



2009.
GODINA
LII



MATERIJALI 1 | KONSTRUKCIJE

MATERIALS AND STRUCTURES

ČASOPIS ZA ISTRAŽIVANJE U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA
JOURNAL FOR RESEARCH OF MATERIALS AND STRUCTURES



MATERIJALI I KONSTRUKCIJE

MATERIALS AND STRUCTURES

ČASOPIS ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA
JOURNAL FOR RESEARCH IN THE FIELD OF MATERIALS AND STRUCTURES

IZDAVAČ:

Društvo za ispitivanje i istraživanje
materijala i konstrukcija Srbije

GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK:

Prof. dr Radomir FOLIĆ, dipl.inž.,
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

REDAKCIONI ODBOR:

Prof. dr Radomir FOLIĆ, dipl.inž.,
glavni i odgovorni urednik
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Doc. dr Mirjana MALEŠEV, dipl.inž.,
zamenik odgovornog urednika,
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Prof. Lazar JOVANOVIĆ, dipl.inž.,
Beograd, Vrnjačka 9

Prof. dr Aleksandar PROKIĆ, dipl.inž.,
Građevinski fakultet, Subotica

Dr Ksenija JANKOVIĆ, dipl.inž.,
Institut IMS, Beograd

Dr Zoran BAČKALIĆ, dipl.inž.tehn.
"Polet", Novi Bečej

Mr Branislav VOJINOVIĆ, dipl.inž.,
Braće Ribnikar br. 15, Beograd

Dr Gordana Topličić-Čurčić, dipl.inž.
Građevinsko-arhitektonski fakultet, Niš

ADRESA REDAKCIJE:

Društvo za ispitivanje i istraživanje
materijala i konstrukcija Srbije
11000 Beograd, Kneza Miloša 9
Telefon: 011/3242-589

RECENZENTI:

Konačnu recenziju izvršio je Redakcioni odbor časopisa
na osnovu recenzentskih izveštaja

TEHNIČKI UREDNIK:

Stoja TODOROVIĆ

NASLOVNA STRANA:

Rusenje i recikliranje stare betonske konstrukcije
Fakultet tehničkih nauka Novi Sad
"ŠUŠA" D.O.O. za građevinarstvo, trgovinu i usluge

TIRAŽ: 200 primeraka

Štampanje ovog broja pomogla je Inženjerska komora
Srbije.

Ovaj časopis primaju članovi Društva za ispitivanje i
istraživanje materijala i konstrukcija Srbije

PUBLISHER:

Society for Materials and Structures Testing
of Serbia

EDITOR AND CHIEF:

Prof. dr Radomir FOLIC, Civ.Eng.,
Faculty of Technical Science, Novi Sad

EDITORIAL BOARD:

Prof. dr Radomir FOLIC, Civ.Eng.,
editor and chief
Faculty of Technical Science, Novi Sad

Dr Mirjana MALESEV, Civ.Eng.,
Faculty of Technical Science, Novi Sad

Prof. Lazar JOVANOVIĆ, Civ.Eng.,
Belgrade, Vrnjačka 9

Prof. dr Aleksandar PROKIC Civ.Eng.,
Faculty of Civil Engineering, Subotica

Dr Ksenija JANKOVIC, Civ.Eng.,
Institute IMS, Belgrade

Dr Zoran BAČKALIĆ, dipl.inž.tehn.
"Polet", Novi Bečej

Mr Branislav VOJINOVIĆ, dipl.inž.,
Braće Ribnikar br. 15, Beograd

Dr Gordana Toplicic-Curcic, Civ.Eng.,
Faculty of Civil Engineering and Architecture, Nis

THE ADDRESS OF THE EDITORIAL-STAFF:

Society for Materials and Structures Testing of Serbia
11000 Belgrade, Kneza Miloša 9
Telephone: 381 11/3242-589

REVIEWERS:

The review of papers done by the Editorial Board on the
reviewer's report

TECHNICAL EDITOR:

Stoja TODOROVIĆ

COVER:

Demolition and recycling of an old concrete structure
Faculty of technical sciences Novi Sad
ŠUŠA Demolition and Recycling

CIRCULATION: 200 examples

This number was published thanks to the financial support
of the Engineering Chamber of Serbia.

This Journal receive all the members of Society for
Materials and Structures Testing of Serbia

DRUŠTVO ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE MATERIJALA I KONSTRUKCIJA SRBIJE
SOCIETY FOR MATERIALS AND STRUCTURES TESTING OF SERBIA

MATERIJALI I KONSTRUKCIJE

MATERIALS AND STRUCTURES

ČASOPIS ZA ISPITIVANJE I ISTRAŽIVANJE U OBLASTI MATERIJALA I KONSTRUKCIJA
JOURNAL FOR RESEARCH IN THE FIELD OF MATERIALS AND STRUCTURES

SADRŽAJ

Snežana MARINKOVIĆ Ivan IGNJATOVIĆ PONAŠANJE ARMIRANOBETONSKIH GREDA OD BETONA NA BAZI RECIKLIRANOG AGREGATA POD KRATKOTRAJNIM OPTEREĆENJEM Pregledni rad	5
Iva DESPOTOVIĆ Zoran GRDIĆ Gordana TOPLIČIĆ-ĆURČIĆ Nenad RISTIĆ PRVIH 20 GODINA SAMOUGRAĐUJUĆEG BETONA Pregledni (stručni) rad	21
Anja TERZIĆ Ljubica PAVLOVIĆ PRIMENA MIKROSKOPSKIH METODA U ANALIZI MIKROSTRUKTURE RAZLIČITIH TIPOVA BETONA SA RECIKLIRANIM AGREGATOM Pregledni rad	34
Ivan IGNJATOVIĆ Snežana MARINKOVIĆ MEHANIČKE KARAKTERISTIKE BETONA NA BAZI RECIKLIRANOG AGREGATA Pregledni rad	40
Dragica JEVTIĆ Dimitrije ZAKIĆ Aleksandar SAVIĆ SPECIFIČNOSTI TEHNOLOGIJE SPRAVLJANJA BETONA NA BAZI RECIKLIRANOG AGREGATA Pregledni rad	52
Radomir FOLIĆ Dragana GLAVARDANOV MEHANIZAMI OŠTEĆENJA, MODELI ODRŽAVA- NJA I SANACIJA BETONSKIH KONSTRUKCIJA POJAČANIH FRP ELEMENTIMA Pregledni rad	63
Miroslava RADEKA KARAKTERIZACIJA MIKROSTRUKTURE TRAN- ZITNE ZONE BETONA NA BAZI AGREGATA OD RECIKLIRANOG BETONA POMOĆU SEM -a Pregledni rad	74
Elefterija ZLATANOVIĆ JET GROUTING Pregledni rad	82

CONTENTS

Snežana MARINKOVIĆ Ivan IGNJATOVIĆ SHORT-TERM BEHAVIOUR OF REINFORCED RECYCLED AGGREGATE CONCRETE BEAMS	5
Iva DESPOTOVIĆ Zoran GRDIĆ Gordana TOPLIČIĆ-ĆURČIĆ Nenad RISTIĆ FIRST 20 YEARS OF SELF COMPACTING CONCRETE	21
Anja TERZIĆ Ljubica PAVLOVIĆ APPLICATION OF MICROSCOPIC METHODS IN THE MICROSTRUCTURAL ANALYSES OF DIFFERENT TYPES OF CONCRETE WITH RECYCLED AGGREGATES	34
Ivan IGNJATOVIĆ Snežana MARINKOVIĆ MECHANICAL PROPERTIES OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE	40
Dragica JEVTIĆ Dimitrije ZAKIĆ Aleksandar SAVIĆ SPECIFIC PROPERTIES OF RECYCLED AGGRE- GATE CONCRETE PRODUCTION TECHNOLOGY	52
Radomir FOLIĆ Dragana GLAVARDANOV DAMAGE MECHANISMS, MAINTENANCE & REPAIR MODELS OF CONCRETE STRUCTURES STRENGTHENED WITH FRP ELEMENTS	63
Miroslava RADEKA THE CHARACTERISATION OF THE MICRO- STRUCTURE OF THE RECYCLED AGGREGATE CONCRETE INTERFICIAL ZONE EMPLOYING SEM	74
Elefterija ZLATANOVIĆ JET GROUTING	82

Vlastimir RADONJANIN
 Mirjana MALEŠEV
 Ivan LUKIĆ
 Vesna MILOVANOVIĆ
 POLIMER-BETONSKI KOMPOZITI NA BAZI
 RECIKLIRANOG AGREGATA
Pregledni rad 91

Bujar EMRA
Milić MILIČEVIĆ
 REŠENJE VREDNOSTI GRANIČNIH PROBLEMA
Prethodno saopštenje 108

Uputstvo autorima 111

Vlastimir RADONJANIN
 Mirjana MALEŠEV
 Ivan LUKIĆ
 Vesna MILOVANOVIĆ
 POLYMER-CONCRETE COMPOSITE WITH
 RECYCLED AGGREGATES 91

Bujar EMRA
Milić MILIČEVIĆ
 SOLUTION OF BOUNDARY VALUE PROBLEMS 108

Preview Report 111

CIP - Katalogizacija u publikaciji Narodna biblioteka Srbije, Beograd 620.1(497.11)
 ISSN 0543-0798 = Materijali i konstrukcije (Beograd) COBISS.SR-ID 6725890
 Štampa: Štamparija "Hektor Print" - Novi Beograd

PONAŠANJE ARMIRANOBETONSKIH GREDA OD BETONA NA BAZI RECIKLIRANOG AGREGATA POD DEJSTVOM KRATKOTRAJNOG OPTEREĆENJA

Snežana MARINKOVIĆ
Ivan IGNJATOVIĆ

PREGLEDNI RAD
UDK: 624.072.2.012.45 = 861

1 UVOD

Nakon Zemaljskog samita u Rio de Ženeiru 1992. godine i promovisanja Agende 21 [1], održivi razvoj (engl. *sustainable development*) i očuvanje životne sredine postali su ključni ciljevi modernog društva. Značajnu ulogu u ostvarivanju ovih ciljeva ima građevinarstvo, s obzirom da najveći deo otpadnog materijala koji se skladišti na deponijama čini građevinski otpad. Otpad predstavlja jedan od najvećih ekoloških problema u zemljama Evropske unije, SAD-a, Japana i drugih visoko industrijalizovanih zemalja sveta. Prema podacima sa početka ove decenije, količina betona koja se odlagala kao građevinski otpad u Evropskoj uniji iznosila je od 200 do 300 miliona tona godišnje [2], što znači da je u poređenju sa podacima s početka 1990-ih [3], količina građevinskog otpada učetvorostručena. S druge strane, godišnja proizvodnja betona, najzastupljenijeg građevinskog materijala, dostigla je vrednost od oko 5 milijardi tona [4], što znači da je i potrošnja prirodnog agregata dostigla rekordni nivo. To otvara pitanje iscrpljivanja prirodnih resursa agregata koji su sve dalje od urbanih sredina gde se najčešće koriste, što istovremeno znači povećanje troškova transporta, ali i veću emisiju štetnih gasova iz transportnih sredstava.

Kao održivo rešenje za probleme građevinskog otpada i iscrpljivanje prirodnih nalazišta agregata, nameću se postupak recikliranja deponovanih građevinskih materijala, u prvom redu betona. Prosečno se krajem 1990-ih u EU recikliralo oko 28% građevinskog otpada, sa veoma velikim disproporcijama između zemalja - od 95% u Holandiji i 90% u Danskoj, do zemalja u kojima takav proces uopšte nije zaživeo [2]. Ipak, i pored visokog

stepena reciklaže u pojedinim zemljama, **agregat od recikliranog betona** (u daljem tekstu skraćeno **ARB**) dominantno se koristi za izradu tampon slojeva i podloga kolovoznih konstrukcija.

Primena ARB kod konstrukcijskih betona ograničena je činjenicom da kvalitet ovog agregata koji potiče od raznorodnih betona nije konstantan te da je moguće prisustvo raznih nečistoća. Ipak, glavna karakteristika ARB je prisustvo sloja cementnog maltera koji obavlja zrna prirodnog agregata i negativno utiče na čitav niz fizičko-mehaničkih osobina betona na bazi ARB. Zaključak većine ispitivanja **betona na bazi agregata od recikliranog betona** (u daljem tekstu skraćeno **BRA**) [3,5] je da se primenom krupne frakcije recikliranog agregata ($d \geq 4$ mm) i zadržavanjem prirodnog peska kao sitne frakcije (0/4 mm), dobijaju betoni koji imaju fizičko-mehaničke karakteristike slične **betonima na bazi prirodnog agregata** (u daljem tekstu skraćeno **BPA**). Čvrstoće na pritisak ovako projektovanih betona su do 25% manje od čvrstoća klasičnih betona [3], a sličan odnos dobijen je i poređenjem modula elastičnosti. Najmanje razlike u mehaničkim karakteristikama dobijene su prilikom ispitivanja čvrstoće na zatezanje, koja je kod betona na bazi agregata od recikliranog betona sa krupnim ARB bila do 10% manja u odnosu na betone sa prirodnim agregatom [6]. Što se tiče ponašanja pod dugotrajnim opterećenjem, zabeležene su deformacije skupljanja nekoliko puta veće i deformacije tečenja do 50% veće kod BRA betona sa krupnim ARB nego kod BPA betona [3]. Sve pobrojane karakteristike BRA betona imaju značajno niže vrednosti od pomenutih ukoliko se koristi i sitna frakcija od recikliranog agregata.

Sa aspekta uštede prirodnih resursa i energije, kao i zaštite prirodne sredine, od ključne je važnosti zaokružiti životni ciklus betonskih konstrukcija i proučiti kako se agregat od recikliranog betona može efikasno koristiti kao komponenta novih konstrukcijskih betona. U cilju ispitivanja ponašanja armiranobetonskih elemenata napravljenih od BRA betona do sada je u svetu sproveden mali broj eksperimenata. Eksperimentalna ispitivanja ponašanja armiranobetonskih greda od BRA betona pri

V. prof. dr Snežana Marinković, dipl.inž.građ.
Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73,
11000 Beograd
Asist.pripr. Ivan Ignjatović, dipl.inž.građ.
Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73,
11000 Beograd

savijanju i smicanju izvršena su u Japanu [7,8,9,10,11], Poljskoj [12], Srbiji [13], Španiji [14,15,16], Koreji [17], Kini [18,19], Italiji [20].

2 PONAŠANJE AB GREDA OD BETONA NA BAZI RECIKLIRANIH AGREGATA PRI SAVIJANJU

U ovom poglavlju su prikazani rezultati i uporedna analiza eksperimentalnih rezultata istraživanja ponašanja ab greda na bazi BRA pri savijanju, i to japanskih [7], poljskih [12] i srpskih istraživača [13]. Pored ova tri, u literaturi se može naći još svega nekoliko sličnih eksperimentalnih ispitivanja [10,11,18], ali nedovoljno dobro opisanih za uporednu analizu rezultata.

2.1 Opis eksperimenata i rezultati

Obimno eksperimentalno ispitivanje greda napravljenih od BRA betona, izloženih kratkotrajnom opterećenju, obavljeno je na Hirošima univerzitetu i objavljeno 2007. godine, Sato i ostali, [7]. Serije uzoraka razlikovale su se prema procentu armiranja greda podužnom armaturom - 0,59%, 1,06% i 1,65%, a parametar koji je variran u okviru jedne serije bio je vrsta betona, tj. količina prirodnog agregata zamenjenog recikliranim - beton od prirodnog agregata, beton sa krupnim recikliranim agregatom, i beton sa kompletnim recikliranim agregatom, dakle i krupni i sitni.

Reciklirani agregat upotrebljen u eksperimentu dobio je drobljenjem betonskih greda, ploča i stubova koji su poticali sa srušenih zgrada starih oko 40 godina, dok je deo recikliranog agregata obezbeđen drobljenjem uzoraka od klasičnog betona prethodno pripremljenog u laboratoriji. Nadalje, ova dva različita porekla recikliranog agregata označena su kao:

– agregat 01: reciklirani agregat dobijen od prethodno pripremljenog laboratorijskog betona ($W/C=0,63$). Betoni u kojima je samo krupna frakcija menjana ovim agregatom, imali su sitnu frakciju od prirodnog rečnog peska. Betoni u kojima je menjana i krupna i sitna frak-

cija, imali su ovaj kompletan reciklirani agregat. I na kraju, odgovarajući betoni sa prirodnim agregatom imali su krupan drobljeni i sitan rečni agregat (pesak),

– agregat 02: reciklirani agregat dobijen od srušenog betona starog oko 40 godina ($W/C=0,55-0,65$). Betoni u kojima je samo krupna frakcija menjana ovim agregatom, imali su sitnu frakciju od prirodnog kopnenog peska. Betoni u kojima je menjana i krupna i sitna frakcija, imali su ovaj kompletan reciklirani agregat. I na kraju, odgovarajući betoni sa prirodnim agregatom imali su krupan drobljeni i sitan kopneni agregat (pesak).

Granica razvlačenja čelika podužne armature bila je 340 MPa.

U tabeli 1 prikazane su karakteristike betona u pojedinim gredama i rezultati eksperimenata. U ovoj tabeli korišćene su sledeće oznake:

– oznaka betona od koga je pravljena greda ima sledeću šemu: procenat zamene prirodnog recikliranim agregatom, gde postoje tri slučaja, KPSP (krupan prirodni i sitan prirodni agregat), KRSP (krupan reciklirani i sitan prirodni agregat) i KRSR (krupan reciklirani i sitan reciklirani agregat). Prvi broj u oznaci označava vodo-cementni faktor W/C (pomnožen sa 100), drugi broj tip agregata (01 ili 02) i treći broj procenat armiranja podužnom armaturom za savijanje. Na primer, KRSP30-02-106 označava beton sa recikliranim krupnim i prirodnim sitnim agregatom, $W/C=0,30$, tip agregata 02 i procenat armiranja podužnom armaturom 1,06%,

– f_{bp} , f_{bz} su čvrstoće betona na pritisak, odnosno zatezanje u starosti u kojoj je vršeno ispitivanje greda,

– M_{cr} je momenat pojave prslina,

– w_{av} je osrednjena širina prslina na delu grede opterećenom samo momentima savijanja na nivou zategnute armature,

– δ_{200} je ugib sredine grede pri opterećenju koje izaziva napon od 200 MPa u armaturi (eksploatacija),

– M_y je momenat savijanja pri opterećenju koje izaziva tečenje armature i

– M_u je momenat loma grede.

Tabela 1. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja [7]

Oznaka	W/C	armatura		starost u tren. oper. (dani)	f_{bp} (MPa)	f_{bz} (MPa)	M_{cr} (kNm)	w_{av} (mm)	δ_{200} (mm)	M_y (kNm)	M_u (kNm)
		pod.	• (%)								
KPSP30-02-106	0.30	2• 13	1.06	99	106.4	6.3	7.2	0.03	1.4	13.2	15.6
KRSP30-02-106	0.30	2• 13	1.06	76	69.0	3.9	4.5	0.05	2.0	12.5	15.3
KRSR30-02-106	0.30	2• 13	1.06	99	53.8	3.7	3.7	0.07	3.4	13.0	15.4
KPSP45-02-106	0.45	2• 13	1.06	60	57	3.0	4.3	0.05	2.6	12.9	15.0
KRSP45-02-106	0.45	2• 13	1.06	88	46.5	3.0	3.5	0.06	2.7	13.2	14.8
KRSR45-02-106	0.45	2• 13	1.06	70	35.5	2.6	2.1	0.09	4.5	12.6	13.7
KPSP60-02-106	0.60	2• 13	1.06	105	40.2	3.5	3.3	0.05	2.9	11.9	15.8
KRSP60-02-106	0.60	2• 13	1.06	41	32.9	2.7	2.7	0.10	4.1	12.8	15.3
KRSR60-02-106	0.60	2• 13	1.06	106	29.4	2.3	2.4	0.10	5.1	12.2	14.1
KPSP60-01-059	0.60	2• 10	0.59	65	30.6	2.9	1.7	0.03	1.8	7.4	8.0
KRSP60-01-059	0.60	2• 10	0.59	142	34.5	2.8	2.7	0.04	1.5	7.7	9.3
KPSP60-01-106	0.60	2• 13	1.06	65	30.6	2.9	3.6	0.07	3.7	13.5	13.7
KRSP60-01-106	0.60	2• 13	1.06	142	34.5	2.8	2.0	0.07	4.0	12.5	14.1
KRSR60-01-106	0.60	2• 13	1.06	87	23.5	2.3	1.5	0.09	5.1	12.4	14.1
KPSP60-01-165	0.60	2• 16	1.65	65	30.6	2.9	3.4	0.10	4.7	18.9	19.4
KRSP60-01-165	0.60	2• 16	1.65	142	34.5	2.8	1.3	0.09	4.9	18.8	19.9

Eksperiment savijanja greda obavljen je na gredama slobodno oslonjenim na krajevima, dimenzija poprečnog preseka $b/d=15/20$ cm i dužine 2,8 m, koje su bile opterećene simetrično sa dve koncentrisane sile, tako da je sredina greda u dužini od 80 cm bila izložena konstantnom momentu savijanja.

Drugo analizirano ispitivanje je eksperimentalno ispitivanje poljskih istraživača Ajdukiewicz i Kliszczewicz [12], izvršeno sa ciljem da se utvrdi razlika u ponašanju greda od BPA i BRA betona. Serije elemenata za ispitivanje napravljene su od tri vrste recikliranog agregata, označenih na sledeći način:

- agregat 03: reciklirani agregat dobijen od prefabrikovanog betona starog nekoliko godina ($W/C=0,6-0,7$ rečni šljunak i pesak),

- agregat 04: reciklirani agregat dobijen od prefabrikovanog betona starog nekoliko godina ($W/C=0,49$, drobljeni granit i pesak),

- agregat 05: reciklirani agregat dobijen od prefabrikovanog betona starog nekoliko godina ($W/C=0,49$, drobljeni bazalt i pesak).

Od agregata 03 napravljene su 4 serije, dve od betona niske čvrstoće ($W/C=0,49$) i dve od betona srednje čvrstoće ($W/C=0,36$). U okviru iste čvrstoće variran je procenat armiranja podužnom armaturom (procenti armiranja 0,87% i 1,55%), tako da je jedna serija definisana vrstom recikliranog, odnosno prirodnog agregata, čvrstoćom betona i procentom armiranja. U svakoj ovako definisanoj seriji, ispitivane su tri vrste uzoraka: beton od prirodnog agregata, beton u kome je krupan agregat zamenjen recikliranim i beton u kome je i krupan i sitan agregat zamenjen recikliranim.

Od agregata 04 i 05 napravljeno je po 6 serija, po dve od betona niske čvrstoće ($W/C=0,49$), po dve od betona srednje čvrstoće ($W/C=0,36$) i po dve od betona visoke čvrstoće ($W/C=0,28$, sa dodatkom silikatne prašine). U okviru iste čvrstoće variran je procenat armiranja podužnom armaturom (procenti armiranja 0,87% i 1,55%), tako da je jedna serija definisana vrstom recikliranog, odnosno prirodnog agregata, čvrstoćom betona i procentom armiranja. U svakoj ovako definisanoj seriji, ispitivane su tri vrste uzoraka: beton od prirodnog agregata, beton u kome je krupan agregat zamenjen recikliranim i beton u kome je i krupan i sitan agregat zamenjen recikliranim. Na primer, u seriji u kojoj je korišćen agregat 03, tri su vrste betona ispitivane kada je o agregatu reč: beton sa prirodnom krupnom i sitnom frakcijom agregata (rečni šljunak i pesak), beton sa recikliranom krupnom frakcijom agregata (krupna frakcija dobijena recikliranjem prefabrikovanog betona starog nekoliko godina, od rečnog šljunka i peska) i beton sa recikliranom krupnom i sitnom frakcijom agregata (obe frakcije dobijene recikliranjem prefabrikovanog betona starog nekoliko godina, od rečnog šljunka i peska). Važno je napomenuti da su sve karakteristike starih betona upotrebljenih za recikliranje bile poznate.

Granica razvlačenja čelika podužne armature bila je 410 MPa.

U radu će biti analizirani samo rezultati serija koje su imale slične čvrstoće na pritisak betona onim u radu japanskih istraživača [7], dakle BPA i BRA betona niske i srednje čvrstoće.

Dispozicija eksperimenta je bila ista kao u prethodno pomenutom eksperimentu, sa nešto drugačijim dimenzi-

jama elemenata - dužina 2,6m, poprečni presek greda $b/d=20/30$ cm.

U tabeli 2 prikazane su karakteristike betona u pojedinim gredama i rezultati eksperimenata. U ovoj tabeli korišćene su sledeće oznake:

- oznaka betona od koga je pravi greda ima sledeću šemu: procenat zamene prirodnog recikliranim agregatom, gde postoje tri slučaja, KPSP (krupan prirodni i sitan prirodni agregat), KRSP (krupan reciklirani i sitan prirodni agregat) i KRSR (krupan reciklirani i sitan reciklirani agregat). Prvi broj u oznaci označava W/C (pomnožen sa 100), drugi broj tip agregata (03, 04 ili 05) i treći broj procenat armiranja podužnom armaturom za savijanje. Na primer, KRSP49-03-087 označava beton sa recikliranim krupnim i prirodnim sitnim agregatom, $W/C=0,49$, tip agregata 03 i procenat armiranja podužnom armaturom 0,87%,

- f_{bpm} , f_{bzm} su čvrstoće betona na pritisak, odnosno zatezanje u starosti od 28 dana,

- E_{bm} je moduo elastičnosti betona u starosti od 28 dana,

- $2F_{cr}$ je opterećenje pri pojavi prslina,

- $\delta_{70(110)}$ je ugib sredine grede pri opterećenju koje odgovara eksploatacionom (sila od 70 kN za grede sa procentom armiranja 0,87%, odnosno 110 kN za grede sa procentom armiranja 1,55%),

- $W_{70(110)}$ je sabrana širina svih prslina sa obe strane greda na nivou zategnute armature pri opterećenju koje odgovara eksploatacionom (sila od 70 kN za grede sa procentom armiranja 0,87%, odnosno 110 kN za grede sa procentom armiranja 1,55%),

- $2F_y$ je opterećenje koje izaziva tečenje armature i

- $2F_u$ je opterećenje koje izaziva lom grede.

Treće analizirano ispitivanje je eksperimentalno ispitivanje izvršeno u Srbiji, autora Malešev i Radonjanin, [13]. Ispitana je jedna serija od tri armiranobetonske grede koje su se međusobno razlikovale samo po vrsti betona, odnosno po procentu zamene prirodnog recikliranim agregatom. Korišćeni betoni bili su: beton na bazi prirodnog agregata, beton sa 50% recikliranog krupnog agregata i beton sa 100% recikliranog krupnog agregata. Reciklirani agregat je dobijen drobljenjem laboratorijskih probnih kocki (MB30) i jednog prefabrikovanog ab stuba (MB40) i ovaj agregat će nadalje biti označen kao agregat 06. Za podužnu armaturu korišćen je čelik RA 400/500, a za uzengije čelik GA 240/360.

U tabeli 3 prikazane su karakteristike betona u pojedinim gredama i rezultati eksperimenta. U ovoj tabeli korišćene su sledeće oznake:

- oznaka betona od koga je pravi greda ima sledeću šemu: procenat zamene krupnog prirodnog krupnim recikliranim agregatom, gde postoje tri slučaja, KP (100% krupan prirodni agregat), KR50 (50% prirodnog krupnog agregata zamenjeno recikliranim) i KR100 (100% prirodnog krupnog agregata zamenjeno recikliranim). Zatim oznaka vrste sitnog agregata, ovde u svim slučajevima prirodan sitni agregat, označen kao SP. Prvi broj u oznaci označava vodocementni faktor W/C (pomnožen sa 100), sledeći broj u oznaci označava tip agregata, ovde 06 i poslednji broj označava procenat armiranja podužnom armaturom. Na primer, KR50SP51-06-103 označava beton sa 50% recikliranog krupnog agregata i sa sitnim prirodnim agregatom, $W/C=0,51$, tip

Tabela 2. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja [12]

Oznaka	W/C	armatura		f_{bpm} (MPa)	f_{bzm} (MPa)	E_{bm} (GPa)	$2F_{cr}$ (kN)	$\delta_{70/110}$ (mm)	$W_{70/110}$ (mm)	$2F_y$ (kN)	$2F_u$ (kN)
		pod.	μ (%)								
KPSP49-03-087	0.49	4 ϕ 12	0.87	37.7	2.9	31.9	40	3.21	0.85	129	129
KRSP49-03-087	0.49	4 ϕ 12	0.87	34.6	2.6	25.9	40	3.63	1.15	128	128
KRSR49-03-087	0.49	4 ϕ 12	0.87	29.2	2.5	21.0	30	4.20	1.40	121	121
KPSP36-03-087	0.36	4 ϕ 12	0.87	57.9	3.5	35.6	40	3.37	0.80	160	160
KRSP36-03-087	0.36	4 ϕ 12	0.87	56.4	3.3	31.8	30	3.93	1.20	156	156
KRSR36-03-087	0.36	4 ϕ 12	0.87	55.5	2.9	26.2	20	4.37	1.33	155	155
KPSP49-04-087	0.49	4 ϕ 12	0.87	39.8	3.2	27.3	30	3.61	0.66	156	156
KRSP49-04-087	0.49	4 ϕ 12	0.87	40.1	2.9	24.3	30	3.57	0.81	163	163
KRSR49-04-087	0.49	4 ϕ 12	0.87	36.2	2.6	22.6	30	3.65	0.73	162	162
KPSP36-04-087	0.36	4 ϕ 12	0.87	58.3	4.4	32.5	40	2.40	0.55	140	140
KRSP36-04-087	0.36	4 ϕ 12	0.87	60.2	4.3	28.5	40	2.94	0.62	136	136
KRSR36-04-087	0.36	4 ϕ 12	0.87	54.2	3.9	26.1	30	3.48	0.85	133	133
KPSP49-05-087	0.49	4 ϕ 12	0.87	40.1	3.4	36.2	40	3.84	0.51	151	151
KRSP49-05-087	0.49	4 ϕ 12	0.87	35.3	3.0	31.7	40	3.90	0.79	150	150
KRSR49-05-087	0.49	4 ϕ 12	0.87	31.0	2.8	26.0	30	4.61	1.06	157	157
KPSP36-05-087	0.36	4 ϕ 12	0.87	61.8	4.5	41.9	40	2.58	0.49	146	146
KRSP36-05-087	0.36	4 ϕ 12	0.87	57.6	3.7	35.9	40	2.74	0.65	143	143
KRSR36-05-087	0.36	4 ϕ 12	0.87	55.5	3.4	31.3	30	3.46	0.88	141	141
KPSP49-03-155	0.49	4 ϕ 16	1.55	38.2	3.4	37.3	40	4.40	0.86	214	227
KRSP49-03-155	0.49	4 ϕ 16	1.55	36.6	2.9	28.1	30	4.91	0.79	214	236
KRSR49-03-155	0.49	4 ϕ 16	1.55	30.5	2.5	21.5	20	5.52	1.55	210	226
KPSP36-03-155	0.36	4 ϕ 16	1.55	59.1	3.6	37.4	30	4.06	0.81	214	234
KRSP36-03-155	0.36	4 ϕ 16	1.55	58.3	3.2	31.8	40	4.37	1.26	214	237
KRSR36-03-155	0.36	4 ϕ 16	1.55	57.5	3.0	28.0	20	4.72	1.34	214	248
KPSP49-04-155	0.49	4 ϕ 16	1.55	38.7	3.1	28.5	40	4.23	0.93	210	217*
KRSP49-04-155	0.49	4 ϕ 16	1.55	39.3	3.0	25.5	30	4.59	1.11	200	233
KRSR49-04-155	0.49	4 ϕ 16	1.55	35.8	2.7	22.1	20	4.79	1.61	210	226
KPSP36-04-155	0.36	4 ϕ 16	1.55	63.7	4.4	31.8	40	3.89	1.25	215	238
KRSP36-04-155	0.36	4 ϕ 16	1.55	59.6	4.1	30.1	30	4.59	1.33	218	237
KRSR36-04-155	0.36	4 ϕ 16	1.55	59.2	3.8	26.4	30	4.64	1.38	210	251
KPSP49-05-155	0.49	4 ϕ 16	1.55	39.6	3.5	37.4	50	3.96	0.75	213	231
KRSP49-05-155	0.49	4 ϕ 16	1.55	35.8	3.2	33.4	45	4.13	0.85	214	241
KRSR49-05-155	0.49	4 ϕ 16	1.55	31.4	3.0	27.5	30	4.69	0.96	213	220
KPSP36-05-155	0.36	4 ϕ 16	1.55	60.8	4.1	41.5	50	3.59	0.51	210	238
KRSP36-05-155	0.36	4 ϕ 16	1.55	59.6	3.6	35.7	60	3.90	0.69	212	238
KRSR36-05-155	0.36	4 ϕ 16	1.55	57.6	3.3	30.8	50	4.13	0.93	217	236

Tabela 3. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja [13]

Oznaka	W/C	armatura		f_{bpm} (MPa)	f_{bzm} (MPa)	F_{cr} (kN)	δ_{200} (mm)	W_{200} (mm)	F_u (kN)
		pod.	μ (%)						
KPSP51-06-103	0,51	3 ϕ 12	1,03	43,4	2,66	20	2,68	0,1	50
KR50SP51-06-103	0,51	3 ϕ 12	1,03	45,2	3,20	20	2,78	0,1	50
KR100SP51-06-103	0,51	3 ϕ 12	1,03	45,7	2,78	20	2,94	0,1	50

agregata 06 i procenat armiranja podužnom armaturom 1,03%,

– f_{bpm} , f_{bzm} su čvrstoće betona na pritisak, odnosno zatezanje u starosti od 28 dana,

– F_{cr} je sila pri pojavi prslina,

– δ_{200} je ugib sredine grede pri opterećenju koje izaziva napon od 200 MPa u armaturi (eksploatacija),

– w_{200} je maksimalna širina prslina na nivou zategnute armature pri istom opterećenju,

– F_u je opterećenje koje izaziva lom grede.

Dispozicija ispitivanja se razlikovala od prethodno opisana dva ispitivanja. Naime, eksperiment je obavljen na gredama slobodno oslonjenim na krajevima, dimenzija poprečnog preseka $b/d=15/25$ cm i dužine 3,0m, ali su grede bile opterećene sa jednom koncentrisanom silom u sredini raspona.

2.2 Uporedna analiza eksperimentalnih rezultata

U ovom poglavlju su analizirani rezultati navedenih eksperimentalnih ispitivanja ponašanja armiranobetonskih greda od betona na bazi recikliranog agregata, u fazi eksploatacije i fazi loma. Analiza je izvršena pre svega u smislu poređenja ponašanja greda od betona na bazi recikliranih agregata i greda od betona na bazi prirodnog agregata.

U analiziranim ispitivanjima, betoni na bazi recikliranih agregata pravljani su sa istim efektivnim vodocementnim faktorom kao i odgovarajući betoni na bazi prirodnih agregata, odnosno veoma slične recepture. Zbog toga, dobijene čvrstoće pri pritisku BRA i odgovarajućih BPA nisu bile iste. U poljskom ispitivanju [12], srednja vrednost odnosa čvrstoće pri pritisku betona sa recikliranim krupnim agregatom BRA (KRSP) i čvrstoće pri pritisku odgovarajućeg betona na bazi prirodnog agregata BPA (KPSP) iznosi 0,96. Srednja vrednost odnosa čvrstoće pri pritisku betona sa recikliranim krupnim i sitnim agregatom BRA (KRSR) i čvrstoće pri pritisku odgovarajućeg BPA (KPSP) iznosi 0,88. Do ovog podatka se u japanskom ispitivanju [7] ne može doći, pošto su publikovane samo čvrstoće betona pri pritisku u starosti koja odgovara trenutku opterećivanja, a ne nakon 28 dana. Kako je starost betona u trenutku opterećivanja bila različita za različite uzorke greda, nemoguće je uporediti čvrstoće recikliranih i prirodnih betona. U srpskom ispitivanju [13], srednja vrednost odnosa čvrstoće pri pritisku betona sa recikliranim krupnim agregatom BRA (KR100SP) i čvrstoće pri pritisku odgovarajućeg BPA (KPSP) iznosila je 1,05.

2.2.1 Faza eksploatacije

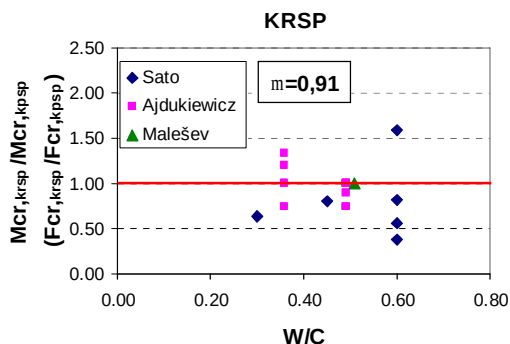
Od veličina koje karakterišu ponašanje armiranobetonskih elemenata u eksploataciji, u ispitivanjima su praćene sledeće: opterećenje koje izaziva pojavu prslina, razmak i širina prslina i veličina ugiba.

Na slici 1 prikazan je odnos momenta savijanja [7], odnosno sile [12] i [13], pri pojavi prslina greda od betona sa recikliranim krupnim agregatom (KRSP) i momenta savijanja [7], odnosno sile [12] i [13], pri pojavi prslina odgovarajućih greda od betona na bazi prirodnog agregata (KPSP), sa istim procentom armiranja podužnom armaturom, u funkciji vodocementnog faktora, odnosno čvrstoće betona pri pritisku. Kao što se iz tabela 1 i 2 može videti, tri najčešće korišćena vodocementna faktora bili su 0,6 (čvrstoće pri pritisku oko 30 MPa), 0,49 (čvrstoće pri pritisku oko 40 MPa) i 0,36 (čvrstoće pri pritisku oko 60 MPa).

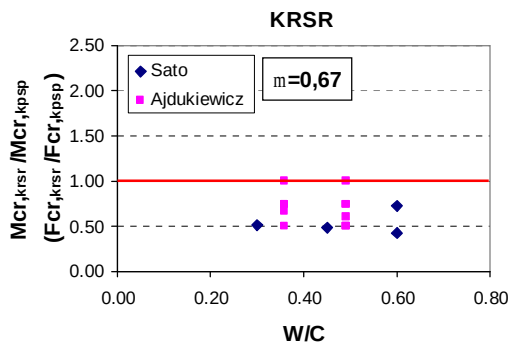
Srednja vrednost ovog odnosa za sve ispitivane uzorke iznosi 0,91, odnosno momenat (sila) pojave prslina kod greda od betona sa recikliranim krupnim agregatom (KRSP) je u proseku 9% manji od momenta (sile) pojave prslina odgovarajućih greda od BPA (KPSP).

Na slici 2 prikazan je odnos momenta savijanja [7], odnosno sile [12] pri pojavi prslina greda od betona sa recikliranim krupnim i sitnim agregatom (KRSR) i momenta savijanja [7], odnosno sile [12] pri pojavi prslina odgovarajućih greda od betona na bazi prirodnog agregata (KPSP), sa istim procentom armiranja podužnom armaturom, u funkciji vodocementnog faktora. U

ovom slučaju, srednja vrednost ovog odnosa za sve ispitivane uzorke je nepovoljnija i iznosi 0,67, odnosno momenat (sila) pojave prslina kod greda od betona sa recikliranim krupnim agregatom i sitnim (KRSR) je u proseku 33% manji od momenta (sile) pojave prslina odgovarajućih greda od BPA (KPSP).



Slika 1. Odnos momenta (sile) pri pojavi prslina greda od BRA (krupan agregat recikliran) i od BPA

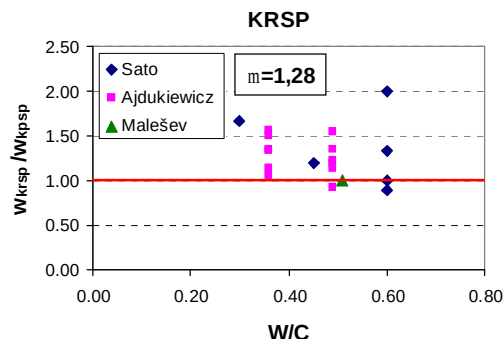


Slika 2. Odnos momenta (sile) pri pojavi prslina greda od BRA (krupan i sitan agregat recikliran) i od BPA

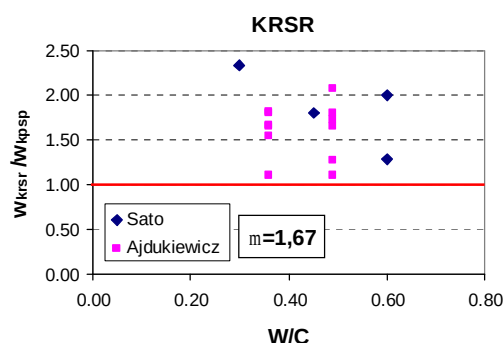
Za nivo eksploatacionog opterećenja, merene širine prslina gotovo uvek su veće kod greda od betona na bazi recikliranih agregata nego kod greda od odgovarajućeg BPA betona. Na slici 3 prikazan je odnos prosečne merene širine prslina [7] i [13], odnosno merene sabrane širine svih prslina sa obe strane grede [12], greda od betona sa recikliranim krupnim agregatom (KRSP) i istih tih veličina kod odgovarajućih greda od betona na bazi prirodnog agregata (KPSP), sa istim procentom armiranja podužnom armaturom, u funkciji vodocementnog faktora. Srednja vrednost ovog odnosa za sve ispitivane uzorke iznosi 1,28, odnosno osrednjena širina prslina kod greda od betona sa recikliranim krupnim agregatom je u proseku 28% veća od osrednjene širine prslina kod odgovarajućih greda od BPA (KPSP).

Situacija je još nepovoljnija za grede od betona sa recikliranim i krupnim i sitnim agregatom. Na slici 4 prikazan je odnos prosečne merene širine prslina [7], odnosno merene sabrane širine svih prslina sa obe strane grede [12], greda od betona sa recikliranim krupnim i sitnim agregatom (KRSR) i istih tih veličina kod odgovarajućih greda od betona na bazi prirodnog agregata (KPSP), sa istim procentom armiranja podužnom armaturom, u funkciji vodocementnog faktora.

Srednja vrednost ovog odnosa za sve ispitivane uzorke greda iznosi 1,67, odnosno osrednjena širina prslina kod greda od betona sa recikliranim krupnim i sitnim agregatom je u proseku 67% veća od osrednjene širine prslina kod odgovarajućih greda od BPA (KPSP).



Slika 3. Odnos merenih širina prslina greda od BRA (krupan agregat recikliran) i od BPA



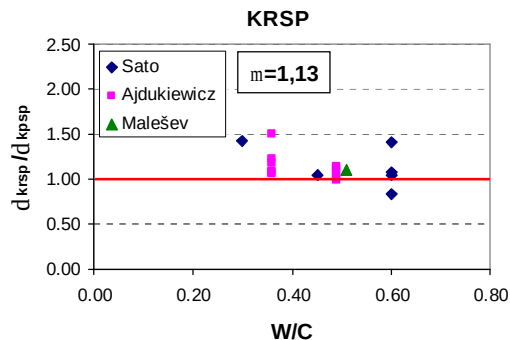
Slika 4. Odnos merenih širina prslina greda od BRA (krupan i sitan agregat recikliran) i od BPA

Inače, sama slika prslina (u smislu mesta formiranja prslina i njihovog razmaka) kod greda od betona na bazi recikliranog agregata, prema ovim ispitivanjima, se ne razlikuje značajno od slike prslina kod greda od betona na bazi prirodnog agregata. Najveća razlika je, kako je već navedeno, u širinama prslina.

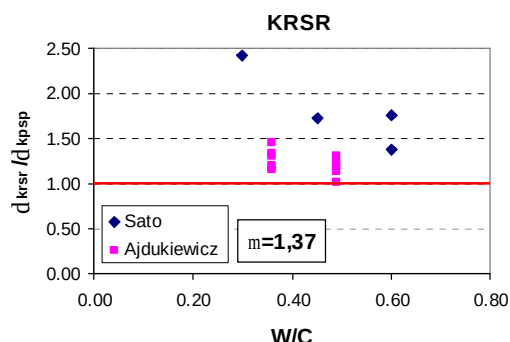
Mereni ugibi greda pod uticajem kratkotrajnog eksploatacionog opterećenja su takođe, gotovo bez izuzetka, veći kod greda od BRA. Na slici 5 prikazan je odnos merenog ugiba u sredini greda od betona sa recikliranim krupnim agregatom (KRSP) i merenog ugiba u sredini odgovarajućih greda od betona na bazi prirodnog agregata (KPSP) sa istim procentom armiranja podužnom armaturom, u funkciji vodocementnog faktora. Srednja vrednost ovog odnosa za sve ispitivane uzorke iznosi 1,13, odnosno ugib greda od betona sa recikliranim krupnim agregatom je u proseku 13% veći od ugiba odgovarajućih greda od BPA (KPSP).

Kao i kod prethodno analiziranih parametara, situacija je nepovoljnija za grede od betona sa recikliranim i krupnim i sitnim agregatom. Na slici 6 prikazan je odnos merenog ugiba u sredini greda od betona sa recikliranim krupnim i sitnim agregatom (KRSR) i merenog ugiba u sredini odgovarajućih greda od betona na bazi prirodnog agregata (KPSP), sa istim procentom armiranja podužnom armaturom, u funkciji vodocementnog faktora. Srednja vrednost ovog odnosa za sve ispitivane uzorke iznosi 1,37, odnosno ugib greda od betona sa recikliranim

krupnim i sitnim agregatom je u proseku 37% veći od ugiba odgovarajućih greda od BPA (KPSP).



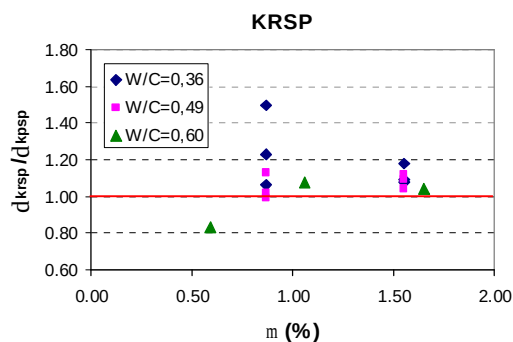
Slika 5. Odnos merenih ugiba greda od BRA (krupan agregat recikliran) i od BPA



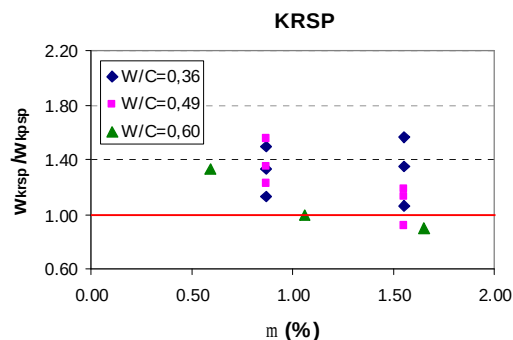
Slika 6. Odnos merenih ugiba greda od BRA (krupan i sitan agregat recikliran) i od BPA

Kod greda od betona sa recikliranim krupnim agregatom, jasno je uočljiv trend povećanja razlika u odnosu na ponašanje odgovarajućih greda od betona sa prirodnim agregatom, sa povećanjem kvaliteta betona, odnosno čvrstoće betona pri pritisku. Na slici 7 prikazan je odnos merenih ugiba greda od BRA betona (KRSP) i merenih ugiba odgovarajućih greda od BPA betona (KPSP) u zavisnosti od procenta armiranja podužnom armaturom, a za različite kvalitete betona, odnosno vodocementne faktore. Na slici 8 prikazan je odnos merenih širina prslina greda od BRA betona (KRSR) i merenih širina prslina odgovarajućih greda od BPA betona (KPSP) u zavisnosti od procenta armiranja podužnom armaturom, a za različite kvalitete betona, odnosno vodocementne faktore. Kod betona najmanjeg kvaliteta (vodocementni faktor 0,6, čvrstoće oko 30 MPa), najmanja su odstupanja merenih ugiba i širina prslina, dok kod betona najveće čvrstoće pri pritisku (vodocementni faktor 0,36, čvrstoće pri pritisku oko 60 MPa), ova odstupanja su najveća.

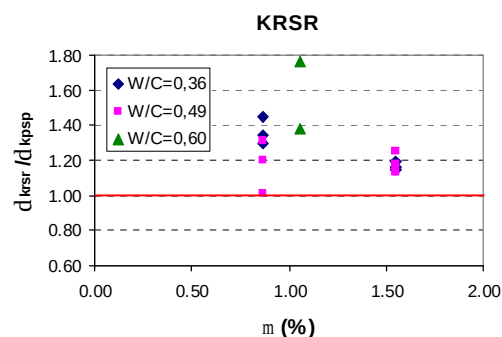
Kod greda od betona sa recikliranim i krupnim i sitnim agregatom, ovaj trend se ne može uočiti. Naime, odstupanja u odnosu na ponašanje odgovarajućih greda od BPA betona slična su za sve ispitivane kvalitete betona. Na slikama 9 i 10 prikazan je odnos merenih ugiba, odnosno merenih širina prslina greda od BRA betona (KRSR) i merenih ugiba, odnosno merenih širina prslina odgovarajućih greda od BPA betona (KPSP), u zavisnosti od procenta armiranja podužnom armaturom, a za različite kvalitete betona, odnosno vodocementne faktore.



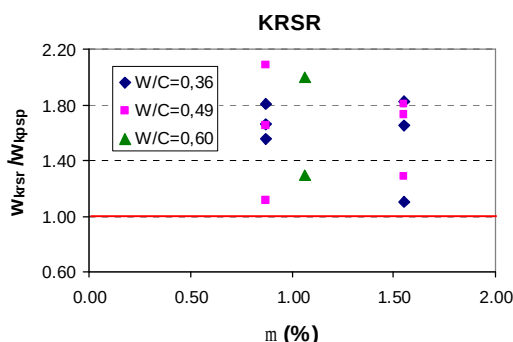
Slika 7. Odnos merenih ugiba greda od BRA (krupan agregat recikliran) i od BPA u funkciji čvrstoće pri pritisku



Slika 8. Odnos merenih širina prslina greda od BRA (krupan agregat recikliran) i od BPA u funkciji čvrstoće pri pritisku



Slika 9. Odnos merenih ugiba greda od BRA (krupan i sitan agregat recikliran) i od BPA u funkciji čvrstoće pri pritisku

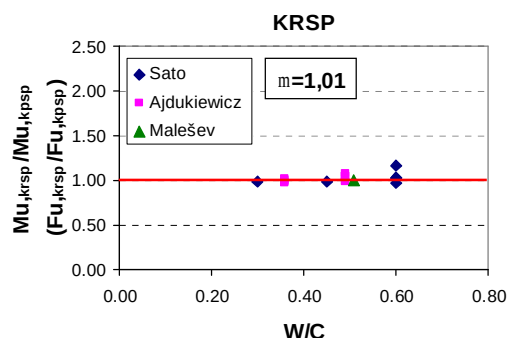


Slika 10. Odnos merenih širina prslina greda od BRA (krupan i sitan agregat recikliran) i od BPA u funkciji čvrstoće pri pritisku

2.2.2 Faza loma

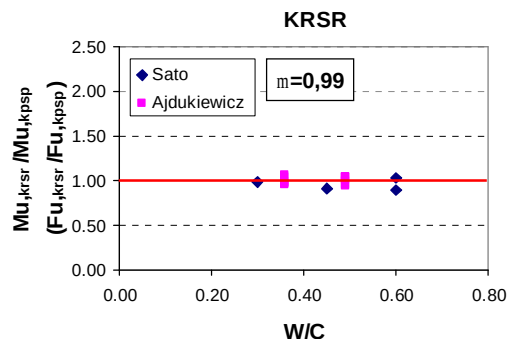
Granična nosivost greda od betona na bazi recikliranog agregata praktično se ne razlikuje od granične nosivosti odgovarajućih greda od betona na bazi prirodnog agregata.

Na slici 11 prikazan je odnos merene vrednosti momenta loma [7], odnosno merene vrednosti sile loma [12] i [13], greda od betona sa recikliranim krupnim agregatom (KRSP) i istih tih veličina kod odgovarajućih greda od betona na bazi prirodnog agregata (KPSP) sa istim procentom armiranja podužnom armaturom, u funkciji vodocementnog faktora. Srednja vrednost ovog odnosa za sve ispitivane uzorke iznosi 1,01, odnosno momenat (sila) loma kod greda od betona sa recikliranim krupnim agregatom je u proseku 1,0% veća od momenta (sile) loma odgovarajućih greda od BPA.



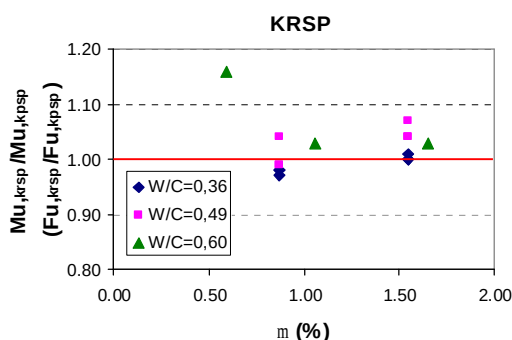
Slika 11. Odnos merenog momenta (sile) loma greda od BRA (krupan agregat recikliran) i od BPA

Granična nosivost greda od betona sa krupnim i sitnim recikliranim agregatom pokazuje sličan trend. Na slici 12 prikazan je odnos merene vrednosti momenta loma [7], odnosno merene vrednosti sile loma [12], greda od betona sa recikliranim krupnim i sitnim agregatom (KRSR) i istih tih veličina kod odgovarajućih greda od betona na bazi prirodnog agregata (KPSP), sa istim procentom armiranja podužnom armaturom, u funkciji vodocementnog faktora. Srednja vrednost ovog odnosa za sve ispitivane uzorke iznosi 0,99, odnosno momenat (sila) loma kod greda od betona sa recikliranim krupnim i sitnim agregatom je u proseku 1,0% manja od momenta (sile) loma odgovarajućih greda od BPA.



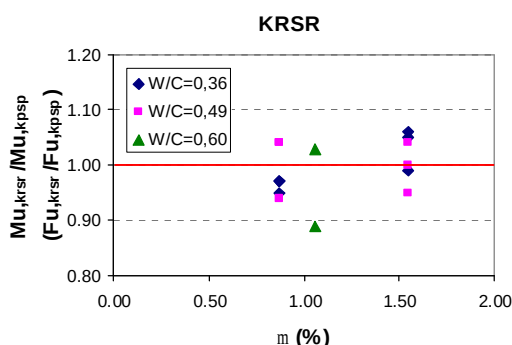
Slika 12. Odnos merenog momenta (sile) loma greda od BRA (krupan i sitan agregat recikliran) i od BPA

Na slici 13 prikazan je odnos merenih momenata (sila) loma greda od BRA betona (KRSP) i merenih momenata (sila) loma odgovarajućih greda od BPA betona (KPSP) u zavisnosti od procenta armiranja podužnom armaturom, a za različite kvalitete betona, odnosno vodocementne faktore. Odstupanja u odnosu na momente (sile) loma greda od betona sa prirodnim agregatom su u proseku istog reda veličine (nekoliko procenata) nezavisno od kvaliteta betona, ali su rezultati za betone sa najmanjom čvrstoćom u gornjem delu dijagrama, a rezultati za betone sa najvećom čvrstoćom u donjem delu dijagrama. Odnosno, i u ovom slučaju, grede od BRA sa manjim čvrstoćama pri pritisku se bolje ponašaju od greda od BRA sa većim čvrstoćama pri pritisku, u odnosu na odgovarajuće grede od BPA.



Slika 13. Odnos merenog momenta (sile) loma greda od BRA (krupan agregat recikliran) i od BPA u funkciji čvrstoće pri pritisku

Kod greda od betona sa recikliranim krupnim i sitnim agregatom, slično kao za ugibe i prsline, ne može se uočiti zavisnost veličine odstupanja momenata (sila) loma u odnosu na momente (sile) loma odgovarajućih greda od betona sa prirodnim agregatom, od čvrstoće betona pri pritisku. Na slici 14 prikazan je odnos merenih momenata (sila) loma greda od BRA betona (KRSP) i merenih momenata (sila) loma odgovarajućih greda od BPA betona (KPSP) u zavisnosti od procenta armiranja podužnom armaturom, a za različite kvalitete betona, odnosno vodocementne faktore.



Slika 14. Odnos merenog momenta (sile) loma greda od BRA (krupan i sitan agregat recikliran) i od BPA u funkciji čvrstoće pri pritisku

3 PONAŠANJE AB GREDA OD BETONA NA BAZI RECIKLIRANIH AGREGATA PRI SMICANJU

U ovom poglavlju prikazani su rezultati i uporedna analiza eksperimentalnih ispitivanja [14], [15] i [17]. Ova ispitivanja su imala za cilj utvrđivanje ponašanja armiranobetonskih greda od betona na bazi recikliranih agregata pri smicanju, a izabrana su jer su dovoljno dobro opisana za uporednu analizu rezultata.

3.1 Opis eksperimenata i rezultati

Eksperimentalno ispitivanje ab greda napravljenih od betona na bazi recikliranih agregata [14] obavljeno je na univerzitetu u Barseloni u sklopu doktorske disertacije i objavljeno 2007. godine. Cilj eksperimenta je bio da se analizira kako različito procentualno učešće krupnog recikliranog agregata, u betonima istih čvrstoća na pritisak (oko 40 MPa), utiče na ponašanje greda pri smicanju i izvršiti poređenje sa ponašanjem greda od betona na bazi prirodnog agregata.

Reciklirani agregat upotrebljen u eksperimentu dobijen je drobljenjem betona sa deponije, nepoznatog kvaliteta. Formirane su četiri serije greda sa različitim procentom poprečne armature - bez uzengija, sa minimalnim uzengijama prema španskim propisima (u ovom slučaju, UØ6/17), sa manjim razmakom uzengija nego što je definisano minimalnim procentom armiranja (UØ6/13) i sa većim razmakom uzengija nego što je definisano minimalnim procentom armiranja (UØ6/24). Svaku od serija činile su grede sa različitim sadržajem krupnog recikliranog agregata - sa potpuno prirodnim agregatom, sa 25%, 50% i 100% krupnog recikliranog agregata, dok je kod svih betona za sitnu frakciju korišćen prirodni rečni pesak. Količina i vrsta podužne armature u svim gredama bila je ista (2,92%), u meri potrebnoj da obezbedi da do loma grede dođe pri smicanju. Primenjena je armatura B-500S, sa granicom razvlačenja od $f_{yk}=500$ MPa.

U tabeli 4 prikazane su karakteristike betona u pojedinim gredama i rezultati eksperimenata. U ovoj tabeli korišćene su sledeće oznake:

- oznaka betona od koga je pravljen greda ima sledeću šemu: procenat zamene krupnog prirodnog krupnim recikliranim agregatom, gde postoje četiri slučaja, KP (100% krupan prirodni agregat), KR25 (25% prirodnog krupnog agregata zamenjeno recikliranim), KR50 (50% prirodnog krupnog agregata zamenjeno recikliranim) i KR100 (100% prirodnog krupnog agregata zamenjeno recikliranim). Prvi broj u oznaci označava tip agregata, ovde 01 (agregat sa deponije), a zatim oznaka vrste sitnog agregata, ovde u svim slučajevima prirodan sitni agregat, označen kao SP. Sledeći broj u oznaci označava vodocementni faktor W/C (pomnožen sa 100), i poslednji broj procenat armiranja uzengijama. Na primer, KR25-1-SP-55-217 označava beton sa 25% recikliranog krupnog agregata tipa 01, sa sitnim prirodnim agregatom, $W/C=0,55$, i procenat armiranja uzengijama 0,217%,

- f_{bpm} , f_{bzm} su čvrstoće betona na pritisak, odnosno zatezanje u starosti od 28 dana,

- b , h su širina odnosno statička visina greda,

- a/h je odnos smičućeg raspona i statičke visine greda,

Tabela 4. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja [14]

Oznaka	W/C	f_{bpm} (MPa)	f_{bzm} (MPa)	b (mm)	h(mm)	a/h	ρ_u (%)	ρ (%)	V_u (kN)	V_{cr} (kN) približno	V_y (kN)
KP-1-SP-55-000	0,55	41,91	2,64	200,00	309,00	3,32	0,000	2,92	100,50	96,00	
KR25-1-SP-55-000	0,55	42,38	3,13	200,00	309,00	3,32	0,000	2,92	104,00	85,00	
KR50-1-SP-52-000	0,52	41,34	3,22	210,00	309,00	3,32	0,000	2,92	89,00	82,00	
KR100-1-SP-50-000	0,50	39,75	3,28	200,00	309,00	3,32	0,000	2,92	84,00	80,00	
KP-1-SP-55-217	0,55	41,91	2,64	200,00	304,00	3,32	0,217	2,97	213,00	108,00	/
KR25-1-SP-55-217	0,55	42,38	3,13	200,00	304,00	3,32	0,217	2,97	186,50	86,00	146,00
KR50-1-SP-52-217	0,52	41,34	3,22	210,00	304,00	3,32	0,217	2,97	220,00	92,50	176,00
KR100-1-SP-50-217	0,50	39,75	3,28	200,00	304,00	3,32	0,217	2,97	189,50	86,00	165,00
KP-1-SP-55-166	0,55	41,91	2,64	200,00	304,00	3,32	0,166	2,97	177,00	98,00	157,50
KR25-1-SP-55-166	0,55	42,38	3,13	200,00	304,00	3,32	0,166	2,97	169,00	100,50	140,50
KR50-1-SP-52-166	0,52	41,34	3,22	210,00	304,00	3,32	0,166	2,97	176,00	93,50	163,50
KR100-1-SP-50-166	0,50	39,75	3,28	200,00	304,00	3,32	0,166	2,97	163,00	90,00	152,50
KP-1-SP-55-117	0,55	41,91	2,64	200,00	304,00	3,32	0,117	2,97	187,50	112,50	
KR25-1-SP-55-117	0,55	42,38	3,13	200,00	304,00	3,32	0,117	2,97	238,00	109,00	
KR50-1-SP-52-117	0,52	41,34	3,22	210,00	304,00	3,32	0,117	2,97	164,00	91,00	
KR100-1-SP-50-117	0,50	39,75	3,28	200,00	304,00	3,32	0,117	2,97	168,00	80,00	

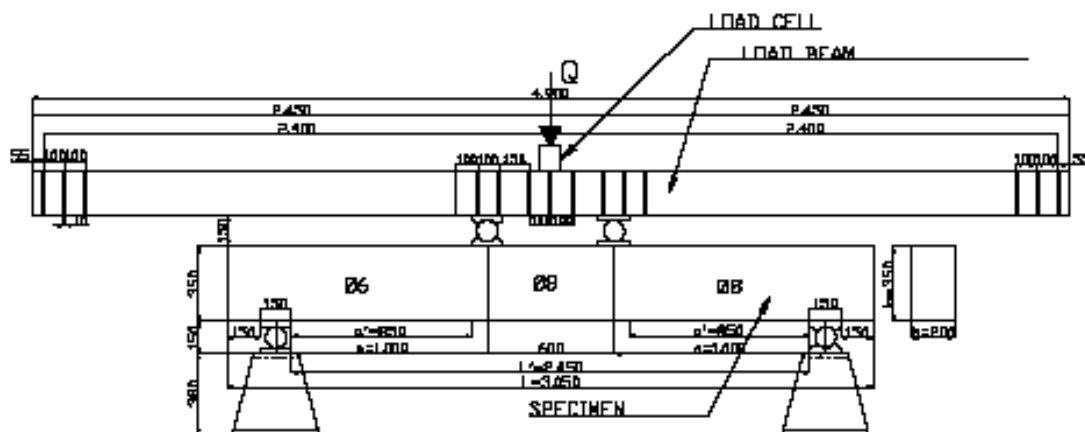
- ρ_u je procenat armiranja uzengijama,
- ρ je procenat armiranja podužnom armaturom,
- V_u je sila loma,
- V_{cr} je sila koja izaziva pojavu dijagonalne prsline,
- V_y je sila koja izaziva tečenje čelika uzengija, u

ovom ispitivanju to je sila koja odgovara početku tečenja druge uzengije koja seče dijagonalnu prslinu.

Ukupna dužina slobodno oslonjenih greda bila je 3,05 m, dimenzija poprečnog preseka $b/d = 20/35$ cm. Kod svih uzoraka, odnos smičućeg raspona (rastojanje od oslonca do mesta nanošenja opterećenja) i statičke visine preseka (engl. *Shear span/depth ratio*) je isti i iznosi $a/h = 3,3$. U svim gredama, osim onima bez poprečne armature, jedan od smičućih raspona armiran je gore definisanom poprečnom armaturom, dok je drugi smičući raspon armiran jačom poprečnom armaturom

(većim prečnikom uzengija na istom rastojanju). Ovo je učinjeno kako bi do loma smicanjem došlo na predviđenom mestu, tj. rasponu. Dispozicija eksperimenta prikazana je na slici 15.

Još jedan opit smicanja na gredama izvršen je u Španiji, na univerzitetu u La Korunji [15]. Napravljene su četiri serije greda, sa različitim procentima armiranja uzengijama: 0%, 0,117%, 0,166% i 0,217%, odnosno isto kao u prethodno opisanom ispitivanju. Svaka serija sadržavala je dve grede: jednu od betona na bazi prirodnog agregata i jednu od betona kod koga je 50% prirodnog krupnog agregata zamenjeno recikliranim. Receptura oba betona pripremljena je tako da se dobiju betoni sa istom merom sleganja, između 5 i 10 cm, a dobijena čvrstoća na pritisak svih uzoraka iznosila je oko 40 MPa.



Slika 15. Dispozicija eksperimentalnog ispitivanja [14]

Dispozicija eksperimenta, dimenzije greda (dužina, poprečni presek), procenat armiranja podužnom armaturom i kvalitet čelika bili su identični sa podacima iz prethodno opisanog eksperimenta [14].

U tabeli 5 prikazane su karakteristike betona u pojedinim gredama i rezultati eksperimenata. U ovoj tabeli korišćene su sledeće oznake:

- oznaka betona od koga je pravljena greda ima sledeću šemu: procenat zamene krupnog prirodnog krupnim recikliranim agregatom, gde postoje dva slučaja, KP (krupan prirodni agregat) i KR50 (50% prirodnog krupnog agregata zamenjeno recikliranim). Prvi broj u oznaci označava tip agregata, ovde 02 (agregat sa deponije), a zatim oznaka vrste sitnog agregata, ovde u svim slučajevima prirodan sitni agregat, označen kao SP. Sledeći broj u oznaci označava W/C (pomnožen sa 100), i poslednji broj procenat armiranja uzengijama. Na primer, KR50-2-SP-55-000 označava beton sa 50% recikliranog krupnog agregata tipa 02, sa sitnim prirodnim agregatom, W/C=0,55, i procenat armiranja uzengijama 0,000%,

- f_{bpm} , f_{bzm} su čvrstoće betona na pritisak, odnosno zatezanje u starosti od 28 dana,

- b, h su širina odnosno statička visina greda,

- a/h je odnos smičućeg raspona i statičke visine greda,

- ρ_u je procenat armiranja uzengijama,

- ρ je procenat armiranja podužnom armaturom,

- V_u je sila loma,

- V_{cr} je sila koja izaziva pojavu dijagonalne prsline,

- V_y je sila koja izaziva tečenje čelika uzengija, u ovom ispitivanju V_{cr} i V_y su određene na osnovu dijagrama $V-\gamma_{xy}$.

Važan doprinos razumevanju ponašanja greda opterećenih poprečnim silama dao je i rad korejskih istraživača [17]. U eksperimentu je analizirano ponašanje i smičuća nosivost greda od betona sa recikliranim agregatom. Ukupno je testirano 12 greda. Parametri koji su varirani su: odnos smičućeg raspona i statičke visine preseka $a/h = 1.5, 2.0, 3.0, 4.0$, tip agregata – reciklirani i prirodni, procenat armiranja poprečnom armaturom: 0, 0,089%, 0,244%, 0,507% i 0,823%. Dimenzije poprečnog preseka greda bile su $b/d=17/30$ cm, sa statičkom visinom od 27 cm. Grede bez uzengija armirane su sa 1,11% podužne armature, a grede sa uzengijama (neza-

visno od količine uzengija) armirane su sa 2,21% zategnute podužne armature. Granica razvlačenja čelika uzengija i podužne armature bila je 410 MPa. Dužina greda bila je od 1,65 m do 3,00 m, u zavisnosti od primenjenog odnosa smičućeg raspona i statičke visine preseka. Napravljene su tri vrste betona – beton sa prirodnim agregatom, beton u kome je 100% prirodnog krupnog agregata zamenjeno recikliranim krupnim agregatom (agregat tipa 03) i beton u kome je 100% prirodnog krupnog agregata zamenjeno recikliranim, ali opranim krupnim agregatom (agregat tipa 04). Čvrstoća na pritisak svih pomenutih vrsta betona od kojih su napravljene grede bila je oko 36 MPa.

U tabeli 6 prikazane su karakteristike betona u pojedinim gredama i rezultati eksperimenata. U ovoj tabeli korišćene su sledeće oznake:

- oznaka betona od koga je pravljena greda ima sledeću šemu: procenat zamene krupnog prirodnog krupnim recikliranim agregatom, gde postoje dva slučaja, KP (krupan prirodni agregat) i KR100 (100% prirodnog krupnog agregata zamenjeno recikliranim). Prvi broj u oznaci označava tip agregata, ovde 03 ili 04 (opran ili neopran agregat sa deponije), a zatim oznaka vrste sitnog agregata, ovde u svim slučajevima prirodan sitni agregat, označen kao SP. Sledeći broj u oznaci označava W/C (pomnožen sa 100), zatim oznaka smičućeg raspona i poslednji broj je procenat armiranja uzengijama. Na primer, KR100-3-SP-40-2.0-000 označava beton sa 100% recikliranog krupnog agregata tipa 03, sa sitnim prirodnim agregatom, W/C=0,40, odnos smičućeg raspona i statičke visine grede 2,0 i procenat armiranja uzengijama 0,000%,

- f_{bpm} je čvrstoća betona na pritisak u starosti od 28 dana,

- b, h su širina odnosno statička visina greda,

- a/h je odnos smičućeg raspona i statičke visine greda,

- ρ_u je procenat armiranja uzengijama,

- ρ je procenat armiranja podužnom armaturom,

- V_u je sila loma,

- V_{cr} je sila koja izaziva pojavu dijagonalne prsline, u ovom ispitivanju to je nivo opterećenja koji odgovara prolasku kritične dijagonalne prsline kroz sredinu visine preseka.

Tabela 5. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja [15]

Oznaka	W/C	f_{bpm} (MPa)	f_{bzm} (MPa)	b (mm)	h(mm)	a/h	ρ_u (%)	ρ (%)	V_u (kN)	V_{cr} (kN)	V_y (kN)
KP-2-SP-55-000	0,55	40,20	3,48	200,00	303,00	3,30	0,000	2,98	88,86	81,00	/
KR50-2-SP-55-000	0,55	39,65	3,41	200,00	303,00	3,30	0,000	2,98	90,64	77,00	/
KP-2-SP-55-117	0,55	39,16	3,55	200,00	303,00	3,30	0,117	2,98	127,97	84,30	125,00
KR50-2-SP-55-117	0,55	39,23	3,30	200,00	303,00	3,30	0,117	2,98	164,29	91,00	130,00
KP-2-SP-55-166	0,55	39,08	3,32	200,00	303,00	3,30	0,166	2,98	150,83	85,00	95,60
KR50-2-SP-55-166	0,55	41,49	3,36	200,00	303,00	3,30	0,166	2,98	176,99	90,00	93,00
KP-2-SP-55-217	0,55	37,66	2,94	200,00	303,00	3,30	0,217	2,98	190,29	96,00	104,00
KR50-2-SP-55-217	0,55	40,46	3,40	200,00	303,00	3,30	0,217	2,98	233,59	108,00	112,00

Tabela 6. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja [17]

Oznaka	W/C	f_{bpm} (MPa)	b (mm)	h(mm)	a/h	ρ_u (%)	ρ (%)	V_u (kN)	V_{cr} (kN)
KP-3-SP-40-2.0-000	0,40	37,43	170,00	270,00	2,00	0,000	1,11	118,00	67,47
KR100-3-SP-40-2.0-000	0,40	30,57	170,00	270,00	2,00	0,000	1,11	117,50	65,18
KR100-4-SP-40-2.0-000	0,40	32,56	170,00	270,00	2,00	0,000	1,11	113,37	60,59
KR100-3-SP-40-1.5-000	0,40	39,62	170,00	270,00	1,50	0,000	1,11	144,13	83,54
KR100-3-SP-40-3.0-000	0,40	31,23	170,00	270,00	3,00	0,000	1,11	55,08	42,69
KR100-3-SP-40-4.0-000	0,40	31,89	170,00	270,00	4,00	0,000	1,11	50,95	31,67
KP-3-SP-40-2.0-244	0,40	49,83	170,00	270,00	2,00	0,244	2,21	154,22	74,82
KR100-3-SP-40-2.0-244	0,40	41,11	170,00	270,00	2,00	0,244	2,21	153,31	85,83
KR100-4-SP-40-2.0-244	0,40	37,43	170,00	270,00	2,00	0,244	2,21	141,83	72,52
KR100-3-SP-40-2.0-089	0,40	41,86	170,00	270,00	2,00	0,089	2,21	150,09	69,31
KR100-3-SP-40-2.0-507	0,40	31,58	170,00	270,00	2,00	0,507	2,21	174,42	79,87
KR100-3-SP-40-2.0-823	0,40	41,11	170,00	270,00	2,00	0,823	2,21	174,42	68,85

3.2 Uporedna analiza eksperimentalnih rezultata

U ovom poglavlju su analizirani rezultati navedenih eksperimentalnih ispitivanja ponašanja armiranobetonskih greda od betona na bazi recikliranog agregata, u fazi eksploatacije i fazi loma. Analiza je izvršena pre svega u smislu poređenja ponašanja greda od betona na bazi recikliranog agregata i greda od betona na bazi prirodnog agregata.

U ispitivanju [14] cilj je bio da se dobiju betoni istih čvrstoća pri pritisku, pa se zbog toga efektivni vodocementni faktori betona na bazi recikliranih agregata razlikuju od istih kod odgovarajućih betona na bazi prirodnih agregata. U ispitivanju [15] cilj je bio da se dobiju betoni slične ugradljivosti, zbog čega je povećana količina vode u uzorcima sa recikliranim agregatom. Da bi se zadržao isti vodocementni faktor, povećana je i količina cementa u ovim betonima. Na kraju, rezultat su bili betoni veoma sličnih čvrstoća pri pritisku. Srednja vrednost odnosa čvrstoće pri pritisku betona sa recikliranim krupnim agregatom (KR50-2-SP - 50% zamene) i čvrstoće pri pritisku odgovarajućeg betona sa prirodnim agregatom (KP-2-SP) iznosila je 1,03. U ispitivanju [17], korišćen je isti efektivni vodocementni faktor i za betone sa prirodnim agregatom i za betone sa recikliranim agregatom, što je u ovom ispitivanju dovelo do razlika u čvrstoćama pri pritisku. Srednja vrednost odnosa čvrstoće pri pritisku betona sa recikliranim krupnim agregatom (KR100-3-SP - 100% zamene) i čvrstoće pri pritisku odgovarajućeg betona sa prirodnim agregatom (KP-3-SP) iznosila je 0,84.

Rezultati ispitivanja [14] koji se odnose na betone sa procentom zamene prirodnog recikliranim krupnim agregatom od 25% nisu analizirani, jer u druga dva ispitivanja ovaj procenat zamene nije ispitivan.

3.2.1 Slika prslina i mehanizam loma

Zaključak svih analiziranih ispitivanja je, da se slika prslina i mehanizam loma usled smicanja greda od betona na bazi recikliranog agregata ne razlikuje bitno od greda od betona na bazi prirodnog agregata, i to

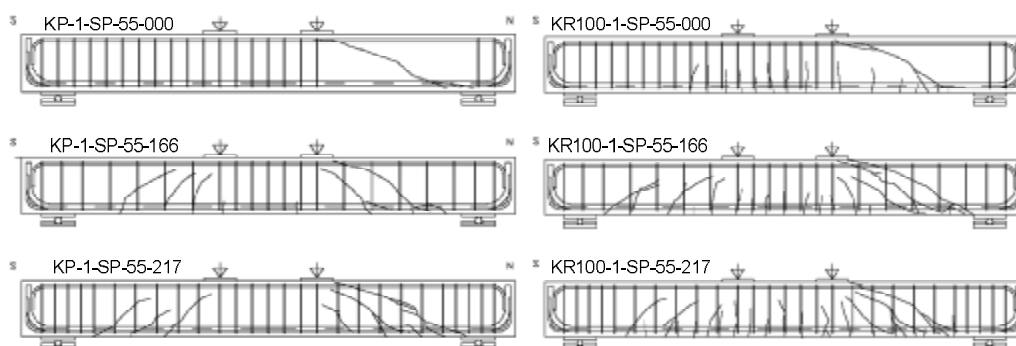
nezavisno od procenta zamene prirodnog recikliranim agregatom.

Kod greda bez uzengija, došlo je do formiranja inicijalne prslina usled savijanja u sredini raspona, a potom i niza prslina duž raspona. Pri povećanju opterećenja, jedna od tih prslina propagira u dijagonalnu prslinu u blizini jednog od oslonaca ili se kosa, dijagonalna prslina formira po sredini visine grede, pod uglom od približno 45°. Sa povećanjem apliciranog opterećenja, kosa prslina propagira kroz pritisnutu zonu betona, odnosno dolazi do spajanja vrha inicijalne prslina sa mestom delovanja spoljašnje sile i dešava se iznenadni, krti lom nosača. Ovakav mehanizam loma isti je za sve ispitivane grede bez poprečne armature, nezavisno od vrste betona (BRA ili BPA).

Uzorci greda sa uzengijama imali su istu sliku prslina do formiranja dijagonalne prslina, ali su i nakon toga bili sposobni da prihvate opterećenje, tj. pokazali su, očekivano, znatno duktilnije ponašanje. Nakon pojave prve prslina, angažuju su uzengije i nastavlja se dalji razvoj prslina. Kod svih greda sa poprečnom armaturom, nezavisno od vrste betona i količine recikliranog agregata, do loma je došlo drobljenjem pritisnute zone grede u kritičnom preseku na mestu kose prslina, usled kombinacije napona pritiska i smicanja.

Uticao količine uzengija na sliku prslina pri lomu greda od betona na bazi prirodnog agregata i betona na bazi recikliranog agregata, prikazan je na slici 16 [14]. U gredi koja nema uzengije (KP-1-SP-55-000), pre loma se formira samo jedna dijagonalna prslina, u gredi sa minimalnim uzengijama formiraju se dve (KP-1-SP-55-166), a u gredi sa maksimalnim procentom armiranja uzengijama (KP-1-SP-55-217) pojavile su se tri prslina, slika 16. Slična slika, uz nešto veći broj prslina, dobijena je i na gredama od betona sa 100% recikliranog krupnog agregata, slika 16 desno.

Analizirani eksperimenti su dakle pokazali da je uticaj vrste agregata na sliku prslina i lom greda usled smicanja praktično zanemarljiv, odnosno da je mehanizam loma grednih elemenata od betona na bazi prirodnog i betona na bazi recikliranog agregata veoma sličan, za sve procenat armiranja poprečnom armaturom. Jedino je u ispitivanju [15], uočeno značajnije formiranje prslina u

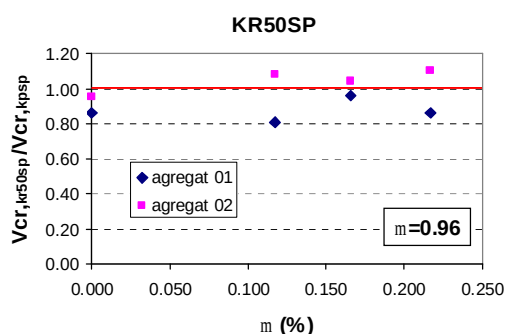


Slika 16. Slika prsline pri lomu greda od BRA i greda od BPA [14]

pravcu podužne zategnute armature usled cepanja, kod greda od betona na bazi recikliranog agregata, što može da ukazuje na lošije prijanjanje kod ove vrste betona.

3.2.2 Sila koja izaziva formiranje dijagonalne prsline i sila loma (granična nosivost na smicanje)

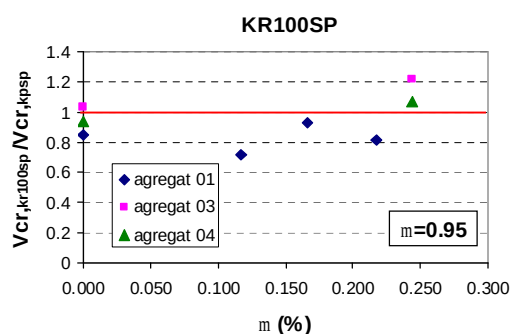
Na slici 17 prikazan je odnos merene vrednosti sile koja izaziva formiranje prve dijagonalne prsline greda od betona sa 50% recikliranog krupnog agregata (KR50SP) i iste te veličine kod odgovarajućih greda od betona na bazi prirodnog agregata (KPSP), sa istim procentom armiranja uzengijama, a u funkciji procenta armiranja uzengijama. Srednja vrednost ovog odnosa za sve ispitivane uzorke iznosi 0,96, odnosno sila koja izaziva pojavu prve dijagonalne prsline kod greda od betona sa 50% recikliranog krupnog agregata je u proseku 4,0% manja od te sile kod odgovarajućih greda od BPA. Ovde treba napomenuti da definicija ove sile u analiziranim ispitivanjima nije bila ista. U ispitivanju [15] sila koja izaziva pojavu dijagonalne prsline određivana je na osnovu promene nagiba merene krive $V-\gamma_{xy}$, u ispitivanju [17] to je nivo opterećenja koji odgovara prolasku kritične dijagonalne prsline kroz sredinu visine preseka, dok u ispitivanju [14] nije navedeno kako je određivana sila V_{cr} .



Slika 17. Odnos sile koja izaziva kosu prslinu greda od BRA (50% recikliranog krupnog agregata) i greda od BPA

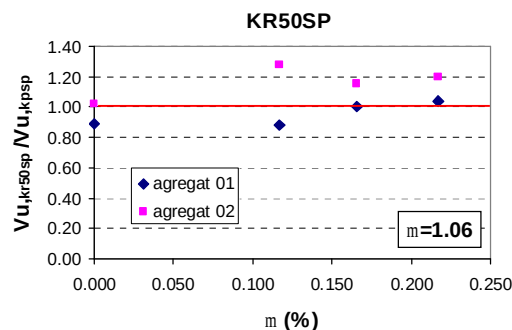
Kod greda od betona sa 100% recikliranog krupnog agregata (KR100SP), sila koja izaziva formiranje dijagonalne prsline takođe je manja nego kod odgovarajućih greda od betona na bazi prirodnog agregata, i to u pro-

seku za 5,0%, dakle slično kao kod greda od betona sa 50% recikliranog krupnog agregata, slika 18.



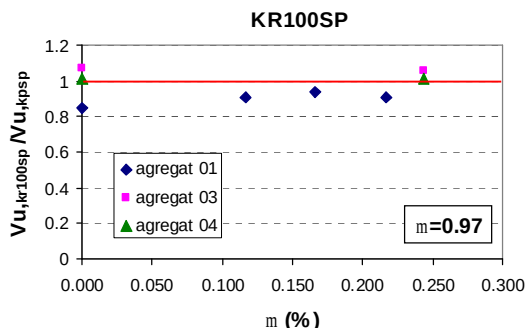
Slika 18. Odnos sile koja izaziva kosu prslinu greda od BRA (100% recikliranog krupnog agregata) i greda od BPA

što se tiče sile loma, razlike u odnosu na graničnu nosivost greda od BPA su takođe male. Na slici 19 prikazan je odnos merene vrednosti sile loma greda od betona sa 50% recikliranog krupnog agregata (KR50SP) i merene vrednosti sile loma odgovarajućih greda od betona na bazi prirodnog agregata (KPSP), sa istim procentom armiranja uzengijama, a u funkciji procenta armiranja uzengijama. Srednja vrednost ovog odnosa za sve ispitivane uzorke iznosi 1,06, odnosno sila loma greda od betona sa 50% recikliranog krupnog agregata je u proseku 6,0% veća od sile loma odgovarajućih greda od BPA (sa istim procentom armiranja uzengijama).



Slika 19. Odnos sile loma greda od BRA (50% recikliranog krupnog agregata) i greda od BPA

Kod greda od betona sa 100% recikliranog krupnog agregata (KR100SP), sila loma je manja nego kod odgovarajućih greda od betona na bazi prirodnog agregata, i to u proseku za 3,0% za sve ispitivane uzorke, slika 20.



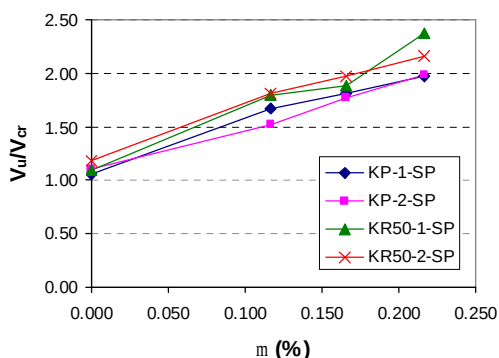
Slika 20. Odnos sile loma greda od BRA (100% recikliranog krupnog agregata) i greda od BPA

3.2.3 Odnos sile loma i sile koja izaziva formiranje dijagonalne prsline

Odnos sile loma i sile koja izaziva formiranje dijagonalne prsline pre svega je funkcija procenta armiranja poprečnom armaturom.

Kod greda koje nemaju poprečnu armaturu, i za odnos smičućeg raspona prema statičkoj visini veći od 2,5, ovaj odnos je oko jedinice, jer odmah nakon formiranja kose prsline dolazi do krto greda. Ukoliko je odnos smičućeg raspona prema statičkoj visini manji od 2,5, zbog lučnog dejstva koji se formira u blizini oslonaca, ovaj odnos je veći od jedinice, odnosno ne dolazi odmah do loma nakon formiranja kose prsline i greda može da prihvati izvesni dodatak opterećenja. Kod greda koje imaju poprečnu armaturu, odnos sile loma i sile koja izaziva pojavu dijagonalne prsline raste sa povećanjem procenta armiranja poprečnom armaturom. Ovakvo ponašanje zabeleženo je i kod greda od betona na bazi recikliranog agregata, nezavisno od procenta zamene prirodnog recikliranim agregatom.

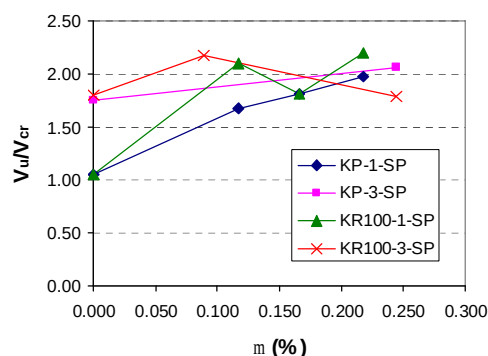
Na slici 21 prikazana je zavisnost odnosa sile loma i sile koja izaziva formiranje dijagonalne prsline u funkciji procenta armiranja uzengijama, za nekoliko različitih vrsta



Slika 21. Odnos sile loma i sile koja izaziva formiranje kose prsline greda od BRA (50% recikliranog krupnog agregata) i greda od BPA

betona: betone na bazi prirodnog agregata (KP-1-SP i KP-2-SP) i odgovarajuće betone sa 50% recikliranog krupnog agregata (KP50-1-SP i KP50-2-SP).

Sa ove slike je uočljivo da je odnos sile loma i sile koja izaziva formiranje dijagonalne prsline uvek veći kod greda od betona sa 50% recikliranog krupnog agregata (KR50SP) nego kod odgovarajućih greda od betona na bazi prirodnog agregata (KPSP). Ovo ukazuje na činjenicu da kod greda od betona sa recikliranim agregatom dolazi do pojave kose prsline nešto ranije nego kod greda od betona sa prirodnim agregatom. Slična je situacija i kod greda od betona sa 100% recikliranog krupnog agregata (KR100SP), osim u ispitivanju Hana [16], gde je odnos smičućeg raspona i statičke visine grede bio 2, slika 22. Na slici 22 Hanovi rezultati su obeleženi kao KP-3-SP i KP100-3-SP (agregat tipa 03), i može se primetiti da je za grede bez uzengija, odnos merene sile loma i sile koja izaziva dijagonalnu prslinu značajno veći od 1.0 (1,75 i 1,8), što je posledica lučnog dejstva u gredama.



Slika 22. Odnos sile loma i sile koja izaziva formiranje kose prsline greda od BRA (100% recikliranog krupnog agregata) i greda od BPA

4 ZAKLJUČAK

Kada je u pitanju ponašanje armiranobetonskih greda napravljenih od betona na bazi recikliranih agregata (BRA) pri savijanju, na osnovu analiziranih eksperimentalnih istraživanja, mogu se izvući sledeći zaključci:

- u analiziranim ispitivanjima, betoni na bazi recikliranih agregata pravljani su sa istim efektivnim vodoce mentnim faktorom kao i odgovarajući betoni na bazi prirodnih agregata, pa dobijene čvrstoće pri pritisku BRA i odgovarajućih BPA nisu bile iste. U poljskom ispitivanju [12], betoni sa recikliranim krupnim agregatom imali su u proseku 4% manju čvrstoću pri pritisku od odgovarajućih betona sa prirodnim agregatom, a betoni sa recikliranim krupnim i sitnim agregatom imali su u proseku 12% manju čvrstoću pri pritisku od odgovarajućih betona sa prirodnim agregatom. U srpskom ispitivanju [13], BRA betoni sa 100% recikliranog krupnog agregata imali su u proseku 5% veću čvrstoću pri pritisku od odgovarajućih BPA,

- pri eksploatacionom kratkotrajnom opterećenju, ugibi greda od betona sa krupnim recikliranim agregatom su u proseku 13% veći od ugiba odgovarajućih greda od betona sa prirodnim agregatom, dok su ugibi greda od betona sa recikliranim i krupnim i sitnim agregatom u proseku 37% veći od ugiba odgovarajućih BPA,

greda od betona sa prirodnim agregatom. Ne može se uočiti zavisnost ovog odnosa od procenta armiranja podužnom armaturom,

- opterećenje koje izaziva pojavu prslina greda od betona sa krupnim recikliranim agregatom je u proseku 9% manje od opterećenja koje izaziva pojavu prslina odgovarajućih greda od betona sa prirodnim agregatom, dok kod greda od betona sa recikliranim i krupnim i sitnim agregatom ovo sniženje je veće i u proseku iznosi 33%,

- pri eksploatacionom kratkotrajnom opterećenju, širine prslina uvek su veće kod greda od betona sa recikliranim agregatom u odnosu na odgovarajuće grede od betona sa prirodnim agregatom, i to kod greda od betona sa krupnim recikliranim agregatom u proseku za 28%, a kod greda od betona sa recikliranim i krupnim i sitnim agregatom u proseku za 67%. Može se uočiti pad vrednosti ovog odnosa sa povećanjem procenta armiranja podužnom armaturom,

- sama slika prslina u smislu mesta formiranja prslina i njihovog razmaka ne zavisi značajno od vrste agregata, mada je uočeno formiranje nešto većeg broja prslina kod greda od betona na bazi recikliranog agregata,

- kod greda od betona sa recikliranim krupnim agregatom, najmanja odstupanja od karakteristika odgovarajućih greda od betona sa prirodnim agregatom (širine prslina i ugibi) zabeležena su kod betona sa najmanjom čvrstoćom pri pritisku. Sa povećanjem kvaliteta betona, rastu i razlike u odnosu na grede od betona sa prirodnim agregatom. Ovaj trend nije uočen kod betona sa recikliranim i krupnim i sitnim agregatom,

- granična nosivost na savijanje greda od betona sa recikliranim agregatom se praktično ne razlikuje od granične nosivosti greda od betona na bazi prirodnog agregata, i to nezavisno od procenta zamene prirodnog recikliranim agregatom. Kod greda od betona sa recikliranim krupnim agregatom, granična nosivost na savijanje je u proseku 1% veća od granične nosivosti odgovarajućih greda od betona sa prirodnim agregatom, dok kod greda od betona sa recikliranim i krupnim i sitnim agregatom granična nosivost je u proseku 1% manja od nosivosti odgovarajućih greda od betona sa prirodnim agregatom. Ne može se uočiti zavisnost ovog odnosa od procenta armiranja podužnom armaturom.

Kada je u pitanju ponašanje armiranobetonskih greda napravljenih od betona na bazi recikliranih agregata (BRA) pri smicanju, na osnovu analiziranih eksperimentalnih istraživanja, mogu se izvući sledeći zaključci:

- u ispitivanjima [14] i [15], cilj je bio da se dobiju betoni na bazi recikliranih agregata iste čvrstoće pri pritisku, odnosno iste ugradljivosti kao i odgovarajućih betona na bazi prirodnih agregata, što je i postignuto. U ispitivanju [17], korišćen je isti efektivni vodocementni faktor za obe vrste betona, što je dovelo do razlika u čvrstoćama betona pri pritisku. Čvrstoća pri pritisku betona sa recikliranim krupnim agregatom bila je u proseku 18% manja od čvrstoće pri pritisku odgovarajućeg betona sa prirodnim agregatom,

- slika prslina i mehanizam loma usled smicanja greda od betona na bazi recikliranog agregata ne razlikuje se bitno od greda od betona na bazi prirodnog agregata, i to nezavisno od procenta zamene prirodnog recikliranim agregatom. Jedino je u ispitivanju [15] uočeno značajnije formiranje prslina u pravcu podužne zategnute

armature usled cepanja kod greda od betona na bazi recikliranog agregata,

- sila koja izaziva formiranje dijagonalne prslina kod greda od betona sa recikliranim agregatom nešto je manja od te sile kod greda od betona sa prirodnim agregatom, i to u proseku 4% za betone sa 50% recikliranog krupnog agregata, odnosno 5% za betone sa 100% recikliranog agregata; jedino je kod greda koje nisu bile armirane poprečnom armaturom ovaj pad nešto izraženiji,

- granična nosivost na smicanje greda od betona sa 50% recikliranog krupnog agregata u proseku je 6% veća od granične nosivosti odgovarajućih greda od betona sa prirodnim agregatom, dok je granična nosivost na smicanje greda od betona sa 100% recikliranog krupnog agregata u proseku 3% manja od granične nosivosti odgovarajućih greda od betona sa prirodnim agregatom; pri tome se ne može uočiti zavisnost od procenta armiranja poprečnom armaturom,

- odnos sile loma i sile koja izaziva formiranje dijagonalne prslina uvek je veći kod greda od betona sa recikliranim krupnim agregatom (i sa 50% i sa 100% zamene) nego kod odgovarajućih greda od betona na bazi prirodnog agregata. Ovo ukazuje na činjenicu da kod greda od betona sa recikliranim agregatom dolazi do pojave kose prslina nešto ranije nego kod greda od betona sa prirodnim agregatom.

Prikazana i analizirana ispitivanja, iako malobrojna, potvrdila su, da sa aspekta ponašanja grednih konstrukcijskih elemenata pri savijanju i smicanju, pod uticajem kratkotrajnog opterećenja, postoje realne mogućnosti za primenu betona na bazi recikliranog agregata (BRA). Ovo se pre svega odnosi na betone sa recikliranim samo krupnom frakcijom, čije je ponašanje sasvim zadovoljavajuće u odnosu na betone na bazi prirodnog agregata, za male i srednje čvrstoće pri pritisku - do 40 MPa. Međutim, grede napravljene od betona sa recikliranim i krupnim i sitnim agregatom imaju značajno veće ugibe i prslina za eksploataciono opterećenje u odnosu na odgovarajuće grede od betona na bazi prirodnog agregata, i ove se razlike ne mogu smatrati prihvatljivim. Pored toga, prema sadašnjem stanju istraživanja, ograničavajući faktor u primeni agregata dobijenih recikliranjem otpadnog betona kao agregata za konstrukcijske betone, mogu da budu i značajno veće vremenske deformacije ovih betona. One su posledica i povećanog skupljanja i povećanog tečenja betona na bazi recikliranih agregata u odnosu na beton napravljen od prirodnog agregata, i u ovom radu nisu analizirane s obzirom na izrazito mali broj do sada izvršenih eksperimentalnih ispitivanja. Zbog toga, buduća istraživanja treba usmeriti u pravcu rešavanja navedenih problema.

ZAHVALNOST

U radu je prikazan deo istraživanja koje je pomoglo Ministarstvo za nauku Republike Srbije u okviru tehnološkog projekta TR-16004 pod nazivom: "Istraživanje savremenih betonskih kompozita na bazi domaćih sirovina, sa posebnim osvrtom na mogućnosti primene betona sa recikliranim agregatom u betonskim konstrukcijama".

5 LITERATURA

- [1] Marinković S., Ignjatović I.: Savremeni koncept projektovanja i građenja betonskih konstrukcija, Građevinski kalendar 2008, str. 181-233.
- [2] Lauritzen E. K. : Recycling concrete – an overview of development and challenges, International RILEM Conference on Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, Barcelona, 2004, str. 9
- [3] Hansen T. C.: Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, Third State-of-the-art Report 1945-1989 of RILEM Technical Committee 37-DARB, 1992, str. 157.
- [4] <http://www.ecosmartconcrete.com>
- [5] Hansen T. C., Narud H.: Strength of Recycled Concrete Made from Crushed Concrete Coarse Aggregate, Concrete International - Design and Construction, No. 1, 1983, str. 79-83.
- [6] ACI Committee 555: Removal and Reuse of Hardened Concrete, 2001, str. 26
- [7] Sato R., Maruyama I., Sogabe T., Sogo M.: Flexural Behaviour of Reinforced Recycled Concrete Beams, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 5, No. 1, 2007, Japan Concrete Institute, str. 43-61.
- [8] Maruyama I., Sogo M., Sogabe T., Sato R., Kawai K.: Flexural Properties of Reinforced Recycled Concrete Beams, International RILEM Conference on Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, Barcelona, 2004, str. 526-535.
- [9] Sogo M., Sogabe T., Maruyama I., Sato R., Kawai K.: Shear Behaviour of Reinforced Recycled Concrete Beams, International RILEM Conference on Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, Barcelona, 2004, str. 610-618.
- [10] Tsujino M., Noguchi T., Tamura M., Kanematsu M., Maruyama I.: Application of Conventionally Recycled Coarse Aggregate to Concrete Structures by Surface Modification Treatment, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.5, No.1, 2007, Japan Concrete Institute, str.13-25.
- [11] Morohashi N., Sakurada T.: A Study on the Bond Splitting Strength of Recycled Aggregate Concrete Beams, Proceedings of the 2nd fib International Congress, Naples, 2006, ID 18-1.
- [12] Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A.: Comparative Tests of Beams and Columns Made of Recycled Aggregate Concrete and Natural Aggregate Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 5, No. 2, 2007, Japan Concrete Institute, str. 259-273.
- [13] Malešev M., Radonjanin V.: Reciklirani betoni kao agregat za dobijanje konstrukcijskih betona, Zbornik radova Konferencije "Savremena građevinska praksa 2007", Novi Sad, 2007, str. 201-222.
- [14] Etxeberria Larranaga M.: Experimental Study on Microstructure and Structural Behaviour of Recycled Aggregate Concrete, Doctoral Thesis, Barcelona, 2004, str. 230.
- [15] Gonzalez-Fonteboa B., Martinez-Abella F.: Shear strength of recycled concrete beams, Construction and Building Materials 21 (2007), str. 887-893.
- [16] Gonzalez B., Martinez-Abella F.: Shear Strength of Concrete with Recycled Aggregates, International RILEM Conference on Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, Barcelona, 2004, str. 10
- [17] Han B. C., Yun H. D., Chung S. Y.: Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Made with Recycled Aggregate, ACI Special publication, 2001, str. 503-515.
- [18] Li X.: Recycling and reuse of waste concrete in China. Part II. Structural behaviour of recycled aggregate concrete and engineering applications, Resources, Conservation and Recycling 53 (2009), str. 107-112.
- [19] Xiao J., Sun Y., Falkner H.: Seismic performance of frame structures with recycled aggregate concrete, Engineering Structures 28 (2006), str.1-8.
- [20] Corinaldesi V., Moriconi G.: Behavior of Beam-Column Joints made of Sustainable Concrete under Cyclic Loading, Journal of Materials in Civil Engineering, sept.-oct. 2008, str.650-658.

REZIME

PONAŠANJE ARMIRANOBETONSKIH GREDA OD BETONA NA BAZI RECIKLIRANOG AGREGATA POD KRATKOTRAJNIM OPTEREĆENJEM

*Snežana MARINKOVIĆ
Ivan IGNJATOVIĆ*

Jedno od održivih rešenja za probleme odlaganja građevinskog otpada i iscrpljivanje prirodnih nalazišta agregata predstavlja postupak recikliranja otpadnog betona. Kao rezultat, dobija se agregat od recikliranog betona (ARB) koji se najčešće koristi za nasipe, kao podloga puteva itd. Međutim, sa aspekta uštede prirodnih resursa i energije, kao i zaštite životne sredine, važno je istražiti da li se betoni na bazi recikliranog agregata (BRA) mogu koristiti kao konstrukcijski betoni. U radu su predstavljena dosadašnja eksperimentalna istraživanja ponašanja greda od BRA pod uticajem kratkotrajnog opterećenja, u fazi eksploatacije i fazi loma. Izvršena je uporedna analiza deformacijskih karakteristika (ugiba), stanja prslina (širina, razmak) i graničnih nosivosti greda od betona na bazi prirodnog agregata (BPA) i greda od betona na bazi recikliranog agregata. Na osnovu do sada izvršenog malog broja eksperimentalnih ispitivanja, može se zaključiti da je ponašanje greda od BRA kod kojih je samo krupni agregat bio recikliran, zadovoljavajuće u odnosu na ponašanje odgovarajućih greda od BPA, i to kako za eksploatacijo, tako i za granično kratkotrajno opterećenje.

Ključne reči: zaštita životne sredine, recikliranje otpadnog betona, beton na bazi recikliranog agregata (BRA), ponašanje BRA greda u fazi eksploatacije i loma, kratkotrajno opterećenje.

SUMMARY

SHORT-TERM BEHAVIOUR OF REINFORCED RECYCLED AGGREGATE CONCRETE BEAMS

*Snežana MARINKOVIĆ
Ivan IGNJATOVIĆ*

Recycling of waste concrete is one of the sustainable solutions for growing waste disposal crisis and depletion of natural aggregate sources. As a result of that process, recycled aggregate (RCA) is produced and it is used mostly in low-value application such as for pavement base. But from the viewpoint of promoting resource and energy saving and environmental preservation, it is essential to study if a concrete made of recycled aggregates - recycled aggregate concrete (RAC) can be effectively used as a structural material. Some experimental studies concerning flexural and shear behaviour of reinforced concrete beams made of recycled aggregate concrete are presented in this paper. Comparison of load-deflection behaviour, crack width and spacing, failure modes and ultimate bending and shear capacity of the beams made of natural (NAC) and recycled aggregate concrete is performed. On the basis of the limited reported test results, it is concluded that the behaviour of RAC beams made of concrete with only coarse aggregate recycled is satisfactory comparing to the behaviour of NAC beams, for service and ultimate short-term loading both.

Key words: environmental preservation, recycling of waste concrete, recycled aggregate concrete (RAC), flexural behaviour of RAC beams, shear behaviour of RAC beams, short-term loading.

PRVIH 20 GODINA SAMOUGRAĐUJUĆEG BETONA

Iva DESPOTOVIĆ
Zoran GRDIĆ
Gordana TOPLIČIĆ-ČURČIĆ
Nenad RISTIĆ

PREGLEDNI (STRUČNI) RAD
UDK: 666.974 = 861

1 NASTANAK I RAZVOJ SAMOUGRAĐUJUĆEG BETONA

Samougrađujući beton (Self-Compacting Concrete - SCC), po mnogim autorima „najrevolucionarnije otkriće betonske industrije XX veka“, ne zahteva vibriranje za ugrađivanje i zbijanje. Pod dejstvom sopstvene težine u potpunosti ispunjava sve delove oplata čak i prisustvu gusto postavljene armature.

Početak razvoja ovih betona se vezuje za Japan početkom osamdesetih godina prošlog veka, mada podaci dostupni u svetskoj literaturi ukazuju da su „samoravnjajući“ (self-levelling) betoni bez sklonosti ka segregaciji (unsegregable) proučavani još 1975-76. godine u Italiji. Bilo je predloga da se definiše reoplastični beton (Prof. Mario Collepardi, Politehnički fakultet, Milano) koji iako tečan, ima veliku koheziju i samim tim nisku tendenciju ka segregaciji ili izdvajanju vode. Takva ideja nije zaživela jer je ACI dozvoljavao maksimalnu vrednost sleganja 175 mm da bi se, u odsustvu superplastifikatora, izbeglo preveliko izdvajanje vode.

Glavni inženjerski problem u Japanu bilo je ubrzano propadanje armiranobetonskih konstrukcija, posebno onih na moru i u obalnim područjima. Problem trajnosti konstrukcija je bio usko povezan sa korozijom armature

u betonu, izazvane karbonatizacijom zaštitnog sloja betona i agresivnim delovanjem jona hlorida. Ako se tome pridoda i nedostatak kvalifikovane građevinske radne snage, razumljivo je što je u tom pravcu bio usmeren najveći broj istraživanja koje je predvodio Hajime Okamura sa Univerziteta u Tokiju. Prototip samozbijajućeg betona je napravljen 1988. godine i tom prilikom je nazvan „beton visokih performansi“ (High Performance Concrete - HPC).

Profesori Aitcin i Gagne su 1989. godine „beton visokih performansi“ definisali kao beton visoke trajnosti koji je i danas prihvaćen u celom svetu, pa je Okamura definisao „samozbijajući beton visoke trajnosti“ [5].

Zahvaljujući radu RILEMA (Međunarodno udruženje laboratorija i eksperata za materijale i konstrukcije) SCC je stigao u Evropu. Međunarodni simpozijumi na temu SCC su organizovani u Glazgovu 1996., Stokholmu 1999., Tokiju 2001., Rejkjaviku 2003. i Čikagu 2005. I druge relevantne grupe osnivaju svoje posebne tehničke komisije, tehničke ili radne grupe koje će se baviti istraživanjem i razvojem SCC-a. FIB (Međunarodna Federacija za Beton), nastala 1998. godine osniva tehničku grupu TG 8.4 koju predvodi Ozava, jedan od začetnika istraživanja samougrađujućeg betona, sa zadatkom izrade Preporuka i/ili Pravila za širu primenu SCC-a i Vodiča za budući razvoj projektovanja i izvođenja konstrukcija na bazi SCC-a.

EFNARC (Evropska Federacija Proizvođača Građevinske Hemije i Betonskih Sistema) nastala 1989. godine, formirala je svoj Tehnički Komitet SCC u čijem su radu učestvovali predstavnici svih vodećih proizvođača građevinske hemije (Degussa, Mapei, Sika, Domilco), a kao rezultat rada nastale su preporuke „Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete“. Evropsko društvo za istraživanje i razvoj tehnologije je pokrenulo u sklopu aktivnosti Eu Ram Project-a program „Racionalna proizvodnja i poboljšanje radnog okruženja kroz primenu SCC“. Projekat je trajao od 1997. do 2000. godine i rezultirao objavljivanjem izveštaja „Principi i preporuke za SCC“.

Adresa autora:

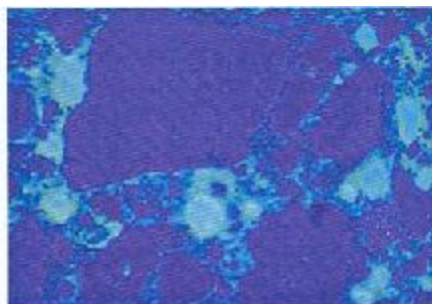
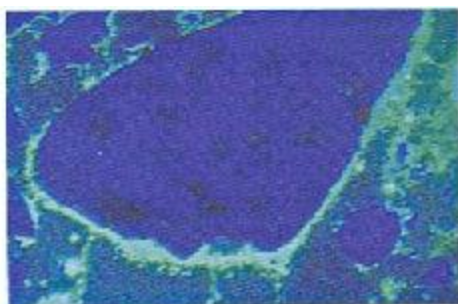
Iva Despotović, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, stipendista Ministarstva nauke, dipl.inž.građ., magistrantica
Zoran Grdić, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, dr. vanredni profesor, dipl.inž.građ.
Gordana Topličić-Čurčić, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, dr. asistent, dipl.inž.građ.
Nenad Ristić, Građevinsko-arhitektonski fakultet u Nišu, stipendista Ministarstva nauke, dipl.inž.građ., student doktorskih studija

Nacionalna strukovna udruženja većine razvijenih evropskih zemalja u kojima se primenjuje samougrađujući beton su sledila primer Japana koji je prvi objavio „Preporuke za SCC Japanskog udruženja građevinskih inženjera“, pripremišći svoje preporuke i uputstva [5]. Trudeći se da prati aktuelne svetske trendove i naša zemlja polako počinje da se kroz naučne projekte i istraživanja, koji se sprovode na fakultetima i institutima, uključi u ovu problematiku. U prilog tome govori i činjenica da je za obnovu jednog od nacionalnih simbola, televizijskog tornja na Avali, koristi upravo samougrađujući beton.

2 OSOBINE SAMOUGRAĐUJUĆEG BETONA

2.1 Osobine svežeg betona

Kod samougrađujućeg betona su najvažnije njegove karakteristike u svežem stanju. Prilikom projektovanja mešavine akcentat se stavlja na sposobnost betona da se razliva samo pod dejstvom sopstvene težine i da u potpunosti ispuni oplatu ma kog oblika i dimenzija bez ostavljanja šupljina, da prođe kroz gusto postavljenu armaturu bez zaglavljivanja, da zadrži homogenu strukturu bez izdvajanja agregata iz paste ili vode od čvrste faze (‐bleeding‐), kao i bez tendencije krupnog



Slika 1. Mikrostruktura običnog (levo) i samougrađujućeg betona (desno)

agregata da ‐propadne‐ kroz betonsku masu pod dejstvom gravitacije (segregacija). Dakle, ključne karakteristike svežeg SCC-a su: sposobnost tečenja, viskoznost (izražena brzinom tečenja), sposobnost prolaza i otpornost na segregaciju [1]. Betonska mešavina će biti klasifikovana kao SCC jedino ako su sve navedene osobine u potpunosti ostvarene. Svaka od njih se može testirati na više načina. O metodama ispitivanja i kriterijumima ocenjivanja će detaljnije biti reči u poglavlju 4.

Prema Evropskom pravilniku za SCC [1], najčešće korišćene metode ispitivanja su prikazane u tabeli:

Tabela 1: Najčešće korišćene metode ispitivanja

karakteristika betona	najčešće korišćena metoda
sposobnost tečenja	Slump-flow test
viskoznost	T ₅₀₀ Slump-flow ili V-funnel test
sposobost prolaza	L-box test
otpornost na segregaciju	test otpornosti na situ (sieve test)

2.2 Osobine svežeg betona

Iako su osnovne komponente vibriranih i SCC betona iste, razlika se ogleda u razmeri mešanja, u sadržaju sitnog agregata (peska) i sitnih čestica, kao i primeni aditiva najnovije generacije (modifikatori viskoziteta i visoke sposobnosti redukcije vode). Pravilno projektovan i ugrađen, SCC se odlikuje većom kompaktnošću i homogenošću. Svetska iskustva neosporno dokazuju da postoji mala razlika između svojstava očvrsllog samougrađujućeg i vibriranog betona slične mešavine i istog vodocementnog faktora, čak su neke osobine i poboljšane kod SCC-a. Veće vrednosti čvrstoće pri pritisku i poboljšanje karakteristika kao što su prijanjanje za armaturu, propustljivost vazduha i vode itd., povezan su sa smanjenom poroznošću u unutrašnjoj tranzitnoj zoni između cementne paste i agregata, i generalno boljoj mikrostrukturi SCC-a u poređenju sa vibriranim betonom, slika 1 [3].

Za projektovanje betonskih konstrukcija inženjerima su potrebni podaci o brojnim osobinama betona koji nisu uvek deo specifikacije. Kao i kod ‐tradicionalnog‐, vibriranog betona, to su najčešće: čvrstoća pri pritisku i zatezanju, modul elastičnosti, tečenje i skupljanje betona, koeficijent termičkog širenja, otpornost na požar, prijanjanje za armaturu, itd. Zbog sigurnosti, generalno je prihvaćeno da se osobine očvrsllog SCC-a smatraju istim

Tabela 2: Vrednosti nekih karakteristika SCC-a

karakteristika betona	vrednost za SCC
vodocementni faktor [%]	25-40
sadržaj vazduha [%]	4.5-6
čvrstoća pri pritisku nakon 28 dana [N/mm ²]	40-80
čvrstoća pri pritisku nakon 90 dana [N/mm ²]	55-100
čvrstoća pri zatezanju cepanjem nakon 28 dana [N/mm ²]	2.4-4.8
modul elastičnosti [GPa]	30-36
skupljanje [x 10 ⁻⁶ m]	600-800

po vrednosti kao i kod vibriranog betona slične mešavine i istog vodocementnog faktora. Neke od tih vrednosti su prikazane u tabeli 2.

Čvrstoća pri pritisku predstavlja fundamentalnu karakteristiku očvrsllog betona značajnu za inženjere u

praksi. Definiše se kao prosečan napon u uzorku izloženom aksijalnom pritisku pri sili loma. SCC sa istim vodocementnim faktorom će imati nešto veću čvrstoću u poređenju sa vibriranim betonom jer se ostvaruje jača veza između agregata i očvršle paste. Priraštaj čvrstoće će biti isti, tako da se dostignuta čvrstoća praktično proverava kao i kod vibriranog betona, bez obzira da li je primenjen postupak ubrzanog očvršćavanja zaparivanjem.

Čvrstoća pri zatezanju se određuje nešto složenije nego pri pritisku, zbog toga što je teško obezbediti homogeno naponsko stanje zatezanja u uzorku. Metode ispitivanja su: ispitivanje direktnim aksijalnim zatezanjem, ispitivanje cepanjem putem linijskog pritiska i ispitivanje savijanjem. SCC može da se projektuje tako da zadovolji bilo koju propisanu klasu čvrstoće pri pritisku. Za datu klasu betona i starost, zatezna čvrstoća se sa sigurnošću može smatrati istom kao i kod vibriranog betona, jer na nju zapremine paste (cement + praškaste čestice + voda) nema značajniji uticaj. Treba napomenuti da je i odnos čvrstoće pri zatezanju i pritisku istog reda veličine kao i kod vibriranog betona.

Statički modul elastičnosti se koristi u elastičnim proračunima ugiba, često kao kontrolni parametar pri projektovanju ploča, kod proračuna prethodno napregnutih konstrukcija, itd. Kako veći deo zapremine betona čini agregat, onda vrsta i količina agregata kao i njegov modul elastičnosti bitno utiču na modul elastičnosti betona. Izbor agregata sa visokim modulom elastičnosti povećaće modul elastičnosti betona. Međutim, povećanje zapremine paste bi moglo da smanji ovaj parametar. Kako SCC ima često veći sadržaj paste od vibriranog betona, mogu se očekivati razlike u smislu nešto nižih vrednosti modula elastičnosti. Iskustveni podaci pokazuju da je odnos modula elastičnosti i čvrstoće pri pritisku, izražen kao $E/f_c^{0.5}$ isti kod SCC-a i vibriranog betona što odgovara preporukama ACI [4].

Tečenje se definiše kao postepeno povećavanje deformacije tokom vremena pod konstantnim naponom, ubrajajući i druge vremenski zavisne deformacije, koje nisu povezane sa primenjenim naponom, na pr. skupljanje, bubrenje itd. Tečenje pod naponom pritiska smanjuje sile prednaprezanja u prethodno napregnutim elementima i uzrokuje spor transfer opterećenja sa betona na armaturu. Nasuprot tome, tečenje pod naponom zatezanja može da bude korisno jer delimično otklanja napone prouzrokovane drugim ograničenim kretanjima (hidrauličko skupljanje, termički efekti). Tečenje se odvija u cementnoj pasti i uzrokovano je njenom poroznošću koja je direktno povezana sa vodocementnim faktorom. Tokom hidratacije smanjuje se poroznost cementne paste te se u posmatranom betonu, sa porastom čvrstoće, smanjuje i tečenje. Vrsta cementa utiče na proces tečenja, pogotovo ako je ograničeno vreme trajanja opterećenja, u smislu da će cement koji hidratise brže uzrokovati veću čvrstoću pod opterećenjem, niži odnos napon/čvrstoća i niže tečenje. Uticaj upotrebljenog agregata za spravljanje betona se ogleda u tome da će se tečenje smanjivati sa porastom zapremine i modula elastičnosti agregata.

Zbog veće zapremine cementne paste s pravom se može očekivati veća deformacija tečenja kod SCC-a u odnosu na vibrirani beton iste čvrstoće, ali su takve razlike male i „pokrivene“ sigurnosnim pretpostavkama datim u Evrokodu [1].

Skupljanje je deformacija koja je funkcija vremena i nastaje usled kontrakcije produkata hidratacije (hidrataciono skupljanje), usled isparavanja vode tokom perioda vezivanja cementa (plastično skupljanje) i skupljanja tokom perioda očvršćavanja cementa (hidrauličko skupljanje). Plastično skupljanje je najveće u poređenju sa ostalim navedenim oblicima, ali se odvija veoma brzo, u prvih nekoliko časova, pa se kao takvo uglavnom i ne registruje. Njegovi štetni efekti (pojava prslina i pukotina na površinama betonskih elemenata) se lako eliminišu pravilnom negom betona, tako da ispitivane vrednosti skupljanja na očvršlom betonu predstavljaju zbir hidratacionog i hidrauličkog skupljanja. Prisustvo agregata povoljno utiče na skupljanje u smislu da se sa povećanjem zapremine agregata i njegovog modula elastičnosti, skupljanje betona u odnosu na cementnu pastu smanjuje. Vrednosti i formule date u Evrokodu za vibrirani beton, važe i u slučaju samougrađujućeg betona. Interesantno je primetiti, da uprkos činjenici da SCC ima veći sadržaj paste i manje krupnog agregata u odnosu na vibrirani beton, ne pokazuje veće hidrauličko skupljanje. Naprotiv, zbog redukovanog sadržaja vlage i kompaktne mikrostrukture vrednosti hidrauličkog skupljanja su manje, te hidrataciono po veličini može da ga prevaziđe.

Testovi tečenja i skupljanja na različitim tipovima SCC-a i uporednom, vibriranom betonu su pokazali da su generalno deformacije kod SCC-a, prouzrokovane ukupnim skupljanjem veće, tečenjem manje, ali su vrednosti ukupnih deformacija približno jednake.

Koeficijent termičkog širenja je dilatacija nastala u betonu usled jedinične temperaturne promene. Vrednost varira u zavisnosti od sastava betona, njegove starosti i sadržaja vlage. Kako najveći deo betona čini agregat, korišćenje agregata sa nižim koeficijentom termičkog širenja će smanjiti ovaj koeficijent kod rezultujućeg betona. Po EN 1992-1 veličina koeficijenta termičkog širenja se kreće od 8-13 mikrodilatacija/°C i u slučaju vibriranog i u slučaju samougrađujućeg betona. Treba napomenuti da propisi Novog Zelanda (NZS 3101.2006) preporučuju uvećanje ovog koeficijenta za 15% kada se koristi za SCC [3].

Prianjanje za armaturu - armirani beton se zasniva na efektivnom prianjanju betona i armature. Prianjajuća snaga betona bi trebalo da bude dovoljna za izbegavanje athezionog loma. Kvalitet prianjanja zavisi od razmeštaja armature i kvaliteta ugrađenog betona. Za pravilan prenos prianjajućih sila između čelika i betona neophodan je odgovarajući betonski zaštitni sloj.

Loše prianjanje često rezultuje lomom betona, promenom pozicije armature prilikom ugrađivanja betona, ili izdvajanjem vode i segregacijom betona pre očvršćavanja što smanjuje kvalitet kontakta na donjoj strani betonskih elemenata. Fluidnost i kohezija SCC-a minimiziraju ove štetne uticaje naročito za vršnu armaturu u visokim presecima.

U slučaju vlaknima armiranog betona, prenos sile i dužina ankerovanja u različitim tipovima SCC-a su upoređeni sa vibriranim betonom iste pritisne čvrstoće. Rezultati za SCC su bili na strani sigurnosti u odnosu na vrednosti sračunate prema EN 1992-1 i EN 206-1.

Smičuća otpornost - površina očvršlog SCC-a nakon ugrađivanja i očvršćavanja može da bude prilično glatka i nepropusna. Bez bilo kakvog „tretmana“ površine nakon ugrađivanja prvog sloja, otpornost na smicanje između prvog i drugog sloja može da bude niža nego

kod vibriranog betona i nedovoljna za prihvatanje bilo kakve smičuće sile. Obrade površine, kao što su čišćenje, rapavljenje ili dodavanje usporivača bi trebalo da daju dobre rezultate [1].

Otpornost na požar - beton nije zapaljiv i ne pospešuje širenje plamena. Prilikom izlaganja vatri, nema dima niti emisije otrovnih gasova. Beton je loš toplotni provodnik što omogućuje da efikasno štiti ostale delove konstrukcije od širenja požarnog opterećenja. Zbog navedenih osobina, ocena betona po pitanju otpornosti na požar je najveća moguća: A₁ (Evropska asocijacija za beton).

Otpornost na požar SCC-a je ista kao i kod vibriranog betona.

Generalno, beton sa niskom propustljivošću može da bude izloženiji pojavi prslina pod dejstvom vatre, ali to najčešće zavisi od vrste agregata, kvaliteta betona i sadržaja vlage. SCC može lako da ispuni zahteve za visoku čvrstoću i nisku propustljivost i ponašaće se, u uslovima požara, na isti način kao bilo koji vibrirani beton visoke čvrstoće.

Problem pojave prslina u betonu prilikom izlaganja vatri je znatno smanjen upotrebom polipropilenskih vlakana. Smatra se da je to zbog topljenja vlakana koje apsorbuje cementna matrica. Vlakno nestaje stvarajući prostor gde para može da se širi, te se na taj način smanjuje rizik od pojave prslina. Polipropilenska vlakna su uspešno primenjena i kod SCC-a.

Trajnost betonske strukture je blisko povezana sa propustljivošću površinskog sloja koji bi trebalo da spreči prodor supstanci koje mogu da iniciraju ili pospeše moguće destruktivne procese (CO₂, hloridi, sulfati, voda, kiseonik, baze, kiseline, itd.). U praksi, trajnost vibriranog betona zavisi od izbora materijala i spravljanja betona u istoj meri kao i od nadzora tokom ugrađivanja, zbijanja, obrade završnog sloja i nege. Nepravilnosti u zbijanju površinskog sloja zbog teškoća u vibriranju, jer je uzak prostor između oplata i armature ili kablova, su prepoznate kao ključni faktor slabe trajnosti armiranih betonskih konstrukcija izloženih agresivnom dejstvu sredine.

Tradicionalni beton se zbija vibracijama ili nabijanjem što je diskontinuiran proces. U slučaju unutrašnjeg vibriranja, iako je korektno izvršeno, zapremine betona koja je pod uticajem vibratora ne prima istu energiju zbijanja. Slično je i kod spoljašnjeg vibriranja: rezultujuće zbijanje je suštinski heterogeno i zavisi od udaljenosti od izvora vibracija. Dakle, rezultat vibriranja je nejednako zbijena betonska struktura sa različitom propustljivošću koja olakšava prodor agresivnih supstanci. Posledice nekorektnog vibriranja (segregacija, izdvajanje vode, šupljikavost) još jače utiču na ugradljivost i samim tim na trajnost betonske konstrukcije. Pravilno projektovan i ugrađen, SCC će biti bez ovih nedostataka, što rezultuje konstantno niskom i ujednačenom propustljivošću, ostavljajući manje slabih tačaka za agresivno dejstvo sredine i mnogo boljom ugradljivošću.

Kao pokazatelj trajnosti, postoje različiti testovi za merenje propustljivosti betona u laboratoriji i na terenu, bilo da su deo nacionalnih standarda ili preporučeni od strane RILEMA.

3 KONSTITUTIVNI MATERIJALI I PROJEKTOVANJE MEŠAVINA SCC BETONA

3.1 Konstitutivni materijali

Cement - svi cementi u skladu sa EN 197-1 mogu da se koriste za SCC. Pravilan izbor tipa cementa je diktiran specifičnostima praktične upotrebe samougrađujućeg betona i samo od toga zavisi.

Dodaci koji se često koriste u cilju postizanja potrebne kohezije i otpornosti na segregaciju se svrstavaju u dve grupe: prvu čine inertni ili poluinertni dodaci, dok su u drugoj pucolani i hidraulični dodaci. Oni utiču i na smanjenje toplote hidratacije i termičkog skupljanja. Klasifikacija dodataka je izvršena prema njihovoj reaktivnosti sa vodom:

Tabela 3: Vrste dodataka

Tip I	inertni ili poluinertni	mineralni filer (krečno ili dolomitsko brašno) pigmenti
Tip II	pucolani	leteći pepeo prema EN 450 silikatna prašina prema EN 13263
	hidraulični	granulisana zgura visokih peći

Mineralni filer svojim granulometrijskim sastavom, oblikom i upijanjem vode utiče na potrebnu količinu vode u betonu, što ga čini pogodnim za primenu kod samougrađujućeg betona. Najviše se koristi filer na bazi kalcijum karbonata koji obezbeđuje odlične reološke osobine i dobre finalne površine. Najveću prednost ima frakcija sitnija od 0.125 mm, pri čemu je poželjno da više od 70% prođe kroz sito 0.063 mm.

Leteći pepeo se pokazao kao koristan dodatak SCC-u obezbeđujući povećanje kohezije i manju osetljivost na promene sadržaja vode. Međutim, visok sadržaj letećeg pepela može da stvori pastu toliko kohezivnu da uopšte ne može da teče pod dejstvom sopstvene težine što je u suprotnosti sa zahtevima za SCC.

Silikatna prašina - visok nivo prašinstih čestica i njihov praktično sferičan oblik kao rezultat daju dobru koheziju i povećanje otpornosti na segregaciju betona. Ipak, silikatna prašina redukuje ili eliminiše izdvajanje vode („krvarenje“) što može da izazove ubrzano površinsko očvršćavanje i pravi probleme ako ima prekida isporuke betona, otežavajući, pri tom, finiširanje površina.

Mlevena granulisana zgura visokih peći sadrži reaktivne prašinate čestice niske toplote hidratacije. Ona je već prisutna u nekim cementima iz grupa CEM II ili CEM III, ali se takođe u pojedinim zemljama posebno dodaje u mikser. Visok udeo u betonskoj mešavini može da utiče na njenu stabilnost u smislu da smanjuje čvrstoću i stvara probleme u kontroli konzistencije, dok sporije vezivanje povećava rizik od segregacije.

Drugi dodaci kao metakaolin, prirodni pucolani, brušeno staklo, vazdušno hlađena zgura, itd. se takođe koriste za spravljanje samougrađujućeg betona s tim što njihove efekte treba detaljnije ispitivati.

Agregat normalne težine treba da zadovolji EN 12620 i zahteve trajnosti po EN 206-1. Laki agregat treba da ispunji EN 13055-1. Agregat sitniji od 0,125 doprinosi sadržaju praškastih supstanci u SCC-u.

Sadržaj vlage, upijanje vode, granulacija i variranja prašinstih čestica u agregatu mora da se pažljivo i kontinuirano prate da bi se proizvodio samougrađujući beton konstantnog kvaliteta. Upotreba opranog agregata će dati produkt veće konzistencije. Oblik i granulometrijski sastav agregata su veoma bitni i utiču na pakovanje zrna i sadržaj pora. Neke metode projektovanja mešavina koriste zapreminu šupljina u agregatu za određivanje potrebne zapremine paste i maltera.

Krupan agregat prema EN 12620 je odgovarajući za spravljanje samougrađujućeg betona. U tu svrhu je uspešno primenjivan i laki agregat, ali treba primetiti da on može da ispliva na površinu ako je viskoznost paste niska što ne može da se otkrije preko testa segregacije sa sitom. Razmak armature je odlučujući faktor pri određivanju maksimalnog zrna agregata da se on ne bi zaglavljivao prolazeći kroz postavljenu armaturu. L-box test je pouzdan pokazatelj sposobnosti prolaza SCC mešavine. Veličina maksimalnog zrna bi generalno trebalo da bude ograničena na 12-20 mm, mada je korišćen i krupniji agregat. Granulometrijski sastav i oblik krupnog agregata direktno utiču na tečenje i sposobnost prolaza SCC-a. Što su zrna agregata loptastija manje će se zaglavljivati i tečenje će biti bolje zbog manjeg unutrašnjeg trenja.

Sitan agregat (pesak) ima znatno veći uticaj na svojstva svežeg samougrađujućeg betona od krupnog agregata. Frakcije sitnije od 0,125 mm ulaze u sastav prašinstih čestica paste i trebalo bi ih uračunati u odnos voda/prašinate čestice. Velika zapremina paste u SCC-u pomaže smanjenju unutrašnjeg trenja, ali je veoma važno pravilno odrediti granulometrijski sastav.

Reciklirani agregat - njegovom upotrebom se rešava problem otpadnog materijala i štede prirodni izvori. U recikliranju građevinskog otpada prednjače Holandija i Danska (sa 85% recikliranog građevinskog otpada) a slede ih Belgija i Nemačka (sa 75%). U evropskoj regulativi, agregati dobijeni recikliranjem su podgrupa agregata dobijenih iz sporednih izvora i podležu normama EN 12620, EN 13055-1 i EN 13242. Veoma interesantna i još uvek nedovoljno istražena je mogućnost korišćenja recikliranog agregata u proizvodnji SCC-a. Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj je 2008. odobrilo naučni projekat koji se realizuje na građevinskim fakultetima u Nišu, Beogradu i Novom Sadu, sa ciljem da se ispita mogućnost primene recikliranog agregata u građevinarstvu.

Aditivi – superplastifikatori ili reduktori vode visokog ranga su suštinski važne komponente SCC-a. Modifikatori viskoziteta se takođe koriste da bi se smanjila segregacija i osetljivost mešavine na promenljivost ostalih konstituenata, posebno sadržaja vlage. Drugi aditivi kao što su aeranti, ubrzivači ili retarderi mogu da se koriste na isti način kao i u vibriranom betonu, s tim što treba da postoje preporuke proizvođača o upotrebi u skladu sa EN 934-2. Izbor aditiva za optimalne performanse betona je uslovljen njegovim fizičkim i hemijskim osobinama. Naime, jako su uticajni faktori poput finoće, sadržaja karbonata, alkalija ili trikalcijum-aluminata (C_3A), pa se preporučuje da se pažljivo prouči svaka eventualna izmena vrste ili količine aditiva.

Superplastifikatori/reduktori vode visokog ranga – većina proizvođača aditiva ima ponudu prilagođenu zahtevima potrošača. Aditiv treba da omogući potrebno smanjenje vode i fluidnost, ali isto tako da postigne efekat disperzije tokom vremena predviđenog za transport i ugrađivanje. Zahtevana retenzija (zadržavanje) konzistencije zavisi od načina ugrađivanja. Prefabrikovani beton zahteva kraće vreme retenzije od betona koji se transportuje i ugrađuje na licu mesta.

Modifikatori viskoziteta su aditivi koji menjaju koheziju SCC-a bez značajne promene fluidnosti. Koriste se za minimiziranje uticaja promene sadržaja vlage, prašinstih čestica u pesku ili njegove granulometrije, čineći da SCC bude izdržljiviji, tj. manje osetljiv na variranja u količini ili osobinama ostalih konstituenata. To ne znači da se njihovom upotrebom umanjuje potreba za dobrim projektovanjem betonskih mešavina i pažljivim odabirom materijala.

Aeranti se koriste u SCC-u da obezbede otpornost na mraz. Takođe mogu da poboljšaju finišenje ravnih površina dok je uvlačenje vazduha uglavnom korisno za stabilizovanje niskog sadržaja prašinstih čestica kod samougrađujućih betona nižih čvrstoća.

Pigmenti prema EN 12878 mogu da se uspešno koriste i kod SCC-a kao i kod vibriranog betona, ali obzirom da utiču na osobine betona u svežem stanju moraju se uraditi prethodne probe. Generalno, zbog visoke fluidnosti SCC-a, disperzija pigmenta je bolja i boja uniformnija nego kod vibriranih betona. Kako SCC ima veći sadržaj paste potrebna je i veća doza pigmenta za postizanje zahtevane boje.

Vlakna – korišćena su i čelična i polimerna vlakna kod samougrađujućeg betona, mada ona smanjuju sposobnost tečenja i sposobnost prolaza koroz armature. Stoga su neophodne prethodne probe da bi se odredili optimalni tip, dužina i količina za postizanje željenih osobina kako svežeg, tako i očvrslog betona. Polimerna vlakna mogu da poboljšaju stabilnost betonske mešavine u smislu da sprečavaju sleganje i pojavu prslina usled plastičnog skupljanja betona. Čelična ili duga polimerna vlakna se koriste za modifikaciju žilavosti očvrslog betona. Njihova dužina i broj se određuju prema maksimalnom zrnu agregata i strukturnim zahtevima.

Voda – prema EN 1008, s tim što recikliranu, industrijsku vodu treba posebno ispitati [1].

3.2 Projektovanje mešavina

Ne postoji standardni metod za projektovanje SCC mešavina, već su brojne akademske institucije, kompanije koje se bave proizvodnjom prefabrikovanih betonskih elemenata, kao i proizvođači građevinske hemije razvili sopstvene recepture. Recepture često koriste zapreminu kao ključni parametar, zbog važnosti popunjavanja šupljina između zrna agregata. Neke metode formiraju optimalnu granulometrijsku krivu, a neke „propisuju“ optimalno tečenje i stabilnost prvo paste, a zatim i maltera pre dodavanja agregata. Evropski vodič za SCC [1] daje sledeću preporuku za spravljanje mešavine uz napomenu da jedan ili više konstituenata mogu da „izađu“ van okvira navedenih u tabeli 4:

Tabela 4: Uobičajene vrednosti sastojaka SCC-a prema Evropskom vodiču za SCC:

sastojak	uobičajena vrednost po masi [kg/m ³]	uobičajena vrednost po zapremini [l/m ³]
praškaste čestice	380 - 600	
pasta		300 - 380
voda		150 - 210
krupan agregat		270 - 360
sitan agregat (pesak)	48-55% od težine ukupnog agregata	
vodopraškasti faktor		0,85-1,10

Hajime Okamura poznat kao „otac SCC-a“, daje sledeće preporuke za projektovanje mešavina [5]:

1. Krupan agregat fiksirati na 50% u odnosu na zapreminu čvrstih sastojaka,

2. Sitan agregat fiksirati na 40% u odnosu na zapreminu malterske komponente (praškasta komponenta + pesak + voda),

3. Vodopraškasti faktor (zapreminski odnos) uzeti u rasponu 0,9 – 1,0 u zavisnosti od svojstva unetih praškastih čestica,

4. Dozažu superplastifikatora i konačnu vrednost vodopraškastog faktora usvojiti tako da zadovolje sposobnost „samozbijanja“.

U tabelama 5, 6 i 7 su prikazani tipični primeri projektovanja mešavina u Japanu, Evropi i SAD. Generalno se mogu izdvojiti tri tipa mešavina: „praškasti tip“ sa povećanim sadržajem praškastih čestica, „VMA tip“ kod koga su korišćeni aditivi za modifikaciju viskoziteta i „kombinovani tip“ koji sadrži i veći procenat praškastih čestica i modifikatore viskoziteta u saglasnosti sa strukturnim i konstrukcijskim zahtevima, dostupnim materijalom

Tabela 5: Primeri SCC mešavina u Japanu

sastojak [kg]	mix J1 (praškasti tip)	mix J2 (VMA tip)	mix J3 (kombinovani tip)
voda	175	165	175
portland cement	530	220	298
leteći pepeo	70	0	206
ložišna zgura	0	220	0
silikatna prašina	0	0	0
sitan agregat	751	870	702
krupan agregat	789	825	871
HRWR	9	4.4	10.6
VMA	0	4.1	0.0875

Mešavina J1 je korišćena za izgradnju LNG rezervoara, J2 za masivne kesone-temelje mosta, dok je J3 uobičajena za armirano-betonske konstrukcije.

Tabela 6: Primeri SCC mešavina u Evropi

sastojak [kg]	mix E1	mix E2	mix E3
voda	190	192	200
portland cement	280	330	310
leteći pepeo	0	0	190
krečnjačko brašno	245	0	0
ložišna zgura	0	200	0
silikatna prašina	0	0	0
sitan agregat	865	870	700
krupan agregat	750	750	750
HRWR	4,2	5,3	6,5
VMA	0	0	7,5

Tabela 7: Primeri SCC mešavina u SAD:

sastojak [kg]	mix U1	mix U2	mix U3
voda	174	180	154
portland cement	408	357	416
leteći pepeo	45	0	0
ložišna zgura	0	119	0
silikatna prašina	0	0	0
sitan agregat	1052	936	1015
krupan agregat	616	684	892
HRWR [ml]	1602	2500	2616
VMA [ml]	0	0	542

i ograničenjima u proizvodnji betona. U poređenju sa običnim betonom, sva tri tipa mešavine imaju povećan sadržaj superplastifikatora [7].

I u našoj zemlji se rađena određena ispitivanja i objedinjuju pojedinačna iskustva u projektovanju mešavina, mada zvanične preporuke još ne postoje. U tabeli 8 je dat primer mešavine projektovane na Građevinskom fakultetu u Beogradu [5].

Tabela 8: Primer SCC mešavine u Srbiji:

cement	$m_c = 500 \text{ kg/m}^3$; $v_c = 0.1667 \text{ m}^3$
silikatna prašina	$m_{sp} = 50 \text{ kg/m}^3$; $v_{sp} = 0.0227 \text{ m}^3$
voda	$m_v = 219 \text{ kg/m}^3$; $v_v = 0.2190 \text{ m}^3$
superplastifikator	$m_{hd} = 9 \text{ kg/m}^3$; $V_{hd} = 0.0090 \text{ m}^3$
kameno brašno	$m_f = 145 \text{ kg/m}^3$
frakcija 0-2 mm	$m_{0-2} = 495.0 \text{ kg/m}^3$
frakcija 2-4 mm	$m_{2-4} = 251.1 \text{ kg/m}^3$
frakcija 4-8 mm	$m_{4-8} = 264.3 \text{ kg/m}^3$
frakcija 8-11,2 mm	$m_{8-11} = 214.8 \text{ kg/m}^3$
frakcija 11,2-16 mm	$m_{11-16} = 280 \text{ kg/m}^3$

4 METODE ISPITIVANJA SAMOUGRAĐUJUĆEG BETONA

SCC je osmišljen da u potpunosti zadovolji standard EN 206-1 u pogledu zapremine mase, porasta čvrstoće, finalne čvrstoće i trajnosti. Obradljivost SCC-a

je veća od najviše klase konzistencije opisane standardom EN 206-1 i može se okarakterisati sledećim osobinama:

- sposobnost tečenja, ispunjavanja (filling ability),
- sposobnost prolaza između armaturnih šipki bez zaglavljivanja (passing ability),
- otpornost na segregaciju tj. stabilnost mešavine (segregation resistance).

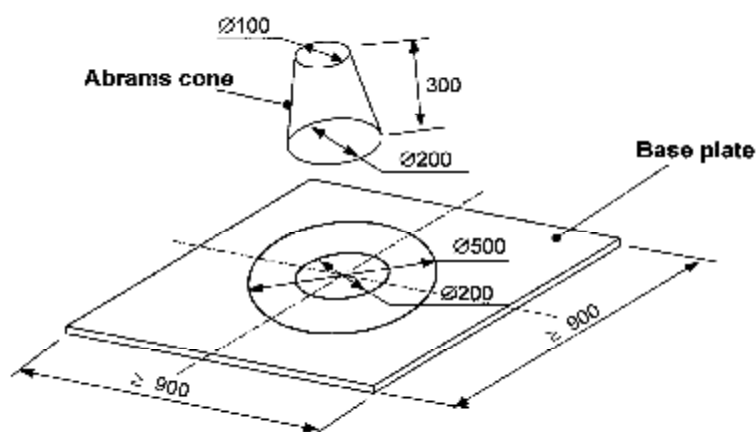
Betonska mešavina će biti klasifikovana kao samo-ugrađujući beton jedino ako su zahtevi za sve tri karakteristike u potpunosti ispunjeni. To ukazuje da prilikom ispitivanja treba da se kombinuje više predloženih metoda. Razvijeno je više različitih metoda ispitivanja konzistencije SCC-a, ali nijedna od njih ne određuje sve relevantne aspekte obradljivosti, tako da se prilikom ispitivanja mora koristiti više metoda. Metode ispitivanja su navedene u tabeli 9 [8].

4.1 SLUMP-FLOW TEST I $T_{50\text{cm}}$ TEST

Ovo je najčešće korišćen test koji daje dobre rezultate u određivanju sposobnosti pokretljivosti sveže betonske mase – tečenja, ali ne pokazuje sposobnost prolaza između šipki armature. Takođe, može da naznači otpornost betona prema segregaciji. Argument protiv ovog testa je da u potpunosti slobodno razlivanje betona, neometeno bilo kakvim granicama, ne odgovara stvarnim uslovima u praksi, ali se uspešno može iskoristiti za procenu konzistencije fabrički spravljenog betona koji se doprema na gradilište. Aparatura prema EN 12350-2 data je na slici 2.

Tabela 9: Metode ispitivanja konzistencije samougrađujućih betona

	Metod ispitivanja	Cilj ispitivanja
1	Slump-flow (test konzistencije)	sposobnost tečenja
2	$T_{50\text{cm}}$ slump-flow	sposobnost tečenja
3	J-ring (J-prsten)	sposobnost prolaza
4	V-funnel (V-levak)	sposobnost tečenja
5	V-funnel za $T_{5\text{min}}$	otpornost na segregaciju
6	L-box (L-kutija)	sposobnost prolaza
7	U-box (U-kutija)	sposobnost prolaza
8	Fill-box (kutija za punjenje)	sposobnost prolaza
9	GTM Screen stability test (GTM sito)	otpornost na segregaciju
10	Orimet test	sposobnost tečenja



Slika 2. Aparatura za slump-flow test

Procedura prilikom ispitivanja praktično predstavlja kombinaciju ispitivanja sleganja po Abramsu i rasprostiranja po Grafu. Nakon podizanja napunjenog metalnog konusa treba izmeriti vreme potrebno da beton dostigne krug prečnika 500 mm (to je T_{50} vreme), kao i konačno dostignuti prečnik rasprostiranja. Takođe, treba uočiti da li se na krajevima betona izdvaja cementna pasta bez krupnog agregata. Što je veća slump-flow (SF) vrednost, veća je i sposobnost betona da pod sopstvenom težinom ispuni oplatu. Najmanja zahtevana vrednost za SCC je 650 mm. Niže vreme T_{50} ukazuje na bolju sposobnost tečenja. Za inženjersku praksu predloženo je 3 do 7 sekundi. U slučaju značajnije segregacije, većina krupnog agregata će ostati u centralnom delu betona, a cementna pasta će se izdvojiti na periferiji. Ako je segregacija zanemarljiva, na samoj ivici betona se može uočiti malterska granica bez krupnog agregata. Odsustvo ovih fenomena ne znači da segregacije uopšte neće biti jer se ona može pojaviti i nakon dužeg vremenskog perioda [9].

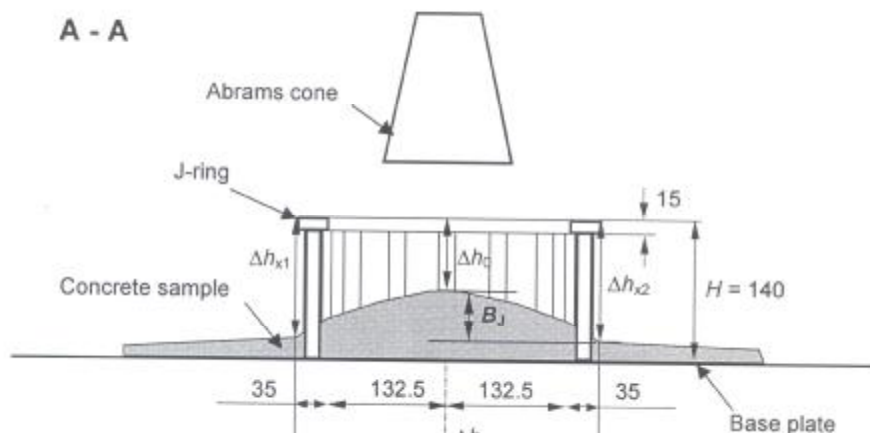
4.2 J-RING TEST

Test je razvijen na Univerzitetu Pejlsi. Koristi se za određivanje sposobnosti prolaza betona kroz armaturne šipke. Aparatura (slika 3) obuhvata otvoreni čelični prsten

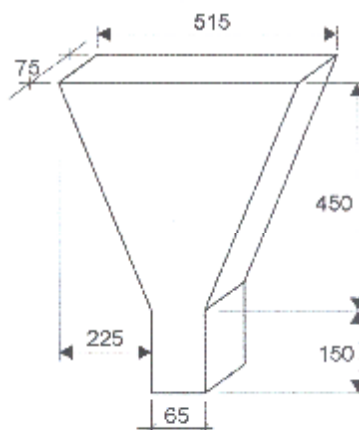
koji je vertikalno izbušen za prihvatanje armaturnih šipki. Armatura može da bude različitog prečnika i na različitom rastojanju, mada je pogodan standardni razmak koji odgovara trostrukoj veličini nominalno najvećeg zrna agregata. J-ring test može da se upotrebi zajedno sa slump-flow testom, Orimet testom ili eventualno V-funnel testom da bi se istovremeno utvrdile sposobnost tečenja i prolaza između armature. Orimet vreme i/ili slump-flow imaju ustaljenu proceduru, dok se armatura kod J-ring testa može postaviti na bilo kom razmaku da bi se uradio manje ili više „strog“ test. Meri se razlika u visini betona unutar i van prstena što pokazuje nivo sposobnosti prolaza betona. Pokazatelji tečenja i sposobnosti prolaza betona između armaturnih šipki dobijeni na ovaj način nisu međusobno nezavisni jer na izmereno tečenje svakako utiče i količina između armature „zaglavljeno“ betona. Što je veća razlika u visini unutar i izvan prstena to je manja sposobnost prolaza betona.

4.3 V-FUNNEL TEST I V-FUNNEL TEST ZA T_{5min}

Test je u Japanu razvio Ozawa. Aparatura se sastoji od V-levka, prikazanog na slici 4. Alternativna varijanta, O-levak sa kružnim presekom se takođe koristi u Japanu. Ispitivanje služi da se utvrdi sposobnost tečenja samougrađujućeg betona sa maksimalnim zrnem 20 mm.



Slika 3. Kombinacija J-prstena i slump-flow testa

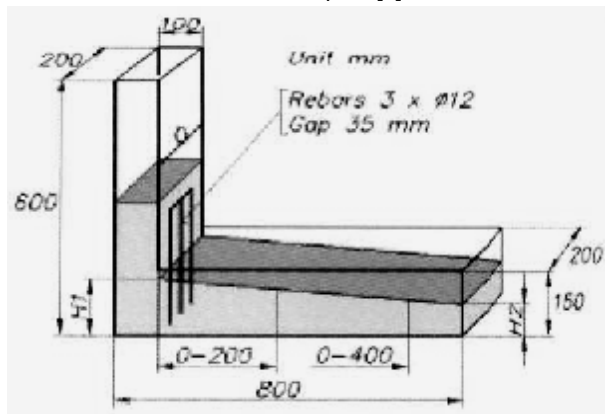


Slika 4. Izgled V-levka

Levak se puni sa oko 12 dm³ betona i meri vreme potrebno da beton prođe kroz levak. Što je kraće izmereno vreme, to je sposobnost tečenja betona bolja. Zadovoljavajućim za SCC se smatra vreme od 10 sekundi. Produženo vreme tečenja ukazuje na moguću sklonost betona da „zablokira“ između šipki armature. Nakon ovoga, levak se može ponovo napuniti i ostaviti 5 minuta da beton odstoji. Ukoliko se pritom javi segregacija, vreme tečenja (T_{5min}) koje se ponovo meri, biće znatno povećano. Test može da ukaže na još neke osobine betona: ako ima previše krupnog agregata, beton će se zaglavljivati. Dugo vreme tečenja se takođe dovodi u vezu sa niskom deformabilnošću, što se i očekuje od visoko viskoznih pasti sa velikim unutrašnjim trenjem [9].

4.4 L-BOX TEST

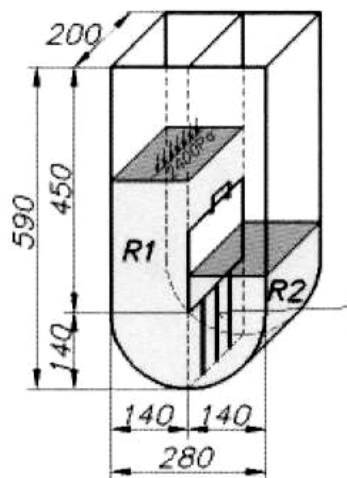
Ovaj test je razvio Peterson na bazi japanskih ispitivanja betona pod vodom. Test služi za procenu tečenja betona i sklonosti „zaglavljivanja“ između šipki armature. Aparatura se sastoji iz kutije „L“ oblika, pravougaonog poprečnog preseka, sa horizontalnim i vertikalnim delom razdvojenim pokretnim poklopcem (izlazom) ispred koga se nalazi vertikalna armatura. Vertikalni odeljak se napuni betonom, a zatim se poklopac podigne da se omogući tečenje betona u horizontalni deo. Kad tečenje prestane meri se visina betona na kraju horizontalnog dela i ostatka u vertikalnom delu (H_2/H_1 na slici 5). To je pokazatelj sposobnosti prolaza betona između armature, a fizički predstavlja nagib betona u mirovanju. Horizontalni odeljak može da bude obeležen na 200 i 400 mm od izlaza pa da se meri vreme dok beton dostigne ove repere. Ovo vreme se označava sa T_{20} i T_{40} i pokazatelj je tečenja, mada konkretne vrednosti još nisu dogovorene. Armatura, u principu, može da bude različitog prečnika i postavljena na različitim razmacima, mada se preporučuje, kao i kod običnog betona, razmak jednak trostrukoj vrednosti nominalno najvećeg zrna agregata. Menjanjem razmaka armature se menja i „strogost“ testa. L-box test je najčešće korišćen test, kako u laboratorijskim tako i u gradilišnim uslovima jer određuje dve bitne karakteristike samougrađujućih betona. Pojava segregacije može se uočiti vizuelno, a zatim i ispitati na horizontalnom delu. Nije sa sigurnošću utvrđeno kako zidovi kutije utiču na tečenje betona, ali ovakva postava, do nekog stepena pokazuje šta se zaista dešava sa betonom u oplati [8].



Slika 5. L-box aparatura

4.5 U-BOX TEST

Test je razvijen u japanskom Tehnološkom istraživačkom centru Tajsej korporacije. Koristi se za procenjivanje sposobnosti tečenja samougrađujućih betona. Aparatura obuhvata sud koji je središnjom pregradom podeljen na dva odeljka (označeni sa R_1 i R_2 na slici 6), između kojih se nalazi klizni poklopac (izlaz). Armaturene šipke sa nominalnim prečnikom 13 mm su postavljene na izlazu sa osovinskim razmakom od 50 mm. Levi odeljak se napuni sa oko 20 dm³ betona, zatim se izlaz otvori i beton teče naviše u drugi deo. Meri se visina betona u oba dela. Alternativni oblik kutije, ali sa istim principom rada predlaže Japansko društvo građevinskih inženjera. Test obezbeđuje dobru direktnu procenu tečenja. Kada bi beton imao svojstva vode njegov nivo bi u oba dela U-kutije bio jednak, tj. razlika H_1-H_2 bi bila jednaka nuli. Zbog toga što je razlika nivoa betona u delovima U-kutije bliža nuli, to je bolje tečenje i sposobnost prolaza betona. Razmak između šipki armature se može smatrati suviše malim, a otvoreno je i pitanje do koje visine je penjanje betona prihvatljivo u praksi.

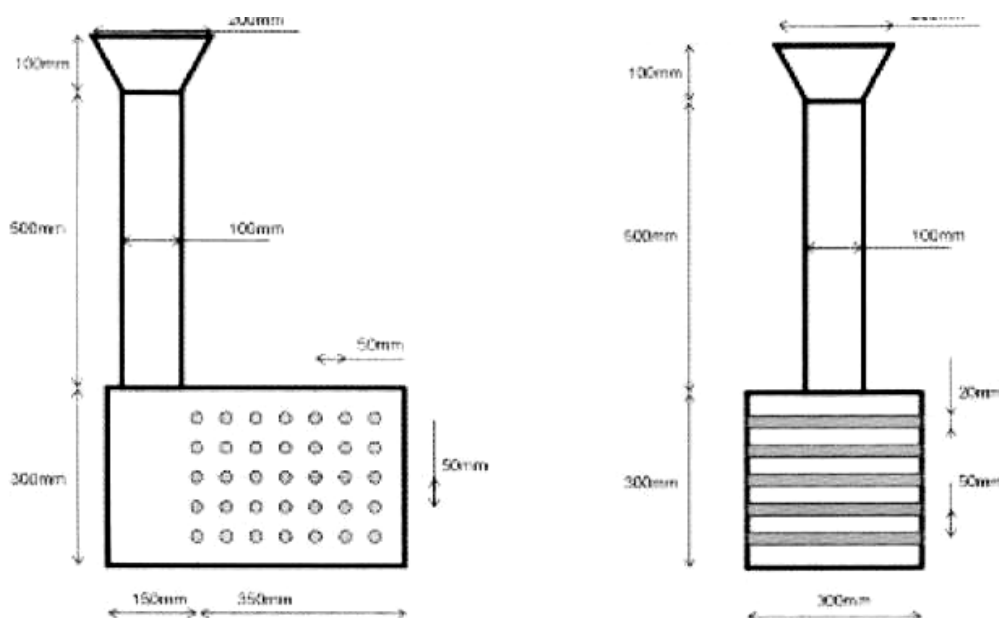


Slika 6. Konstrukcija U-kutije

4.6 FILL-BOX TEST

Test je poznat i kao „Kadžima test“. Koristi se za određivanje tečenja samougrađujućeg betona sa maksimalnim zrnom agregata 20 mm. Aparatura se sastoji iz providnog kontejnera, ravne i glatke površine u kome je smešteno 35 prepreka napravljenih od PVC-a, prečnika 20 mm i centralnim rastojanjem 50 mm, slika 7. Na gornjoj strani je postavljena dovodna cev sa levkom. Kontejner se puni betonom kroz dovodnu cev i razlika u visini betona između dve strane kontejnera je mera tečenja.

Test je teško izvoditi na mesu ugradnje betona zbog složenosti aparature i velike količine betona (oko 45 dm³). Daje dobre pokazatelje osobina samougrađujućeg betona. Čak i mešavine sa dobrim tečenjem će pokazati loše rezultate na testu ako su skloni segregaciji. Smatra se da je samougrađujući beton utoliko boljih svojstava što je veća ispunjenost kutije, pod uslovima u kojima se test obavlja.



Slika 7. Poprečni preseki kutije za punjenje

4.7 GTM SCREEN STABILITY TEST

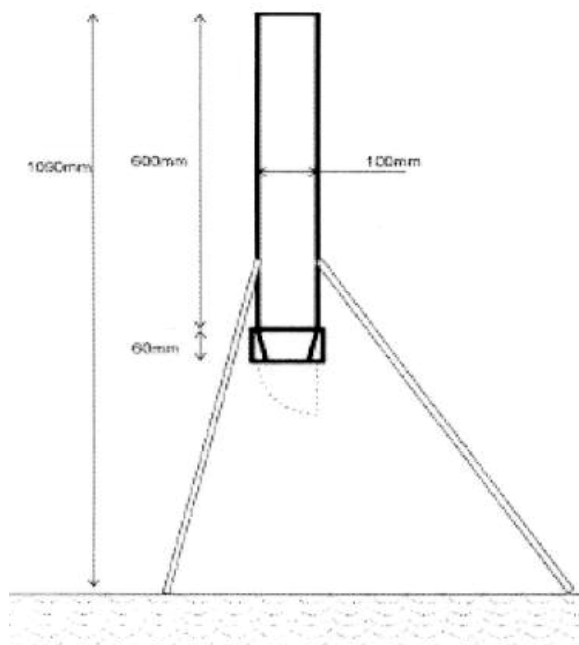
Ovaj test je razvijen u Francuskoj (GTM) u cilju ispitivanje otpornosti SCC-a na segregaciju. Potrebno je uzeti 10 dm³ betona i pustiti da odstoji određeno vreme posle kojeg se polovina uzorka sipa na sito otvora 5 mm i prečnika okvira 350 mm, koje je postavljeno na odgovarajući sud sa dnom. Posle dva minuta meri se težina maltera koji je prošao kroz sito i izražava kao procenat prolaska.

Na osnovu iskustva, inženjeri koji su koristili ovaj test kažu da je veoma pouzdan i efektivan način za ispitivanje stabilnosti samougrađujućih betona. Iskustveni podaci pokazuju da ukoliko procenat prolaza maltera kroz sito iznosi 5-15% težine uzorka otpornost na segregaciju je sasvim zadovoljavajuća. Ispod 5% otpornost je velika, a iznad 15% i pogotovo iznad 30% postoji velika segregacija.

4.8 ORIMET TEST

Orimet test je razvijen na Univerzitetu Pejlsli kao metod za ocenjivanje visoko obradljivih, tekućih, svežih betonskih mešavina. Aparatura je prikazana na slici 8. Zasniava se na principu reometra sa otvorom. Orimet aparat se sastoji iz vertikalne, livene cevi na čijem se donjem kraju nalazi zamenjivi deo oblika obrnutog konusa sa vratancima za brzo zatvaranje i otvaranje. Obično ovaj deo ima unutrašnji prečnik 80 mm što je pogodno za ocenjivanu tečenja betona sa agregatom do 20 mm. Testiranje podrazumeva jednostavno punjenje Orimet aparata betonom, otvaranje vratanca i merenje vremena za koje će se pojaviti svetlost na dnu (kada se gleda odozgo). Test je brz, a aparatura jednostavna i laka za rukovanje. Testom se određuje sposobnost teče-

nja betona pri čemu kraće vreme ukazuje na bolju sposobnost tečenja. Za samougrađljive betone vreme tečenja od 5 sekundi i kraće smatra se zadovoljavajućim. Duže vreme tečenja, zbog oblika obrnutog konusa na kraju cevi može da bude znak segregacije ili sklonosti betona da se zaglavi između šipki armature.



Slika 8. Aparatura za Orimet test

Evropski vodič za samougrađujući beton [1] navodi sledeće kriterijume za ocenjivanje testova, tabela 10.

Tabela 10: Kriterijumi za ocenu testova svežeg SCC-a

osobina	kriterijum
Slump-flow klasa SF1	$\geq 520 \text{ mm}, \leq 700 \text{ mm}$
Slump-flow klasa SF2	$\geq 640 \text{ mm}, \leq 800 \text{ mm}$
Slump-flow klasa SF3	$\geq 740 \text{ mm}, \leq 900 \text{ mm}$
dozvoljeno odstupanje za Slump flow	$\pm 80 \text{ mm}$ od ciljne vrednosti
V-funnel klasa VF1	$\leq 10 \text{ s}$
V-funnel klasa VF2	$\geq 7 \text{ s}, \leq 27 \text{ s}$
dozvoljeno odstupanje za V-funnel test	$\pm 3 \text{ s}$
L-box klasa PA1	$\geq 0,75$
L-box klasa PA2	$\geq 0,75$
dozvoljeno odstupanje za L-box test	ne više od 0,05 ispod ciljne vrednosti
otpornost na segregaciju, klasa SR1	≤ 23
otpornost na segregaciju, klasa SR2	≤ 18

5 PRIMENA SAMOUGRAĐUJUĆEG BETONA

Nakon višegodišnjih istraživanja ponašanja i osobina samougrađujućeg betona krenulo se sa izgradnjom najrazličitijih objekata i to najpre u Japanu. U ovom radu će biti predstavljeni neki od najznačajnijih.

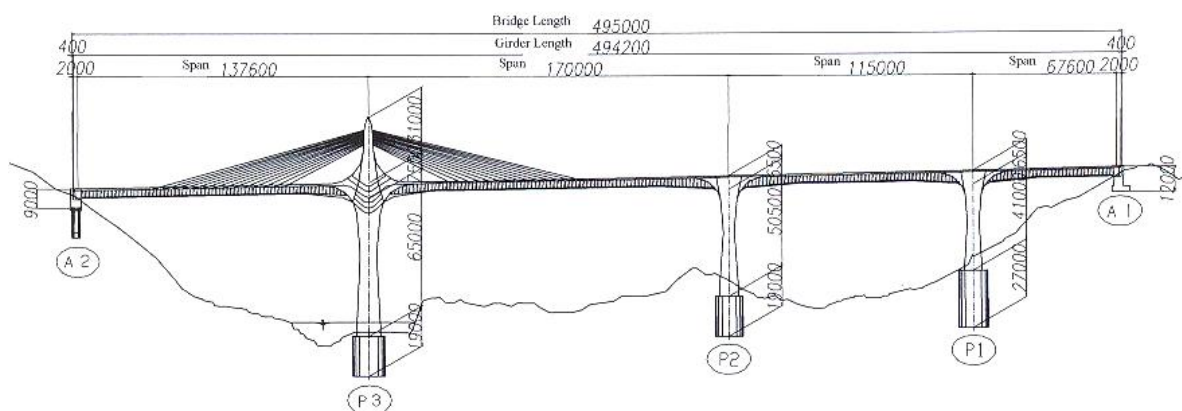
5.1 Most Ritto, Japan

Nalazi se na autoputu, najviši srednji stub je visok 65 m. Projektom je zahtevana čvrstoća betona pri pritisku

50 N/mm² a armature pri zatezanju 685 N/mm² zbog uticaja seizmike, slika 9 [7].

5.2 Viadukt Higashi Oozu, Japan

Prefabrikovani, prethodnonapregnuti T-nosači su korišćeni kao glavni nosači na viaduktu. U početku je planiran običan, vibrirani beton sa rasprostiranjem (slump-flow) 80 mm. Međutim, pokazalo se da je on nepraktičan zbog ogromnih dimenzija nosača, pa se SCC nametnuo kao odlično rešenje, slika 10 [7].



Slika 9. Most Ritto



Slika 10. Glavni nosači viadukta Higashi Oozu

5.3 Rezervoar LNG (Liquid Natural Gas), Japan

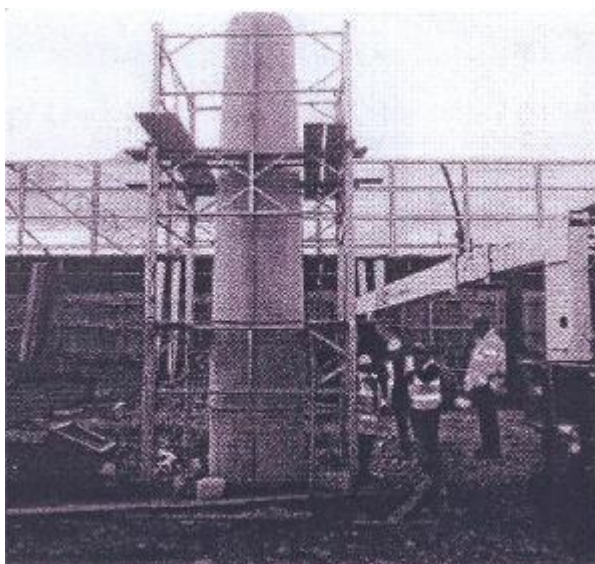
Kapacitet rezervoara je 180000 m^3 , gde je zahvaljujući primeni samougrađujućeg betona (sastav je dat u tabeli 3), čvrstoće 60 N/mm^2 debljina zidova smanjena sa prvobitnih 90 na 60 cm, vreme izgradnje sa 22 na 18 meseci, a broj radnika sa 150 na 50 [5].



Slika 11. Rezervoar kompanije LNG

5.4 Shopping centre Midsummer Place, London

To je prva primena SCC-a u Velikoj Britaniji, jer su stubovi bili tako gusto armirani da je potpuno nepraktično bilo koristiti konvencionalnu tehniku betoniranja. Betoniranje eliptičnih stubova kod kojih je zapremina betona iznosila oko 16 m^3 je trajalo po 30 min. Postignuta



Slika 12. Jedan od stubova Midsummer Place shopping centra

čvrstoća betona nakon 24h je bila 50 N/mm^2 , a nakon 28 dana 70 N/mm^2 . Vreme betoniranja je skraćeno za 40%, a cena radova smanjena za oko 10% zahvaljujući takvom kvalitetu površine stubova, koja je troškove završne obrade svela na minimum [5].

5.5 Avalski toranj, Srbija

Televizijski toranj koji je svakako jedan od simbola naše zemlje, trenutno je u izgradnji po čijem završetku treba da bude visok 203 m i predstavlja najvišu građevinu na Balkanu. Toranj je prvobitno izgrađen 1965. godine, a porušen je 29.04.1999.g tokom bombardovanja. Za novi toranj, koji će izgledati identično kao prethodni, zahtevane su marke betona MB 50 i MB 60. Ovo je najznačajnija primena SCC-a u Srbiji.



Slika 13. Avalski toranj prvobitno i danas

6 ZAKLJUČAK

Samougrađujući beton je doneo značajan prosperitet industriji betona omogućivši kvalitetniju i bržu gradnju, prihvatljivu kako sa ekološkog tako i sa veoma značajnog aspekta zdravstvene zaštite radnika. Proteklih 20 godina u svetu su održani brojni kongresi i seminari posvećeni ovoj problematici i pokretani različiti naučno-istraživački projekti u okviru kojih su proučavane i unapređivane osobine SCC-a. Kako ovaj beton određuju karakteristike u svežem stanju: konzistencija, sposobnost prolaza kroz armaturu bez zaglavljivanja i otpornost na segregaciju, to je propisano desetak različitih testova za njihovo proveravanje, s tim što mora da se kombinuje nekoliko testova zajedno da bi se sve navedene osobine ispitalo. Osnovni konstitutivni materijali su isti kao i kod vibriranog betona, dok SCC zahteva obavezno prisustvo veće količine praškastih čestica i aditive najnovije generacije (za modifikaciju viskoziteta i redukciju vode). Spravljanje je jako jednostavno, koristi se običan mikser, ali je neophodno kontrolisati sadržaj vlage/vode (mikser mora da bude suv i čist, obavezno se proverava sadržaj vlage u agregatu) na koji je SCC posebno osetljiv. Nakon opsežnih istraživanja krenula je i praktična primena SCC-a. Postao je nezamenljiv u slučajevima gusto postavljene armature, kratkih rokova gradnje, zahtevane visoke čvrstoće. Dok širom sveta niču kapitalni objekti, naša zemlja se, sledeći svetska saznanja i iskustva, sopstvenim istraživanjima polako priključuje korisnicima SCC-a kao „najznačajnije tekovine betonske industrije u XX veku“ [3].

ZAHVALNOST

U radu je prikazan deo istraživanja koje je pomoglo Ministarstvo za nauku Republike Srbije u okviru tehnološkog projekta TR-16004 pod nazivom: "Istraživanje

savremenih betonskih kompozita na bazi domaćih sirovina, sa posebnim osvrtom na mogućnosti primene betona sa recikliranim agregatom u betonskim konstrukcijama"

7 LITERATURA

- [1] *European Guidelines for Self-Compacting Concrete*; ERMCO,EFNARC, EFCA, CEMBUREAU; pp 63; May 2005.
- [2] Muravljev M.: *Građevinski materijali I*; Građevinska knjiga; Beograd; 2005.
- [3] Khrapko M.: *SCC-A Solution for Technology Hungry Concrete Construction*; CBE Consultancy, Ltd
- [4] Bin Azmi A.: *The properties and flexural behaviour of Self-Compacting Concrete using palm oil fuel ash and admixture*; Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia; april 2008.
- [5] Živković S.: *Svojstva i tehnologija samozbijajućeg betona*; Građevinski kalendar; 2007; str. 234-304.
- [6] Larrard F.,Ferraris C.F., Sedran T.: *Fresh Concrete: A Herschel-Bukley Material*; Materials and Structures; 31 [211] pp. 494-498; 1998.
- [7] Ouchi M., Nakamura S., Osterberg T., Hallberg S., Lwin M.: *Applications of Self- Compacting Concrete in Japan, Europe and The United States*; pp. 20; 2006.
- [8] Grdić Z., Despotović I., Topličić-Ćurčić G.: *Metode ispitivanja SCC betona prema standardu EFCA (evropske asocijacije za beton)*; Simpozijum DIMK; Zbornik radova; str. 515-522; Divčibare 2008.
- [9] Grdić Z., Despotović I., Topličić-Ćurčić G.: *Properties of Self-Compacting Concrete with different types of additives*; Facta Universitatis, Series Architecture and Civil Engineering, Vol 6, N°2; pp. 173 -177; 2008.

REZIME

PRVIH 20 GODINA SAMOUGRAĐJUJUĆEG BETONA

Iva DESPOTOVIĆ
Zoran GRDIĆ
Gordana TOPLIČIĆ-ĆURČIĆ
Nenad RISTIĆ

Prva samougrađujuća betonska mešavina je projektovana 1988. godine na Tokijskom Univerzitetu u Japanu. Proglašen „revolucionarnim“ otkrićem betonske industrije, zaokupio je pažnju naučne javnosti, pa je u narednih 20 godina pokrenut niz projekata i eksperimenata i održano više naučnih skupova na kojima su prezentovani postignuti rezultati. U radu je dat pregled osobina samougrađujućeg betona, konstitutivnih materijala, metoda ispitivanja i najznačajnijih izvedenih objekata.

Ključne reči: samougrađujući beton, konstitutivni materijali, metode ispitivanja, izvedeni objekti

SUMMARY

FIRST 20 YEARS OF SELF COMPACTING CONCRETE

Iva DESPOTOVIĆ
Zoran GRDIĆ
Gordana TOPLIČIĆ-ĆURČIĆ
Nenad RISTIĆ

First self-compacting concrete mix is made in University of Tokyo in Japan. Named as „revolutionar“ discover of concrete industry, it took attend of science world, in next 20 years there was a plenty of projects, experiments, and science reunions where results are presented. This paper consists rewiw of properties of self-compacting concrete, constituent materials, test methods and realised objects.

Key words: self-compacting concrete, constituent materials, test methods, realised objects

PRIMENA MIKROSKOPSKIH METODA U ANALIZI MIKROSTRUKTURE RAZLIČITIH TIPOVA BETONA SA RECIKLIRANIM AGREGATOM

Anja TERZIĆ
Ljubica PAVLOVIĆ

PREGLEDNI RAD
UDK: 666.972.12 = 861

1 UVOD

Poslednjih decenija je sve zastupljeniji trend korišćenja agregata dobijenog recikliranjem otpadnog betona (ARB). Tako dobijeni kompoziti se nazivaju betoni sa recikliranim agregatom BRA (engl. *recycled aggregate concretes – RAC*). Razlog nastanka ovakvog trenda u proizvodnji betona jeste smanjenje rezervi prirodnog agregata i drastično povećanje cena skladištenja betonskog šuta uz koji ide i problem nedostatka lokacije za skladištenje.

Agregat od recikliranog otpadnog betona ARB (engl. *recycled concrete aggregate – RCA*) se, kao i prirodni, po granulaciji može podeliti u dve osnovne grupe: krupan i sitan. Prvi tip ARB se uspešno upotrebljava u proizvodnji novih betonskih mešavina i kod baza za puteve, dok je primena drugog tipa generalno ograničena zbog njegovog degradirajućeg uticaja (veliko upijanje vode i mala specifična težina) na mehanička i ostala svojstva novog betona.

U BRA mešavini se različiti procentualni udeo prirodnog agregata može zameniti recikliranim. Udeo zamene može biti između 1 i 100 %. Nije svejedno koji se udeo zamene koristi, jer se njegovim pravilnim izborom može dobiti BRA sa svojstvima približno sličnim, boljim ili daleko lošijim od svojstava betona na bazi prirodnog agregata.

Glavni problem primene recikliranih agregata jeste upravo u njihovom promenljivom i neujednačenom kvalitetu. Naime, ne može se uvek garantovati ujednačenost porekla agregata. U slučaju korišćenja agregata nastalog rušenjem konstruktivnih elemenata nekog objekta, njegovo poreklo je vrlo različito i svakako neće biti ujednačenog sastava. Kad se kao reciklirani agregat koriste pre-

fabrikovani betonski elementi koji predstavljaju škart pri proizvodnji (ne zadovoljavaju standarde za ugradnju) ne postoji problem varijabilnosti osobina recikliranog agregata, ali se javlja jedan drugi problem: postojanje nehidratisanog ili nedovoljno hidratisanog cementa u kompozitnoj matrici.

Za razliku od prirodnog agregata reciklirani agregat u svom sastavu sadrži dve komponente: prirodni agregat i za njega vezanu staru cementnu pastu (Slika 1.). Cementna pasta je upravo uzrok loših svojstava recikliranog agregata: manja gustina, visoka absorpciona moć, slaba otpornost na abraziju i visoki udeo sulfata u sastavu. Ovakva svojstva recikliranog agregata negativno utiču na kvalitet konačnog proizvoda – BRA-a i to uglavnom degradiraju mehanička svojstva vezana za čvrstoću i trajnost (elastičnost, skupljanje, tečenje, itd.)¹.



Slika 1. Izgled usitnjenog recikliranog betona: prirodni agregat (*natural aggregate*) i zaostala stara cementna pasta (*attached mortar*)¹.

Adresa autora:

Anja Terzić, Institut za Tehnologiju Nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd, Srbija
Ljubica Pavlović, Institut za Tehnologiju Nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd, Srbija

Udeo stare cementne paste se može minimizirati kontinualnim procesom usitnjavanja u postrojenjima predviđenim za tu delatnost. Što je manja količina zaostale cementne paste kvalitet BRA-a će biti bolji. Na žalost ovakav postupak poskupljuje proizvodnju BRA-a, tako da se pitanje troškova dobijanja i kvaliteta polaznog materijala svakako mora izbalansirati.

Cilj ovog preglednog rada je da se kritički osvrne na aktuelne rezultate do kojih su različiti autori došli u smislu ispitivanja mikrostrukture, a samim tim i stare cementne paste, kao i tzv. tranzitne zone formirane između stare i nove paste. Cilj primene mikroskopskih metoda i metoda analize slike je uspostaviti veze između svojstava BRA-a i procesa koji se dešavaju u tranzitnoj zoni nastaloj upotrebom recikliranog agregata i postojanjem stare cementne paste.

2 PRIKAZ I DISKUSIJA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA IZ AKTUELNE LITERATURE

Glavna razlika između betona na bazi prirodnog agregata BPA i betona na bazi recikliranog agregata BRA je u postojanju stare, zaostale cementne paste vezane za zrna prirodnog agregata u slučaju BRA-a. Ne postoji uobičajeni metod za određivanje udela cementne paste u recikliranom agregatu, ali se u literaturi mogu naći tri često upotrebljavane metode ¹:

1. Tretman sa rastvorom hlorovodonične kiseline koji se sastoji u izdvajanju taloga cementne paste, koja je bila vezana za agregat, u rastvoru hlorovodonične kiseline. Masa taloga se potom može izmeriti.

2. Upotreba cementa specifične boje pri spravljanju BRA-a. Na taj način razlika između stare i nove cementne paste je na planarnom preseku uzorka više nego očigledna i može se jednostavno odrediti primenom neke od metoda analize slike.

3. Termički tretman koji se sastoji u naizmeničnom potapanju uzorka agregata u vodu i potom zagrevanju, što dovodi do odvajanja zaostale cementne paste, čija se masa i udeo mogu jednostavno izmeriti.

Marta Sánchez de Juan i Pilar Alaejos Gutiérrez ¹ su primenom termičkog tretmana došli do podatka da frakcije agregata 4/8 mm sadrže 33 do 55 % stare cementne paste. Kod krupnijih frakcija 8/16 mm količina je očekivano manja: 23 – 44 %. U literaturi se mogu naći podatci o učešću cementne paste koje varira od 25-64%. Rasipanje rezultata je posledica razlike u primenjenim metodama. Ipak sva istraživanja se slažu u sledećem zaključku: udeo stare cementne paste se smanjuje sa smanjenjem frakcije agregata. Pored toga dostupni literaturni podatci se slažu i u sledećem:

- povećanje količine stare cementne paste utiče na smanjenje gustine ARB;
- povećanje udela stare cementne paste dovodi do povećanja absorpcione moći ARB;
- reciklirani agregati ARB obično imaju veći udeo sulfatnih primesa nego što je to slučaj kod prirodnih agregata zbog sulfata koji potiču iz cementa koji je zaostao na zrnima iz prethodne namene betona.

Primenom mikroskopskih metoda moguća je analiza mikrostrukture uzorka, a samim tim i utvrđivanje razlika između BPA i BRA na strukturalnom nivou. U svom radu Zonghe Shui ³ razmatra mogućnost upotrebe sitnog recikliranog agregata SARB (engl. FRCA), manjih od 5

mm, čiji udeo generalno mora biti ograničen zbog lošeg uticaja i degradiranja mehaničkih svojstva i trajnosti betonskog kompozita. Autor predlaže korišćenje termički tretiranog SARB. Termički tretman dovodi do rehidracije SARB čija je dalja posledica promena mikrostrukture i hemijskog sastava, što konačno dovodi do poboljšanja mehaničkih karakteristika finalnog proizvoda.

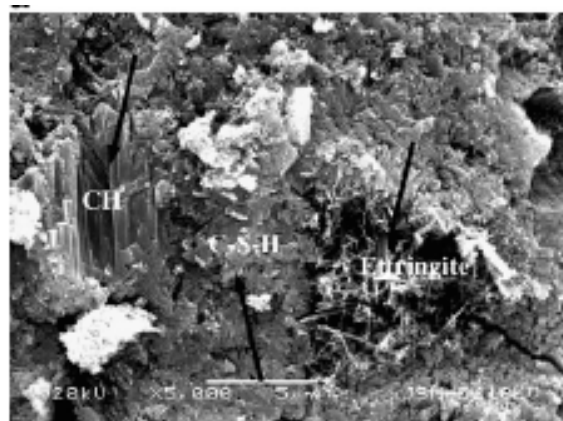
Granulacija SARB je prikazana na slici 2. :

Sieving result of FRCA

Sieve Size (mm)	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15
Passing (%)	100	75.3	44.3	20.8	2.4	1.0

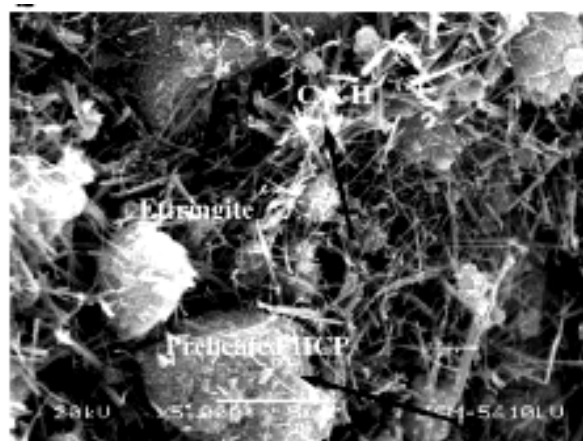
Slika 2. Granulometrija upotrebljenog SARB ³.

SEM snimci uzoraka RAC-a spravljenih sa SARB su prikazani na Slikama 3. 4. i 5:



Slika 3. Polazni uzorak BRA-a sa SARB koji nije podvrgnut termičkom tretmanu ³.

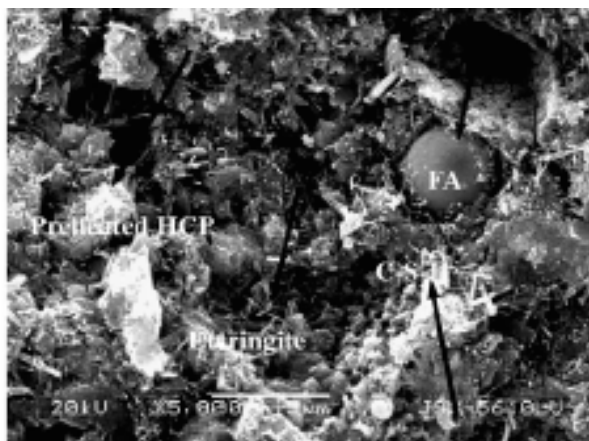
Na slici 3. je prikazan uzorak recikliranog betona u kome je upotrebljen SARB koji nije prethodno termički tretiran, što znači da nije došlo do rehidracije. Na snimku se mogu uočiti pločaste tvorevine CH, igličasti etringit i C-S-H gel koji podseća po svom izgledu na foliju. C-S-H gel svojim folijastim izgledom obavija ostale



Slika 4. Uzorak BRA-a sa termički tretiranim SARB – snimljeno nakon rehidracije ³.

mikrostrukturalne elemente i omogućava efekat strukturnog povezivanja heterogenog materijala u jedinstvenu mrežu. U takvoj strukturalnoj mreži etringit, koji je igličast, skoro da podseća na vlakna i predstavlja neku vrstu mikroarmature kompozita. CH je poput ploča "pričvršćen" za bazalnu površinu uzorka. Sve prethodno navedeno betnoski kompozit čini jako "gustim" sa veoma slabo izraženom poroznošću.

Kod uzorka sa upotrebljenim prethodno termički tretiranim SARB-om dolazi do procesa rehidracije nakon čega se uočavaju neke promene u odnosu na inicijalni uzorak: povezale su grupacije tankih "folijastih" tvorevina C-S-H (tip I) i snopovi igličastog etringita što je dovelo do rekonstrukcije unutar strukture uzorka. Javlja se i C-S-H gel (tip II), kao još jedna posledica rehidracije, koji praktično "obavija" celokupnu strukturu uzorka, što u krajnjem utiče na još veće ojačanje samog uzorka i povećanje mehaničke pritiskne čvrstoće.



Slika 5. Uzorak BRA-a sa termički tretiranim SARB i dodatkom letećeg pepela (FA) – snimljeno nakon rehidracije³.

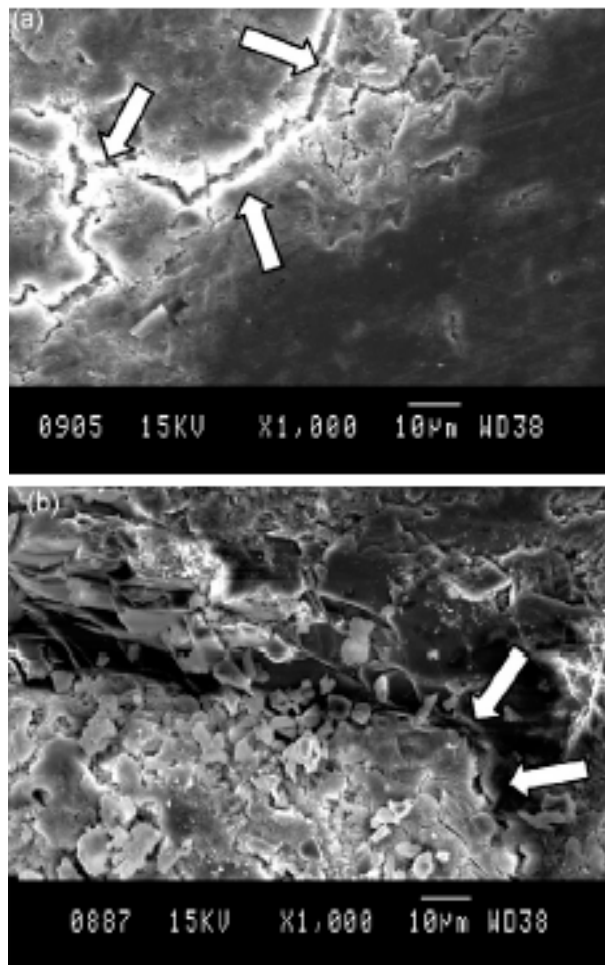
Dodatak letećeg pepela (Fly Ash – FA) utiče na povećanje gustine i smanjenje poroznosti u strukturi BRA-a. FA se na snimku može uočiti u vidu granula obavijenih folijastim tvorevinama C-S-H gela. Upravo takav raspored utiče na još veće smanjenje poroznosti. Inače FA ne samo da ima ulogu u pucolanskoj reakciji, on i ubrzava proces rehidracije što na posletku dovodi do boljih mehaničkih performansi.

Na Slikama 3. - 5. su evidentne promene u strukturi uzorka BRA-a (u ovom slučaju spravljenog samo sa sitnozrnim recikliranim agregatom) koje nastaju usled promena u tretmanu polaznih sirovina (uvođenje termičkog tretmana) ili u sastavu polaznih sirovina (dodavanje letećeg pepela). Mikrostruktura se menja od uzorka do uzorka – javljaju se nove faze, dolazi do procesa kao što je u ovom slučaju rehidracija i sve to podržava stav o neophodnosti ispitivanja mikrostrukture čak i kod jako heterogenih materijala kao što je beton. Promene na mikrostrukturalnom nivou su jedine odgovorne za krajnje mehaničke karakteristike betonskog kompozita.

Vivian W.Y. Tam⁴ u svom radu analizira fizičko-hemijske reakcije koje se javljaju u betonu na bazi recikliranog agregata. U pitanju je tzv "Two-stage-mixing-approach" (TSMA) kao jedan od specifičnih postupaka za mešanje komponenta BRA-a u cilju

postizanja bolje trajnosti i kvaliteta: komponente se mešaju u dva stupnja pri čemu se i potrebna količina vode deli na dva dela i dodaje u različitim vremenskim intervalima. Rađena je 100 % zamena običnog agregata sa ARB.

Autor je došao do zaključka da ispitivani BRA ima veoma visoku vrednost absorpcije (50,46 %) što je posledica potpune zamene prirodnog agregata recikliranim. Samim tim i mehanička pritiskna čvrstoća ovog betona je niža nego kod standardnog. Na SEM mikrofotografiji uzorka ispitivanog BRA-a uočavaju se brojne pore i pukotine unutar cementne paste. (Slika 6.)

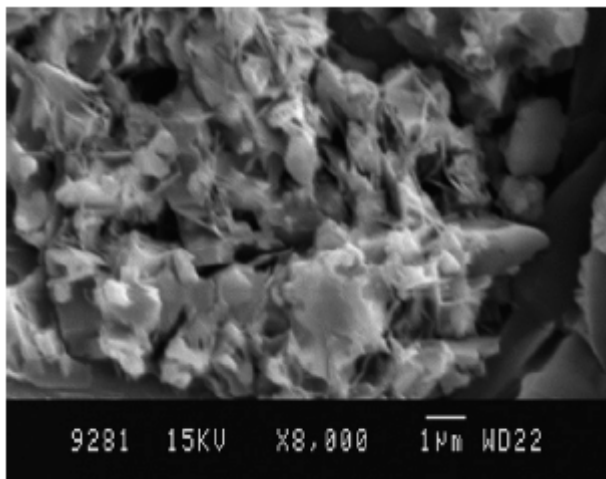


Slika 6. Uzorak BRA-a sa koeficijentom zamene 100%: slika gore – pukotine unutar cementne paste; slika dole: uočljive pore u cementnoj pasti⁴.

U toku vezivanja i očvršćavanja nova cementna pasta najpre reaguje sa starom pastom koja je zaostala na zrnima recikliranog betona što zahteva deo vode koja ulazi u sastav betonske mešavine. Ovo kao posledicu ima redukciju u formiranju C₃S₂H₃, etringita, CH i C₆S₃H, što opet za posledicu ima smanjenje čvrstoće betona. Primenom TSMA postupka se pomenuto izbegava. Naime, stupnjevito mešanje omogućava da C₃S₂H₃, etringit, CH i C₆S₃H formiraju kristale unutar mikrostrukture i da kompozit brže postigne određenu čvrstoću. Samim tim delimično je redukovana i poroznost i nastanak mikroporslina koje "uvlače" u sebe vodu

neophodnu za proces hidratacije i dalje očvršćavanje. Iz tog razloga ovakav BRA ima nešto bolje karakteristike od BRA-a pripremljenog po standardnom postupku sa 100 % zamenjenog prirodnog agregata.

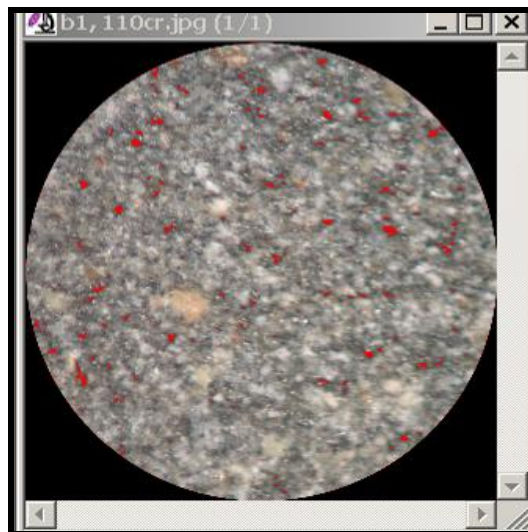
Na slici 7. prikazan je razvoj kristala $C_3S_2H_3$ nakon mešanja po TSMA postupku:



Slika 7. Uzorak BRA-a sa koeficijentom zamene 100 %: razvoj crystal $C_3S_2H_3$ nakon mešanja po TSMA postupku.⁴

Upotreba SEM mikroskopije kao metode omogućava vizuelno praćenje razvoja pora i mikroprrsline unutar ispitivanog uzorka. To može poslužiti i kao smernica ili potvrda da li je primenjena procedura ili izabrani sastav betonske mešavine takav da može dati očekivane rezultate. Sam SEM, kao metoda, omogućava mnogostruko uvećan prikaz slike (i do 100.000 puta), što daje uvid u faze i tvorevine nastale u mikrostrukтури ispitivanog uzorka. Sa druge strane SEM u kombinaciji sa EDS metodom omogućava i dobijanje kvalitativnih i kvantitativnih podataka vezanih za hemijski i fazni sastav uzorka u izabranoj tački na snimku (uzorku). To bi trebalo da posluži i kao potvrda rezultata dobijenih drugim metodama kao što je: hemijska analiza, XRD, DTA, TGA, DSC i slično. Prednost SEM i EDS metode je što se sastav može odrediti u bilo kojoj izabranoj tački uzorka (npr. ako na delu uzorka postoji promena u boji, ili je izraženija poroznost, i slično).

SEM mikrofotografije u kombinaciji sa nekim od programa za analizu slike (npr. Image Pro Plus Analysis, Slika 8.) omogućavaju približno kvantitativno kompjutersko određivanje parametara kao što su: veličina pora, sferičnost (oblik) pora, udeo pora u ukupnoj površini uzorka – poroznost, broj pora unutar pora, veličinu zrna ili vidljive faze, njihov oblik i udeo u odnosu na ukupnu površinu, veličinu i brojsnost prsline i pukotina, itd. Rad većine programa za analizu slike se zasniva na identifikovanju razlike u boji na snimku. Programi za analizu slike mogu raditi sa snimcima bilo kog mikroskopskog uređaja (optički mikroskop, fluorescentni mikroskop, SEM, TEM, itd), bitno je da fotografija bude u digitalnom obliku.



Slika 8. Označene pore (crveno) na uzorku betona (snimljeno optičkim mikroskopom) – Image Pro Plus Analysis

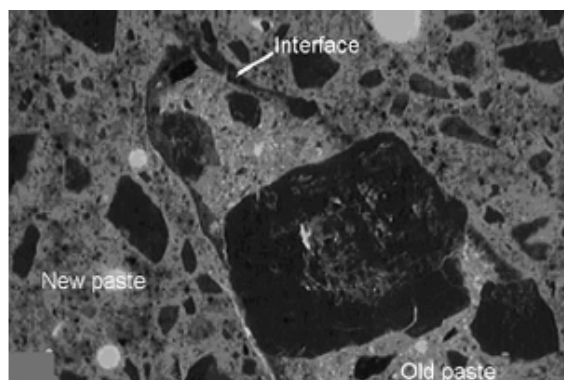
M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí i M. Barra⁵ su se bavili proučavanjem uticaja koeficijenta zamene (0 %, 25%, 50% i 100%) krupnog prirodnog agregata recikliranim i postupka proizvodnje na konačna mehanička svojstva BRA-a. Kao i drugi autori i oni su došli do zaključka da su gustina i kapacitet absorpcije recikliranog agregata isključivo posledica udela zaostale, stare cementne paste na zrnima agregata. Na slici 9. dat je mikroskopski snimak (optički mikroskop) uzorka BRA-a nakon loma u toku standardnog ispitivanja mehaničkih karakteristika. Na preseku se mogu uočiti zrna recikliranog agregata koja se sastoje od prirodnog agregata i adhezanoe stare cementne paste.⁵



Slika 9. Snimak uzorka BRA-a pomoću optičkog mikroskopa – uočljiva zrna recikliranog agregata sa adhezanom starom cementnom pastom.⁵

Pored navedenog pomenuti autori su izveli izvesne zaključke vezane za mehanizam loma koji se javlja kod BRA-a.

Poznato je da se uzročnik loma kod betona nalazi uvek u njegovoj "najslabijoj tački". U slučaju betona na bazi recikliranih agregata prosečne mehaničke čvrstoće,



Slika 10. Snimak loma kroz zrno recikliranog agregata na uzorku BRA-a prosečne čvrstoće sa velikim udelom recikliranog materijala urađen pomoću fluorescentnog mikroskopa

najslabija tačka jeste upravo zrno recikliranog agregata. Kod betona na bazi prirodnog agregata lom nastaje kroz očvrslu cementnu pastu. Na slici 10. prikazan je lom na uzorku BRA-a, sa velikom količinom recikliranog agregata, nastao prilikom ispitivanja na zateznu mehaničku čvrstoću. Putanja loma (pukotina) je prošla kroz zrno recikliranog agregata, jer se on pokazao najslabijom komponentom kompozita. Zanimljivo je to što se lom nije odigrao kroz tzv. tranzitnu zonu (*interface*), t.j. zonu dodira stare i novoformirane cementne paste. Dakle čvrstoća veze u tranzitnoj zoni je veća od čvrstoće koji poseduje samo zrno recikliranog agregata.⁵

3 ZAKLJUČCI VEZANI ZA AKTUELNU LITERATURU I DALJA SOPSTVENA ISTRAŽIVANJA

Analizirajući podatke iz literature može se zaključiti da je BRA po svim svojim svojstvima najslabiji lakoagregatnim betonima. BRA sa udelom zamene 100% i sa visokim udelom cementa može postignuti srednju čvrstoću na pritisak (45 MPa), ali nije preterano ekonomski isplativ za proizvodnju. Standardni BRA (sa do 25% ARB) pripadaju grupi betona sa prosečnom čvrstoćom na pritisak (30 – 45 MPa). Dakle, preostaje da se ispita koji je to optimalni koeficijent zamene prirodnog agregata recikliranim koji daje kompozit zadovoljavajućih svojstava i čija je proizvodnja ekonomski isplativa. Preporuka je da se koeficijent zamene bude u intervalu 50 – 75%.

Zaključci vezani za BRA i njegove sličnosti i razlike u odnosu na standardne betone, a koji su posledica ispitivanja mikrostrukture primenom različitih metoda mogu se sumirati na sledeći način:

- Osnovna razlika BPA i BRA je u postojanju stare, zaostale cementne paste vezane za zrna prirodnog agregata u slučaju BRA-a. Postojanje stare cementne paste negativno utiče na fizičke i mehaničke karakteristike BRA.
- Primenom krupnijih frakcija recikliranog agregata smanjuje se količina stare cementne paste u odnosu na sadržaj cementne paste vezan za zrna sitnog recikliranog agregata.
- Povećanje udela stare cementne paste dovodi do smanjenja gustine i povećanja absorpcione moći recikliranog agregata.

- Reciklirani agregati ARB obično imaju veći udeo sulfatnih primesa nego što je to slučaj kod prirodnih agregata zbog sulfata koji potiču iz cementa koji je zaostao na zrnima iz prethodne namene betona.

- Primena termičkog tretmana u slučaju sitnog recikliranog agregata dovodi do procesa rehidratacije čija je dalja posledica promena mikrostrukture i hemijskog sastava, što konačno dovodi do poboljšanja mehaničkih karakteristika finalnog proizvoda. Naime usled termičkog tretmana dolazi do povezivanja "folijastih" tvorevina C-S-H (tip I) i etringita što dovodi do rekonstrukcije unutar strukture uzorka. Kao posledica rehidratacije javlja se i C-S-H gel (tip II), koji "obavija" celokupnu strukturu uzorka, što u krajnjem utiče na još veće ojačanje samog uzorka i povećanje mehaničke pritiskne čvrstoće.

- BRA ima značajno veću vrednost absorpcije što je posledica zamene prirodnog agregata recikliranim. Reciklirani agregat, usled prisustva zaostale cementne paste, ima uvećanu poroznost u odnosu na prirodni agregat.

- Dodatak letećeg pepela ili silikatne prašine (ili nekog srodnog pucolanskog materijala) utiče na povećanje gustine i smanjenje poroznosti u strukturi BRA-a.

- Čvrstoća veze u tranzitnoj zoni BRA je veća od čvrstoće koji poseduje samo zrno recikliranog agregata. Iz tog razloga je putanja loma na uzorku BRA-a prilikom ispitivanja na zateznu mehaničku čvrstoću prošla kroz zrno recikliranog agregata, jer se on pokazao najslabijom komponentom kompozita. Kod betona na bazi prirodnog agregata lom nastaje kroz očvrslu cementnu pastu.

Treba napomenuti da istraživanja o BRA-u nisu u potpunosti zaokružena jer su različiti autori dolazili do različitih, a često i suprotnih zaključaka. Pored rezultata izloženih u ovom preglednom radu zanimljivo je napomenuti zaključke do kojih su došli različiti autori: veza matrica-agregat jača kod BRA-a nego kod BPA; loš kvalitet BRA-a kao građevinskog materijala je posledica visoke absorpcije vode, velike poroznosti, i slabe ITZ (interfacial transition zone – veza između cementne paste i agregata); kvalitet BRA-a direktno zavisi od kvaliteta originalnog betona, i da beton visokih performansi upotrebljen za dobijanje recikliranog agregata daje izvanredne vrednosti mehaničkih svojstava BRA-a, itd. Ovakvi različiti zaključci ostavljaju još puno mesta za nova ispitivanja i istraživanja u oblasti BRA-a.

Obzirom da su mehanička svojstva BRA-a direktna posledica promena u njegovoj mikrostrukтури neophodno je naglasiti potrebu za mikroskopskim ispitivanjima i primenom različitih mikroskopskih tehnika počevši od optičkog mikroskopa, različitih varijacija kao što su fluorescentni mikroskopi, do superiornih uređaja kao što je SEM.

4 BUDUĆA ISTRAŽIVANJA

Sve ustanovljene veze između analiziranih rezultata iz dostupne i aktuelne literature, kao i izvedeni zaključci navedeni u ovom preglednom radu biće primenjeni u toku sopstvenih istraživanja o uticaju količine i kvaliteta primenjenog recikliranog agregata na mehanička svojstva BRA-a, a u cilju optimizacije procesa proizvodnje recikliranog betona i aktualizacije ideje o opsežnijoj primeni istog u građevinarstvu.

ZAHVALNOST

Ispitivanja u ovom radu omogućilo je Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije (projekat 19012 i 16004).

Korišćene oznake:

Agregat od recikliranog betona (reciklirani agregat) - ARB

Beton na bazi recikliranog agregata – BRA

Beton na bazi prirodnog agregata – BPA

Sitan agregat od recikliranog betona – SARB

Krupan agregat od recikliranog betona – KARB

Beton koji ima recikliranu krupnu frakciju – BRAK

Beton koji ima recikliranu sitnu frakciju - BRAS

5 LITERATURA

- [10] Marta Sánchez de Juan, Pilar Alaejos Gutiérrez, "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate", *Construction and Building Materials* 23 (2009) 872–877
- [11] RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures). Recycled aggregates and recycled aggregate Concrete. In: Hasen TC, editor. *Recycling of demolished concrete and masonry*. RILEM Report 6. 1st ed. 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN: E&FN Spon; 1992.

REZIME

PRIMENA MIKROSKOPSKIH METODA U ANALIZI MIKROSTRUKTURE RAZLIČITIH TIPOVA BETONA SA RECIKLIRANIM AGREGATOM

Anja TERZIĆ
Ljubica PAVLOVIĆ

Aspekti očuvanja prirodne sredine, održivog razvoja i pravilnog raspolaganja prirodnim resursima nameću reciklažu kao jedan od veoma važnih postupaka u proizvodnji građevinskih materijala. Danas se beton na bazi recikliranog agregata (BRA) uspešno upotrebljava u raznim oblastima građevinarstva – kako kod novih konstrukcija i njihovih elemenata tako i za izradu baza puteva. BRA se dobija potpunom ili delimičnom zamenom prirodnog agregata agregatom dobijenim recikliranjem otpadnog betona (ARB), t.j. betona dobijenog rušenjem objekata, betona koji je škart u procesu prefabrikacije i slično. Tako dobijen beton ima različite karakteristike od betona na bazi prirodnog agregata (BPA) što je posledica razlike u čvrstoći i sastavu prirodnog i recikliranog agregata, ali i formiranja takozvane „prelazne zone“ između stare, zaostale i novoformirane cementne paste. U ovom preglednom radu dat je kritički pregled rezultata primenjenih mikroskopskih metoda, a u cilju objašnjenja procesa koji nastaju tokom očvršćavanja betona na bazi recikliranih agregata i dovode do promene u karakteristikama u odnosu na beton na bazi prirodnog agregata.

Cljučne reči: beton na bazi recikliranih agregata, mikroskopske metode, prelazna zona, cementna pasta

- [12] Zhonghe Shui, Dongxing Xuan, Huiwen Wan, Beibei Cao: "Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment", *Construction and Building Materials* 22 (2008) 1723–1729
- [13] Vivian W.Y. Tama, X.F. Gaob, C.M. Tamc, K.M. Ng, "Physio-chemical reactions in recycle aggregate concrete", *Journal of Hazardous Materials* (2008) article in press
- [14] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, M. Barra, "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete", *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 735–742
- [15] Amnon Katz, "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete", *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 703–711
- [16] R.J. Collins, "Recycled aggregates in ready-mixed concrete, in: J.W. Llewellyn, H. Davis (Eds.)", *Proceedings of Sustainable Use of Materials, Building Research Establishment, UK, 1996, Papers 1–2*.
- [17] M. Tavakoli, P. Soroushian, "Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate", *ACI Mater. J.* 93 (2) (1996) 182–190.
- [18] I.B. Topcu, N.F. Guncan, "Using waste concrete as aggregate", *Cem.Concr. Res.* 25 (7) (1995) 1385–1390.

SUMMARY

APPLICATION OF MICROSCOPIC METHODS IN THE MICROSTRUCTURAL ANALYSES OF DIFFERENT TYPES OF CONCRETE WITH RECYCLED AGGREGATES

Anja TERZIĆ
Ljubica PAVLOVIĆ

Aspects of environmental safety, sustainable development and proper disposal of natural resources impose recycling as one of the main methods in manufacturing of the construction materials. Concrete based on recycled aggregate (BRA) has been successfully applied in various areas of civil engineering – as in new constructions and constrictive elements also in road basis. BRA is obtained with utter or partial replacement of natural aggregate with recycled, secondary concrete. Such concrete has different properties than concrete based on natural aggregate (BPA). Different properties are consequence of differences in chemical composition and hardness of aggregates and of „transition zone“ which occurs on contact of old, lingering cement paste and newly formed one. This „state of art“ paper presents critical review of results obtained with microscopic methods applied during microstructural researches of properties of concrete based on recycled aggregates.

Key words: concrete based on recycled aggregates, microscopic methods, transition zone, cement paste

MEHANIČKE KARAKTERISTIKE BETONA NA BAZI RECIKLIRANOG AGREGATA

Ivan IGNJATOVIĆ
Snežana MARINKOVIĆ

PREGLEDNI RAD
UDK: 666.972.12 = 861

1 UVOD

Korišćenje građevinskog otpada kao izvora agregata za proizvodnju novog betona, postala je česta pojava u svetskim okvirima u poslednje dve decenije. Nekoliko faktora utiče na odluku o upotrebi materijala sa građevinskih deponija za proizvodnju agregata. Sa jedne strane to su ekološki faktori - iscrpljivanje prirodnih izvora agregata, povećavanje površina deponija građevinskog materijala naročito u gusto naseljenim područjima i emitovanje štetnih gasova prilikom transporta agregata. Sa druge strane su materijalni faktori - visoke cene zakupa zemljišta za stvaranje deponija i povećani troškovi transporta od sve udaljenijih izvora agregata. Veliki naponi proteklih decenija uloženi su kako bi se unapredio tehnološki proces recikliranja betona i proizvodnje agregata i čitav postupak postao ekonomski opravdan. To je bio neophodan uslov da deponije na kojima bi se proizvodio reciklirani agregat postanu održivi i pouzdan izvor agregata za proizvodnju betona, naročito u urbanim sredinama. Drugi važan uslov za primenu bio je da karakteristike agregata dobijenog recikliranjem betona, kao što su veličina zrna, specifična masa, upijanje vode, otpornost na habanje, budu u standardima definisanim okvirima. Veliki broj istraživanja posvećen je ispitivanju recikliranog agregata, što je u nekim zemljama rezultiralo i donošenjem standarda koji se tiču agregata od recikliranog betona. Kako se napredovalo u poznavanju karakteristika recikliranog agregata, širila se i oblast njegove primene. U početku se koristio samo kao tampon sloj pri izgradnji puteva i za formiranje nasipa, a kako se uvećavao broj istraživanja vezanih za karakteristike betona na bazi ovakvog agregata

(čvrstoća pri pritisku i zatezanje) počeo je da se koristi i za izradu nekonstruktivnih betonskih elemenata – ivičnjaka, staza, ograda. U današnje vreme istraživanja se odnose na uticaje raznih faktora na mehaničke karakteristike betona na bazi recikliranog agregata, pitanje trajnosti i reoloških osobina- skupljanja i tečenja. Sve se to čini radi stvaranja uslova za primenu ovakvih betona za konstruktivne elemente, u prvom redu grede i stubove, i formiranje pouzdane baze eksperimentalnih podataka za uobičajeni način proračuna ovih elemenata.

U ovom radu biće prikazani rezultati istraživanja mehaničkih karakteristika betona na bazi recikliranog agregata, koja su sprovedena od početka 90-ih godina do danas, s obzirom da pregledni rad koji je objavljen od strane T.C. Hansena [1] u okviru RILEM-ove radne grupe, obuhvata period istraživanja do 1989. godine. Za svaku razmatranu karakteristiku betona će biti prvo izneti zaključci njegovog istraživanja, a zatim analizirani rezultati ispitivanja koja su potom usledila.

1.1 Termin i oznake

U daljem tekstu, pod recikliranim agregatom podrazumevaće se agregat od recikliranog betona, skraćeno **ARB** (engl. *recycled concrete aggregate* – skraćeno RCA). Beton od recikliranog agregata kraće će se označavati sa **BRA** (engl. *recycled aggregate concrete* – skraćeno RAC). Prirodni agregat označavaće se kraće sa **PA** (engl. *natural aggregate* – skraćeno NA), a beton od prirodnog agregata sa **BPA** (engl. *natural aggregate concrete* – skraćeno NAC). Termin koji će se koristiti za beton koji se reciklira je originalni beton, dok će se prilikom poređenja BRA sa BPA betonom, BPA beton nazivati i uporedni BPA beton. Ukoliko se u betonskoj mešavini nalazi samo krupna ili samo sitna frakcija recikliranog agregata, za takve betone biće korišćene skraćenice **BRBK** (beton od recikliranog agregata krupne frakcije), ili **BRAS** (beton od recikliranog agregata sitne frakcije).

Adresa autora:

Ivan Ignjatović, dipl.građ.inž., Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija; e-mail: ivani@imk.grf.bg.ac.yu
Snežana Marinković, vanredni profesor, dr, dipl.građ.inž., Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija;
e-mail: snenska@imk.grf.bg.ac.yu

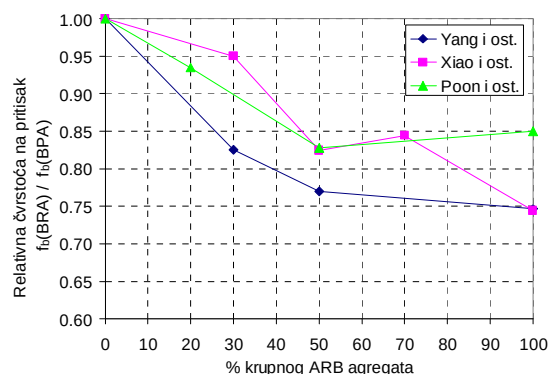
2 ČVRSTOĆA PRI PRITISKU

Prema Hansenu [1], čvrstoća pri pritisku betona na bazi recikliranog agregata može biti veća, ista ili manja od čvrstoće uporednog BPA betona, koji ima isti efektivni vodocementni faktor kao i BRA. Efektivni vodocementni faktor, $(w/c)_{ef}$, je odnos količine slobodne vode i cementa. Slobodna voda je količina vode koja se dodaje prilikom spravljanja betonske mešavine, nezavisno od količine vode potrebne za zasićenje agregata vodom, shodno njegovom stepenu upijanja. Osnovni parametar koji definiše odnos čvrstoća BRA i uporednog BPA betona je odnos čvrstoća betona koji se reciklira (od koga se dobija reciklirani agregat) i čvrstoće koja se projektuje, ciljane čvrstoće. Ukoliko je čvrstoća originalnog betona koji se reciklira veća ili ista od ciljane čvrstoće, tada će čvrstoća betona na bazi recikliranog agregata biti ista ili veća od čvrstoće uporednog BPA betona. S obzirom da čvrstoća betona, uopšteno posmatrano, dominantno zavisi od vodocementnog faktora ukoliko su svi ostali parametri isti, prethodni zaključak se može preformulisati i svesti na poređenje efektivnih vodocementnih faktora različitih betona- originalnog betona koji se reciklira, betona na bazi recikliranog agregata (BRA) i uporednog BPA. Pri tome, naravno, primena nižeg efektivnog vodocementnog faktora znači da će beton imati višu vrednost čvrstoće pri pritisku. Dakle, ako je vodocementni faktor originalnog betona isti ili niži od vodocementnog faktora uporednog BPA, tada će čvrstoća pri pritisku betona na bazi recikliranog agregata (BRA) biti ista ili veća od čvrstoće pri pritisku uporednog BPA. Rezimirajući rezultate nekoliko istraživanja, Hansen [1] je izneo da su čvrstoće BRA betona od 5-10% niže od čvrstoća uporednih BPA betona, ukoliko su slične čvrstoće, tj. vodocementni faktori, originalnih i novoprojektovanih betona. Taj pad može biti i do 50% ukoliko se od originalnog betona izuzetno slabog kvaliteta želi postići visoka marka novoprojektovanog betona sa recikliranim agregatom. Pored toga, varijacije čvrstoće pri pritisku betona od recikliranog agregata zavise od ujednačenosti kvaliteta recikliranog agregata, pa problem može da predstavlja ukoliko se u pogonu za recikliranje dopremaju i recikliraju bez klasifikovanja betoni sa velikim razlikama u čvrstoćama na pritisak.

Hansen [1] je istakao značaj tipa i količine primenjenog recikliranog agregata na čvrstoću betona. Zaključak svih istraživanja je da povećanje količine recikliranog agregata u betonskoj mešavini smanjuje čvrstoću na pritisak. Ukoliko se primenjuju i krupna i sitna frakcija recikliranog agregata, pad čvrstoće betona sa ovim agregatom je 15-40% u odnosu na beton sa potpuno prirodnim agregatom, istog efektivnog vodocementnog faktora. Primena samo krupne frakcije ($d \geq 4$ mm) recikliranog agregata i prirodne sitne frakcije (peska) dovodi do maksimalnog pada čvrstoće takvog betona u odnosu na uporedni, u iznosu od 5-10%. Ukoliko se u betonskoj mešavini upotrebi prirodan krupan agregat, a sitna prirodna frakcija (pesak) zamenjuje recikliranom, pad čvrstoće je praktično linearan i raste sa povećanjem količine sitnog ARB agregata, do 50% za potpunu zamenu prirodne frakcije recikliranom. Hansen smatra se da se do 30% prirodnog krupnog agregata može zameniti recikliranim bez "značajne promene" u čvrstoći na pritisak betona na bazi recikliranog agregata u odnosu na uporedni beton sa potpuno prirodnim agregatom.

2.1 Uticaj količine recikliranog agregata

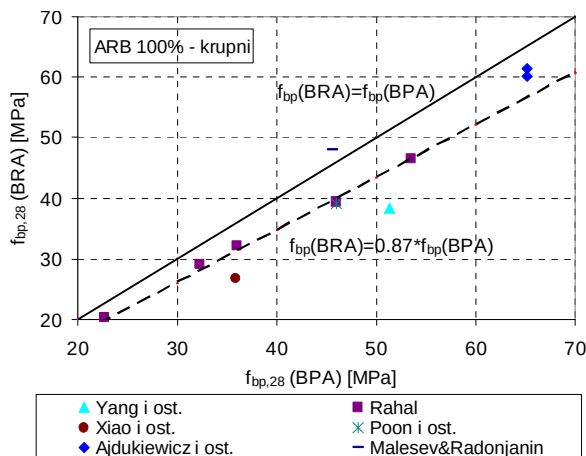
Nakon zaključka Hansena o uticaju količine recikliranog agregata na čvrstoću BRA betona, sprovedeno je još nekoliko istraživanja sa istim ciljem. Osim radova koji u principu potvrđuju navode Hansena i koji će kasnije biti prikazani, ima i eksperimenata sa rezultatima koji govore o značajnijem smanjenju čvrstoće pri pritisku betona koji sadrže krupan reciklirani agregat, u poređenju sa pomenutih 10% kod Hansena.



Slika 1. Dijagram relativne čvrstoće pri pritisku BRA betona, na 28 dana, u funkciji količine krupnog ARB agregata

Betoni čija je čvrstoća pri pritisku analizirana na slici 1, napravljeni su od ARB agregata koji imaju slične karakteristike upijanja (6,2; 9,2; 6,9%) i koji su prilikom spravljanja sveže betonske mešavine bili u vodom zasićenom, površinski suvom stanju (skraćeno ZPS) (engl. *saturated surface dry* – skraćeno SSD). Relativna čvrstoća pri pritisku koja je prikazana na ordinati dijagrama na slici 1, predstavlja odnos čvrstoća pri pritisku BRA betona i uporednog BPA betona koji su imali isti efektivni vodocementni faktor. Ovo se odnosi na sve u nastavku analizirane parove BRA i uporednih BPA betona. Reciklirani agregat u ovim eksperimentima, [4], [12], [14], potiče od srušenih betonskih konstrukcija i nije poznato kolika je čvrstoća pri pritisku betona koji je recikliran. Sa dijagrama na slici 1 se vidi da relativna čvrstoća pri pritisku BRA betona opada sa povećanjem procenta ARB agregata u betonu. Interesantno je da kod Yanga i ostalih [4], BRA beton sa 30% krupnog ARB agregata ima pad čvrstoće od čak 17% u odnosu na uporedni BPA beton. Smanjenje čvrstoće pri pritisku registrovano kod uzoraka koji su imali 50% ARB agregata iznosi od 18% do 23%, dok su BRAK betoni sa 100% ARB agregata imali za 15% do 25% nižu vrednost čvrstoće u odnosu na uporedne BPA betone. Koristeći numeričke vrednosti čvrstoća za BRAK betone sa 100% ARB agregata iz još nekoliko radova [5,16,19], formiran je dijagram na slici 2. Vrednosti sa dijagrama odnose se na betone čije su čvrstoće pri pritisku od 20 do 65 MPa. S obzirom da su ispitivanja vršena na uzorcima raznih oblika i dimenzija, sve vrednosti su svedene na čvrstoće koje odgovaraju probnom telu kocke ivice 10 cm. Jasno se vidi da su gotovo sve čvrstoće BRA betona ispod pune linije, što znači da su niže od čvrstoća uporednih BPA betona. Isprekidana linija predstavlja dobru aproksimaciju analiziranih vrednosti odnosa čvrstoća, što znači da se za čvrstoću na pritisak BRA betona sa

100% krupnog ARB agregata može očekivati vrednost od 87% čvrstoće uporednog BPA.



Slika 2. Dijagram čvrstoće pri pritisku BRAK betona (100% ARB), na 28 dana, u funkciji čvrstoće pri pritisku BPA betona

Na slici 3 prikazan je uporedni odnos čvrstoća pri pritisku BRAK betona sa 50% ARB agregata i uporednih BPA betona, na osnovu 5 različitih ispitivanja [4,6,12,14,19]. Rezultati su, kao i na slici 2, svedeni na isto probno telo (kocka, 10 cm). Dve od pet vrednosti se nalaze na i iznad pune linije koja predstavlja jednake čvrstoće BRAK i BPA betona, dok tri vrednosti ispod te linije znače niže čvrstoće BRAK u odnosu na uporedne BPA betone. Crtkasta linija na dijagramu sa slike 3, predstavlja aproksimaciju prikazanih čvrstoća, a njena jednačina glasi:

$$f_{bp,28}(BRA) = 0.92 \times f_{bp,28}(BPA) \quad (1)$$

gde je:

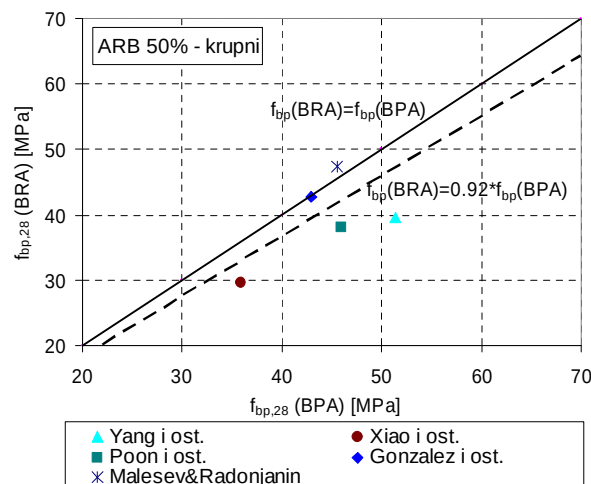
$f_{bp,28}(BRA)$ – čvrstoća pri pritisku BRAK betona sa 50% ARB agregata,

$f_{bp,28}(BPA)$ – čvrstoća pri pritisku uporednog BPA betona.

Dakle, za čvrstoću na pritisak BRAK betona sa 50% ARB agregata može se očekivati vrednost od 92% čvrstoće uporednog BPA, tj. smanjenje od oko 8%.

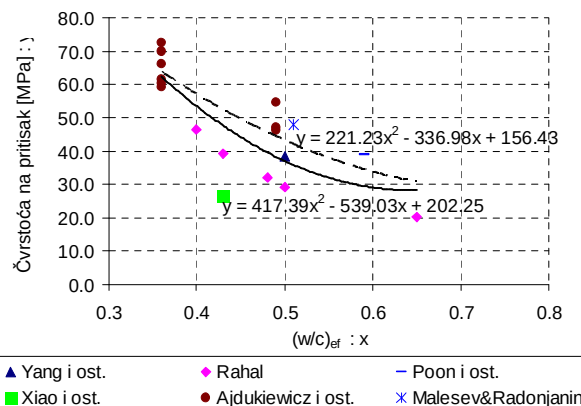
Iz postojećih istraživanja nije bilo moguće izvršiti sličnu analizu za još neke značajne procenete zamene prirodnog ARB agregatom, npr. 30%. O takvim betonima se može zaključiti samo posredno, na osnovu slika 2 i 3 i imajući u vidu trend čvrstoće sa povećanjem (ili smanjenjem) količine krupnog ARB agregata. Jasno je da bi BRAK betoni sa 30% agregata imali smanjenje čvrstoće pri pritisku koja je manja od 8% i koje bi moglo da se okarakterise kao "bez značaja", kako je to naveo Hansen [1]. U svetlu ovoga, rezultat Yanga i ostalih (slika 1), pre treba posmatrati kao rasipanje rezultata nego kao pravilo.

Kao što je poznato, čvrstoća pri pritisku dominantno zavisi od vodocementnog faktora - što je viši vodocementni faktor, niža je čvrstoća pri pritisku. Na slici 4 prikazana je zavisnost efektivnog vodocementnog faktora i čvrstoće pri pritisku kod BRAK betona sa 100% ARB agregata, dobijena na osnovu eksperimentalnih ispitivanja [4,5,12,



Slika 3. Dijagram čvrstoće pri pritisku BRAK betona (50% ARB), na 28 dana, u funkciji čvrstoće pri pritisku BPA betona

14,16,18,19]. S obzirom da su merenja vršena na uzorcima različitih oblika i dimenzija, sve čvrstoće pri pritisku su svedene na vrednosti koje odgovaraju kocki ivice 10 cm.



Slika 4. Dijagram čvrstoće pri pritisku BRAK betona (100% ARB), na 28 dana, u funkciji vodocementnog faktora

Punom linijom na slici 4 prikazana je kvadratna funkcija koja predstavlja dobru aproksimaciju svih dostupnih eksperimentalnih vrednosti za BRAK betone. Crtkastom linijom je uspostavljena takođe aproksimativna zavisnost veličine $(w/c)_{ef}$ i čvrstoće na pritisak, prema eksperimentalnim podacima za BPA betone (koji nisu prikazani na dijagramu radi jasnoće). Kao što se vidi sa dijagrama, ove dve linije imaju sličnu tendenciju, ali niže vrednosti čvrstoća za isti efektivni vodocementni faktor odgovaraju BRAK betonima. Razlike u čvrstoćama definisanim preko krivih čije su jednačine prikazane na slici 4, rastu sa povećanjem efektivnog vodocementnog faktora. Za betone visokih čvrstoća, preko 50 MPa, razlika u ovako definisanim čvrstoćama iznosi do 7%, dok za betone uobičajenih čvrstoća, oko 30-35 MPa, razlika iznosi do 15%.

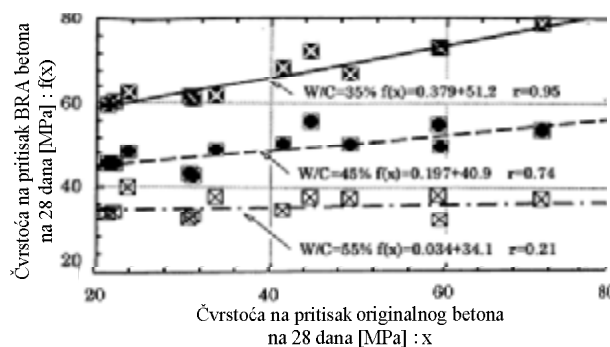
Eksperimenti čiji se rezultati nalaze u okviru granica koje je naveo Hansen [1], urađeni su u Španiji [3], Turskoj [13] i Japanu [2]. S obzirom da iz pomenutih

radova nisu bili dostupni numerički podaci, korišćeni su ili zaključci autora ili sopstveni zaključci na osnovu u radovima prikazanih dijagrama.

U radu koji su prezentovali Sanchez & Gutierrez [3], svi betoni sa recikliranim krupnim agregatom imali su niže vrednosti čvrstoća pri pritisku u odnosu na BPA betone sa istim $(w/c)_{ef}$. Primenjivan je reciklirani agregat prosečnog kvaliteta koji potiče od betonskih uzoraka iz laboratorijskih ispitivanja. Za betone koji sadrže do 50% krupnog recikliranog agregata, pad čvrstoće pri pritisku bio je 5-10% u odnosu na uporedni BPA beton, dok su betoni sa 100% zamenjenog krupnog agregata imali pad čvrstoće 10-15% u odnosu na beton sa potpuno prirodnim agregatom.

Istraživanja u Turskoj [13] imala su za cilj da se betonima koji sadrže različite procenat recikliranog agregata - 30, 50, 70 i 100% (sitne i krupne frakcije), a koji potiče od originalnog betona čvrstoće pri pritisku 14 MPa, postigne čvrstoća pri pritisku od 16 MPa, tj. 20 MPa. Rezultati su pokazali da je moguće napraviti beton čvrstoće 16 MPa samo ukoliko je procenat zamene prirodnog agregata recikliranim do 30%. Čvrstoće pri pritisku betona sa većim procentom ARB agregata od 30% imali su niže čvrstoće od 16 MPa, kao i svi betoni projektovani za čvrstoću od 20 MPa, nezavisno od procentualnog učešća recikliranog agregata. BRA betoni sa 100% recikliranog agregata imali su 23.5% i 33% nižu čvrstoću na pritisak od uporednog betona. Dakle, kada je cilj čvrstoća pri pritisku za oko 15% veća od čvrstoće originalnog betona, takvu čvrstoću je moguće dostići sa BRA betonom koji sadrži maksimalno 30% agregata dobijenog recikliranjem originalnog betona pomenutog kvaliteta.

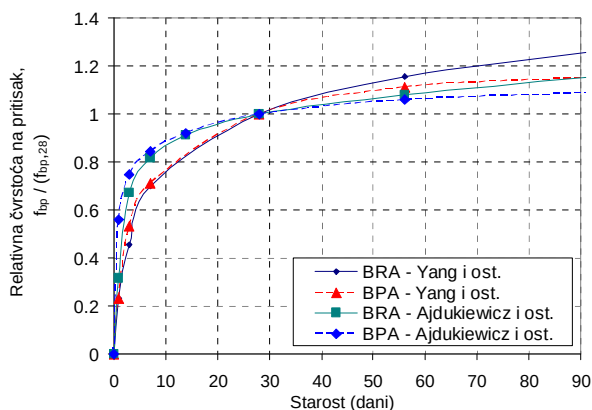
Obimno eksperimentalno ispitivanje Dosho-a i ostalih [2] potvrdilo je zaključke iz Izveštaja Hansena koji se tiču odnosa kvaliteta recikliranog agregata, tj. čvrstoće pri pritisku originalnog betona i čvrstoće pri pritisku betona na bazi krupnog recikliranog agregata. Ukoliko se uporede čvrstoće betona sa recikliranim agregatom istih receptura (efektivnih vodocementnih faktora), a različitog kvaliteta recikliranog agregata (različitih čvrstoća pri pritisku originalnih betona koji su reciklirani), sa dijagrama na slici 5 jasno se uočava da se niža vrednost čvrstoće novog betona dobija primenom agregata koji potiče od betona niže čvrstoće. Uticaj kvaliteta recikliranog agregata raste sa snižavanjem vodocementnog faktora novog betona, tj. sa povećanjem zahtevane marke novog betona, što se vidi iz nagiba pravih linija sa dijagrama na slici 5.



Slika 5. Dijagram čvrstoće pri pritisku BRA betona, na 28 dana, u funkciji čvrstoće pri pritisku originalnog betona i vodocementnog faktora [2]

2.2 Razvoj čvrstoće pri pritisku kroz vreme

Dijagram sa koga se može zaključiti o sličnosti i razlikama u prirastu čvrstoće pri pritisku tokom vremena, prikazan je na slici 6. Svaka od četiri krive predstavlja odnos čvrstoće u nekom trenutku vremena i čvrstoće na 28 dana istog betona (relativna čvrstoća na dijagramu).



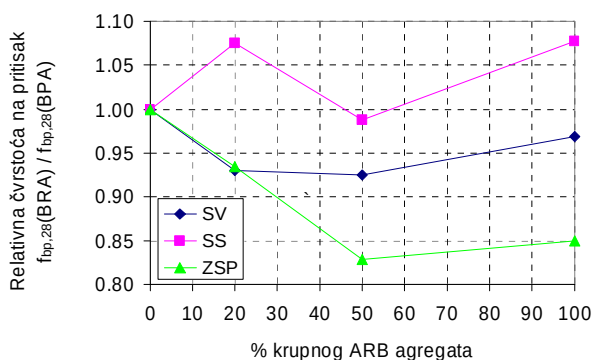
Slika 6. Dijagram relativnog prirasta čvrstoće pri pritisku BRA i BPA betona tokom vremena

Prikazani su odnosi za po jedan BRA i BPA beton iz dva različita eksperimenta [4], [16]. Betoni koji su upoređivani sadržali su 100% krupnog recikliranog agregata, a ciljane čvrstoće pri pritisku cilindra bile su 40 MPa [4] i 50 MPa [16]. Kod svih uzoraka, prilikom dozage, agregat je bio u stanju koje je ranije nazvano ZPS. Može se uočiti vrlo slično ponašanje betona koji sadrži 100% recikliranog agregata i betona sa prirodnim agregatom, ali i važna razlika. Do starosti od 28 dana, oba merenja su pokazala brži prirast čvrstoće BPA u odnosu na BRA betone. Nakon 28 dana, strmiji je nagib linija koje predstavljaju relativne čvrstoće BRA betona, tj. prirast čvrstoće pri pritisku BRA betona nakon 28 dana veći je od iste veličine kod uporednog BPA betona. Isti odnosi prirasta čvrstoća BRA i BPA betona dobijeni su i na osnovu istraživanja koje je obavio Rahal [5], čiji rezultati zbog preglednosti nisu prikazani na slici 6. Ova osobina BRA betona se objašnjava reakcijom cementa iz do tada nehidratirane cementne paste oko zrna recikliranog agregata.

2.3 Uticaj stepena upijanja vode i stanja vlažnosti recikliranog agregata

Poon i ostali [14] ispitivali su uticaj vlažnosti prirodnog i recikliranog agregata pri pravljenju betonske mešavine na čvrstoću pri pritisku. Agregat je bio u tri stanja vlažnosti – sušen na vazduhu (SV), sušen u sušnici (SS) i vodom zasićen površinski suv (ZPS). Korišćen je samo krupan recikliran agregat nominalne veličine zrna od 10 i 20 mm, a ispitivani procenti zamene bili su 20, 50 i 100%. Odnos količine cementa i slobodne vode bio je konstantan za sve betonske mešavine. Ciljana čvrstoća pri pritisku bila je 35 MPa, a ispitivana je pri starosti od 3, 7 i 28 dana. Sve betonske mešavine dostigle su željenu čvrstoću pri pritisku nakon 28 dana. Ipak, različiti odnosi čvrstoća između BPA i BRA betona dobijeni su za različite kombinacije količine i stanja vlažnosti reciklira-

nog agregata. BRAK betoni koji su sadržali agregat sušen na vazduhu, imali su čvrstoće pri pritisku koje su od 3% do 7% niže od čvrstoća kod uporednih BPA betona, zavisno od procenta krupnog ARB agregata, slika 7. BRAK betoni sa agregatom sušenim u sušnici imali su veće vrednosti čvrstoće pri pritisku od uporednih BPA betona (do 8%), praktično nezavisno od procenta krupnog ARB agregata, slika 7. BRAK betoni sa agregatom u ZPS stanju, pokazali su linearan pad čvrstoće (u odnosu na BPA betone), sa povećanjem procenta krupnog ARB agregata do 50%. Za ovaj procenat zamene pad čvrstoće iznosio je 17%. Sa daljim povećanjem količine ARB agregata, nema značajne promene u odnosima čvrstoća BRAK i BPA betona, slika 7.



Slika 7. Dijagram odnosa čvrstoće pri pritisku BRA i BPA betona za razna stanja vlažnosti agregata pri formiranju betonske mešavine

Niža pritisna čvrstoća betona pripremljenog sa vodom zasićenim agregatom objašnjava se izdvajanjem vode na površini uzorka prilikom vibriranja svežeg betona (engl. *bleeding*). Voda iz agregata dolazi u kontakt sa cementom pastom i formira se relativno visok vodocementni faktor, lokalno, u okolini zrna agregata. Ovaj proces može oslabiti vezu između zrna ARB agregata i cementne paste, koja praktično determiniše čvrstoću na pritisak. Suprotno, kada se primeni suv agregat, cementna pasta koja oblaže zrna recikliranog agregata ima manju količinu vode (jer deo vode "odlazi" na vlaženje agregata) i formira jaču vezu, naročito u ranoj fazi očvršćavanja betona. Mešavine koje su sadržale vodom zasićen agregat dale su niže vrednosti čvrstoća u odnosu na one sa suvim agregatom, pri svim ispitivanim starostima, ukoliko je zamena krupnog prirodnog agregata recikliranim 100%. Dakle, nasuprot zaključku većine istraživanja da je najpodesnije stanje recikliranog agregata pri spravljanju betonske mešavine vodom zasićen a površinski suv agregat, Poon i ostali [14] zaključuju da je ovo stanje vlažnosti ARB agregata nepoželjno, tj. da daje niže čvrstoće pri pritisku u odnosu na BRA betone formirane sa potpuno suvim recikliranim agregatom.

Izdvajanje vode na površini uzorka prilikom vibriranja betona analizirali su korejski istraživači [4]. Oni su ovu pojavu analizirali u funkciji stepena upijanja i procentualnog učešća recikliranog agregata u betonskoj mešavini. Zaključili su da se količina vode koja se izdvaja tokom vibriranja uzorka smanjuje kako raste relativno upijanje agregata definisano jednačinom (2):

$$Q_w = \frac{a \cdot Q_{NG} + b \cdot Q_{NS} + c \cdot Q_{RG} + d \cdot Q_{RS}}{a + b + c + d} \quad (2)$$

gde su:

Q_{NG} , Q_{NS} upijanja vode prirodnog krupnog i sitnog agregata,

Q_{RG} , Q_{RS} upijanja vode krupnog i sitnog recikliranog agregata,

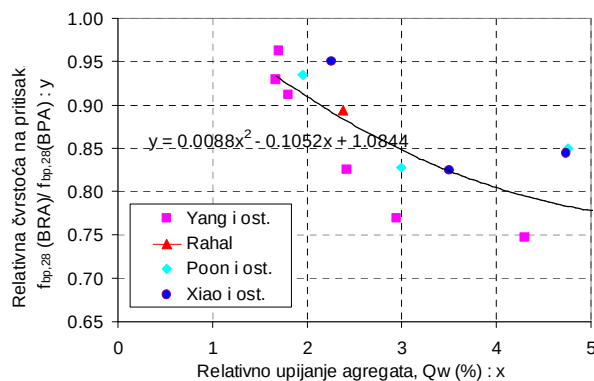
a, b - količine prirodnog krupnog i sitnog agregata

c, d - količine recikliranog krupnog i sitnog agregata,

Q_w - relativno upijanje.

Takođe, količina vode koja se izdvaja tokom vibriranja uzorka smanjuje se kako se povećava procentualno učešće krupnog recikliranog agregata, jer deo te vode može biti apsorbovan od strane cementne paste koja se nalazi na površini zrna recikliranog agregata. Ipak, Yang i ostali [4] navode da ima autora koji su dobili suprotne rezultate, tj. da se količina izdvojene vode na površini uzorka povećava sa povećanjem količine na vazduhu sušenog recikliranog agregata. Napomenimo da su Yang i ostali [4] baratali sa agregatom koji je bio u vodom zasićenom površinski suvom stanju. Kako navodi Neville [4], izdvajanje vode na površini prilikom vibriranja zavisi od karakteristika cementa, količine vode i pucolanskih dodataka. Imajući sve prethodno u vidu, jasno je da će betoni spravljeni sa agregatom u ZPS stanju imati veće izdvajanje vode na površini uzorka, što će oslabiti vezu između zrna ARB agregata i cementne paste i na kraju rezultovati nižom čvrstoćom na pritisak u odnosu na betone sa agregatom u suvom stanju.

Osim od stanja vlažnosti agregata pri spravljanju betonske mešavine, čvrstoća pri pritisku zavisi i od stepena upijanja vode od strane agregata. Koristeći podatke iz nekoliko radova [4], [5], [12], [14] formiran je dijagram na slici 8. Na apscisi se nalazi relativno upijanje agregata koji se nalazi u okviru raznih betonskih mešavina sračunato prema formuli (2), sa različitim odnosima recikliranog i prirodnog agregata. Na ordinati se nalazi odnos čvrstoća BRA i odgovarajućeg BPA betona, pri starosti od 28 dana. U prikazanim rezultatima, agregat je bio u ZPS stanju pri spravljanju betonske mešavine.



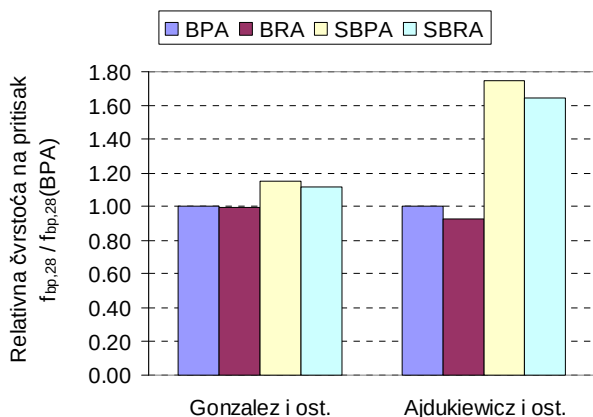
Slika 8. Dijagram zavisnosti relativne čvrstoće pri pritisku BRA betona od relativnog upijanja agregata

Očigledno je da, sa povećanjem relativnog upijanja agregata, opada čvrstoća BRA betona u poređenju sa čvrstoćom uporednog BPA uzorka. Na dijagramu je pri-

kazana kvadratna funkcija koja relativno dobro uspostavlja zavisnost između ove dve veličine.

2.4 Uticaj dodatka cementu

Podaci dobijeni iz ispitivanja španskih [6] i poljskih [16] naučnika ukazuju na uticaj dodatka silikatne prašine Portland cementu na čvrstoću pri pritisku BPA i BRA betona, slika 9.



Slika 9. Dijagram relativne čvrstoće pri pritisku BRA i BPA betona, sa dodatkom silikatne prašine cementu

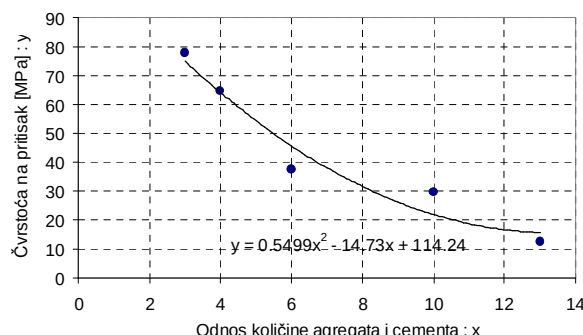
Gonzalez-Fontebao i Martinez-Abella [6] su poredili čvrstoće pri pritisku četiri betona- BPA, BRA betona sa 50% krupnog recikliranog agregata, dok su još dve betonske mešavine spravljene od pomenutih BPA i BRA betona dodavanjem 8% silikatne prašine Portland cementu. Ispitivanje je izvršeno pri starosti betonskih cilindara od 7, 28 i 115 dana. Iz obimnog eksperimentalnog istraživanja koje su sproveli Poljaci Ajdukiewicz i Kliszczewicz [16], radi poređenja sa prethodno pomenutim radom, izdvojeni su podaci koji se odnose na čvrstoće pri pritisku BPA i BRA betona sa 100% ARB agregata, te ovih betona sa dodatkom silikatne prašine od 10% u odnosu na količinu Portland cementa. U španskom ispitivanju, razlike u čvrstoćama na pritisak BPA i BRA betona praktično nema (BPA i BRA na slici 9). Dodatak silikata rezultira povećanjem čvrstoće i to kod BPA betona za 15% (SBPA na slici 8), a kod betona sa recikliranim agregatom za 12% (SBRA na slici 9). Značajno veće razlike u čvrstoćama betona sa silikatnim dodatkom (SBPA i SBRA) u odnosu na betone samo sa cementom (BPA i BRA) dobijene su u drugom istraživanju [16] – 74% veća čvrstoća SBPA, tj. 64% SBRA betona u odnosu na BPA beton. Tako velike razlike u ova dva ispitivanja ne mogu se pripisati ni većoj količini silikatnog dodatka (10% u odnosu na 8% kod Španaca), ni tome što je zamenjena kompletna krupna frakcija recikliranom (100% u odnosu na 50% kod Španaca).

Testovi kojima je ispitivano kako na mehaničke karakteristike BRA betona utiču dodaci cementu, sprovedeni su i u Australiji [8]. Primenjen je Portland cement za uzorke sa prirodnim i sa recikliranim krupnim agregatom (100% zamene), te cement sa dodatkom zgure za uzorke sa recikliranim agregatom. Ciljana čvrstoća pri pritisku betona bila je 25 MPa, a sastav betonskih mešavina je projektovan tako da se postigne

identična konzistencija (sleganje od $8 \pm 1,5$ cm). Uzorci su čuvani u vlažnim uslovima godinu dana. Beton sa recikliranim agregatom i Portland cementom postigao je praktično istu čvrstoću na pritisak, na 28 dana, kao i beton sa prirodnim agregatom i istim cementom (isti rezultat dobili su i Gonzalez&Martinez [6], za slučaj dodavanja silikata, slika 9). Zahvaljujući hidrauličkim osobinama zgure, beton sa ARB agregatom i cementom sa dodatkom zgure imao je značajno veći prirast čvrstoće naročito u periodu od 7 do 28 dana starosti (sa 20,2 na 32,6 MPa). Apsolutna vrednost čvrstoće na 28 dana takođe je bila veća kod ovakvih uzoraka za oko 15% (!) u odnosu na betone sa Portland cementom, bez obzira na primenjeni agregat. Podsetimo, isto povećanje čvrstoće Španci [6] su dobili sa dodatkom 8% silikatne prašine cementu. Nakon 28 dana, porast čvrstoće betona sa Portland cementom iznosio je oko 5%, bez obzira na tip agregata, dok je beton koji je kao dodatak cementu imao i zguru, povećao čvrstoću na pritisak za još 25%, do godinu dana.

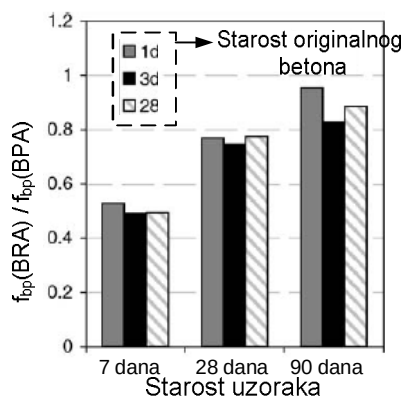
2.5 Uticaj ostalih faktora

Čvrstoća pri pritisku zavisi i od odnosa količine agregata i cementa u betonskoj mešavini. Poon i Lam [7] su ispitivali čvrstoću na pritisak betonskih blokova (20/10/6 cm) varirajući odnos količina ARB agregata (100% zamene) i cementa ($A/C = 3,4,6,10,13$). Rezultati su pokazali da se čvrstoća pri pritisku smanjuje sa povećanjem odnosa A/C (slika 10). Pri relativno niskom odnosu količina agregata i cementa ($A/C=3$) čvrstoća betonskih blokova dominantno je uslovljena čvrstoćom cementne paste. Sa povećanjem odnosa A/C raste značaj kvaliteta agregata i čvrstoća prizmi praktično je direktno proporcionalna odgovarajućoj čvrstoći agregata.



Slika 10. Dijagram čvrstoće pri pritisku BRA betona, na 28 dana, u funkciji odnosa količina agregata i cementa

Značajne količite betona proizvode se za potrebe kontrole kvaliteta u industriji prefabrikovanih elemenata ili u cementnoj industriji. Taj beton nakon ispitivanja postaje građevinski otpad i odlazi se na deponije, a krajnji cilj istraživanja koje je obavio Katz [9] bio je da se taj beton koristi kao izvor recikliranog agregata. Ispitivane su mehaničke karakteristike betona na bazi ARB agregata (100% zamene krupnog) koji potiče od betonskih kocki starih 1, 3 i 28 dana korišćenih za kontrolu kvaliteta cementa. Čvrstoća pri pritisku merena je na 7, 28 i 90 dana. Rezultati su prikazani na dijagramu na slici 11.

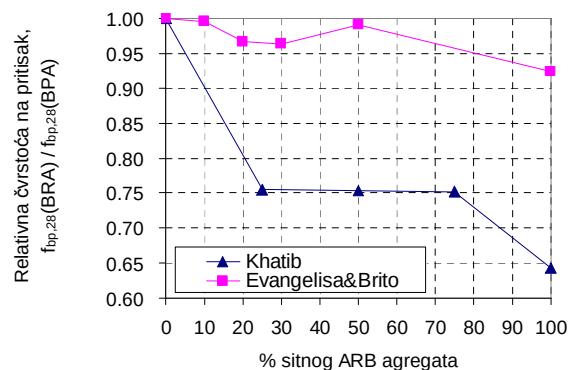


Slika 11. Dijagram relativne čvrstoće pri pritisku BRAK betona (100% ARB), u zavisnosti od starosti originalnog betona

U proseku, betoni sa recikliranim agregatom imali su na 28 dana oko 24% manju čvrstoću na pritisak u odnosu na uporedni BPA beton, nezavisno od starosti betona prilikom recikliranja, slika 11. Ako se uporede međusobno betoni na bazi recikliranog agregata, može se zaključiti da je uticaj starosti betona u trenutku kada se reciklira, na čvrstoću, relativno mali i iznosi maksimalno 13% na 90 dana starosti betona koji se ispituje. Na 28 dana starosti razlike u čvrstoćama su nekoliko procenata, slika 11.

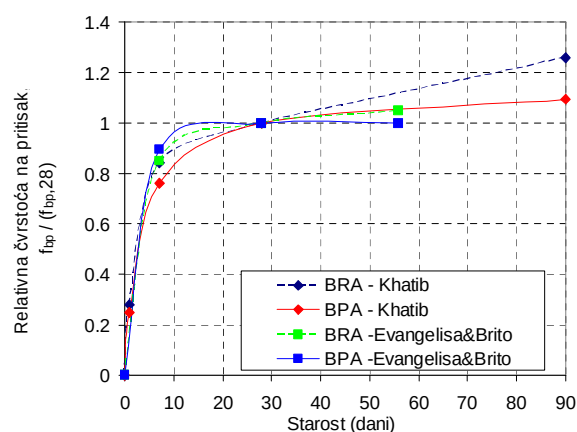
2.6 Betoni sa recikliranim sitnim i prirodnim krupnim agregatom

Nakon što je Hansen [1] izneo zaključak da sitna frakcija recikliranog agregata ($d < 4$ mm) ima uglavnom štetan uticaj na fizičko-mehaničke karakteristike betona, u velikoj većini istraživanja BRA betona podrazumevala se primena prirodne sitne frakcije (peska) i različitih procenata krupnog ARB agregata. Ovde će biti predstavljena dva rada koja se bave istraživanjem primene sitnog ARB agregata i njegovim uticajem na mehaničke karakteristike betona. Kod Khatib-a [10], prirodni agregat prečnika zrna manjeg od 5 mm zamenjen je sitnim agregatom od recikliranog betona u procentualnim iznosima od 0, 25, 50 i 100%, dok su krupnije frakcije bile potpuno od prirodnog agregata. Udeo sitne frakcije u odnosu na ukupnu količinu agregata iznosio je oko 33%. Evangelista i Brito [11] testirali su uzorke betonskih kocki napravljenih od šest betonskih mešavina sa 0, 10, 20, 30, 50 i 100% sitnog recikliranog agregata ($d \leq 1,19$ mm). Udeo sitne frakcije u odnosu na ukupnu količinu agregata iznosio je oko 30%. Rezultati dobijeni iz ova dva eksperimenta su značajno različiti, a zavisnost čvrstoće pri pritisku BRAS od procentualnog sadržaja sitnog recikliranog agregata, prikazana je na slici 12. Zajedničko za oba merenja je da čvrstoća pri pritisku svih betona opada sa povećanjem procenta sitne reciklirane frakcije. Kod Khatib-a [10] je karakteristično da betoni koji sadrže od 25 do 75% sitnog ARB agregata, imaju približno isti pad čvrstoće na 28 dana od oko 25%, u odnosu na čvrstoće uporednog BPA, slika 12.



Slika 12. Dijagram relativne čvrstoće pri pritisku BRAS betona, na 28 dana, u funkciji količine sitnog ARB agregata

Pad čvrstoće kod betona sa 100% sitnog ARB agregata iznosi oko 36%, što je u skladu sa navodima Hansena [1]. S druge strane, istraživanje sprovedeno u Portugalu [11] dalo je neočekivano dobre rezultate. Merenja su pokazala maksimalnu razliku u čvrstoćama između BPA i BRAS do 7% (!), slika 12. Ovakvo dobri rezultati objašnjeni su prisustvom velike količine cementa (hidratisanog i nehidratisanog) kod sitnog ARB agregata, koja može dostići i do 25% njegove težine, čime se značajno povećava količina cementa u betonskoj mešavini. Ipak, ista količina sitnog ARB agregata, što znači verovatno je ista količina cementa oko zrna agregata (podaci nisu dostupni), u uporednom istraživanju [10] rezultirala je znatno nižim relativnim čvrstoćama. Verovatnije je, da je visok odnos relativnih čvrstoća BRA i BPA betona, rezultat brižljivo sprovedene analize upijanja vode sitnog ARB agregata, sprovedenim postupcima spravljanja betonskih mešavina kao i projektovanja probnih mešavina, kako bi za sve procenata zamene sitnog agregata sveži betoni imali istu vrednost sleganja od 80 ± 10 mm [11]. To je rezultiralo različitim efektivnim vodocementnim faktorima u zavisnosti od procenta zamene prirodnog recikliranim agregatom (reciklirani agregat je bio u stanju prirodne vlažnosti, a pri spravljanju betona dodavana je voda koja odgovara upijanju). U istraživanju Khatib-a [10], betoni sa različitim procentima



Slika 13. Dijagram relativnog prirasta čvrstoće pri pritisku BRAS i BPA betona tokom vremena

zamene sitne frakcije imali su isti efektivni vodocementni faktor ($w/c=0,5$, reciklirani agregat u ZPS stanju), što je rezultiralo različitim konzistencijama i sleganjima svežeg betona. U oba eksperimenta, nehidratirana cementna pasta oko zrna agregata uticala je da čvrstoća pri pritisku kod BRAS betona ima veći prirast nakon 28 dana (slično kao kod BRAK betona) u odnosu na BPA betone, slika 13.

3 ČVRSTOĆA NA ZATEZANJE

Jedna od mehaničkih karakteristika koja se ne razlikuje značajno kod BPA i BRA betona je čvrstoća na zatezanje. U izveštaju Hansena [1] se navodi da je čvrstoća na zatezanje BRAK betona maksimalno 10% manja od čvrstoće na zatezanje BPA betona. Razlike u čvrstoćama od 10% do 20% mogu se očekivati ukoliko se beton pravi sa recikliranim agregatom svih frakcija. Najčešće se čvrstoće na zatezanje određuju testom cepanja, ali ima i rezultata dobijenih na osnovu testa savijanja.

Na osnovu numeričkih podataka iz dostupnih radova nije bilo moguće formirati dijagrame zavisnosti čvrstoće na zatezanje od procentualnog sadržaja recikliranog agregata ili dijagram razvoja čvrstoće na zatezanje. Zato će biti izneti zaključci nekoliko istraživanja koji, u principu, potvrđuju navode Hansena [1].

Poređenje zatezne čvrstoće BRA i BPA betona istih efektivnih vodocementnih faktora, dalo je vrlo slične rezultate u istraživanju sprovedenom u Španiji [3]. Za betone koji sadrže od 20 do 50% recikliranog krupnog agregata razlike u čvrstoćama na zatezanje u odnosu na beton sa potpuno prirodnim agregatom iznose do 2%. Betoni sa 100% recikliranog krupnog agregata imaju čvrstoću na zatezanje prosečno 10% manju od uporednih uzoraka.

Gonzalez-Fonteboa i Martinez-Abella [6] su izvestili da ni količina recikliranog agregata, ni dodatak silikatne prašine cementu, ne utiču na vrednost čvrstoće na zatezanje. Svi rezultati, nezavisno od tipa agregata, vrste veziva ili starosti pri ispitivanju, nalaze se u okviru granica od $\pm 5\%$.

Poljski autori [16] takođe su dobili malu razliku u čvrstoći na zatezanje između BRAK (100% ARB) i BPA betona, prosečno od 3%. Ipak, dodatak silikatne prašine od 10% u odnosu na količinu cementa, kod BRA betona je rezultovao povećanjem zatezne čvrstoće od čak 28%.

Da čvrstoća na zatezanje zavisi od količine i vrste veziva, zaključio je i Sagoe-Crentsil [8]. On je takođe došao do zaključka da tip agregata nije od značaja kada se govori o zateznoj čvrstoći. S druge strane, ako se umesto klasičnog Portland cementa kao vezivo upotrebi cement sa dodatkom zgure, čvrstoća na zatezanje je veća za 15% na 28 dana, tj. 25% nakon godinu dana starosti betona (100% zamene krupnog agregata). Osim vrste veziva, na zateznu čvrstoću utiče i količina veziva i to tako da se sa povećanjem količine cementa povećala i razmatrana čvrstoća.

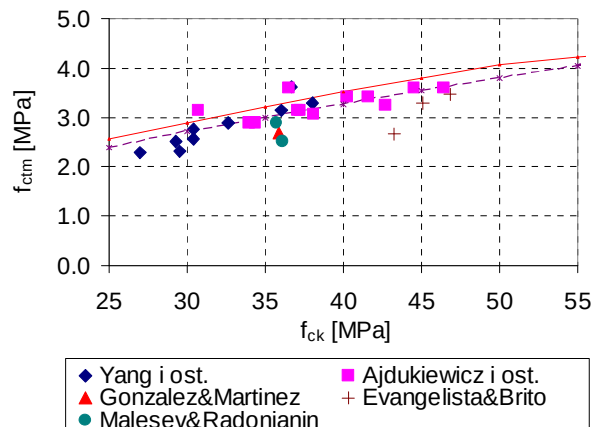
Rezultati koje su prezentovali Poon i Lam [7] takođe idu u prilog tezi da korišćenje recikliranog agregata umesto prirodnog nema značajan uticaj na čvrstoću pri zatezanju. Ipak, oni su zaključili da zatezna čvrstoća zavisi od odnosa količine agregata i cementa – sa povećanjem ovog odnosa smanjuje se čvrstoća na

zatezanje, nezavisno od toga da li je u betonskoj mešavini korišćen prirodni, reciklirani ili obe vrste agregata.

Uticaj sitne frakcije agregata na čvrstoću pri zatezanju cepanjem analiziralo je malo autora. Istraživanje iz Portugalijske [11] ukazuje da se, sa količinom sitnog ARB agregata od 30% čvrstoća smanjila za 5%, dok je kod betona sa 100% sitne reciklirane frakcije smanjenje oko 23%. Za ista procentualna učešća recikliranog sitnog agregata, Yang [4] je dobio niže vrednosti čvrstoće na zatezanje od čak 24% i 37%, respektivno, u odnosu na uporedni BPA.

U Korejskom istraživanju [4] ispitivana je čvrstoća na zatezanje cepanjem u funkciji procentualnog učešća i stepena upijanja krupnog ARB agregata. BRA betoni sa agregatom veće absorpcione moći (upijanje ARB agregata od 6,2%) imaju do 37% nižu vrednost čvrstoće na zatezanje (sa 100% krupnog ARB agregata). BRA betoni od krupnog ARB agregata sa manjim upijanjem (1,6%) imali su do 14% manju zateznu čvrstoću, za isti procenat ARB agregata. Smanjenje čvrstoće na zatezanje u odnosu na uporedni BPA u iznosu do 30% važi za sve betonske mešavine koje sadrže do 50% krupnog recikliranog agregata, nezavisno od njegove sposobnosti upijanja vode.

Veoma važna veza za proračun betonskih konstrukcija je između čvrstoće na zatezanje i čvrstoće pri pritisku. Uporedne vrednosti ove dve veličine dobijene iz različitih eksperimenata [4], [6], [11], [16] prikazane su na dijagramu na slici 14.



Slika 14. Dijagram zavisnosti čvrstoće pri pritisku i čvrstoće na zatezanje BRA betona, za različite procenete zamene

Treba napomenuti da se vrednosti sa dijagrama odnose na različite procenete zamene i krupnog i sitnog prirodnog agregata recikliranim.

Puna linija na dijagramu predstavlja vezu između posmatranih čvrstoća kako je definiše Evrokod 2 [17]:

$$f_{cm} = 0.30 \times f_{ck}^{2/3}, \text{ za klase do C50/60} \quad (3)$$

$$f_{cm} = 2.12 \times \ln(1 + (f_{cm}/10)), \text{ za klase iznad C50/60}$$

gde je:

f_{cm} – srednja vrednost aksijalne čvrstoće betona na zatezanje,

f_{ck} – karakteristična čvrstoća betona na pritisak određena na cilindru,

f_{cm} – srednja vrednost čvrstoće betona na pritisak.

Isprekidana linija na slici 14 predstavlja dobru aproksimaciju odnosa čvrstoća BRA betona na zatezanje i na pritisak, s obzirom na prikazani broj merenja, kao i na raznorodnost tipa i procentualnog učešća recikliranog agregata. Ta linija je dobijena kada se jednačina (3) modifikuje na sledeći način:

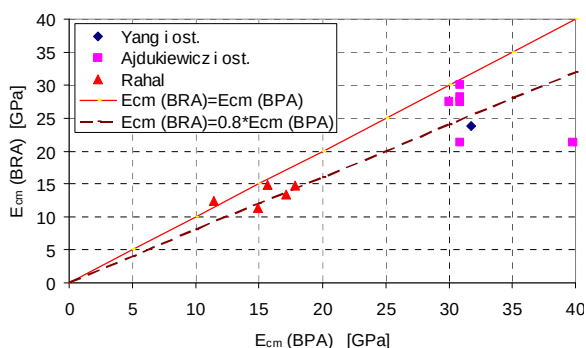
$$f_{cm} = 0.28 \times f_{ck}^{2/3} \quad (4)$$

Dakle, smanjenje čvrstoće na zatezanje kod BRA betona, posmatrano relativno u odnosu na čvrstoću na pritisak, iznosi oko 7% u odnosu na beton sa prirodnim agregatom, bez obzira na to koliko ima i koje su frakcije recikliranog agregata u betonskoj mešavini.

4 MODUL ELASTIČNOSTI

Zbog značajne količine stare cementne paste koja ima relativno nizak modul elastičnosti, a koja se nalazi oko zrna recikliranog agregata, modul elastičnosti betona na bazi recikliranog agregata praktično uvek ima nižu vrednost u poređenju sa uporednim BPA betonom. U izveštaju Hansena [1] se kaže da su vrednosti modula elastičnosti kod betona na bazi recikliranih agregata od 15 do 40% niže od vrednosti uobičajene za betone sa prirodnim agregatom. Veće vrednosti modula elastičnosti, tj. manji pad beleži se kod betona spravljanih sa krupnim ARB agregatom, dok su manje vrednosti modula, tj. veći pad, zabeleženi kod betona koji sadrže i sitne i krupne frakcije recikliranog agregata.

Na slici 15 prikazane su vrednosti modula elastičnosti BRA betona sa 100% recikliranog krupnog agregata dobijenog iz nekoliko eksperimenata [4,5,16], u poređenju sa modulom elastičnosti kod uporednih BPA betona.



Slika 15. Dijagram odnosa modula elastičnosti BRAK betona (100 % ARB) i BPA betona

Očigledno je da se gotovo sve vrednosti nalaze ispod pune linije, što znači da su moduli elastičnosti niži kod BRA u odnosu na BPA betone. Iako nedostaju podaci za module elastičnosti u značajnoj oblasti od 20 do 30 GPa, može se reći da crtkasta linija na dijagramu predstavlja dobru aproksimaciju prikazanih podataka. Jednačina te linije glasi:

$$E_{cm} (BRA) = 0.8 \times E_{cm} (BPA) \quad (5)$$

gde je E_{cm} sekantni modul elastičnosti.

Dakle, može se smatrati da modul elastičnosti betona na bazi recikliranog agregata sa 100% krupne

ARB frakcije, predstavlja 80% modula elastičnosti uporednog BPA betona.

Još jedna od značajnih funkcionalnih zavisnosti svojstava betona je između čvrstoće pri pritisku i modula elastičnosti. Ispitivanja su pokazala da se i kod BRA betona može uspostaviti veza između ove dve veličine, ali na drugačiji način nego kod BPA betona. Eksperimentalni rezultati [4,5,16] ispitivanja modula elastičnosti betona sa 100% recikliranog krupnog agregata koji su prikazani na slici 16, dobro slede zavisnost od čvrstoće pri pritisku koja je definisana isprekidanom linijom na dijagramu, a čija jednačina glasi:

$$E_{cm} = 0.74 \cdot f_{cm} - 5.850 \quad (6)$$

gde je:

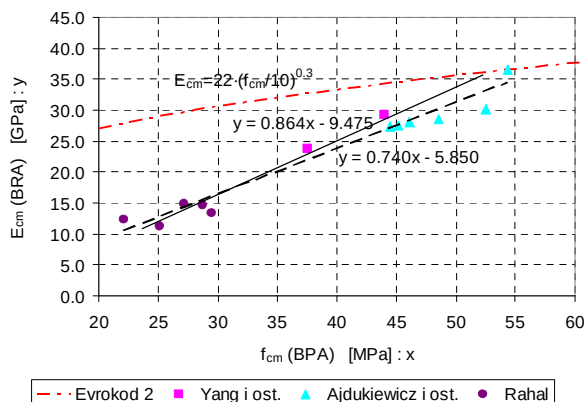
f_{cm} – srednja vrednost čvrstoće betona na pritisak u MPa, probno telo cilindar

E_{cm} – sekantni modul elastičnosti betona u GPa.

Sa druge strane, numerički podaci (koji nisu prikazani na dijagramu na slici 16 radi jasnoće), iz eksperimenata [4,5,16] za uporedne BPA betone, dali su zavisnost modula elastičnosti od čvrstoće pri pritisku definisanu punom linijom na dijagramu na slici 16, čija je jednačina:

$$E_{cm} = 0.864 \cdot f_{cm} - 9.475 \quad (7)$$

gde su f_{cm} i E_{cm} veličine definisane kao u jednačini (6).



Slika 16. Dijagram odnosa čvrstoće pri pritisku i modula elastičnosti BRAK betona (100% ARB)

Dakle, kako raste čvrstoća pri pritisku, raste i razlika u modulima elastičnosti između BPA i BRA betona, pri čemu se veće vrednosti modula elastičnosti odnose na BPA betone. Sa dijagrama se, na osnovu zavisnosti (6) i (7), može zaključiti da za srednje vrednosti čvrstoće pri pritisku do 30 MPa, praktično nema razlike u modulima elastičnosti BRA i BPA betona. Za betone čija je srednja vrednost čvrstoće pri pritisku 50 MPa, razlika u modulima elastičnosti iznosi oko 8%.

Sa dijagrama na slici 16 može se pratiti odstupanje modula elastičnosti za BRA i BPA betone iz eksperimentalnih podataka u odnosu na teorijske vrednosti dobijene na osnovu srednje vrednosti čvrstoće pri pritisku (linija formata tačka-crta), prema definiciji Evrokoda 2 [17]:

$$E_{cm} = 22 \times [f_{cm}/10]^{0.3} \quad (8)$$

gde su f_{cm} i E_{cm} veličine definisane kao u jednačini (6).

Sprovedeno je još nekoliko istraživanja iz kojih nisu bili dostupni numerički podaci već samo zaključci, koji će u daljem biti navedeni.

Dosho i ostali [2] dobili su da sekantni modul elastičnosti kod betona sa recikliranim agregatom (100% krupne frakcije) iznosi od 80 do 95% modula elastičnosti uporednog BPA.

U španskom ispitivanju [3] betoni sa 20, 50 i 100% zamene prirodnog krupnog agregata recikliranim daju 10, 20 i 40% niže vrednosti modula elastičnosti, respektivno. Za betone sa 20 i 50% ARB agregata može se reći da je smanjenje modula u odnosu na uporedni BPA nezavisno od njegove čvrstoće pri pritisku. Kod betona sa 100% krupnog ARB agregata, smanjenje modula u odnosu na uporedni beton je veće kako raste čvrstoća pri pritisku betona. Ovaj zaključak je u saglasnosti sa zaključkom izvedenim na osnovu dijagrama na slici 16.

Korejski naučnici [4] su zaključili da normalizovani modul elastičnosti koji predstavlja odnos modula elastičnosti i kvadratnog korena čvrstoće pri pritisku, kod BRA betona opada sa povećanjem absorpcione moći recikliranog agregata.

Prema ispitivanjima [6], na modul elastičnosti ne utiče dodavanje silikatne prašine u betonsku mešavinu. Razlika između betona sa recikliranim agregatom i uporednog BPA betona bila je oko 11% na 28 dana, a BRA betona koji je sadržao i dodatak silikatne prašine, oko 15% pri istoj starosti. U ovom ispitivanju, silikatni dodatak nije uticao ni na modul elastičnosti kod betona sa potpuno prirodnim agregatom – razlike su do $\pm 2\%$.

Proučavajući karakteristike betona sa recikliranim agregatom koji potiče od betona starosti od 1 do 28 dana, Katz [9] je dobio izuzetno niske vrednosti modula elastičnosti. U poređenju sa uporednim BPA betonom, moduli elastičnosti BRA betona su manji za 37, 41 i 50%. Ova smanjenja odgovaraju betonu sa ARB agregatom koji potiče od originalnog betona starosti 1, 3 i 28 dana, respektivno.

U istraživanju Evangelista-a i Brito-a [11], betoni sa 100% sitne frakcije od recikliranog agregata imali su 18,5% manju vrednost modula elastičnosti, dok je za 30% zamene zabeležen pad modula od svega 3,7% u odnosu na uporedni BPA.

Xiao [12] je takođe zaključio da modul elastičnosti opada sa povećanjem procentualnog udela recikliranog agregata i ako se primeni 100% krupnog recikliranog agregata pad iznosi do 45% u odnosu na uporedni BPA.

Deibieb i Kenai [15] su dobili modul elastičnosti redukovano za 30, 40 i 50% kod betona sa zamenjenim krupnim, sitnim, te krupnim i sitnim recikliranim agregatom respektivno, u odnosu na uporedni BPA.

5 ZAKLJUČAK

Na osnovu prethodno iznetih činjenica mogu se izvesti sledeći zaključci:

- povećanje količine krupnog ARB agregata dovodi do snižavanja čvrstoće pri pritisku BRAK betona u odnosu na uporedne BPA betone sa istim efektivnim vodocementnim faktorom,

- BRAK betoni sa 100% recikliranog agregata imaju prosečno 13%, a BRAK betoni sa 50% ARB agregata

8% nižu čvrstoću na pritisak, u odnosu na uporedni BPA beton,

- čvrstoća pri pritisku BRAK betona opada sa povećanjem efektivnog vodocementnog faktora, na sličan način kao kod BPA betona,

- čvrstoća pri pritisku BRA betona zavisi od čvrstoće originalnog betona; ukoliko je čvrstoća originalnog betona niža od ciljane čvrstoće prema kojoj se projektuje betonska mešavina, čvrstoća pri pritisku BRA betona biće niža od uporednog BPA betona; uticaj čvrstoće originalnog betona je utoliko veći ukoliko je veća ciljana čvrstoća novog betona,

- prirast čvrstoće pri pritisku do 28 dana je brži kod BPA u odnosu na BRA betone, a nakon 28 dana veći je prirast čvrstoće BRA betona u odnosu na uporedne BPA betone,

- na čvrstoću pri pritisku značajno utiče stanje vlažnosti agregata pri spravljanju betonske mešavine. Na osnovu ispitivanja [14] najnepovoljnije stanje agregata je vodom zasićen površinski suv, dok je najpovoljnije raditi sa potpuno suvim ARB agregatom; ovo je u kontradikciji sa većinom istraživanja koja su istakla prednosti spravljanja betonske mešavine sa agregatom u ZPS stanju,

- postoji zavisnost između relativnog upijanja vode od strane agregata i čvrstoće pri pritisku BRA betona, pri čemu više vrednosti relativnog upijanja znače i veći pad čvrstoće BRA u odnosu na BPA betone,

- zbog velikih razlika u dostupnim podacima, nije moguće zaključiti o stepenu uticaja silikatnog dodatka cementu na čvrstoću na pritisak; uopšteno važi da dodatak silikatne prašine povećava čvrstoću na pritisak BRA betona,

- istraživanja potvrđuju raniji stav o velikom padu čvrstoće pri pritisku ukoliko se koristi sitna frakcija recikliranog agregata; ipak, dobri rezultati iz nekih ispitivanja ukazuju da se brižljivim projektovanjem betona (preciznim određivanjem količine dodate vode) i tehnologijom spravljanja betonske mešavine, štetni efekti sitne ARB frakcije mogu svesti na prihvatljiv nivo,

- odnos čvrstoća na zatezanje i pritisak BRA betona u proseku je za oko 7% je niži od odnosa definisanog Evrokodom 2 za betone sa prirodnim agregatom, nezavisno od procenta zamene,

- modul elastičnosti BRAK betona (100% ARB agregata) predstavlja u proseku 80% vrednosti modula elastičnosti uporednog BPA betona,

- kod BRAK betona (100% ARB agregata) važi drugačija veza između čvrstoće pri pritisku i modula elastičnosti nego kod BPA betona; sa porastom čvrstoće pri pritisku raste i razlika u modulima elastičnosti BPA i BRA betona; ako se uporede BRAK i BPA betoni iste čvrstoće pri pritisku, tada za uobičajene čvrstoće pri pritisku od oko 30 MPa, razlike u modulima elastičnosti BRA i BPA betona praktično nema; za veće čvrstoće pri pritisku od 50 MPa, BRAK betoni imaju za oko 8% manji modul elastičnosti u poređenju sa BPA betonom iste čvrstoće pri pritisku.

ZAHVALNOST

U radu je prikazan deo istraživanja koje je pomoglo Ministarstvo za nauku Republike Srbije u okviru tehnološkog projekta TR-16004 pod nazivom: "Istraživanje

savremenih betonskih kompozita na bazi domaćih sirovina, sa posebnim osvrtom na mogućnosti primene betona sa recikliranim agregatom u betonskim konstrukcijama".

6 LITERATURA

- [1] Hansen T. C. : Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, Third State-of-the-art Report 1945-1989 of Technical Committee 37-DRC (Demolition and Reuse of Concrete), 1992, str. 157
- [2] Dosho Y., Kikuchi M., Narikawa M., Ohshima A., Koyama A., Miura T. : Application of Recycled Concrete for Structural Concrete – Experimental Study on the Quality of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete, ACI – Special Publication, SP 179-61A, str. 29
- [3] Sanchez de Juan M., Gutierrez P.A.: Influence of recycled aggregate quality on concrete properties, International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures, Barcelona, 2004., str. 9
- [4] Yang K.H., Chung H.S., Ashour A.: Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties, ACI Material Journal, V. 105, No. 3, May-June 2008, str. 289-296
- [5] Rahal K.: Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate, Building and Environment 42 (2007), str. 407-415
- [6] Gonzalez-Fontebao, B., Martinez-Abella F.: Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties, Building and Environment 43 (2008), str. 429-437
- [7] Poon C. S., Lam C. S. : The effect of aggregate-to-cement ratio and types of aggregates on properties of pre-cast concrete blocks, Cement and Concrete Composites 30 (2008), str. 283-289
- [8] Sagoe-Crentsil K.K., Brown T., Taylor A.H. : Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate, Cement and Concrete Research 31 (2001), str. 707-712
- [9] Katz A.: Performance of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete, Cement and Concrete Research 33 (2003), str. 703-711
- [10] Khatib J. M.: Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate, Cement and Concrete Research 35 (2005), str. 763-769
- [11] Evangelista L., Brito J.: Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregate, Cement and Concrete Composites 29 (2007), str. 397-401
- [12] Xiao J., Li J., Zhang Ch. : Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading, Cement and Concrete Research 35 (2005), str. 1187-1194
- [13] Topcu I. B., Sengel S.: Properties of concrete produced with waste concrete aggregate, Cement and Concrete Research 34 (2004), str. 1307-1312
- [14] Poon C. S., Shui Z. H., Lam C. S., Fok H., Kou S.C. : Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete, Cement and Concrete Research 34 (2004), str. 31-36
- [15] Debieb F., Kenai S. : The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete, Construction and Building Materials, 22 (2008), str. 886-893
- [16] Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A.: Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC, Cement and Concrete Composites 24 (2002), str. 269-279
- [17] EN 1992: 2004, Evrokod 2: Proračun betonskih konstrukcija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2006, str. 237
- [18] Ajdukiewicz A., Kliszczewicz A.: Comparative Tests of Beams and Columns Made of Recycled Aggregate Concrete and Natural Aggregate Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 5, No. 2, Japan Concrete Institute, 2007, str. 259-273
- [19] Malešev M., Radonjanin V.: Reciklirani betoni kao agregat za dobijanje konstrukcijskih betona, Konferencija "Savremena građevinska praksa 2007", Novi Sad, April/2007, Zbornik radova, str. 201-222.

REZIME

MEHANIČKE KARAKTERISTIKE BETONA NA BAZI RECIKLIRANOG AGREGATA

Ivan IGNJATOVIĆ
Snežana MARINKOVIĆ

U cilju očuvanja životne sredine i održivog razvoja građevinarstva, u svetu se sve češće proizvode betoni na bazi agregata dobijenog recikliranjem građevinskog otpada, u prvom redu betona. U radu su prikazani rezultati eksperimentalnih istraživanja čvrstoće pri pritisku, zatezanje i modula elastičnosti betona na bazi recikliranog agregata. Korišćeni su numerički podaci iz istraživanja sprovedenih u poslednje dve decenije, kako bi se pronašle zakonitosti u ponašanju, uspostavile veze između pojedinih veličina i izveli odgovarajući zaključci. Izvršeno je poređenje sa karakteristikama betona na bazi prirodnog agregata i ukazano na sličnosti i razlike. Na osnovu zaključaka može se reći da reciklirani betoni imaju budućnost kao konstruktivni betoni, ali da je zbog značajnog osipanja dosadašnjih rezultata neophodno sprovesti dodatna eksperimentalna istraživanja i mehaničkih karakteristika betona i samih konstruktivnih elemenata od recikliranih betona.

Ključne reči: održivi razvoj, reciklirani agregat, reciklirani beton, mehaničke karakteristike

SUMMARY

MECHANICAL PROPERTIES OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE

Ivan IGNJATOVIĆ
Snežana MARINKOVIĆ

For the purpose of the environmental preservation and sustainable development, production of concrete made of recycled concrete rubble (recycled aggregate concrete-RAC) become more often. Results of experimental investigations of mechanical properties of RAC, performed in last 20 years, are presented in this paper. Test results of RAC compressive strength, tensile strength and elastic modulus are critically analyzed and compared. Comparison of natural aggregate concrete (NAC) and RAC properties is performed too, and differences and similarities are pointed out. Based on analyzed experimental results, it can be concluded that RAC has the future in structural applications. However, significant scatter of the test results points at a need for more experimental investigation of RAC properties, and especially, of structural elements made of RAC.

Key words: sustainable development, recycled aggregate, recycled aggregate concrete, mechanical properties

SPECIFIČNOSTI TEHNOLOGIJE SPRAVLJANJA BETONA NA BAZI RECIKLIRANOG AGREGATA

Dragica JEVTIĆ
Dimitrije ZAKIĆ
Aleksandar SAVIĆ

PREGLEDNI RAD
UDK: : 666.972.12 = 861

1 UVOD

Možda najbitniju karakteristiku stepena na kome se nalazi savremeno društvo, uz stalni napredak nauke i tehnike, predstavlja pojava sve većeg problema u vezi iskorišćenog i otpadnog materijala. Predmetne probleme neophodno je rešavati odmah, jer u slučaju da ostanu nerešeni mogu vremenom postati akutni i nerešivi. Moguća rešenja, koja su u skladu sa racionalnim sagledavanjem problema, daje filozofija održivog razvoja. Održivi razvoj je jedna od retkih sveprisutnih tema, iz dana u dan sve aktuelnija, pre svega zato što je od izuzetne važnosti za savremeno društvo a može se primeniti praktično na sve vidove delatnosti čoveka [1]. U oblasti građevinarstva, održivi razvoj uspostavlja se u veoma širokom obimu različitih aktivnosti, od kojih je jedna proizvodnja i primena recikliranih materijala, a posebno betona na bazi recikliranog agregata.

Građevinski otpad, kao rezultat građenja novih i rušenja postojećih objekata, ali i kao rezultat prirodnih katastrofa, jedan je od najvećih ekoloških problema u današnjem svetu, pogotovu u zemljama Evropske Unije. Upravljanje čvrstim građevinskim otpadom do sada se svodilo na njegovo odlaganje na deponije. Međutim, površine ovih deponija se iz dana u dan povećavaju i na taj način oduzimaju dragoceno obradljivo zemljište, te predstavljaju ekološki i ekonomski problem.

Adresa autora:

Prof. dr Dragica Jevtić, dipl. inž. tehn., Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, dragica@imk.grf.bg.ac.yu
Asist. mr Dimitrije Zakić, dipl. inž. građ., Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, dimmy@imk.grf.bg.ac.yu
Asist. pripr. Aleksandar Savić, dipl. inž. građ., Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd, sasha@imk.grf.bg.ac.yu

Kada govorimo o betonu kao potencijalnom ekološkom ili "zelenom" materijalu, treba prvo naglasiti njegove osnovne nedostatke na tom planu. Naime, proizvodnja komponentnih materijala (cementa, agregata, hemijskih i mineralnih dodataka), kao i samog betona zahteva veliku količinu energije i generalno predstavlja izvor značajnog zagađenja životne sredine. Zato je način implementacije poznatog principa "3R" (*Reduce, Recycle, Renewable*) u ovoj oblasti veoma značajan. Cilj je smanjiti potrošnju energije i stepen zagađenja (*Reduce*), ponovo koristiti stari beton (*Recycle*) - kao agregat za novi beton (*Renewable resource*).

Većina razvijenih zemalja poslednjih godina aktivno se bavi razradom politika i mera kako bi se smanjilo iscrpljivanje prirodnih resursa - sirovina, odnosno podsticanje održivosti njihovog korišćenja putem reciklaže, korišćenja sekundarnih sirovina, razvoja alternativnih tehnologija i supstitucije neobnovljivih resursa.

Uopšteno govoreći, građevinarstvo je aktivnost štetna po životnu sredinu. Njeni štetni efekti uključuju narušavanje biosfere i biodiverziteta, iskorišćavanje i transformaciju terena, iscrpljivanje prirodnih resursa (energije, minerala, vode, plodnog zemljišta), hemijska, fizička i vizuelna zagađenja (zemljište, vazduh, voda), generisanje otpada i promenu klime.

Recikliranje građevinskog i demoliranog otpada (na engleskom jeziku *Construction and Demolition Waste* – skraćeno se ovaj pojam obeležava kao *C&D Waste*) je socijalno-ekonomski prioritet, obzirom da on predstavlja nezanemarljiv procenat u odnosu na ukupnu količinu otpada označenog kao produkt ljudskih aktivnosti. Količina *C&D* otpada, naravno, leži u direktnoj srazmeri sa stepenom građevinskih delatnosti, pa se razlikuje od države do države [2]. Na primer, u Hong Kongu, u kome se veoma mnogo gradi, proizvodi se oko 37000 tona *C&D* otpada svakodnevno, što je grubo oko 4 puta više od količine komunalnog čvrstog otpada koji se proizvede u tom gradu, kako navode Tam i sar. [3].

Ukoliko se posmatraju procenti različitog otpadnog materijala u odnosu na ukupnu količinu građevinskog i

demoliranog otpada, može se reći da beton zauzima glavno mesto, u procentu od oko 75% u odnosu na ukupnu količinu građevinskog otpada na gradilištima, oko 70% u odnosu na ukupnu količinu otpada na mestima demoliranja konstrukcija, oko 40% na lokacijama opštih građevinskih radova i oko 70% u odnosu na celokupnu količinu otpada prilikom restauracija [2].

Na osnovu dostupnih podataka, stepen recikliranja betona u Danskoj iznosi 80%, u Holandiji 75% i u Japanu 65%. Da bi se postigao ovaj visoki stepen recikliranja, moraju se implementirati posebni uslovi na gradilištima, kao na primer selektivno demoliranje. Različite vrste materijala (opeka, kamen, crep, beton i drvo) moraju se uklanjati zasebno, koliko je to moguće, i sortirati na licu mesta, kako bi se omogućila efikasnija reciklaža [4].

U Japanu je zabeležena upotreba betona na bazi recikliranog agregata u zahtevnijim konstrukcijama, sa stopom recikliranja od 65% za beton [5]. U izvesnim slučajevima reciklirani agregat (Recycled Aggregate -

RA) korišćen je za nove betone u konstrukcijama. Takođe, u Velikoj Britaniji je politika vlade da se poveća nivo RA i tako promoviše konzervacija prirodnih resursa i poboljša zaštita čovekove okoline.

Brojni primeri u svetu nedvosmisleno pokazuju da je neophodno učiniti političku odluku i implementirati princip "zagađivač plaća" (*polluter pays principle*), ma koliko jasno je izražena potreba za recikliranjem. Generalno, građevinska industrija je relativno konzervativna, pa promene u ustaljenim procedurama zahtevaju dosta vremena i potrebne su im dugoročne politike i strategije. Uvođenjem ekonomskih instrumenata, koji podstiču recikliranje i upotrebu recikliranog agregata, mogu se prevazići ekonomske barijere. Treba naglasiti da su izvesne države, u ovom smislu, već uvele posebne takse i novčane naknade u korist recikliranja. Danska vlada je još 1986. godine uvela taksu na otpad koji se ne reciklira nego odlaže na deponijama. Danas je ta taksa reda veličine 50 evra po toni odloženog otpada.

Tabela 1: Rekapitulacija prethodnih istraživanja RAC-a [14]

Izvori	Procenat zamene	Čvrstoća pri pritisku ^a	Čvrstoća pri savijanju ^a	Modul elastičnosti ^a
Acker (1998)	100% zamene krupnog ag.	17.2% niža	17.2% niža	23% niži
Ahmed i Struble (1995)	100% zamene krupnog ag.	33% niža		
Bretschneider (2004)	100% zamene krupnog ag. 75% zamene krupnog ag. 50% zamene krupnog ag.			11.9% niži 4.0% niži 5.8% niži
Frondistou-Yannas (1977)	100 %zamene krupnog ag.	4-14% niža		40% niži
Grubl i sar. (2004)	100% zamene krupnog ag. 75% zamene krupnog ag. 50% zamene krupnog ag. 25% zamene krupnog ag.			28.3% niži 21.9% niži 23.3% niži 13.6% niži
Hansen i Marga (1988)	100% zamene krupnog ag.	30% niža		
Ikeda i sar. (1988)	100% zamene krupnog ag.	15-40% niža		30-50% niži
Kakizaki i sar. (1988)	100% zamene krupnog ag. 100% zamene sitnog ag.	32% niža		40% niži
Masood i sar. (2001)	10% zamene krupnog ag. 20% zamene krupnog ag. 30% zamene krupnog ag.	20% niža 22.6% niža 25.5% niža	4.2% niža 7.3% niža 10.4% niža	32.4% niži 22.7% niži 20.2% niži
Nishibayashi i Yamura (1988)	100% zamene krupnog ag.	15-30% niža		15% niži
Roos (2003)	100% zamene krupnog ag.	34% niža		36.4% niži
Teranishi i sar. (1998)	50% zamene krupnog ag.	57.8% niža		30.5% niži
Topcu (1997)	30% zamene krupnog ag. ^b 50% zamene krupnog ag. ^b 70% zamene krupnog ag. ^b 100% zamene krupnog ag. ^b	31.8% niža 45.5% niža 54.5% niža 86.4% niža		
Yangi i sar. (1993)	30% zamene krupnog ag. 50% zamene krupnog ag. 100% zamene krupnog ag.	0.3-11.2% niža 1.2-16.8% niža 4.1-19.7% niža		0-18.7% niži 2.8-25.1% niži 1.1-25.8% niži
^a Ispitivanja izvršena pri starosti od 28 dana				
^b Kvalitet ovih recikliranih agregata je nizak, sa upijanjem od 7% za 30 min.				

Pitanje recikliranja betona zaokuplja pažnju naučnika i istraživača već dugi niz godina. Tako, prvi značajniji radovi u kojima se kao agregat za beton koristi recikliran agregat dobijen usitnjavanjem "starog" betona pojavljuju se u literaturi još sedamdesetih i osamdesetih godina prošlog veka (videti na primer [5, 6, 7]).

Na ovom mestu, ilustracije radi, daje se pregled dostupnih radova iz oblasti recikliranog agregata (tabela 1). Kao što se vidi, u navedenim radovima radilo se o zameni prirodnog agregata krupnim recikliranim agregatom, a proučavan je uticaj na mehanička svojstva novodobijenih betona sa recikliranim agregatom (*Recycled Aggregate Concrete – RAC*).

2 OSNOVNA SVOJSTVA RECIKLIRANOG AGREGATA

Upotreba recikliranog agregata kao komponente za spravljanje novog betona podrazumeva potpuno (temeljno) poznavanje svojstava takvog agregata. Tu se, pre svega, misli na upijanje vode, zapreminsku i specifičnu masu, količinu prašinih (sitnih) čestica, sadržaj organskih i eventualno štetnih materija, drobljivost, otpornost prema habanju, kao i otpornost prema dejstvu mraza.

Naime, ispitivanja su pokazala da, po pravilu, reciklirani agregat u odnosu na prirodni ima:

- veće upijanje vode,
- manju zapreminsku i specifičnu masu,
- veću količinu prašinih čestica,
- veći sadržaj organskih i eventualno drugih štetnih materija,
- veću drobljivost,
- manju otpornost prema habanju i
- manju otpornost prema dejstvu mraza.

Izgled recikliranog agregata (različite frakcije) prikazan je na slici 1.

Kvalitet i svojstva novog betona izrađenog sa recikliranim agregatom direktno će zavisiti od svojstava upotrebljenog recikliranog agregata.

Poznato je da se agregat od drobljenog betona sastoji od upotrebljenog – originalnog agregata i sloja maltera koji zaostaje nakon drobljenja. Upijanje vode recikliranog agregata je značajno veće nego kod prirodnog, što je svakako povezano sa:

- tipom prvobitnog (originalnog) agregata
- čvrstoćom prvobitnog betona
- najkrupnijim zrnom agregata u prvobitnom betonu [8].

Upijanje vode kod recikliranog agregata je utoliko veće, ukoliko je količina maltera koja obavlja zrna recikliranog agregata veća. Pokazalo se da kod recikliranog agregata upijanje vode raste sa smanjenjem veličine zrna agregata korišćenog u originalnom betonu. Ovo je posledica veće površine zrna za koju može da se veže (pričvrsti) veća količina maltera u odnosu na istu zapreminu agregata.

Zbog povećanog upijanja vode, autor W.Y. Tam [11] predlaže da se ograniči učešće recikliranog agregata u betonu na npr. 20-30%, da bi se obezbedio uslov da ukupno upijanje vode za korišćeni agregat bude manje od 5%.

Malter koji obavlja zrno je porozniji materijal u odnosu na zrno prirodnog agregata, a njegova poroznost zavisi od vodocementnog faktora betona koji je recikliran [2, 3, 4]. Važno je istaći da i postupak dobijanja – usitnjavanja recikliranog agregata ima uticaja na svojstva novog betona; tako količina malterske komponente koja obavlja zrno recikliranog agregata direktno zavisi od načina drobljenja "starog" betona, ali isto tako i od dimenzija recikliranog agregata [8, 9]. Oblik zrna recikliranog agregata je mnogo nepravilniji nego kod prirodnog agregata, a površina hrapavija. Tekstura drobljenog agregata zavisi od načina drobljenja, tj. vrste upotrebljene mašine za drobljenje. Reciklirani agregat ima ispuca-lu površinu, što rezultira povećanjem propustljivosti vode i vazduha između cementne paste i agregata. Zato i beton spravljen sa recikliranim agregatom ima veće vrednosti propustljivosti gasova, pare i vode u odnosu na običan beton (Zaharieva i sar. [10]).

Na zrnima recikliranog agregata, kao što je već rečeno, uvek se nalaze izvesne količine relativno krte cementne paste i maltera, što čini ove agregate poroznijim i manje otpornim na mehaničke uticaje. Značajno svojstvo recikliranog agregata je da se malter uvek vezuje za originalno zrno agregata. Maseni procenat "stare" cementne paste iznosi $28 \pm 4.5\%$ prema Zaharieva i sar. [10], dok je u slučaju primene recikliranog sitnog agregata (peska) ovaj procenat nešto viši prema Sánchez de Juan i sar. [17]. U stvari, procenat "stare" cementne paste varira u jako širokim granicama (25-64%) što se može sagledati iz dostupne aktuelne literature. Ako se zna da ovaj procenat maltera, tj. "stare" cementne paste direktno zavisi od načina drobljenja, onda su napred prikazana variranja objašnjiva. Autori Sánchez de Juan i sar. [17] preporučuju da maksimalan procenat maltera na recikliranom agregatu bude manji od 44%, za konstruktivne betone.



Slika 1. Izgled recikliranog agregata

Kapacitet upijanja vode recikliranog agregata, koji svakako zavisi od kvaliteta i debljine malterskog sloja obavijenog oko zrna agregata, treba da bude poznat kao jedno od osnovnih svojstava pre primene recikliranog agregata u proizvodnji novog betona.

Reciklirani agregat ima nižu zapreminsku masu od prirodnog, zbog prisustva omotača od maltera. Treba istaći da se sa smanjenjem krupnoće zrna agregata povećava prisustvo prvobitnog maltera, zbog veće specifične površine, a to rezultira značajnim smanjenjem zapreminske mase.

Kao što je više istraživača utvrdilo, otpornost na udar i habanje RA je manja u odnosu na prirodni agregat; ovo je posledica odvajanja i drobljenja poroznog malterskog omotača oko zrna recikliranog agregata [8].

Ova svojstva direktno ukazuju na izvesne specifičnosti u tehnologiji spravljanja betona sa recikliranim agregatom, o kojima će biti više reči u daljem tekstu.

Neki autori [16] predložili su podelu recikliranog agregata na klase, na osnovu upijanja vode i otpornosti na dejstvo mraza metodom potapanja u rastvor natrijum sulfata (Na_2SO_4). Tako su za krupan reciklirani agregat predložene tri klase, pri čemu je maksimalno upijanje vode $\leq 7\%$, a za sitan reciklirani agregat dve klase, pri čemu je ograničeno maksimalno upijanje vode $\leq 10\%$. U tesnoj vezi sa ovim, autori su dali i preporuke za moguću primenu u građevinarstvu (armirani i nearmirani beton, tamponi, slojevi za izravnavanje itd.).

3 STRUKTURA BETONA SA RECIKLIRANIM AGREGATOM

Strukturu betona, kao što je poznato, čini trofazni sistem i to:

- makrostruktura – struktura dvokomponentnog sistema u čiji sastav ulazi malterska komponenta i krupan agregat

- mikrostruktura tj. struktura cementnog kamena i
- prelazna (tranzitna) zona (interface) između agregata i cementnog kamena.

Prelazna zona između cementne paste i zrna agregata kod betona je uvek kritično mesto i od njenih

svojstava (kvalitet, debljina) zavise mnoga svojstva betona kao kompozita, a naročito njegova trajnost [12].

Struktura betona koji je spravljen sa recikliranim agregatom u ovom smislu je još kompleksnija. Naime, beton spravljen sa recikliranim agregatom (*Recycled Aggregate Concrete - RAC*) poseduje dve prelazne zone, jednu između recikliranog agregata i nove cementne paste (nova prelazna zona) i drugu između recikliranog agregata i "starog" maltera (stara prelazna zona). Ovo se shematski može prikazati na slici 2 [2].

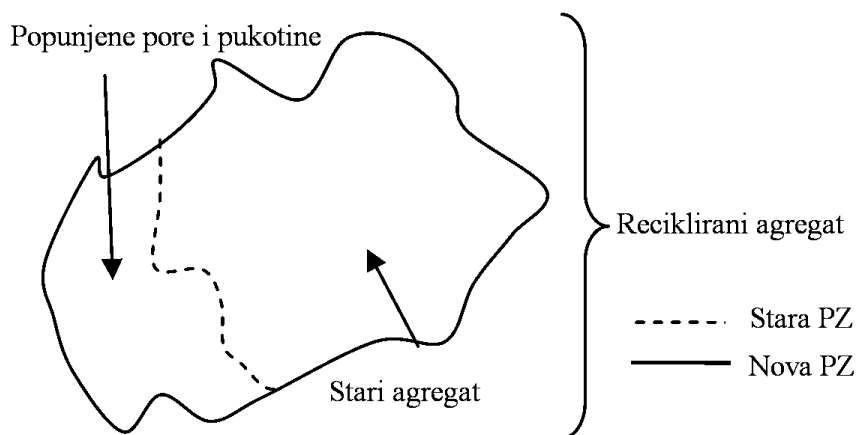
Zaostali cementni malter na prelaznoj zoni sadrži značajnu poroznost i pukotine, što sve ima uticaja na krajnja svojstva ovakvog betona (RAC), pogotovo na čvrstoću pri pritisku.

Ove pore i pukotine – prsline povećavaju potrebu za vodom, tj. upijanje vode iz nove mešavine, tako da se javlja problem nedostatka vode potrebne za potpunu hidrataciju cementa u okviru novospravljenog, betona na bazi recikliranog agregata. Kvalitet prelazne zone zavisi pre svega od površinskih svojstava agregata, stepena izdvajanja vode (bleeding-a), tipa hemijskih veza, načina nege betona i dr. Naučnici se slažu u mišljenju da što je jačina veze cementna matrica-agregat veća, čvrstoća betona je takođe veća [2].

Autori [4] su procenili da prelazna zona čini 20-40% ukupne zapremine cementne matrice.

Generalno lošiji kvalitet u odnosu na prirodni agregat, kao i varijacije u kvalitetu i njegova heterogenost, učinili su da se reciklirani agregat upotrebljava uglavnom za nasipanje i podloge, pa se njegova upotreba za spravljanje betona ograničava na određeni procenat (najčešće je taj procenat reda veličine 20-30% u odnosu na ukupnu masu agregata). Ovo se odnosi na upotrebu krupnog recikliranog agregata, dok je istovremena upotreba i sitnog i krupnog recikliranog agregata još složenija.

Da bi bila moguća upotreba recikliranog agregata u betonima viših performansi, bilo je neophodno rešiti problem visoke poroznosti, sadržaja prsline, visokog sadržaja sulfata i hlorida, visokog stepena nečistoća i ostataka cementnog maltera u zrnima RA.



Slika 2. Prelazne (tranzitne) zone u betonu sa recikliranim agregatom

4 SPECIFIČNOSTI SPRAVLJANJA BETONA NA BAZI RECIKLIRANOG AGREGATA

U nastavku će, na osnovu literaturnih podataka, biti prikazani različiti predlozi u tehnologiji spravljanja betona sa recikliranim agregatom, u zavisnosti od načina i redosleda doziranja komponenata u mešalicu i trajanja mešanja. U svim slučajevima čije objašnjenje sledi, u svojstvu krupnog agregata pojavljuje se ili reciklirani krupan agregat, ili mešavina recikliranog i prirodnog krupnog agregata, dok je sitan agregat – pesak isključivo prirodan, rečni agregat.

Normalan, uobičajen, odnosno tradicionalan postupak mešanja, podrazumeva da se u mešalicu prvo doziraju sve čvrste komponente betonske mešavine, zatim voda i da se na kraju pristupi mešanju u trajanju od ≈120s. Naime, nakon što se odmere količine komponentnih materijala, krupnog i sitnog agregata, cementa i vode, u mešalicu se najpre dozira polovina krupnog agregata, zatim sitan agregat i cement i na kraju ostatak krupnog agregata. Posle toga se dodaje celokupna količina vode, i počinje postupak mešanja koji traje oko dva minuta. Ovako opisan postupak može se nazvati normalan postupak mešanja (*Normal Mixing Approach* - skraćeno NMA). On je prikazan i shematski na slici 3a. Objašnjenje simbola dato je u okviru slike 3.

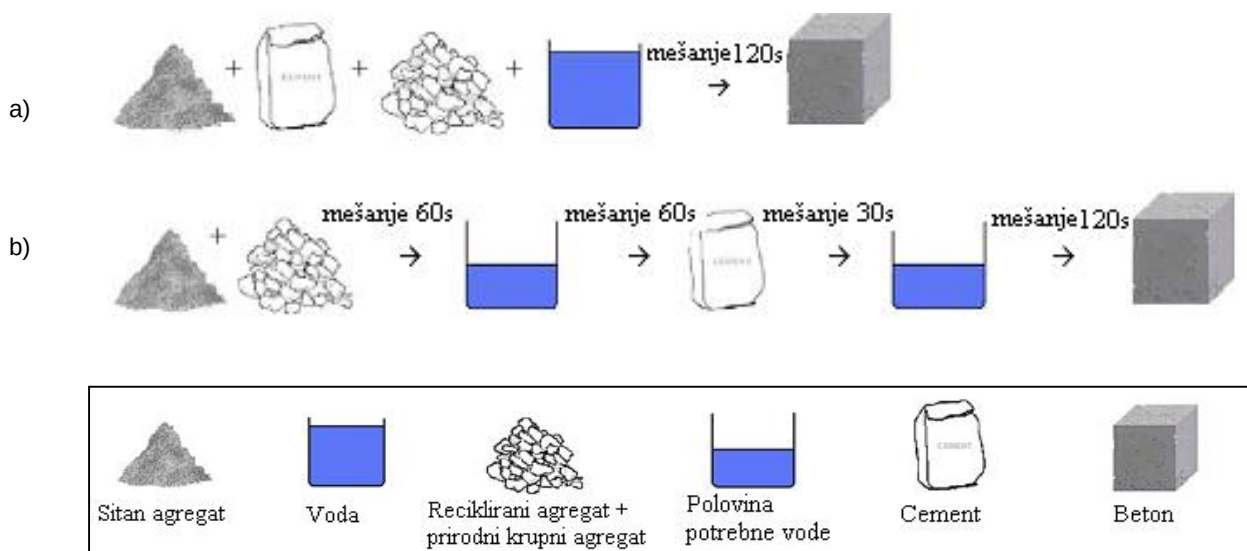
Drugi pristup mešanju, koji su predložili autori W. Y. Tam i sar. [2], bazira se na principu podele celokupne količine vode na dva dela. Zato se ovaj pristup može nazvati metodom iz dve faze (*Two Stage Mixing Approach* - kraće TSMA). Postupak spravljanja betona je, na osnovu ovog pristupa, sledeći (slika 3b): prvo se dozira agregat (pesak i krupan agregat) i ova suva mešavina se homogenizuje mešanjem "usuvo" približno 60s. U nastavku se dozira otprilike polovina ukupne proračunate količine vode i vrši mešanje daljih ≈60s. Nakon toga, dozira se celokupna količina cementa i meša još oko 30s. Na kraju se u svežu betonsku smešu

dodaje ostatak vode i proces spravljanja završava mešanjem u trajanju od približno dva minuta.

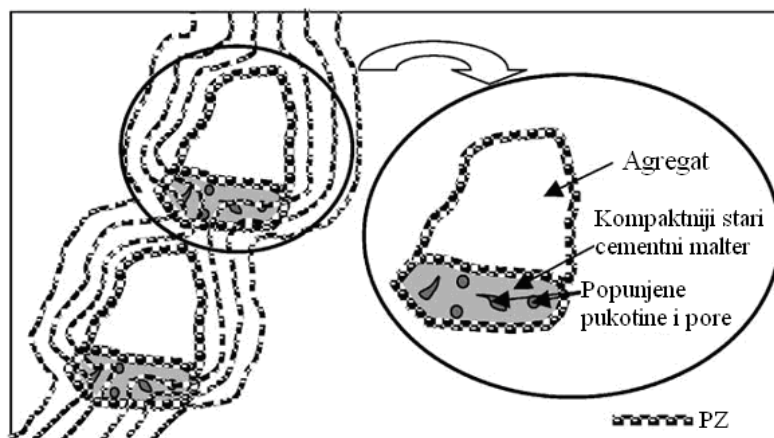
Postupak mešanja prema TSMA predložen je kod primene recikliranog agregata u betonima kao poboljšanje u odnosu na NMA. U stvari, za vreme prve faze mešanja pri doziranju polovine količine upotrebljene vode, a zatim i cementa, donekle se ovlaže zrna recikliranog agregata i formira se tanak sloj cementne paste na površini recikliranog agregata, koji može da prođe u porozni stari cementni malter, popunjavajući "stare" pukotine i šupljine (dejstvo slično armiranju). U drugoj fazi mešanja, preostala voda koja se dodaje dovoljna je za proces hidratacije. Putem skeniranja elektronske mikroskopije uočeno je da prelazna zona postaje jača i gušća i da su šupljine u betonu na bazi recikliranog agregata spravljenom u dve faze popunjene u mnogo većoj meri nego šupljine u RAC betonu spravljenom mešanjem na uobičajen, tradicionalan način [4].

Isto tako, više praznina i pukotina je otkriveno u novoformiranoj prelaznoj zoni u RAC betonu kod uobičajenog spravljanja betona (NMA), obzirom da je potpuna hidratacija maltera u ovoj zoni bila sprečena nedostatkom vode (koju su upila zrna recikliranog agregata). Shematski prikaz strukture recikliranog agregata prema mešanju u dve faze prikazan je na sl. 4.

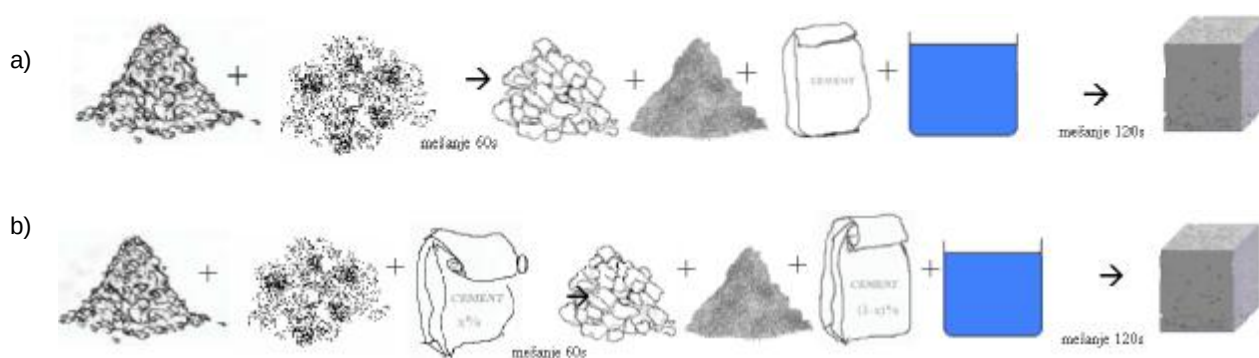
Ako se usredsredimo na ključni problem koji prati upotrebu recikliranog agregata dobijenog drobljenjem starog betona, tj. na povećanu poroznost stare PZ, može se lako zaključiti da je poboljšanje kvaliteta novog betona uslovljeno poboljšanjem mehaničkih svojstava prelazne zone (kao što je to već i naglašeno). Ovo poboljšanje može se izvesti i upotrebom nekog od veoma sitnih pucolanskih materijala (na primer silikatne prašine), koji bi u najvećoj mogućoj meri ispunio šupljine i pukotine u zrnima recikliranog agregata, odnosno u malterskoj matrici starog agregata. U ovom smislu predložene su varijante postupka TSMA koje su prikazane na slici 5.



Slika 3. (a) normalan postupak (NMA), (b) metoda iz dve faze (TSMA)



Slika 4. Povoljšanje strukture recikliranog agregata prema metodi u dve faze (TSMA)



Slika 5. Pristup iz dve faze mešanja - TSMA a) sa silikatnom prašinom i b) sa silikatnom prašinom i cementom

Dakle, na osnovu TSMA prikazanog na slici 5, izvestan procenat cementa se može zameniti silikatnom prašinom (na primer 2%) i u tom slučaju celokupna količina silikatne prašine dozira se u prvoj fazi spravljanja, zajedno sa recikliranim agregatom. Nakon mešanja u trajanju od oko 60s, doziraju se prirodan agregat (sitan i krupan), cement i voda, pa se proces mešanja završava drugim mešanjem, u trajanju od $\approx 120s$. Ovaj postupak autori [2] su nazvali TSMA_s (slika 5a).

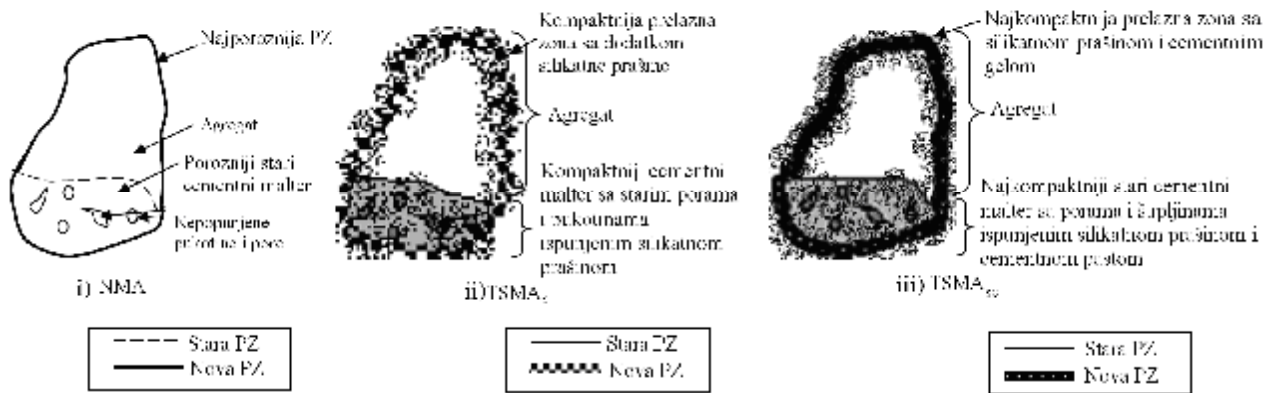
Predlagan je i postupak označen kao TSMA_{sc} u kome se prva faza sastoji od doziranja recikliranog agregata, silikatne prašine i dela cementa, nakon čega se sprovodi mešanje u trajanju od oko 60s, a zatim i druga faza, u kojoj se doziraju prirodan krupan agregat, pesak, ostatak cementa i celokupna količina vode, pa se na kraju pristupa mešanju od $\approx 120s$ (slika 5b).

Dodatak silikatne prašine u slučaju primene recikliranog agregata, kao i kod običnih betona, generalno vodi poboljšanju performansi betona. Beton sa dodatkom silikatne prašine ostvaruje veću čvrstoću u dužem vremenskom intervalu. Osnovna mehanička svojstva betona spravljenih u dve faze (TSMA) u odnosu na normalan (NMA) postupak mešanja, tj. čvrstoća pri pritisku, čvrstoća pri savijanju, čvrstoća pri zatezanju cepanjem i statički modul elastičnosti, kod RAC mogu se poboljšati od 10% do 30%, u zavisnosti od sadržaja recikliranog agregata u novom betonu [2].

Poređenjem dva betona proizvedena postupkom iz dve faze, TSMA_s sa jedne i TSMA_{sc} sa druge strane, pokazalo se da betoni mešani po proceduri opisanoj kao TSMA_{sc} imaju bolja svojstva. Na osnovu istraživanja [2] fizičko-mehanička svojstva (čvrstoća pri pritisku, pri savijanju, pri zatezanju cepanjem i modul elastičnosti) betona na bazi recikliranog agregata primenom ovih postupaka mogu se poboljšati čak 20-30%.

U prvoj varijanti novog postupka (slika 5a) silikatna prašina predstavlja filer koji takoreći armira prostor unutar zrna recikliranog agregata, što rezultira smanjenjem veličine individualnih pora i praznina u starom cementnom malteru kod RA. Slično ovoj varijanti, dodatak silikatne prašine i cementa u prvoj fazi, obezbeđuje relativno debelu opnu paste silikatne prašine i nešto ravnomerniji sloj cementne paste oko zrna RA u procesu prvog stadijuma mešanja. Na slici 6 shematski su prikazane faze koje se mogu očekivati u RAC betonima u slučaju NMA, odnosno u slučaju primene gore opisanih postupaka TSMA. Dakle, obe varijante TSMA sa silikatnom prašinom predstavljaju alternativne metodologije za poboljšanje kvaliteta RAC betona [2].

Neki istraživači preporučuju nešto drugačiji postupak mešanja komponenata, sa istim ciljem. Tako Li i sar. [13] predlažu da se najpre napravi smesa vode i cementa ili vode i pucolanski aktivnog dodatka, a zatim da se dodaje agregat, kako bi se, nakon produženog mešanja



Slika 6. Normalni postupak spravljanja betona (i), metod iz dve faze - TSMA_s (ii) i metod iz dve faze sa proporcionalnim doziranjem silikatne prašine i cementa TSMA_{sc} (iii)

postigao pomenuti efekat oblaganja zrna, koji ima pozitivno dejstvo u smislu poboljšanja konzistencije, prelazne zone i fizičko-mehaničkih svojstava očvrslog betona.

Radi ojačanja prelazne zone, istraživači Li i sar. [13] preporučuju i postupak sa primenom vodenog stakla ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$).

Postoje izvesni predlozi da se, u cilju poboljšanja kvaliteta recikliranog agregata, a time i betona koji se dobija njegovom upotrebom, smanji procenat cementne paste i maltera pričvršćenih za zrna recikliranog agregata; oni predstavljaju slabu tačku u betonu, kao porozan i ispucao sloj manje čvrstoće. Jedan od načina da se to izvede je prethodno kvašenje i potapanje zrna agregata u razblaženi rastvor kiseline, praćeno kasnijim ispiranjem zrna pomoću destilovane vode. Pokušaji na bazi ovog pristupa vršeni su uz upotrebu hlorovodonične, sumporne ili fosforne kiseline (W. Y. Tam i sar. [14]). U ovom slučaju svakako treba biti naročito obazriv, kako ekološki princip, koji leži u osnovi primene RAC betona ne bi prešao u svoju suprotnost, usled nekontrolisane upotrebe pomenutih kiselina i usled nepropisnog rukovanja ovim hemikalijama. Pomenuta procedura sastoji se iz potapanja recikliranog agregata u kiselu sredinu u trajanju od 24h, pri temperaturi od približno 20°C. Zatim se vrši ispiranje pomoću destilovane vode, kako bi se u najvećoj mogućoj meri uklonile primenjene kiseline. Konačno, pre samog spravljanja svežeg betona, agregat stoji u vodi 24h. Kako bi se uklonio sloj cementne paste i maltera, a da se pritom ne smanji kvalitet agregata u smislu smanjenja pH vrednosti, koncentracija rastvora mora biti veoma pažljivo utvrđena. Predlaže se koncentracija kiseline u destilovanoj vodi u količini od 0.1 mol. Ovim postupkom donekle je moguće smanjiti upijanje vode kod recikliranog agregata, a da njegova pH vrednost ostane u relativno visokim granicama (iznad 8.5). Upijanje vode kod recikliranog agregata obrađenog na ovaj način može se smanjiti za 7-12%. Autori [14] su ustanovili da bi investicija od oko 50 evra bila dovoljna da se primenom ovog postupka obradi 10 tona recikliranog agregata i na taj način njegov kvalitet približi kvalitetu prirodnog agregata.

Posebno je proučavan uticaj vlažnosti agregata na fizičko-mehanička svojstva betona na bazi recikliranog agregata, u svežem i očvrsлом stanju. Razmatrani slučajevi su prilikom tih proučavanja obuhvatili ispitivanja različitih betona uz upotrebu recikliranog agregata osušenog u sušnici (Oven dried - OD), zasićenog, površinski suvog (Saturated, surface dried - SSD) i agregata osušenog na vazduhu (Air dried - AD). U slučaju OD recikliranog agregata, predmetni agregat je tretiran na 105°C u toku 24h i ohlađen na sobnu temperaturu, pre postupka spravljanja betona. Priprema SSD recikliranog agregata izvršena je tako što je agregat bio najpre potopljen u vodu u toku 24h - zasićen, a nakon toga je pomoću vlažnog platna uklonjena voda sa površine agregata. Reciklirani agregat u prirodno vlažnom stanju, odnosno u stanju u kome je dostavljen, označen je kao AD. Kada se govori o termičkom tretmanu agregata, treba reći da tek nakon tretmana na 800°C reciklirani agregat po svojim fizičko-mehaničkim svojstvima može da se meri sa konvencionalnim rečnim agregatom. Istraživanja su pokazala da je za primenu betona na bazi recikliranog agregata uobičajenih čvrstoća optimalno koristiti reciklirani agregat koji je sušen na vazduhu, odnosno u stanju u kome je dostavljen [3, 20].

Zbog visokog stepena upijanja, od interesa je poznavanje uticaja vlažnosti recikliranog agregata na svojstva svežeg i očvrslog betona na bazi recikliranog agregata. Načelno, u velikom broju studija predlagano je da agregat bude zasićen vodom i/ili prethodno navlažen, kako bi se sprečio ubrzan pad obradljivosti i ugradljivosti (konzistencije) kod ovakvih betona. Međutim, pokazalo se da prethodno zasićenje recikliranog agregata nije neophodno iz tehnoloških razloga, sve dok se prirodna vlažnost uzima u obzir prilikom projektovanja betonske mešavine. Takođe, utvrđeno je i da se ta količina vode nikad neće moći potpuno ravnomerno rasporediti po celokupnoj masi agregata [3].

Čvrstoća pri pritisku betona sa suvim i zasićenim površinski suvim recikliranim agregatom je, generalno, nešto niža u odnosu na referentni beton. Smanjenje je značajnije prilikom ispitivanja čvrstoće pri savijanju betona sa zasićenim agregatom. Betoni sa suvim i

zasićenim recikliranim agregatom manje su otporni na mraz, dok su se prilikom ovog konkretnog ispitivanja bolje pokazali betoni sa agregatom čija zrna su sadržala manju količinu vode [3].

Što se sadržaja vode u RAC betonu tiče, na osnovu svega rečenog, uvek treba voditi računa o tome, da se jedan deo vode kod betona sa recikliranim agregatom dozira direktno, a jedan deo je sadržan u samim poroznim zrnima recikliranog agregata. Samim tim, pri projektovanju sastava RAC betona, treba poznavati maseni procenat vode unutar zrna agregata. Ukoliko je reciklirani agregat potpuno suv, onda je veoma verovatno da će, prilikom mešanja, jedan deo vode upiti porozna zrna agregata. To dalje znači da će doći do smanjenja vodocementnog faktora, usled smanjenja vode koja će reagovati sa cementom, i do veoma brzog pogoršanja tehnoloških, odnosno do ozbiljnih problema, kada je reč o ugradljivosti i obradljivosti ovako spravljenog betona. Ako su, pak, zrna recikliranog agregata prethodno zasićena i površinski suva, dokazano je da će deo vode iz zrna prilikom vibriranja migrirati u prelaznu zonu; vrlo verovatno će doći do izdvajanja vode na površini betona ("*bleeding*"), a konzistencija će biti tečnija [3]. Neki autori [21] preporučuju da se reciklirani agregat prethodno navlaži sa 80% vode koju može da upije, što smanjuje vrednost upijanja vode zrna recikliranog agregata i ne utiče značajno na obradljivost i na vodocementni faktor.

Na osnovu svega rečenog, može se zaključiti da je neophodno poznavati količinu vode koju predmetni agregat može da upije u roku od 30 min, kao što se to radi u slučaju lakoagregatnog betona, pa zatim tu količinu vode uvesti u proračun prilikom određivanja ukupne potrebne količine vode za neki beton sa recikliranim agregatom [19].

Dakle, kod betona sa recikliranim agregatom ne treba govoriti o uobičajenom vodocementnom faktoru, već o ukupnom vodocementnom faktoru (to je odnos ukupne količine vode u betonu i ukupne količine cementa) i o slobodnom vodocementnom faktoru (odnos vode koja je zaista na raspolaganju cementu prilikom procesa hidratacije i ukupne količine cementa). Voda koja je zaista na raspolaganju cementu prilikom procesa hidratacije predstavlja razliku ukupne količine vode i vode koju zrna recikliranog agregata upiju prilikom spravljanja betona.

Priča o vodocementnom faktoru kod betona RAC dodatno se može komplikovati u slučaju dodavanja materijala pucolanskih svojstava i drugih sitnih čestica, kao što je to slučaj sa napred pomenutom silikatnom prašinom. Tada se, strogo posmatrano, radi o vodo-praškastom faktoru, i tada u praškaste čestice, osim cementa ubrajamo i silikatnu prašinu. Princip se poštuje i kada se koristi neki hemijski dodatak, npr. superplastifikator.

5 GENERALNE SMERNICE ZA PROJEKTOVANJE SASTAVA BETONA NA BAZI RECIKLIRANOG AGREGATA

Projektovanje sastava betona spravljenog na bazi recikliranog agregata se obavlja na osnovu poznatih empirijskih obrazaca, npr. Skramtajeve [19] ili Bolomeja [21], iz tehnologije betona. Pri tome, osnovno je odrediti

zapreminsku masu recikliranog agregata za svaku korišćenu frakciju, kao i upijanje vode. Problem većeg upijanja vode kod recikliranog agregata može se rešiti na tri načina prema [19] i [21], tj. slično kao kod lakoagregatnih betona. Prvi način je zasićenje vodom recikliranog agregata putem prethodnog potapanja; drugi način podrazumeva povećanje potrebne količine vode za spravljanje betona na osnovu merenja upijanja vode u trajanju od 30 minuta. Treći način je dodavanje vode na gradilištu, do postizanja zahtevane konzistencije.

Autori Malešev i Radonjanin [19], koji su vršili obimna eksperimentalna ispitivanja iz ove oblasti, preporučuju određivanje upijanja vode u trajanju od 30 min za recikliran agregat i taj podatak koriste u proračunu kao dodatnu količinu vode za spravljanje betona. Autori predlažu proveru projektovane konzistencije posle 30 min.

Kod određivanja odnosa krupnog i sitnog agregata u mešavini sa recikliranim agregatom može se pretpostaviti da je optimalan granulometrijski sastav isti kao i kod prirodnog agregata.

Iskustva pokazuju da, ako se koristi reciklirani krupan agregat zajedno sa prirodnim sitnim agregatom, može se pretpostaviti da će vodocementni faktor za zahtevanu čvrstoću pri pritisku biti isti kao i za beton spravljen od prirodnog agregata.

U preporukama mnogih zemalja, pa i u Velikoj Britaniji, ograničava se upotreba najkrupnijeg zrna recikliranog agregata na 16-20 mm. Svakako je razlog za ovo pitanje trajnosti betona spravljenog sa recikliranim agregatom.

Eksperimenti su pokazali da je potreba za slobodnom vodom kod betona izrađenog sa krupnim recikliranim agregatom veća za 10 l/m^3 u odnosu na uobičajeni beton, pa je i ovo relevantan podatak u preporukama nekih autora.

Zbog veće potrebe za slobodnom vodom kod mešavina sa recikliranim agregatom računski količina cementa treba da bude nešto veća, radi očuvanja istog vodocementnog faktora.

Što se tiče vrste cementa, za spravljanje betona na bazi recikliranog agregata po pravilu se mogu koristiti sve vrste cementa (CEM I – CEM V) dostupne u našim fabrikama.

6 ZAKLJUČAK

Ovaj pregledni rad ukazuje na parametre koji utiču na kvalitet i načine poboljšanja svojstava recikliranog agregata kao komponente betona. Naime, na osnovu dostupnih literaturnih podataka prikazano je kako se može uticati na strukturu i kvalitet tranzitne zone koja je, kao što je poznato, najslabija komponenta u strukturi betona.

Predložen metod mešanja iz dve faze svakako daje bolje rezultate od klasičnog, a primena pucolanskih materija tipa silikatne prašine, letećeg pepela ili zgure visokih peći takođe poboljšava prelaznu zonu, armirajući na izvestan način strukturu prvobitnog betona. Na osnovu brojnih istraživanja jasno se sagledava da se i ovde može primeniti poznata međuzavisnost struktura – svojstva, prisutna u strukturalističkom pristupu – modeliranju kompozitnih materijala.

Potpuno poznavanje svojstava recikliranog agregata, načina njegovog dobijanja, tj. drobljenja i selekcija po kategorijama – klasama zavisno od primarnih svojstava (zapreminska masa, upijanje vode, otpornost prema mrazu, čvrstoća originalnog betona i dr.) sigurno će učiniti manje rasipanje rezultata u nekim budućim istraživanjima. Isto tako, pravilan redosled doziranja komponenta i brižljivo projektovanje sastava uz pridržavanje generalnih smernica, omogućiće dobijanje betona viših i visokih performansi tj. konstruktivnih betona na bazi recikliranog agregata. Saradnja istraživača različitih struka (građevinskih inženjera, tehnologa, hemičara, mineraloga) je u ovom smislu dobrodošla, radi potvrđivanja mikrostrukturnih svojstava novospravljenih betona. Na taj način reciklirani agregat neće više biti heterogena komponenta, tj. nepoznanica u tehnologiji spravljanja betona, već čvrsti građevinski otpad kojim stručnjaci znalački upravljaju.

Istraživanja mnogih naučnika u ovoj oblasti pokazuju da ima veoma velikih varijacija u rezultatima ispitivanja, pa se ne može doneti generalni stav o npr. optimalnom procentu zamene prirodnog agregata recikliranim krupnim agregatom, kao i o pitanju korišćenja sitnog recikliranog agregata. Ako se ovome doda još i mogućnost upotrebe pomenutih pucolanskih dodataka, kao i upotreba hemijskih dodataka tipa superplastifikatora, onda svakako postoji prostor za dalja eksperimentalna istraživanja u ovoj oblasti, u granicama ekonomske isplativosti. Postojanje kontradiktornih rezultata ispitivanja različitih naučnika iz ove oblasti u nekim slučajevima usporava i zamagľuje put intenzivnijeg korišćenja recikliranog agregata u betonima. Nadajmo se da će sinergija prikazana na sl. 7, između postrojenja za reci-

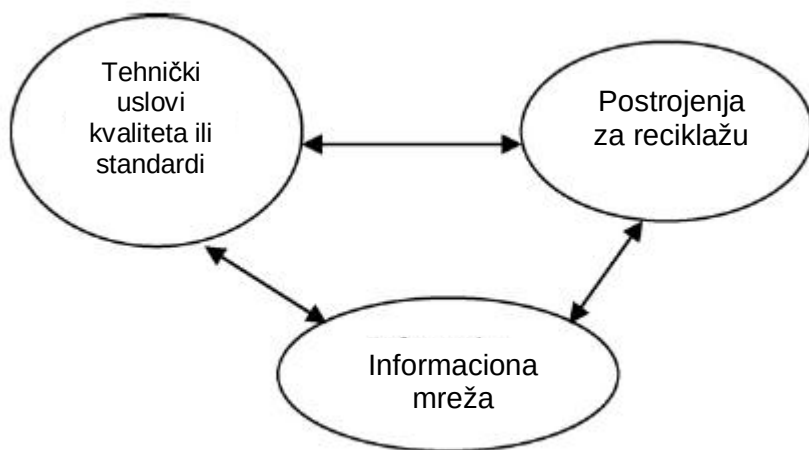
klažu, standarda i informacione mreže, učiniti korišćenje recikliranog agregata kao komponente betona masovnijim. Pri ovome, posebnu pažnju treba posvetiti prethodnim ispitivanjima i specifičnostima u tehnologiji spravljanja betona na bazi recikliranog agregata.

U opšte prihvaćenom opredeljenju, tj. u politici zaštite životne sredine, postavlja se pitanje kako uticati na upotrebu i povećanje procenta recikliranja građevinskih materijala, pogotovo betona. Ovo se može postići edukacijom, dostupnim informacijama, planiranjem projekata, razumevanjem problematike recikliranja u najširem smislu reči, kao i selekcijom i sertifikacijom recikliranih materijala.

Mogućnosti za recikliranje baziraju se na strateškim, političkim i ekonomskim parametrima. Uspeh betona na bazi recikliranog agregata danas je u nekim evropskim zemljama baziran na integralnom menadžmentu resursima. Uspeh recikliranja betona u budućnosti biće baziran na globalnim vizijama za implementaciju postupaka proizvodnje i primene betona na bazi recikliranog agregata u celom svetu, u cilju očuvanja prirodnih resursa i zaštite životne sredine.

ZAHVALNOST

U radu je prikazan deo istraživanja koje je pomoglo Ministarstvo za nauku Republike Srbije u okviru tehnološkog projekta TR-16004 pod nazivom: "Istraživanje savremenih betonskih kompozita na bazi domaćih sirovina sa posebnim osvrtom na mogućnosti primene betona sa recikliranim agregatom u betonskim konstrukcijama".



Slika 7. Tri neophodna faktora za primenu betona na bazi recikliranog agregata [14]

7 LITERATURA:

- [1] Jevtić, D., Marinković, S., Zakić, D., Savić, A.: Primena recikliranog betona – korak ka održivom razvoju u građevinarstvu, Međunarodni naučni skup "Održivi prostorni razvoj gradova Srbije", Beograd, decembar 2007. godine, Zbornik radova, str. 150-161., ISBN 978-86-80329-53-6,
- [2] Vivian W.Y. Tam, C.M. Tam: Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMA_s and TSMA_{sc}, Construction and Building Materials 22 (2008) 2068–2077,
- [3] C.S. Poon, Z.H. Shui, L. Lam, H. Fok, S.C. Kou: Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete, Cement and Concrete Research 34 (2004) 31–36,
- [4] Vivian W.Y. Tam, X.F. Gao, C.M. Tam: Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, Cement and Concrete Research 35 (2005) 1195–1203.,
- [5] M. Kikuchi, T. Mukai, H. Kozoumi: Properties of concrete products containing recycled aggregate, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry: Reuse of Demolition Waste, Chapman and Hall, London, 1988, pp. 595-604.,
- [6] R. S. Ravindrarajah, C. T. Tam: Properties of Concrete Made With crushed Concrete as Coarse Aggregate, Magazine of Concrete Research 37 (130) March 1985.,
- [7] T. C. Hansen, H. Narud: Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate, Concrete International-Design and Construction 5 (1) pp. 79-83., January 1983.,
- [8] A.K. Padmini, K. Ramamurthy, M.S. Mathews: Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete, Construction and Building Materials 23 (2009) 829–836,
- [9] Fung, W.K. (2005), The Use of Recycled Concrete in Construction, *Ph.D. dissertation*, University of Hong Kong, pp. 30-55.
- [10] Roumiana Zaharieva, Francois Buyle-Bodin, Frederic Skoczylas, Eric Wirquin: Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete, Cement & Concrete Composites 25 (2003) 223–232,
- [11] Vivian W.Y. Tam: Recycled aggregate from concrete waste for higher grades of concrete construction, *Ph.D. dissertation*, City University of Hong Kong, June 2005.,
- [12] Jevtić Dragica: Svojstva svežeg i očvrstlog betona u funkciji termohigrometrijskih parametara sredine, Monografija, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1996.,
- [13] Jiusu Li, Hanning Xiao, Yong Zhou: Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete, Construction and Building Materials 23 (2009) 1287–1291,
- [14] Vivian W.Y. Tam, C.M. Tam, K.N. Le: Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches, Resources, Conservation and Recycling 50 (2007) 82–101,
- [15] S. Nagataki, A. Gokce, T. Saeki, M. Hisada: Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates, Cement and Concrete Research 34 (2004) 965–971,
- [16] F. Tomosawa, T. Noguchi, New technology for the recycling of concrete—Japanese experience, Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st century, E & FN Spon, London, 2000, pp. 274–287.,
- [17] Marta Sánchez de Juan, Pilar Alaejos Gutiérrez : Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, Construction and Building Materials 23 (2009) 872–877
- [18] Vivian W.Y. Tam, C.M. Tam, Y. Wang: Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach, Construction and Building Materials 21 (2007) 1928–1939
- [19] Radonjanin Vlastimir, Malešev Mirjana: Beton sa agregatom od recikliranog betona, sastav, svojstva i primena, Građevinski kalendar 2008., Savez građevinskih inženjera i tehničara Srbije, Vol. 40, Decembar 2005, str. 48-91.,
- [20] J.A. Larbi, W.M.M. Heijnen, J.P. Brouwer, E. Mulder: Preliminary laboratory investigation of thermal treated recycled concrete aggregate for general use in concrete, in: G.R. Wooley, Goumans, Wainwright (Eds.), Waste Materials in Construction-WASCON, Pergamon, England, 2000, pp. 129–139.
- [21] Ettxeberria Larrañaga, Miren: Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete, *Ph.D. dissertation*, Universitat Politècnica de Catalunya, 2004.

REZIME

SPECIFIČNOSTI TEHNOLOGIJE SPRAVLJANJA BETONA NA BAZI RECIKLIRANOG AGREGATA

Dragica JEVTIĆ
Dimitrije ZAKIĆ
Aleksandar SAVIĆ

Ovaj pregledni rad govori o specifičnostima tehnologije spravljanja betona na bazi recikliranog agregata. U prvom delu rada analiziraju se svojstva recikliranog agregata kao komponente za spravljanje novog betona, njegove specifičnosti i razlike u odnosu na prirodni agregat. Daju se opisi mešanja iz dve faze koje se primenjuje u cilju poboljšanja performansi novog betona, kao i primeri spravljanja betona na bazi recikliranog agregata sa dodatkom silikatne prašine. Analiziran je i uticaj promene redosleda doziranja sastavnih komponenata betona. Dalje, prikazani su primeri u kojima se opisuju načini uklanjanja malterske komponente sa recikliranog agregata, npr. pomoću različitih kiselina, sa uticajem na fizička i mehanička svojstva novodobijenih betona, a takođe i različiti načini pripreme recikliranog agregata (sušen na vazduhu, sušen u sušnici i vodomzasićen+površinski suv). Na kraju, prikazuju se generalne smernice za proces projektovanja sastava betona na bazi recikliranog agregata.

Ključne reči: beton na bazi recikliranog agregata, reciklirani agregat, tehnologija betona, projektovanje sastava betona, svojstva svežeg i očvrstlog betona, istraživanja.

SUMMARY

SPECIFIC PROPERTIES OF RECYCLED AGGREGATE CONCRETE PRODUCTION TECHNOLOGY

Dragica JEVTIĆ
Dimitrije ZAKIĆ
Aleksandar SAVIĆ

This state-of-the-art paper deals with the differences in production technology of concrete made with recycled aggregate. The properties of recycled aggregate, as a component for new concrete production, are being analyzed in the first part of the paper as well as its specifics and distinctions in comparison to natural aggregate. Two-stage-mixing approaches, as a way to achieve concrete performance improvement, are also described and the examples of recycled aggregate concrete mixing with the addition of silica fume are given. The influence of variation of concrete component materials dosage is also analyzed. Further more, the examples of mortar component removal from recycled aggregate are described (e.g. with the aid of different acids) with the influence of this process on physical and mechanical properties of new concrete. Also, different ways of preparation of recycled aggregate (air-dried, water-saturated, surface-dry and oven-dried) are discussed. At the end, general guidelines for recycled aggregate concrete mix design are given.

Key words: recycled aggregate concrete, recycled aggregate, concrete technology, concrete mix design, properties of fresh and hardened concrete, research.

MEHANIZAMI OŠTEĆENJA, MODELI ODRŽAVANJA I SANACIJA BETONSKIH KONSTRUKCIJA POJAČANIH FRP ELEMENTIMA

Radomir FOLIĆ
Dragana GLAVARDANOV

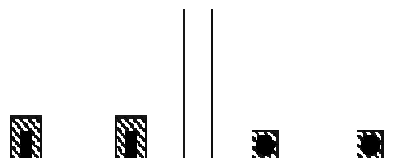
PREGLEDNI RAD
UDK: 624.012.46.059.3 = 861

1 UVOD

Armiranobetonske (AB) konstrukcije, usled promene namene, oštećenja/defekata ili drugih zahteva u fazi eksploatacije, često zahtevaju pojačavanje, tj. povećanje nosivosti preseka postojećih elemenata. Pojačavanje AB preseka FRP kompozitnim materijalima je veoma efektan, jednostavan i brz način pojačavanja [1] i [8]. Uobičajeni načini pojačavanja ovim kompozitnim materijalima su spoljašnjim lepljenjem elemenata od FRP materijala na površinu AB elementa [2] i [13], ili usecanjem i ubacivanjem FRP materijala u zaštitni sloj betona AB preseka [14]. Pored toga efikasno se primenjuje i prednaprezanje kablovima na bazi FRP materijala što je opširno opisano u [3] i [11].

Kod preseka pojačanih spoljašnjim lepljenjem FRP materijala na betonsku površinu, koriste se uglavnom platna ili trake sastavljene od aramidnih (AFRP), staklenih (GFRP) ili karbonskih vlakana (CFRP) u polimernoj matrici [7] i [13]. Noviji način pojačavanja, koji se sve više koristi je NSM sistemom, tj. ubacivanjem napred pomenutih šipki u proreze zaštitnog sloja betona [14]. Ovaj sistem pojačavanja prikazan je na slici 1, a skraćenica se vezuje za engleski prevod- near surface mounted (NSM), ili ubacivanje elemenata za pojačavanje blizu površine. U daljem tekstu će se koristiti skraćenica NSM, a taj sistem podrazumeva prorezivanje zaštitnog sloja betona i ubacivanje FRP elementa u taj prorez, uz naknadno zapunjavanje proreza. FRP element korišćen za primenu NSM metode pojačavanja može biti u obliku šipki ili traka, uglavnom sastavljenih od ugljeničnih CFRP ili staklenih GFRP vlakana.

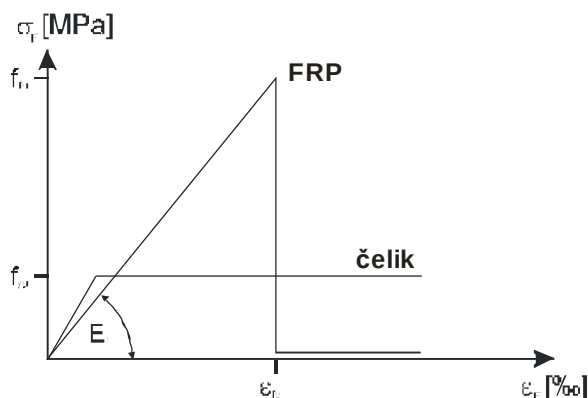
Adresa autora:
Dr. Radomir Folić, dipl.inž.građ. profesor emeritus
Departman za građevinarstvo Fakulteta tehničkih nauka,
Novi Sad
Dragana Glavardanov, dipl. inž. građ.
Energogroup, Beograd



Slika 1. NSM sistem pojačavanja betonskih preseka napregnutih na savijanje

Pošto FRP materijali ne ispoljavaju plastične karakteristike kao čelik, već kod ove vrste materijala postoji samo zona elastičnih deformacija nakon kojih dolazi do prethodno nenajavljenog krto g loma, i pored svih očiglednih prednosti pojačavanja FRP materijalima, ovako pojačani AB preseki mogu biti veoma krti što se vidi na slici 2 na kojoj je dat uporedni dijagram za čelik i FRP materijale. Iz tog razloga, poslednjih godina su sprovedena mnoga istraživanja koja se bave proučavanjem duktilnosti, kao i analize mehanizama loma AB preseka pojačanih FRP kompozitima. Treba imati u vidu da različiti načini primene FRP sistema pojačavanja imaju različite efekte ne samo sa aspekta nosivosti već i trajnosti i mogućnosti održavanja [23].

Sanirane/pojačane konstrukcije mogu biti izložene različitim dejstvima, jer pored eksploatacionog često deluju i incidentna opterećenja koja mogu prouzrokovati različita oštećenja [15]. Spolja lepljeni elementi su znatno izloženi, nepovoljnim spoljnim dejstvima i većem opadnju svojstava, od vođenja traka ili šipki unutar zaštitnog sloja NSM sistema. Pošto nema dovoljno iskustava ni kod nas ni u svetu, od značaja je i dugotrajno osmatranje ponašanja objekata, na kojima su pri intervenciji primenjeni FRP elementi, pod uticajem sredine u kojoj se oni nalaze [12] i [20]. Često se različita dejstva sprežu kao, npr. biološka i hemijska i imaju značajan uticaj na ukupno pogoršanje performansi pojačane konstrukcije [6], [16] i [19].



Slika 2. Karakterističan s-e dijagram za FRP i čelik

Istraživanja sprovedena na AB elementima pojačanim spoljašnjim lepljenjem FRP materijala [12] i [15] su pokazala da do otkaza dolazi uglavnom usled odvajanja FRP materijala od betona, dok kod NSM sistema pojačavanja [22]. Pošto je veza sa betonom, po pravilu-zahtevima, mnogo jača nego veza FRP elementa lepljenog na površinu, postoji realna mogućnost dostizanja granice loma FRP elementa usled zatežućih sila, pre otkaza usled odvajanja u sloju lepka ili otkaza u betonu [14] i [22], tj. pre krtoq loma.

U ovom radu analiziraju se različiti oblici oštećenja i mehanizmi loma pojačanih AB elemenata koristeći različite postupka intervencija (popravke i pojačavanja). U tom smislu dat je širi pregled literature i međunarodnih preporuka za održavanje i sanacije pojačanih AB elemenata.

2 MEHANIZMI LOMA AB PRESEKA POJAČANIH SPOLJAŠNJIM LEPLJENJEM FRP ELEMENATA

Pri proveru graničnih stanja loma elemenata pojačanih spoljašnjim lepljenjem FRP materijala formira se znatno više mehanizama loma nego kod armirano-betonskih i prethodno napregnutih konstrukcija. Mehanizmi loma elemenata napregnutih na savijanje i pojačanih FRP laminatima se mogu podeliti, [15] i [21], u dve kategorije:

1/ Lom koji nastaje bez gubitka veze betona i FRP elementa

- lom po betonu, pre dostizanja granice razvlačenja čelične armature, dok FRP element ostaje neoštećen (slika 3). Ovo je nenajavljen, krtoq lom, koji nije dozvoljen i koji po svaku cenu treba izbeći.

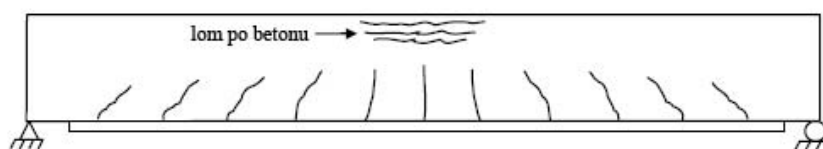
- lom usled dostizanja granice istezanja čelika, praćen lomom FRP elementa izazvanim prevelikom silom zatezanja u FRP elementu (slika 4). Ova vrsta loma je moguća, ali je verovatnije da će do otkaza doći usled narušavanja veze kompozita sa betonom, pre samog "pucanje" FRP elementa. U smernicama FIB-a [9] se, ipak, dozvoljava mogućnost ove vrste loma.

- lom gde dolazi do dostizanja granice istezanja čelika, praćen lomom u betonu, dok FRP element ostaje neoštećen. Ovo je najavljena i poželjna vrsta loma kojem se teži u svim smernicama (Međunarodnog društva za beton- FIB [7], Društva za beton V. Britanije- CSC [6] i Američkog instituta za beton- ACI [1], koje su uporedo analizirane u radu [13]).

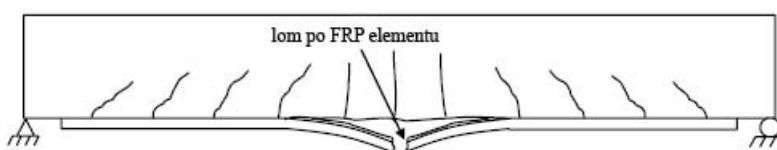
2/ Lom koji nastaje prethodnim gubitkom veze betonskog i FRP elementa

- odvajanjem dva elementa ili otkazom u nekom od slojeva

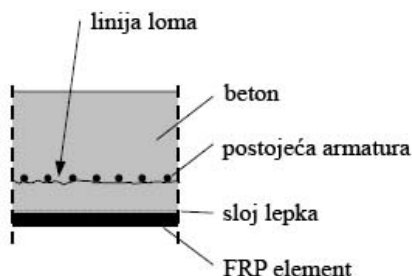
a) "pucanjem" betona u blizini linije sloja lepka ili u liniji postojeće zategnute armature (slika 5),



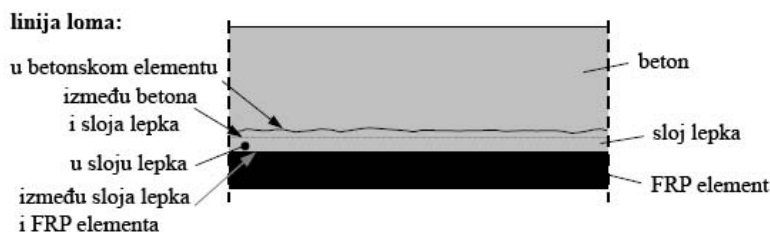
Slika 3. Prikaz loma po betonu



Slika 4. Prikaz loma po FRP elementu

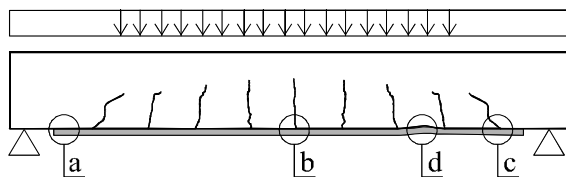


Slika 5. Prikaz linije loma duž postojeće armature



Slika 6. Prikaz pojave linije loma pri otkazu adhezije i kohezije

- b) otkazom u sloju lepka (otkaz kohezije) (slika 6),
- c) otkazom između sloja lepka i betona ili otkazom između sloja lepka i FRP elementa (otkaz adhezije) prikazanim na slici 6,
- d) odlepljivanje unutar FRP elementa (otkaz smicanjem između slojeva)
- odlepljivanjem ili odvajanjem FRP elementa od betonske površine (prikazanim na slici 7)
 - a) odlepljivanjem kraja FRP laminata od betonskog elementa u neispucaj zoni sidrenja,
 - b) odvajanjem FRP laminata prouzrokovanim prslinama u betonskom elementu nastalim usled napona savijanja,
 - c) odvajanjem FRP laminata prouzrokovanim prslinama u betonskom elementu nastalim usled smičućih napona,
 - d) odvajanjem FRP laminata prouzrokovanim neravninama na površini betonskog elementa.

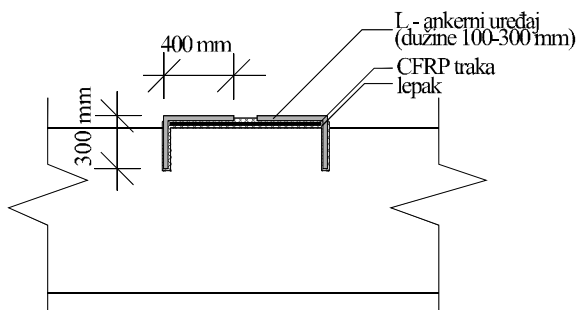


Slika 7. Prikaz loma nastalog prethodnim gubitkom veze betonskog i FRP elementa

Da ne bi došlo do odlepljivanja ili odvajanja FRP laminata od betonske površine elementa na neispraskalom delu ili usled prslina prouzrokovanih momentima savijanja, neopходно je odrediti potrebnu dužinu sidrenja FRP laminata [21]. Ukoliko nije moguće obezbediti dovoljnu dužinu sidrenja, potrebno je osigurati krajeve FRP laminata od odlepljivanja trakama upravno orijentisanim u odnosu na trake kojim pojačavamo element, ili pomoću specijalnih uređaja za ankerovanje [12].

Upotreba traka upravno orijentisanih u odnosu na trake kojima pojačavamo element na savijanje, oblikovanih u uzengije, kojima se obuhvataju podužne trake je preporučljiva, ali se ove uzengije ne mogu smatrati delom pojačanja na smičuće sile, ukoliko je i ono potrebno.

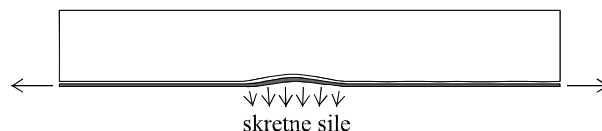
Korišćenje mehaničkih ankernih uređaja kao što su zavrtnjevi treba izbegavati ili sa velikim oprezom koristiti, pošto oni mogu uticati na integritet FRP elemenata. Rupe koje su neophodne u slučaju zavrtnjeva npr., mogu prouzrokovati „pucanje“ po dužini FRP laminata, i smanjenje njegovog poprečnog preseka na tom mestu.



Slika 8. Prikaz mehaničkog sredstva za ankerovanje CFRP traka

Specijalna mehanička sredstva za ankerovanje L oblika, prikazanih na slici 12, dužine 100-300 mm su preporučljiva naročito pri upotrebi CFRP traka za pojačavanje tavanica. Ovi ankerni uređaji se postavljaju u zareze napravljene u tavanici i znatno povećavaju mogućnost primanja zatežuće sile na krajevima traka. Nakon ugradnje, ove ankerni uređaje treba zaštititi minimalnim zaštitnim betonskim slojem od 20 mm.

Odvajanje FRP elementa od betonske površine usled neravnina je još jedna od mogućnosti koju treba izbeći. Ovaj problem nije dovoljno proučen, i stoga postoje samo preporuke za temeljnu pripremu betonske podloge. FRP sistemi se ne smeju lepiti na neravne nosive površine, pošto to dovodi do pojave nepoželjnih skretnih sila (slika 9).



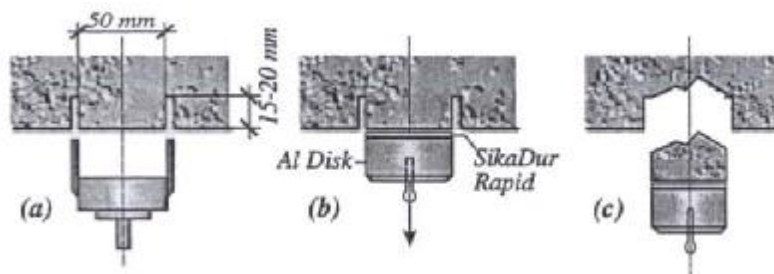
Slika 9. Prikaz skretnih sila nastalih usled neravnina na betonskoj podlozi

Pre nanošenja lepka, a nakon detaljnog čišćenja, treba proveriti betonsku površinu metalnom letvom, dužine 2m kod koje ne sme da se pojavi neravnina veća od 5 mm. Pri kontroli na dužini, odnosno širini od 30 cm, dozvoljeno odstupanje letve od betonske površine treba da je manje od 1mm. Ukoliko ovo nije slučaj, odnosno ukoliko su neravnine veće od dozvoljenih, potrebno je primeniti izravnavajuću podlogu i prajmer.

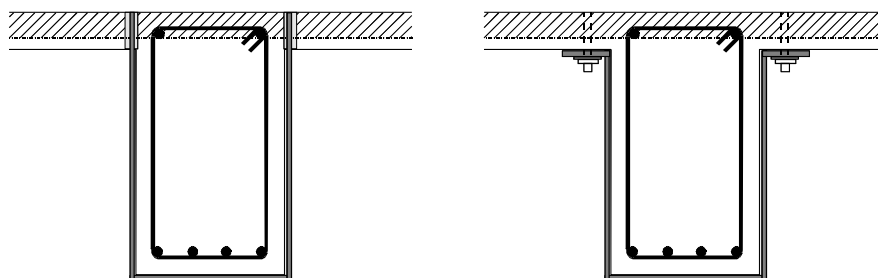
Najznačajniji kriterijum za primenu FRP elemenata kao sistema za pojačanje konstrukcije je kvalitet ugrađenog betona. Pre nanošenja lepka, poslednja provera kvaliteta betonske površine na koju treba da zalepimo FRP element, vrši se tzv. „pull-off testom“ kojim se dobija stvarna čvrstoća betona na zatezanje kao i kvalitet pripremljene podloge. Na ovaj način utvrđena čvrstoća betona na zatezanje prema [7] treba da iznosi minimalno $f_{ct}=1,5$ MPa. Ukoliko je utvrđeno da je potrebno konstrukciju prethodno izravnati tankim nanosom izravnavajuće podloge i prajmera, „pull-off“ test se vrši nakon nanošenja ove podloge na betonsku površinu (slika 10). U Tehničkom izveštaju 55 [6] ističe se potreba uzimanja minimalno tri uzorka za betonsku površinu na koju želimo da lepimo FRP element.

Pri pojačavanju elemenata za prijem povećanih momenata savijanja, mora se voditi računa da se sa druge strane može povećati mogućnost loma od uticaja transverzalnih sila u preseku.

Što se elemenata pojačanih na smičuće sile tiče, da ne bi došlo do njihovog otkaza, neophodno je propisno ankerovanje FRP laminata. Ovo se postiže obuhvatanjem betonskog preseka sa tri ili čak sa sve četiri strane i izbegavanjem lepljenja laminata samo po obrazima. Laminati koji obuhvataju zategnutu zonu poprečnog preseka betonskog elementa sa njegove tri strane, formirajući pri tome obvojnici u obliku slova U, moraju prema Tehničkom biltenu 14 [7] biti ankerovani u pritisnutu zonu preseka, da bi se formirao efekat rešetke, a gde je to moguće, preporučljivo je čak da se ankerovanje izvrši celom visinom pritisnute zone (slika 11).



Slika 10. Prikaz „pull-off“ testa

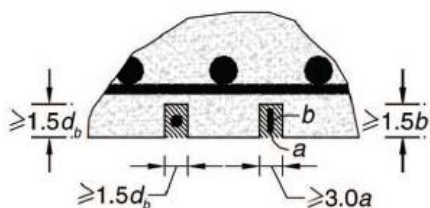


Slika 11. Pravilno ankerovanje FRP elementa kod elementa pojačanog na smicanje

3 OBLICI I MEHANIZMI LOMA AB PRESEKA POJAČANIH NSM METODOM APLICIRANJA FRP ELEMENATA

Pojačavanje betonskih elemenata napregnutih na savijanje može biti izvedeno umetanjem FRP traka ili šipki u prethodno napravljene proreze u betonu. Ovaj način pojačavanja, kako je napred naglašeno, se naziva pojačavanjem u blizini površine betonskog preseka, tzv. NSM sistem [14].

FRP elementi aplicirani na ovaj način su bolje zaštićeni od traka koje se lepe na samu površinu, što omogućuje bezbedno apliciranje u zonama gde postoji mogućnost oštećenja. Takođe, ovako apliciran FRP ima veću specifičnu površinu sprezanja sa betonom, što je još jedna od prednosti NSM sistema (slika 12). Da bi se poboljšalo prijanjanje, FRP elementi korišćeni za primenu NSM sistema uglavnom imaju obrađenu površinu. Ovo se može postići na razne načine, a jedan od uobičajenih je fabrička profilacija tj. rebra, slična čeličnoj rebrastoj armaturi.



Slika 12. Detalji za ugradnju NSM sistema pojačavanja

Dosadašnja ispitivanja su pokazala [23] da se granična nosivost NSM sistema povećava sa povećanjem dužine sidrenja. Kao i kod FRP elemenata koji se

lepe na površinu betonske konstrukcije postoji granična dužina sidrenja posle koje njeno dalje povećavanje ne utiče na povećanje veze FRP elementa sa betonom. Ipak, ova granična dužina sidrenja daje mnogo veću jačinu i prijanjanja kod NSM sistema, te je zbog toga manje verovatno da će ona u ovom slučaju biti limitirajući faktor pri dimenzionisanju.

U osnovi postoje tri vrste otkaza koji se mogu javiti kod NSM sistema:

1/ Otkaz nastao usled odvajanja u sloju lepka

Do odvajanja u sloju lepka, kojim se zapunjava prorez nakon umetanja FRP elementa, može doći usled visokih napona zatezanja na spoju FRP elementa i epoksida. U ovom slučaju se formiraju podužne prsline u sloju lepka.

Ova vrsta otkaza uglavnom nastaje zbog debljine lepka koji okružuje FRP element i može se minimalizovati, ili čak izbeći korišćenjem lepkova veće čvrstoće na zatezanje.

2/ Otkaz nastao usled odvajanja betona

Odvajanje betona u direktnoj blizini lepka usled dostizanja granice zatežućih napona u betonu se uglavnom dešava ukoliko upotrebljeni epoksid ima veću čvrstoću na zatezanje od betonskog elementa koji se pojačava.

Ova vrsta otkaza je u direktnoj zavisnosti od veličine preseza.

Ove dve vrste otkaza su uglavnom praćene odvajanjem FRP elementa duž linije otkaza. Kombinacija ova dva otkaza je takođe moguća.

3/ Lom po FRP elementu usled zatežućih sila

Pošto je veza NSM sistema sa betonom mnogo jača nego veza FRP elementa lepljenog na površinu, postoji

realna mogućnost dostizanja granice loma FRP elementa usled zatežućih sila, pre otkaza usled odvajanja u sloju lepka ili otkaza u betonu.

Sidrenje NSM sistema se razlikuje od FRP sistema nanetih na površinu betonskog elementa. Sloj lepka je znatno deblji, tako da površina naleganja FRP elementa i lepka može biti znatno manja od površine naleganja betona na lepak. Takođe, uslovi pripreme betonskog prereza, tj. pristupačnost svim stranama prereza, mogu rezultovati nejednako pripremljenom betonskom površinom. Iz svih ovih razloga, smernice koje se tiču otkaza površinski lepljenih FRP elemenata, ne mogu se primeniti na NSM sisteme.

Otkaze prouzrokovane prslinama nastalim usled smičućih napona, usled neravne betonske površine ili maksimalne zatežuće sile u FRP elementu, treba proveriti na identičan način kao i kod površinski nanetih sistema.

4 MEHANIZMI LOMA KOD POJAČAVANJA PREDNAPREZANJEM

Eksperimentalna istraživanja obavljena u EMPA-Cirih 1993. g., pokazala su povoljan rezultat na pojačavanje konstrukcije pri prednaprezanju CFRP traka. Njime je postignuto poboljšanje ponašanja u upotrebi i za granično stanje loma [3] i [11]. Prednaprezanje korišćenjem spolja vođenih kablova (van poprečnog preseka) je povoljno zbog zanemarljivog povećanja težine i ometanja saobraćaja. Kod prednaprezanja kablovima od čelika često dolazi do korozije, a time i do redukcija njihovog preseka i do povećanja napona u kablovima. To može dovesti do loma, kao na mostu Znys-y-Gwas u Velsu 1985. godine. Pored toga održavanje ovako pojačanih konstrukcija je otežano. Ovaj problem je moguće rešiti korišćenjem kablova od različitih FRP materijala. Za pojačavanje elemenata izloženih savijanju mogu se primeniti prethodno i naknadno naprezanje kablova [11].

Za prednaprezanje se koriste različite trake (CFRP) kao spoljašnji kablovi jer su izduženja lepljenih traka ograničena nosivošću lepka i površinskih slojeva betona. Potreban je dokaz sidrenja zatežuće komponente, a prednapregnute trake su vrlo povoljne za pojačavanje AB elemenata i sa aspekta graničnih stanja upotrebljivosti i loma [2] i [3].

Ukoliko se pojačavanje vrši prednaprezanjem FRP elemenata, neophodno je obratiti pažnju na mehanizme otkaza ankernih sistema:

- pomeranje ili proklizavanje kabla van ankera izazvano nedovoljnim ukleštenjem između kabla i cilindra - čaure,

- proklizavanje kabla i cilindra, skupa, relativno u odnosu na klin,

- proklizavanje klina, relativno u odnosu na cev,

- prekid štapova van zone ankerovanja. Prekid kabla van zone ankerovanja je, kada do prekida dođe u zoni dalje od, trostruke vrednosti prečnika, u odnosu na anker.

Otpornost na zamor je posebno važna kod mostova, jer je kod njih, često potrebno povećati njihovu nosivost zbog porasta saobraćajnog opterećenja. Kako je naglašeno, da bi se pojačanje izvelo brzo i sa malim ometanjem saobraćaja i sa malim povećanjem težine prime-

njuje se spoljašnje prednaprezanje kablovima na bazi FRP.

U istraživanju opisanom u radu [11] primenjeno je prednaprezanje Parafil užadima (linearni aramidni laminati) uz određivanje uticaja sledećih parametara: veličine unete sile, broja devijatora (jedan u sredini i dva u trećinama raspona), maksimalno opterećenje pre prednaprezanja, efektivne visine do unete sile, čvrstoće betona i odnosa raspona i visine grede. Na osnovu upoređenja eksperimentalnih i teorijskih rezultata razvijen je jednostavan izraz za određivanje granične nosivosti grede.

Mehanizmu loma prethodili su veliki ugibi i otvaranje širokih prslina, a lom se događao u zoni unošenja sila (devijatora), dok su smičuće sile izazvale prsline u zoni smicanja (savijanja silama). Rezultati, prikazani u radu [11], su pokazali da granični momenat savijanja pojačane grede raste:

- sa porastom spoljašnje sile prednaprezanja, kao dominantnim parametrom,

- pri korišćenju dva devijatora u trećinama raspona umesto jednog u sredini,

- sa porastom ekscentriciteta sile prednaprezanja,

- sa porastom čvrstoće betona na pritisak.

Na vrednost graničnog momenta neznatno utiče opterećenje naneto pre pojačavanja i vitkost grede (za ispitivane odnose) [3]. Predloženi metod, sa malim modifikacijama, može se primeniti na bilo koja FRP užad. Spoljašnja sile prednaprezanja povećava momenat nosivosti u odnosu na nepojačane grede bez bitne redukcije duktilnosti [2].

5 PREGLEDI I PROCENA STANJA OBJEKATA

Nadgledanje obuhvata skup mera koje se preduzimaju na objektu u toku njegove eksploatacije da bi se utvrdile potrebe za izvođenje različitih intervencija tokom održavanja. O nadgledanju, zavisno od vrste i nivoa detaljnosti sastavlja se odgovarajući izveštaj. Prema Model Code Evro-internacionalnog komiteta za beton (1990/93) preporučuje se da vreme između dva detaljna pregleda, za stambene zgrade, ne bude duže od deset godina. Znatno kraći periodi vremena, npr. zahtevaju se za mostove (šest za drumske, dve za železničke). U našem Pravilniku BAB' 87 Projekat osmatranja i održavanja je obavezni deo projektno dokumentacije. AB konstrukcije moraju se održavati u stanju projektom predviđene sigurnosti i funkcionalnosti, a u slučaju oštećenja moraju se predvideti mere zaštite i/ili sanacije.

S obzirom da ne postoji dovoljno iskustava sa praćenjem ponašanja izvedenih objekata čine se pokušaji da se to nadoknadi eksperimentalnim istraživanjem nekih najčešćih mehanizama oštećenja, kao npr. [5]. U tom radu istraživana je otpornost veze na kontaktu FRP elemenata i betona za slučaj lepljenja i njihovog vođenja u okviru zaštitnog sloja-NMS sistema. U njemu su razvijeni matematički modeli popuštanja veze za pojedinačne elemente/ploče koji se koriste za povećanje nosivosti na savijanje i na smicanje AB greda, kao i za pojačanje korišćenjem NSM sistema. Istraživani su pojedinačni elementi i grupe elemenata koji se koriste za pojačavanje.

Slabljenje FRP materijala odvija se kao kombinacija sledećih činilaca [19]:

- Mehanička dejstva (zamor, ponovljeni udari, abrazija, erozija i ređe preopterećenje);
- Hemijska dejstva (zagađena voda, rastvori, ulja, kiseline, i dr.);
- Radijacija;
- Visoke temperature ili njihove fluktuacije;
- Biološka dejstva (bakterije, alge, insekti, i dr.) više o tome dato je u [5].

Promene pri pomenutim dejstvima mogu se uočiti uz uslov, očišćenih površina na kojima su naneti FRP elementi od nečistoća. Pregledom se obuhvata stanje zaštitnih obloga iako ne utiču na konstrukcijska svojstva AB konstrukcije. Često na stanje pojačane konstrukcije utiče više činioca pa je važno odrediti primerne uzroke neadekvatnog stanja i ukloniti ih pa zatim izvesti popravke. Značajno je odrediti vek trajanja komponenti da bi se odredio preostali vek trajanja objekta, da konstrukcija ne bude skupa za održavanje i da ispuni zahteve nosivosti i estetske.

I pored toga što je trajnost FRP elemenata za pojačanje manja od AB elemenata od značaja je činjenica da se oni lakše mogu popraviti ili zameniti nego ostali elementi kod klasičnih intervencija čime se postiže produženje eksploatacionog veka (EV). Za estetske popravke koriste se blaga sredstva za čišćenje ili specijalni vosak. Neadekvatno održavanje FRP materijala za pojačavanje, povećava oštećenja i negativno utiče na trajnost, tj. EV. Oštećenja mogu biti posledica povrede elemenata za pojačavanje tokom sečenja i postavljanja. Najozbiljnija oštećenja javljaju se za incidentna opterećenja, neplanirana povećanja opterećenja i izlaganja dugotrajnim dejstvima.

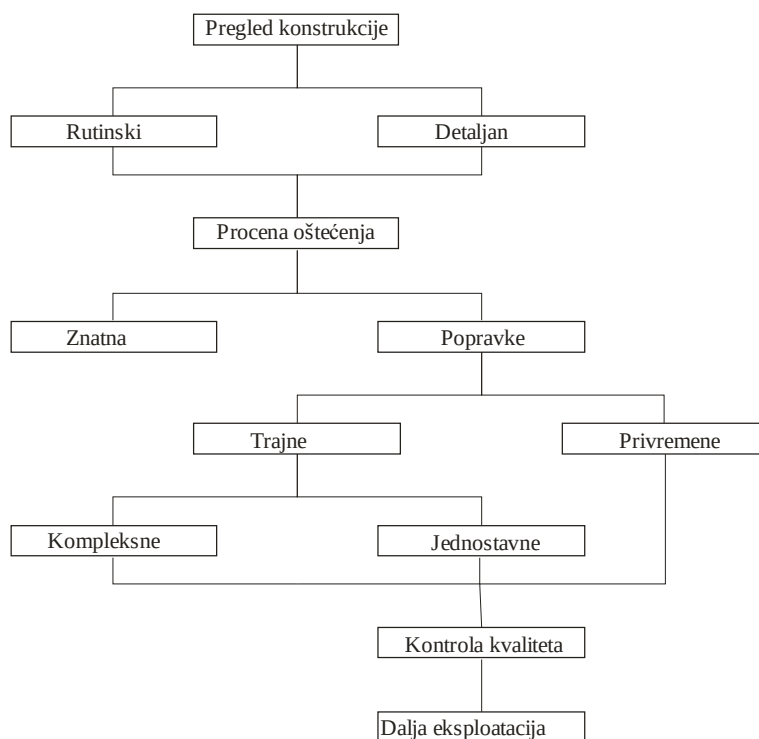
Za razliku od metode spolja lepljenih (EBR) FRP elemenata, koja se razvija oko dve decenije, NSM metoda u svetu se primenjuje svega nekoliko godina i

nedovoljno je obrađena u literaturi, kao i preporukama i smernicama za projektovanje

Posle nekoliko decenija korišćenja početna svojstva elemenata se menjaju, čak i bez mehaničkih oštećenja. Obavljanje pregleda i registracija promene svojstava tokom vremena mogu obezbediti da se pad svojstava i oštećenja ne povećavaju. Rutinski pregledi obavljaju se vizuelno i beleže sve promene uključivo i promene boje. Registruju se prsline ili ispušćenje/ bubrenja, ali ponekad nije lako uočiti znake deterioracije. Zbog toga je u nekim slučajevima potrebno koristiti specijalnu opremu kao što je termografija, ultrazvuk, i dr. instrumenti. I to je onda detaljni pregled praćen ispitivanjima.

Uzorci vlaknastih elemenata se lepe za konstrukciju van dela područja koje je pojačano u svhu ispitivanja tokom eksploatacionog veka. Alternativno uzorci FRP laminata se mogu lepiti na grede u neposrednoj blizini pojačane konstrukcije, koji se kasnije ispituju prema režimu pregleda. Deo uzoraka se ne prekriva zaštitnim oblogama. Značajne su naznake slabijeg prijanjanja kada se ona ispituje. Regularno ispitivanje uključuje tradicionalni pull-off test da bi se odredila čvrstoća na zatezanje ili se obavlja ispitivanje konstrukcije pod probnim opterećenjem. Analiza prikupljenih podataka i rezultati ispitivanja koriste se za procenu integriteta pojačane konstrukcije. Izveštaj treba da sadrži i preporuke za popravke i sprečavanje daljeg pogoršavanja stanja.

Rutinskim vizuelnim pregledom sa mogu konstatovati nabori prsline ili raslojavanje, za lokalna oštećenja (usled udara ili abrazije, npr.) i deterioracija (degradacija) konstrukcije (dodatne prsline ili korozija). Kada se elementi FRP pokriju zaštitnim slojem, pregledom se mogu konstatovati oštećenja na kompozitima, najčešće bez uklanjanja zaštitnog sloja. Planirani radovi na pojačanim elementima mogu biti uzrok povrede FRP elemenata-armature.



Slika 13. Dijagram toka monitoringa i sanacija

Upitnik za rutinski pregled konstrukcija pojačanih sa FRP elementima sadrži sledeće:

- Da li je FRP vlažan?
- Postoje li znaci oštećenja na FRP koji su vizuelno primetni? (oštećenja od udara, površinske prsline, izloženost vlakana, promena boje, i dr.),
- Da li je obavljeno čišćenje posle prethodnog pregleda?
- Da li ne nanošen zaštitni sloj ili bojenje posle prethodnog pregleda?

Detaljni pregledi se obavljaju uz nedestruktivne metode ispitivanja, kao što su obični čekić za kucanje po betonu i korišćenje ultrazvuka, tokom eksploatacionog veka. Upotreba termografije je nešto kompleksnija i skuplja, ali znatno preciznija za ispitivanje FRP materijala. Ali ne postoji pouzdan metod nedestruktivnog ispitivanja prijanjanja, tj. stanja adheziva. U tom cilju primenjuje se kao adekvatan pull-off test, na kontrolnim uzorcima koji se čuvaju u blizini pojačane konstrukcije. Ostali instrumenti za ispitivanje tokom korišćenja objekta mogu se postaviti u vreme pregleda i procene (merenje dilatacija pod pokretnim opterećenjem, npr.) ili u procesu pojačavanja. Pri većim promenama neophodno je utvrditi poreklo neregularnosti u FRP nanetom materijalu ili originalnoj konstrukciji, kao što su dodatne prsline u betonu [7] na koje treba primeniti sanacione mere.

Intervali između pojedinih pregleda dati su u Preporukama Američkog instituta za beton [1], Međunarodne federacije za beton [7], i Društva za beton [6]. U dokumentu [6] se uslovljavaju češći pregledi u prvih nekoliko godina posle postavljanja FRP elemenata kao proveru efikasnosti obavljene intervencije.

6 TRAJNOST I PERFORMANSE

Prema Evrokodu 0 [16], koji daje osnove projektovanja konstrukcija i [4] potrebno je za BK odrediti proračunski eksploatacioni vek koji za konstrukcije zgrada i druge jednostavne konstrukcije iznosi 50 godina. Takođe se uslovljava da degradacija konstrukcije posle isteka eksploatacionog veka, ne utiče na smanjenje nivoa njenog ponašanja ispod određene mere imajući u vidu sredinu u kojoj se nalazi, kao i njeno održavanje. Zbog toga je od značaja poznavanje efekata na trajnost i performanse AB konstrukcija pojačanih FRP elemenatima.

6.1 Mehanički efekti

Trajnost FRP materijala na mehanička dejstva je zadovoljavajuća [17] jer su prisutna vlakna koja

obezbeđuju nosivost, ali treba imati u vidu da slabljenje matrice koja prenosi opterećenje između vlakana, može indirektno uticati na ukupna mehanička svojstva materijala. Meke matrice su podložne eroziji i ogrebotinama. Udari manjih predmeta izazivaju oštećenja materijala koja se, često, ne vide golim okom ali se može javiti raslojavanje, prsline u matrici, odlepljivanje vlakana čak i njihovo cepanje. Najbolje je ovakva oštećenja odmah sanirati zamenom FRP materijala [18].

Da bi se popravile karakteristike žilavosti matrice, pre završne obrade dodaju se, oko 10% mereno težinski, modifikatori od gume, termoplastike, koristi se i umetanje sloja apsorbera energije (elastomera) između zubaca armature.

Zamor pod cikličkim opterećenjem koje se spreže sa ostalim dinamičkim dejstvima koja mogu biti mehanička, termička i hemijska. Ponašanje se prognozira na osnovu eksperimentalnih istraživanja, jer ovaj činilac bitno utiče na eksploatacioni vek pojačane AB konstrukcije [4].

Iako su dostupni za pregled spojevi, tj. pojačanja FRP elementima spoljašnjim lepljenjem, posebno su osetljivi. Uopšte trajnost popravke zavisi od primenjenih adheziva i mogu se analizirati odgovarajućim kriterijumima loma.

6.2 Hemijska dejstva

Poznato je da FRP materijali apsorbuju vodu, kao što su stakleni (sa nižom cenom) i karbonski FRP materijali uz napomenu da se staklena vlakna završnom obradom mogu zaštititi od apsorpcije. Apsorpcija dovodi do migracije vlage kroz smolu, pa može izazvati redukciju nosivosti zbog odvajanja vlakana i smole. Neke smole su osetljive na ključalu vodu, ali ne i na hladnu. Vлага i temperaturna fluktuacija izazivaju prsline i druga oštećenja. Debeli slojevi su manje podložni ovom dejstvu nego tanki što se objašnjava ranijim iskustvom iz sanacija sa FRP materijalima. Zbog toga je važan adekvatan izbor materijala, smole i geometrije, kao i pažljivo sečenje i bušenje pri postavljanju.

Neke materijale na bazi FRP treba zaštititi od kontakta sa hemikalijama jer su podložni oštećenjima pod njihovim delovanjem [18]. Izbeci kontakt sa deterdžentima, rastvaračima za čišćenje, kiselinama, alkalijama i dr. Otpornost većine FRP materijala na visoko reaktivne hemikalije je dobro, što omogućuje njihovu primenu u objektima sa hemikalijama i sličnim materijalima, kao i na nepovoljnu sredinu. Agensi oksigena, jake alkalije, bromidi i vlažni hloridi remete efekte smole. Ako su FRP materijali podvrgnuti simultanom mehaničkom i hemijskom dejstvu mogu izazvati prsline, koje pod uticajem sredine dovode do nepoželjnog, tj. naglog-krtog loma.

Tabela 1: Preporučeni intervale između dva pregleda

Tip konstrukcije:	Rutinski pregledi:	Detaljni pregledi:
Mostovi	Svake godine	Najmanje jednom u šest godina
Zgrade	Svake godine	Pri promeni namene Pri promeni načina korišćenja Pri izvođenju radova na konstrukciji ili pojačavanju. Najmanje jednom u šest godina
Ostali objekti	Zavisno od korišćenja objekta (idealno svake godine)	Zavisno od korišćenja objekta (najmanje jednom u deset godina)

6.3 Promena boje

Od značaja je da su FRP materijali otporni na promenu boje. Smole imaju promenljivu otpornost na dugotrajna dejstva spoljašnje sredine. Za tu svrhu se preporučuje korišćenje staklo/poliester ili ugljenik/epoksi materijala na koje nepovoljno deluje samo površinski. Efekti su „kozmetičke“ prirode:

- Bleđenje i zatamnjenje ako se ne koriste odgovarajući pigmenti za očuvanje boje.

- Žutilo usled zatamnjenja baze obloge smole. Izbegava se korišćenjem smola otpornih na ultravioletna zračenja (UV), ili se uslovljava da ih apsorbuje, uz dobru negu smole.

- Cvetanje zbog migracije nekompatibilnih pigmenta ili aditiva doprinosi da površina postaje tamnija. Posledice se mogu ukloniti poliranjem, kao kratkotrajna mera.

- Gubitak sjaja i razgradnja površinskog veziva izaziva erozija površinskih slojeva usled hemijskog ili mehaničkog oštećenja, ili njihove kombinacije.

Klimatske promene takođe utiču na FRP materijale. Više o ovome videti u [10].

6.4 Temperatura

Najveće temperature pri korišćenju FRP materijala uslovljavaju dva činioca: prvi je prenos toplote sa smole na staklo, i temperatura kada počinje hemijska razgradnja (retko se javlja). Pri porastu temperature opadaju čvrstoća, napon pri popuštanju, i modul elastičnosti. Smole imaju ograničenu otpornost na temperaturu, ali postoje i otporne smole koje su veoma skupe. Vlakna su stabilni materijali i na visokim temperaturama, čak i za komercijalne smole. Efekti visokih temperatura su:

- Hemijska razgradnja smola pri zagrevanju.

- Redukcija modula i čvrstoća.

- Ubrzavanje procesa deterioracije/degradacije, slično kao pri radijaciji ili hemijskom dejstvu.

- Oštećenja usled termičke ekspanzije i nekompatibilnosti dva susedna materijala sa aspekta termičkog koeficijenta.

- Termički udar posle naglih promena temperature i pojava prslina.

- Ponovljena nagla zagrevanja FRP materijala koji je prethodno apsorbovao vlagu ili rastvarače izaziva različite mehanizme oštećenja.

- Požari.

Protivpožarna otpornost FRP je, pored čvrstoće i modula elastičnosti, značajan podatak za projektovanje. Smola ne sme biti podložna zapaljenju, ali pri zagrevanju iznad kritične temperature gubi mehanička svojstva i integritet. Najveći broj organskih smola se naglo degradira već na temperaturama između 300 i 400^o C. Zbog toga se izboru smola i dodataka pri intervencijama (sanacije/pojačavanje) sa FRP materijalima mora pokloniti puna pažnja.

7 ODRŽAVANJE, SANACIJE I POPRAVKE

FRP materijali ne uslovljavaju velike radove na održavanju tokom eksploatacionog perioda. Ipak, popravke se obavljaju i u toku izvođenja radova, tj. njihovog nano-

šenja na konstrukcijske elemente i tokom korišćenja objekta. Tokom nanošenja FRP elemenata (izvođenje radova na pojačavanju) radovi na bušenju, pravljenje zarez, brušenje i ostali radovi mogu izazvati površinska oštećenja FRP elemenata, naročito izlaganje vlakana, sa smanjenom zaštitom matrice od spoljašnjih dejstava. To bitno utiče na performanse (ponašanje u upotrebi).

Oštećena površina mora biti zaštićena slojem matrice ili boje. Opšte pravilo je da se koristi materijal istog tipa od kojeg je prvobitno izvedena sanacija/pojačavanje. Uputstva proizvođača se moraju uvažavati da bi se postigla optimalna popravka. Da bi se obezbedila adekvatna popravka zaostala prašina ili druge nečistoće nastale tokom izvođenja pojačanja moraju se ukloniti pre početka same popravke. Odluka o izvođenju popravke donosi se zavisno od stepena zahteva da se performanse dovedu na nivo projektovanih. Ostale stavke su koštanje popravke, pristup oštećenom mestu i dostupnost materijala za popravku.

Iskustveno neophodni koraci za izvođenje popravke su:

1. Pregledati i proceniti oštećenje
 - Vizuelne-tehnika posmatranja, i
 - Korišćenjem instrumenata.
2. Procena opcija popravki
 - Nastavak korišćenja bez popravke.
 - Popravka oštećenog dela pojačanja, i
 - Zamena oštećenog dela pojačanja.
3. Izvođenje popravki
 - Ukloniti oštećeni materijal.
 - Očistiti materijal do zdravog dela.
 - Pripremiti oblast za popravku, i
 - Izvesti planiranu popravku.
4. Kontrolisati kvalitet popravke
5. Obnoviti zaštitni sloj-premaz

7.1 Tipovi poravki

Prema prikazanom dijagramu toka (slika 13) postoje tri tipa popravki:

1. Jednostavna popravka ako je oštećenje neznatno ili ne utiče na strukture FRP materijala. U ovom slučaju popravka je isključivo estetskog karaktera i izvodi se radi zaštite i dekorisanja površine. Ovim se ne poboljšava čvrstoća na zatezanje i koristi se tamo gde ovo nije potrebno postići. Zbog značajnog stepena skupljanja materijala kojim se izvodi popravka, ovi delovi mogu isprskati posle određenog vremena.

2. Kompleksna popravka je potrebna kada je oštećenje znatno i kada se moraju nadomestiti snižene mehaničke karakteristike materijala. Najbolji izbor materijala bi bio korišćenje originalnih vlakana i recepture matrice ukoliko je to moguće. Ukoliko to nije alternativno rešenje iziskuje pažljivi izbor. Predložena šema popravki mora da odgovara originalnom projektu pojačanja konstrukcije/betonskog elementa.

3. Privremena popravka izvodi se u slučaju malih oštećenja koja ne ugrožavaju strukturu i/ili mehaničke karakteristike materijala. Ove popravke se obavljaju sa minimumom pripremnih radova i u cilju zaštita FRP elementa do trenutka kada se izvede potpuna popravka. Za privremene popravke se, takođe, uslovljavaju redovni pregledi.

7.2 Neke tehnike poravki

1. Premaz

Ukoliko je u pitanju samo ogrebotina ili abrazija popravka se obavlja jednostavnim premazivanjem te površine premazom obogaćenom matricom.

2. Popravka krpljenjem

Debljina originalnog FRP materijala se nadoknađuje korišćenjem umetnutih slojeva i materijala za popravku koji se lepe na površinu FRP materijala. Uglove zakrpe treba zaobliti za sve slojeve. Zakrpom se zamenjuje oštećena površina da što više odgovara originalu. To znači da broj slojeva i orijentacija vlakana treba da budu kao kod originalnog pojačanja. Popravljeni pojačanje ima 60 do 80% čvrstoće originalnog pojačanja (slika 14).

Prednosti ovog postupka su: jednostavno izvođenje, male su potrebe za pripremne radove, a mane popravljeni FRP element je deblji i teži od originalnog pojačanja. Da bi se obezbedila adekvatna adhezija potrebna je priprema površine čišćenjem.

3. Popravka sa zakošenjem i umetkom

Oblast oko oštećenja se peskari da bi se ogolio svaki sloj laminata. Važno je znati broj slojeva FRP materijala, kao i njihovu orijentaciju. Ponekad je potrebno umetnuti sloj FRP materijala radi izravnavanja površina.

Prednosti ovog postupka su što je neznatno deblji od originala, svaki sloj za popravku se preklapa sa slojem koje se popravlja (slika 15). Dobro prijanjanje može da se

postigne sveže ogoljenim površinama (peskarenje). Mane su mu što je postupak vremenski zahtevan i što je potreban visok stepen veštine radnika da bi se pravilno izveo.

4. Stepenasta popravka konstrukcijskog elementa

Stepenasta popravka (slika 16) je alternativa za popravku sa zakošenjem. U ovom slučaju ugao se postiže preciznim uklanjanjem određene površine FRP materijala svakog sloja. Laminat se peskari sve dok se ne ukaže sledeći sloj FRP pojačanja, što rezultuje stepenastim oblikom. Ovaj oblik ostavlja oštre ivice na svakom sloju i veoma ga je teško izvesti, a da se pri tome ne jave oštećenja.

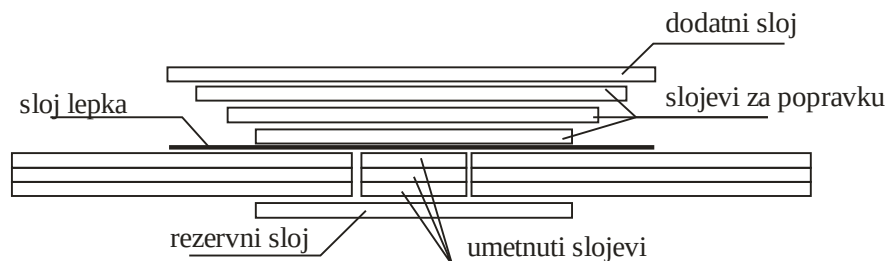
Prednosti su mu što je neznatno deblji od originala, svaki sloj za popravku se preklapa sa slojem koje se popravlja. Dobro prijanjanje može da se postigne sveže ogoljenim površinama. Mana mu je što je izuzetno komplikovan za izvođenje.

Za građevinske objekte koriste se sledeće strategije održavanja:

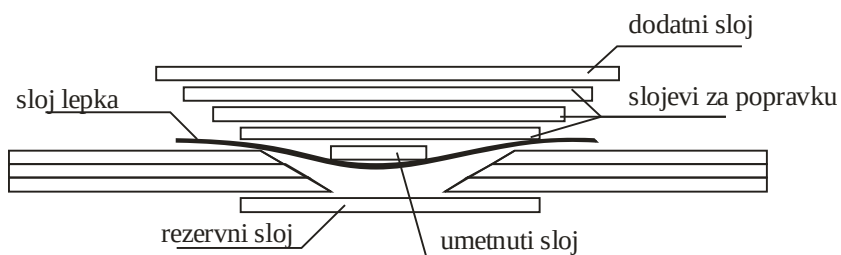
1. Osnovno održavanje popravkama nakon registrovanja oštećenja.

2. Popravkama nakon određenog vremena korišćenja objekta.

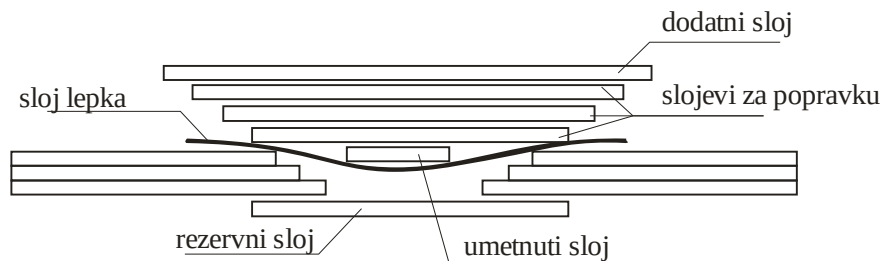
3. Intervencije prema stanju važnijih komponenti nakon nekih nepredviđenih okolnosti ili usled prekoračenja nekih granica odstupanja konstatovanih redovnim pregledom.



Slika 14. Krpljenje nenosećih elemenata



Slika 15. Nastavak sa zakošenjem i umetkom



Slika 16. Stepenasta popravka konstrukcijskog elementa

To se svodi na podelu na: korektivno održavanje (popravka nakon otkaza), preventivno održavanje i kombinovano održavanje. Nakon svakog pregleda upoređuju se stanje sa onim iz prethodnog pregleda. Za ove konstrukcije prikladan je samo treći model održavanja, tj. održavanje prema stanju.

Ukupno koštanje je zbir koštanja popravki, očekivanih pregleda, plus totalni rizik od oštećenja podeljeno sa životnim vekom objekta

8 ZAKLJUČAK

Iako savremeni način sanacija i pojačavanja AB konstrukcija, korišćenjem različitih elemenata na bazi FRP materijala i tehnika rada, on uslovljava redovno (kontinualno) praćenje stanja dodatnih elemenata i veze sa pojačanom konstrukcijom. Razlog za učestalije praćenje, nego za klasične AB konstrukcije, je nedostatak iskustava vezane za trajnost na ovaj način saniranih/pojačanih objekata. Zbog toga je od značaja prikaz i analiza dostupnih podataka iz literature i međunarodnih preporuka, jer je kod nas literatura iz ove oblasti veoma oskudna.

Pošto su, kako je naglašeno, trajnost i performanse u toku korišćenja objekata ključni faktori za primenu FRP materijala za sanacije/pojačanje betonskih konstrukcija, tj. svih njenih elemenata njima se mora posvetiti posebna pažnja. Naročito je značajna provera FRP elemenata kao dela pojačane konstrukcije tokom pregleda i procene stanja. Kada se oblast koja je oštećena identifikuje potrebno je sprovesti popravke, na način kako je to napred opisano. Za održavanje AB konstrukcija pojačanih FRP elementima jedino je ispravan model održavanja prema stanju uz adekvatno periodično praćenje i procenu stanja.

Pri intervencijama na konstrukciji treba imati u vidu da je pojačavanje AB preseka FRP materijalima naročito efikasno u slučajevima relativno male količine postojeće

zategnute armature u preseku. Mora se voditi računa da se zbog izraženih elastičnih karakteristika FRP materijala uvek obezbedi potrebna duktilnost preseka, kojom se sprečava nepoželjni mehanizam otkaza preseka, kao i u slučajevima lošeg kvaliteta izvođenja ili kvaliteta kontrole ovih sistema za pojačavanje.

Kod pojačavanja AB ploča sa FRP elementima (trake, lamele, ploče) treba sprečiti lom odlepljivanjem jer se u tom slučaju ne može razviti puni kapacitet nosivosti na savijanje. Do otkaza najčešće dolazi na krajevima obloge, pa se za njegovo sprečavanje koristi specijalno ankerovanje na krajevima ili prednaprezanje, tj. aktivno pojačavanje.

Nameće se, kao imperativ, da je pored solidnog projekta i izvođenja radova na pojačavanju, potreban adekvatan monitoring i sprovođenje mera održavanja saglasno navedenim preporukama koje su u radu sažeto prikazane i analizirane. Pošto su FRP materijali novi i sa njima nema dovoljno iskustava Preporuke za njihovo projektovanje sanacija/pojačavanja se često menjaju. Sa povećanjem fonda eksperimentalnih istraživanja i iskustava u njihovoj primeni preporuke su detaljnije i ne uslovljavaju tako česte promene. S tim u vezi je i potreba njihovog adekvatnog nadgledanja i održavanja, znatno više nego kod klasičnih intervencija na elementima AB konstrukcija. Zbog toga se AB konstrukcija pojačane FRP elementima moraju češće nadgledati uz procena stanja betona, armature i FRP materijala, kao i veze osnovnih i dodatnih materijala (elemenata).

I u našoj zemlji bi bilo neophodno usvojiti, što je moguće pre, adekvatnu regulativu iz oblasti primene FRP elemenata za projektovanje i izvođenje novih ili pojačavanje postojećih AB konstrukcija kao i njihovog nadgledanja i održavanja.

Napomena: Ovaj rad je deo istraživanja na Projektu 16018 koji finansira Ministarstvo za nauku Republike Srbije.

9 LITERATURA

- [1] American Concrete Institute (ACI), Committee 440: ACI 440.2R-08 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, 2008.
- [2] American Concrete Institute (ACI), Committee 440: ACI 440R-96 State of the Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures.
- [3] American Concrete Institute (ACI), Committee 440: ACI 440.4R-04 Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons, pp. 35.
- [4] American Concrete Institute (ACI), Committee 365: ACI 365.1R-42 Service-Life Prediction-State of the Art report, 2000.
- [5] Bastidas-Arteaga, E. Et al.: Coupled reliability model of biodeterioration, chloride ingress and cracking for RC structures, Structural safety 30 (2008), pp. 110-129
- [6] Concrete Society (CSC), Technical Report No.55: Design Guidance for Strengthening Concrete Structures Using Fibre Composite Materials, 2004
- [7] Fédération Internationale du Béton (FIB): Technical Report Bulletin 14: Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures, Lausanne, 2001.
- [8] FIB: Management, maintenance and strengthening of concrete structures, April 2002.
- [9] FIB: Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures (Task Group 5.1), March 2003.
- [10] Folić R., Glavardanov D.: Damage, inspection, monitoring and maintenance of structures strengthened with FRP materials, Proc. Int. Conference VSU`08, Sofia, May, 2008.
- [11] Folić R., Glavardanov D.: Pojačavanje betonskih konstrukcija prednaprežanjem FRP kablovima, Ocena stanja, održavanje i sanacija građevinskih objekata i naselja, Zlatibor, 2007., str. 47-52.
- [12] Folić R., Glavardanov D.: Mehanizmi loma i oblikovanje detalja pri pojačavanju AB savijenih elemenata FRP kompozitima, Tehnika 5, Naše građevinarstvo, 2006., str. 5-12.
- [13] Folić R., Glavardanov D.: Analiza metoda pojačavanja armiranobetonskih elemenata lepljenjem vlaknastih kompozita (FRP), Izgradnja br. 5-6, 2006, str. 113-126.

- [14] Glavardanov D., Folić R.: Pojačavanje betonskih konstrukcija FRP elementima NSM sistemom, *Materijali i konstrukcije* 4, 2007., str. 29-35.
- [15] Glavardanov D., Folić R.: Failure modes and detailing of RC elements in flexure strengthened with FRP composites, *Jubilee Scientific Conference of UACEG*, Sofia, May, 2007.
- [16] Gulvanessian, H., et al.: *Designers' Guide to EN 1990*, T. Telford, London, 2002.
- [17] Halliwell S.: Fibre reinforced polymers in construction: durability; BRE- Information paper IP10/03; September 2003
- [18] Halliwell S., Suttie E.: Repair and maintenance of FRP structures; BRE- Good repair guide GRG34; October 2003
- [19] Halliwell S., Reynolds, T.: FRP in construction: Long-term performance in service, BRE Centre for Composites in Construction, 2003.
- [20] Kindij A., Sorić Z.: Kabeli i trake od složenih materijala za prednaprezanje, *Građevinar*, 2007.
- [21] Oehlers, D. J.: Plates Adhesively Bonded to Reinforced Concrete Beams: Generic Debonding Mechanisms, *Advances in Structural Engineering* Vol. 9, No. 6, 2006., pp. 737-750.
- [22] Oehlers, D. J., Rashid, R., Serciano, R.: IC debonding resistance of groups of FRP NSM strips in RC beams, *Construction and Building Materials*, 22 (2008), pp. 1547-1582.
- [23] Szabo Z. K., Balazs G. L.: Near surface mounted FRP reinforcement for strengthening of concrete structures.

REZIME

MEHANIZAMI OŠTEĆENJA, MODELI ODRŽAVANJA I SANACIJA BETONSKIH KONSTRUKCIJA POJAČANIH FRP ELEMENTIMA

Radomir FOLIĆ
Dragana GLAVARDANOV

Pojačavanje armiranobetonskih (AB) preseka polimernim materijalima ojačanih vlaknima (FRP materijalima) se izvodi lepljenjem elemenata na spoljašnju površinu betonskog preseka ili ugradnjom FRP šipki u zaštitni sloj betona (tzv. NSM sistem). Primjenjuje se i prednaprezanje FRP kablovima. Efikasno pojačanje uslovljava sprečavanje mehanizma loma u fazi eksploatacije. Zbog toga je važno poznavanje mehanizama loma i načina kako izbeći njihovu pojavu. To se postiže pravilnim sidrenjem FRP elemenata i oblikovanjem detalja. U radu su klasifikovani mehanizmi loma i date preporuke da bi se izbegla njihova pojava kod AB elemenata pojačanih na pomenute načine (lepljenjem, NSM i prednaprezanjem). Za obezbeđenje adekvatne trajnosti, tj. produženje eksploatacionog perioda pojačanih elemenata, od posebnog značaja je izbor adekvatnog modela njihovog održavanja. Zbog toga su analizirani načini praćenja ponašanja i modela održavanja ovih specifičnih konstrukcijskih elemenata.

Ključne reči: FRP, oštećenja, lepljenje, NSM sistem, prednaprezanje, monitoring, održavanje, popravke

SUMMARY

DAMAGE MECHANISMS, MAINTENANCE & REPAIR MODELS OF CONCRETE STRUCTURES STRENGTHENED WITH FRP ELEMENTS

Radomir FOLIĆ
Dragana GLAVARDANOV

Strengthening of reinforced concrete (RC) sections using polymer materials strengthened with fibers (FRP) is executed by gluing (bonding) elements on the exterior surface of the concrete section or by building in FRP bars in the protective concrete layer (the so-called NSM system). Prestressing with FRP cables is also used. Efficient strengthening conditions the preventing of damage mechanism in the phase of operation (service). Therefore, it is important to know the damage mechanisms and the way how to avoid their occurrence. This is achieved by proper anchoring of FRP elements and detailing. The paper presents a classification of damage mechanisms and gives recommendations to avoid their occurrence in strengthened RC elements in the mentioned ways (gluing, NSM, and prestressing). To provide adequate durability, i.e. prolonging (extended) service life of strengthened elements, choice of appropriate maintenance model is very important. Therefore, means of monitoring and modeling maintenance of these specific structural elements have been analysed.

Key words: FRP, damage, bonded, NSM system, prestressed, monitoring, maintenance, repair works

KARAKTERIZACIJA MIKROSTRUKTURE TRANZITNE ZONE BETONA NA BAZI AGREGATA OD RECIKLIRANOG BETONA POMOĆU SEM-a

Miroslava RADEKA

PREGLEDNI RAD
UDK: 666.972.12 = 861

1 UVOD

Betoni spravljeni sa agregatom koji je dobijen od recikliranog betona se proučavaju od sedamdesetih godina prošlog veka. Proučavanja su išla u pravcu definisanja parametara kojim se određuje kvalitet recikliranog agregata, a potom i na proučavanje kvaliteta betona koji je spravljen sa ovim agregatom. Pitanja kojim je najviše pažnje posvećeno se odnose na:

a) Definisanje svojstava agregata dobijenog od recikliranog betona,

b) Davanje preporuka važnih za njegovu pravilnu primenu,

c) Određivanje mehaničkih svojstava betona načinjenog na bazi ovog agregata.

Manje pažnje je posvećeno:

d) Trajnosti betona na bazi agregata dobijenog od recikliranog betona,

e) Konstruktivnim karakteristikama betona na bazi agregata dobijenog od recikliranog betona.

Agregat koji je dobijen u postupku recikliranja starog betona se najčešće sastoji od zrna prirodnog kamena i sloja cementnog kamena ili maltera koji je vezan za zrno od prirodnog kamena. U manjoj meri se primenjuju tehnologije za potpuno uklanjanje cementnog kamena/maltera sa površine zrna prirodnog agregata (Takenaka Corporation, 1999). Količina cementnog kamena/maltera koja je vezana za zrno prirodnog agregata u "starom betonu" zavisi od vrste uređaja/tehnologije koja se koristi za usitnjavanje. Za određeni tip uređaja i istu količinu energije koja se troši na usitnjavanje, karakteristike agregata dobijenog recikliranjem betona su određene:

a) vodocementnim faktorom "starog betona", b) čvrstoćom

"starog betona", c) veličinom zrna prirodnog agregata u "starom betonu". Debljina sloja cementnog kamena/maltera u agregatu dobijenom recikliranjem starog betona je veća ako je vrednost vodocementnog faktora "starog betona" manja i ako je veličina zrna prirodnog agregata u "starom betonu" manja (Hansen i dr., 1983) kao i sa smanjenjem čvrstoće "starog betona" (Hasaba i dr., 1981).

Osnovna razlika u svojstvima recikliranog agregata i prirodnog agregata je u:

a) povećanoj poroznosti sloja cementnog kamena/maltera koji je sastavni deo agregata dobijenog recikliranjem betona, u odnosu na prirodni agregat,

b) većoj specifičnoj površini zrna agregata dobijenog recikliranjem betona,

c) smanjenoj zapreminskoj masi,

d) povećanju upijanja vode,

e) manjoj otpornost na mraz,

f) manjoj otpornost na habanje (Report IPRF-01-G-002-03-5).

Zbog povećanog upijanja vode agregata dobijenog od recikliranog betona smanjena je ugradljivost betona u odnosu na betone sa istim vodocementnim faktorom spravljenim sa prirodnim agregatom (Topcu, 1997). Iz pomenutih razloga preporučuje se prethodno zasićenje zrna recikliranog agregata sa vodom do nivoa od 80% od ukupne količine vode koju može da upije. Na taj način se postiže bolja čvrstoća "novog betona", ali i veća koncentracija zrna cementa iz "nove cementne paste" u prelaznoj zoni (Larranga, 2004). Navedena svojstva agregata na bazi recikliranog betona ukazuju da način spravljanja "novog betona" može odrediti karakteristike tranzitne zone između agregata na bazi recikliranog betona i cementne paste.

U ovom radu će se ukazati na značaj tranzitne zone na fizičko-mehanička svojstva normalnog betona i betona spravljenim sa lakim agregatom kao dva granična slučaja u pogledu svojstava betona spravljenog od agregata nastalog recikliranjem betona, kao i na ulogu elektronske mikroskopije u karakterizaciji njene mikrostrukture.

Adresa autora:

Vanr.prof. dr Miroslava Radeka

Fakultet tehničkih nauka-Department za građevinarstvo

Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad

mirka@uns.ns.ac.yu

2 UTICAJ TRANZITNE ZONE NA SVOJSTVA BETONA

Priroda tranzitne zone ("aureole of transition") je određena osbinama agregata, cementne paste i načina na koji oni međusobno reaguju u toku mešanja, ugrađivanja i negovanja betona. Cementnu pastu odlikuje visok stepen heterogenosti svojstava s obzirom da nastaje u procesu hidratacije čestica cementa dispergovanih u vodi. Tranzitna zona unosi dodatno još jedan nivo heterogenosti u svojstvima betona.

U sastav tranzitne zone ulaze voda i finije čestice cementne paste. Fizički kontakt/stepen razdvojenosti paste od zrna agregata zavisi u najvećoj meri od količine vode koja je koncentrisana u tranzitnoj zoni, kao i od načina ugradnje, negovanja i dr. Obe komponente deluju sinergijski i kreiraju prostor u tranzitnoj zoni gde dolazi do kristalizacije produkata hidratacije iz rastvora. Tranzitnu zonu je najlakše prikazati na primeru kontakta armature i cementne paste u betonu, slika 1. Dupleks film, slika 1, debljine oko $1\mu\text{m}$, se sastoji od kalcijum hidroksida i kalcijum-siliko-hidrata i pokriva veći deo površine armature. Na dupleks filmu se sa druge strane nalazi semi-kontinualan sloj debljine oko $3\mu\text{m}$ koji se sastoji uglavnom od kristala kalcijum hidroksida. Iznad zone kristala kalcijum hidroksida se nalazi porozan sloj u kom se razvijaju kristali etringita. Debljina ovog sloja je između 20 i $40\mu\text{m}$ i on postepeno prelazi u cementnu pastu. Zrna agregata za razliku od armature mogu biti i porozna i rapava, što u velikoj meri može izmeniti karakter tranzitnezone prikazan na slici 1.

Agregat na bazi recikliranog betona može da se posmatra kao zrno sa dve tranzitne zone: zona između zrna prirodnog agregata i cementnog kamena/maltera (stara tranzitna zona) i nova između recikliranog agregata i novog cementnog kamena. Na svojstva "stare" tranzitne zone nije moguće uticati, ali na svojstva nove je moguće.

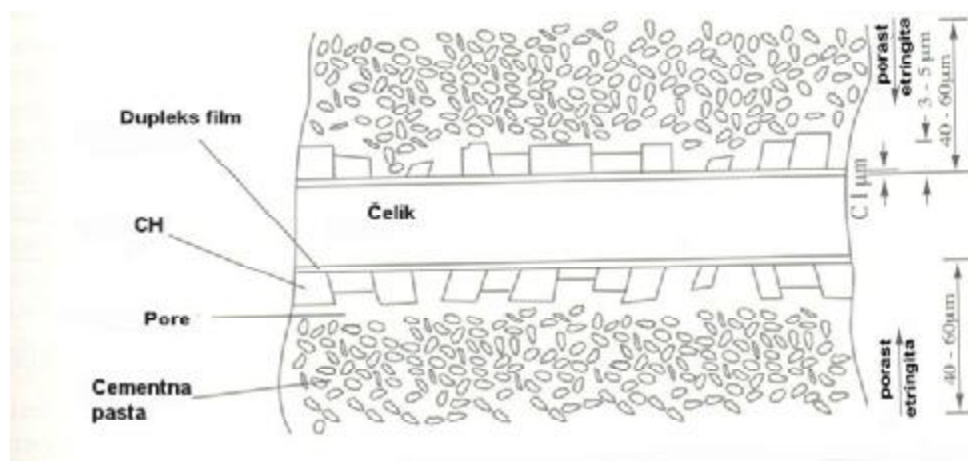
Ako je prosečno rastojanje između zrna agregata u betonu od 75 do $100\mu\text{m}$, a širina tranzitne zone od 10 - $50\mu\text{m}$, proizilazi da je zapremina tranzitne zone 20 - 40% zapremine cementnog kamena. Kao i kod drugih kompozitnih materijala, jačina veze između agregata i cementnog kamena određuje mehaničke karakteristike

betona (Kuroda, 2000). Karakteriše je velika poroznost i najvećim delom je rezultat otežanog pakovanja čestica cement uz površinu zrna agregata-"efekat zida". Poznato je da pri pakovanju čestica u nekom sudu uvek postoji oblast u blizini ivice suda sa većom poroznošću od poroznosti u sredini suda. Širina ove oblasti odgovara prečniku najveće čestice. Eksperimentalno izmerena širina tranzitne zone od $50\mu\text{m}$ odgovara prečniku aglomerata čestica cementa (prečnik čestice cementa je od 15 - $20\mu\text{m}$). Postoji još jedan uzrok formiranja tranzitne zone. Produkti hidratacije unutar cementne paste daleko od tranzitne zone rastu u svim pravcima, a u tranzitnoj zoni samo u pravcu od cemente paste ka zrnu agregatu, tako da se prazan prostor popunjava nedovoljno efikasno. Ovaj parameter manje utiče na karakteristike tranzitne zone od pakovanja čestica uz površinu agregata-"efekat zida".

Proces popunjavanja pora u tranzitnoj zoni počinje sa procesom hidratacije cementa. Produkti hidratacije koji se najčešće nalaze u tranzitnoj zoni su kristali kalcijum hidroksida (CH). Ovo jedinjenje u obliku rastvora ulazi u sistem pora tranzitne zone. Kada rastvor postane zasićen dolazi do nukleacije i rasta kristala CH. Vrlo često se formiraju klasteri kristala CH. Smatra se da prisustvo kristala CH u tranzitnoj zoni ne doprinosi značajno mehaničkim svojstvima betona. Produkti hidratacije cementa, kalcijum siliko hidrati (CSH), se u procesu kristalizacije rastvora u pori vezuju za površinu zrna cementa. Otuda se u okolini zrna agregata na mikr mikroskopskim snimcima vide kristali CH, CSH i neki drugi, manje značajni produkti hidratacije.

Kada su u pitanju normalni betoni ne dele svi istraživači ovo mišljenje. Diamond i Huang (2001) ukazuju da poroznost tranzitne zone nije tako visoka (6 - 9% , a drugi autori smatraju da ide do 30%) i da se ne razlikuje u velikoj meri od ostatka cementnog kamena van tranzitne zone.

Agregat dobijen od recikliranog betona je nehomogen, manje gustine od normalnog agregata, a veće poroznosti. Kod ovog agregata bi kao i kod prirodnih agregata mogao biti izražen efekat zida, ali se ne može smatirati hemijski inernim kao što je to slučaj sa agregatom u normalnom betonu.

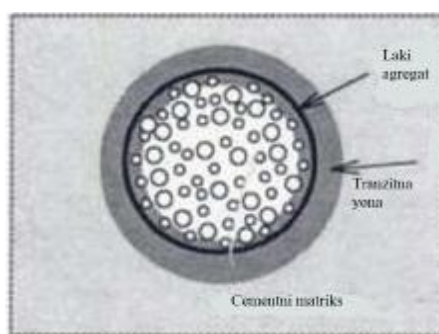


Slika 1. Šematski prikaz tranzitne zone armatura/cementna pasta (Massazza i Costa, 1986)

Poon i dr. (2003) smatraju da agregat dobijen recikliranjem starog betona u velikoj meri imaju svojstva agregata za lake beotne. Tranzitna zona kod agregata za lake betone je kompleksna. Razlikuju se na prvom mestu po strukturi. Počinje nešto ispod površine zrna agregata i širi se do cementnog matriksa, slika 2. Absorpcija vode iz cementne paste kada je agregat suv, oslobađanje vode kada je vlažan, penetracija cementnog materijala u pore i moguća hemijska reakcija sa agregatom, utiču da su svojstva tranzitne zone kompleksne. Kada agregat upija vodu iz cementne paste dolazi do formiranja tranzitne zone veće gustine. Zhang i Gjorv (1990) ukazuju da struktura tranzitne zone ima manju gustinu ukoliko je zrno agregata u površinskom sloju veće gustine. Tada u tranzitnoj zoni ima više kristala kalcijum hidroksida, slično tranzitnoj zoni normalnog betona, a voda koja se akumulira u blizini zrna neće biti absorbovana u strukturu pora agregata u onoj meri u kojoj bi bila da je zrno poroznije. Oni takođe ukazuju da kada se u tranzitnoj zoni nalazi cementni matriks veće gustine kontakt sa agregatom je bolji, te se dobijaju bolja mehanička svojstva.

Brzinu absorpcije vode u zrno agregata je ispitivao Wasserman i Bentur (1996). Zagrevanjem Lytag agregata na visoke temperature promenila su se svojstva površinskog sloja, jer se povećala gustina, odnosno smanjila poroznost. Pokazali su da se sa smanjenjem brzine absorpcije vode (usled manje poroznosti površine agregata) povećava širina tranzitne zone. Iz ove činjenice su zaključili da se absorpcijom vode iz cementne paste u sistem pora agregata sprečava akumulacija vode u tranzitnoj zoni, što se inače smatra glavnim uzrokom formiranja porozne strukture u tranzitnoj zoni.

Analiza navedenih karakteristika tranzitne zone normalnog betona i betona na bazi lakog agregata ukazuje da bi karakteristike agregata dobijenog recikliranjem betona trebalo da variraju između navedenih graničnih stanja. Kada je agregat dobijen recikliranjem betona visokih mehaničkih karakteristika može se očekivati da će imati karakteristike tranzitne zone koje su bliže normalnom betonu. Situacija je obrnuta za aggregate donijene recikliranjem betona manjih čvrstoća.



Slika 2. Tranzitna zona lakog agregata

Metodologija istraživanja mikrostrukture betona će biti prikazana na nekoliko primera iz literature. U svim primerima se koristi skening elektronska mikroskopija dopunjena sa EDS analizom (energetski disperzioni spektar): a) primer analize uzroka pojave "prstena" oko

zrna recikliranog agregata (Larranga 2004) b) primer analize uticaja kvaliteta veziva na mikrostrukturu tranzitne zone starog i novog betona (Gengying i dr, 2001) i c) primer uticaj mikrostrukture tranzitne zone na mehanička svojstva betona na bazi recikliranog agregata (Poon i dr.,2003).

3 KARAKTERIZACIJA MIKROSTRUKTURE TRANZITNE ZONE U BETONU

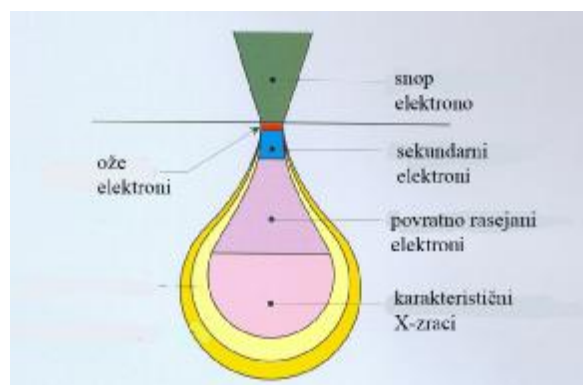
Mikroskopske metode imaju veliku prednost u odnosu na ostale u izučavanju tranzitne zone.

Međutim, zbog heterogenosti svojstava betona, rezultate ove analize je teško smatrati relevantnim za ponašanje materijala u celini ako se rade na malom broju uzoraka.

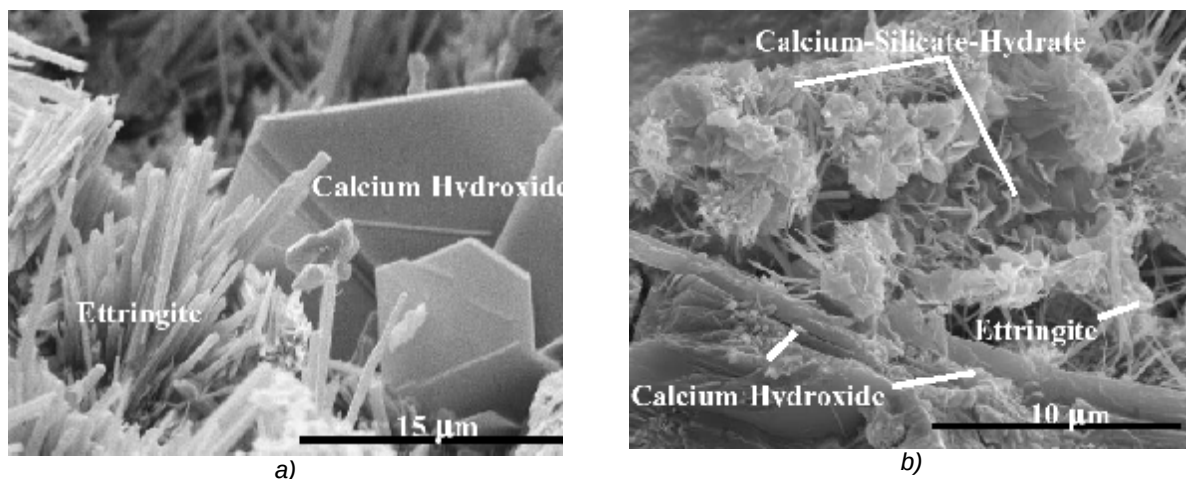
3.1 Skening elektronska mikroskopija

Slika na skening elektronskom mikroskopu se dobija u interakciji materijala sa snopom elektrona. U interakciji snopa elektrona sa uzorkom emituju se elektroni sa različitim dubinama, slika 3. Detekcijom različite vrste elektrona dobijaju se različite informacije. Kada se skupe i analiziraju sekundarni elektroni, dobija se slika topografije uzorka koja nam daje informacije o veličini čestica, obliku i rapavosti površine (Brandon i Kaplan, 2001). Rad u režimu sekundarnih elektrona (SEM/SE) se koristi najčešće za praćenje formiranja kristalnih formi produkata hidratacije za betone male starosti. Kristalne forme se razvijaju u praznom prostoru (šupljine i pore), slika 4, (Stutzman, 2000). Njih najviše ima u početku procesa očvršćavanja. Kasnije se ove kristalne forme mogu pratiti samo u vazдушnim porama ili u tranzitnoj zoni između zrna agregata i cementne paste gde je takođe poroznost prisutna u većoj meri. Uzorci za ispitivanje mikrostrukture u režimu SEM/SE su sveži prelomi materijala. Obično se teži ka prikazivanju detalja pa često dve slike istog betona izgledaju kao da su dobijene za različite vrste betona.

Povratno rasejani elektroni su elektroni iz elektronog snopa koji su rasejani iz veće dubine uzorka od sekundarnih elektrona, slika 3. Ugao pod kojim dolazi do



Slika 3. Nastanak signala kod skening elektronskog mikroskopa (SEM). Sekundarni elektroni (SE) se emituju iz materijala u blizini površine, povratno rasejani elektroni (BSE) iz nešto dubljih delova, a karakteristični X-zraci (EDS) iz dubljih delova zapremine materijala



Slika 4. Snimak dobijen u SEM/SE režimu: a) pravilne kristalne forme-heksagonalni kristali kalcijum hidroksida i kristali etringita u obliku iglica, b) CSH (kalcijum-siliko-hidrati) jedinjenja tip I i tip II, CH (kalcijum hidroksid) jedinjenje koje nije imalo prostora da se razvije u pravilne heksagonalne oblike.

njihovog rasejavanja je velik (Brandon i Kaplan, 2001). Intenzitet signala koji formiraju zavisi isključivo od prosečnog atomskog broja, Z , površine na koju je upravljen elektronski snop. Pošto nastaju na većoj dubini uzorka od sekundarnih elektrona, njihova rezolucija je lošija od rezolucije sekundarnih elektrona. Rad u režimu povratno rasejanih elektrona (SEM/BSE) često prati i analiza na bazi X -zraka (EDS) u cilju definisanja raspodele elemenata na posmatranoj površini.

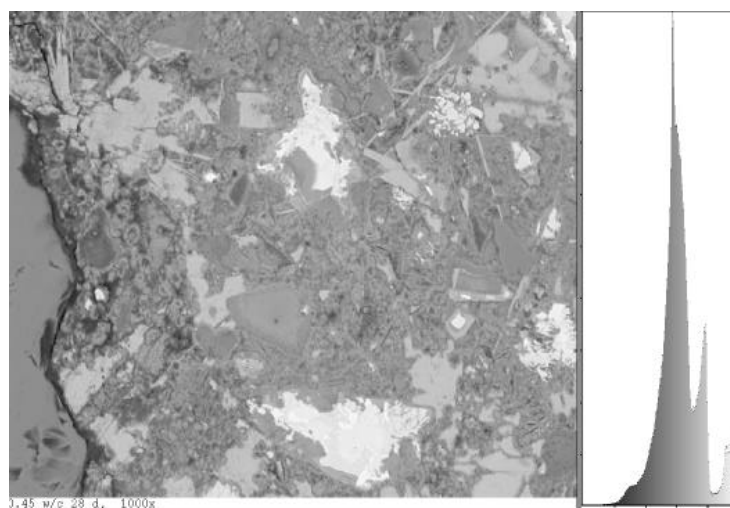
Rad u režimu SEM/BSE ima mnoge prednosti jer se za ispitivanje mogu pripremiti reprezentativni uzorci, a uvećanja idu od 20x do 10 000x. Rad u ovom režimu ima smisla ako se radi osim kvalitativne i kvantitativna karakterizacija materijala. Rezultat ispitivanja heterogenih sistema, kao što je beton, treba da bude prosečna vrednost merenja koja bi karakterisala strukturu materijala u celini a ne izdvojeni deo površine. Ovako dobijene prosečne vrednosti omogućavaju da se poredi karakteristike tranzitnih zona različitih betona.

Za rad u režimu sa povratno rasejanim elektronima (SEM/BSE) i EDS analiza potrebni su polirani uzorci jer se dobija bolji kvalitet slike. Procedura pripreme uzoraka

za ovu vrstu ispitivanja zahteva isecanje uzoraka dijamantskom testerom bez korišćenja vode, sušenje i impregnacija epoksi smolom niskog viskoziteta, poliranje. Uz upotrebu ravnih poliranih uzoraka i sa par detektora snopa elektrona sa svake strane dobija se slika sa koje se uspešno eliminiše uticaj topografije uzorka. Kontrast koji se uvek može ponoviti čini ovu tehniku rada sa rasejanim elektronima izuzetno korisnom (Diamond i Huang, 2001).

Da li se neka faza vidi kao svetlo ili tamno mesto zavisi od prosečnog atomskog broja faze, Z . Kod cementnog klinkera najsvetlija je feritna faza (C_4AF), potom alit (C_3S), dok su aluminatna (C_3A) i belitna (C_2S) slične nijanse sive boje. Uvođenje molekula vode u procesu hidratacije u strukturu minerala cementnog klinkera jako se smanjuje vrednost prosečnog atomskog broja. Kod produkata hidratacije najsvetliji je kalcijumhidroksid (CH), a potom dolaze ostali produkti hidratacije koje nije moguće razlikovati prema boji (CSH, etringit, AFm).

Na slici 5 je prikazana slika tranzitne zone, pri radu u SEM/BSE režimu, sa histogramom raspodela tonova



Slika 5. Snimak SEM/BSE tranzitne zone

sive boje (dobije korišćenjem programa za analizu slike). Tranzitna zona određene širine je analizirana prema razlikama u tonovima sive boje. Identifikovana su četiri faze: zrna nehidratiranog cementa, CH, CSH i pore. Histogram, prikazan na desnoj strani slike, pokazuje raspodelu broja piksela na osnovu tona sive boje.

3.2 Prikaz radova u kojim se analizira tranzitna zona korišćenjem SEM-a

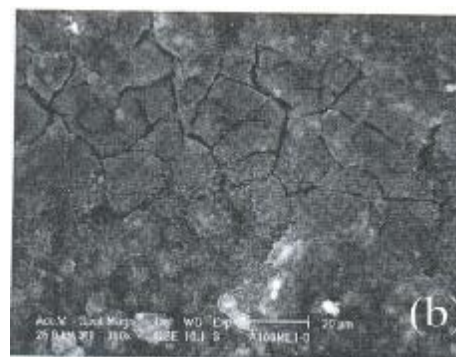
Larranga (2004), je u dokorskom radu analizirao mirostrukutu betona na bazi agregata od recikliranog betona, korišćenjem različitih mikroskopskih tehnika. Upotrebom SEM/SE režima zajedno sa EDS analizom utvrdio je pojavu alkalno silikatne reakcije, slike 6 -9.

Ispitivanja mehaničkih karakteristika betona spravljenog sa agregatom od recikliranog betona su pokazala da se najveće čvrstoće dobijaju ako se agregat od recikliranog betona prethodno zasiti sa vodom do vrednosti 80% od ukupne vode koju može da upije. Pri spravljanju betonske mešavine ovaj agregat je dodatno upijao vodu iz cementne paste (do vrednosti 100%), te se u tranzitnoj zoni formiralo područje sa povećanom koncentracijom cementa iz nove cementne paste. Uzorci za mikroskopsku analizu su bili pripremljeni i stavljeni u najlon vreću (uslovi povećane vlažnosti). U uslovima visokih spoljašnjih temperatura (35-40°C) pojavili su se beličasti prsteni u tranzitnoj zoni, slika 6a.

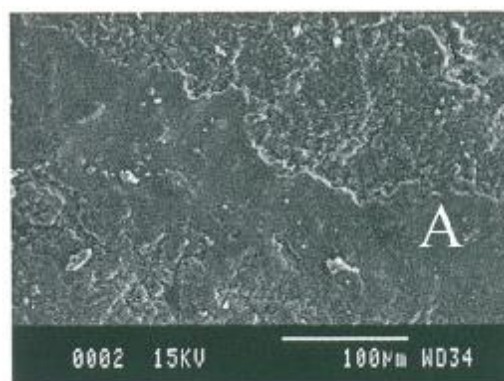
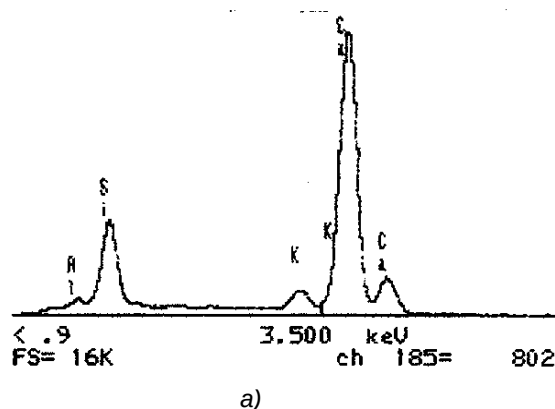
Analiza putem optičkog mikroskopa je ukazala da beličasti prsten ocrta sloj sa nagomilanim zrnima cementa u tranzitnoj zoni. Povećana koncentracija zrna

cementa može biti poželjna pod pretpostavkom da će vremenom najveći deo izreagovati. Međutim, njihovo prisustvo označava opasnost od povećane koncentracije alkalijske i mogućnost reakcije sa potencijalno reaktivnim zrnima agregata. Agregat nastao recikliranjem betona je i potencijalno reaktivan. Beličasti prsteni su se uvek javljali tamo gde je registrirano povećanje koncentracije zrna cementa. U ovom slučaju beličasti prsten je bio rezultat alkalno-silikatne reakcije, slika 6b.

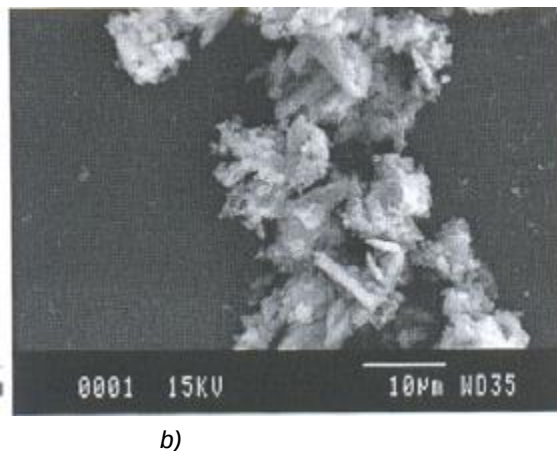
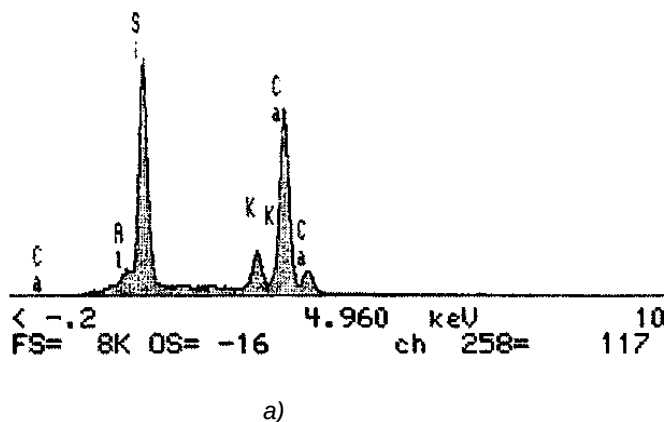
Analiza na SEM/SE u kombinaciji sa EDS je pokazala da su zrna primarnog agregata po sastavu kvarc i feldspat. Mineraloški sastav u okolini agregata od recikliranog betona je ukazivao na pojavu CSH jedinjenja što je očekivano za CEM I. Na snimku su se uočavale i male pukotine koje su kretale od primarnog zrna agregata silikatnog sastava, prolazile kroz cementni kamen recikliranog agregata i završavale se u prstenu gde se nalazio cement iz nove cementne paste. Pukotine su bile prazne, tj nisu bile popunjene produktima reakcije što ukazuje da su rezultat procesa u novoj betonskoj mešavini. U ovom slučaju "prsten" je na snimku identifikovan kao gušći deo (slika 6b, detalj A). EDS analiza ove oblasti je ukazala na povećanje udela silicijuma. Precizno uzimanje uzorka sa tog mesta (beličasti prsten) i njegova EDS analiza je ukazala na postojanje alkalno-silikatnog gela, slika 8. Hidratacija cementa nagomilanog u prstenu je uticala na povećanje pH vrednosti. Utvrđeno je da su zrna prirodnog agregata u agregatu od recikliranog betona reaktivan silicijum. Sa povećanjem pH vrednosti raste rastvorljivost silicijuma i dolazi do reakcije.



Slika 6.(a) Beličasti prsteni oko zrna agregata od recikliranog betona pod optičkim mikroskopom, (b) SEM/SE alkalno-silikatne reakcija

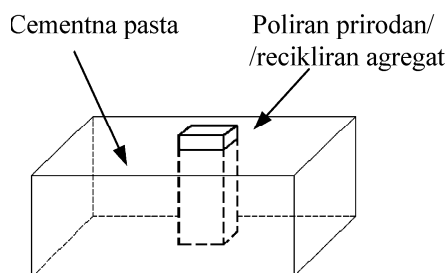


Slika 7. a) rezultati EDS analize tranzitne zone b) SEM/SE snimak tranzitne zone



Slika 8. a) rezultati EDS analize alkalno-silikatnog gela uzorkovanog sa mesta gde je beličasti prsten
b) SEM/SE snimak alkalno-silikatnog gela

Poon i dr. (2003) su prikazali zanimljiv model na kom su proučavali uticaj promena u sastavu i tehnologiji betona na formiranje mikrostrukture tranzitne zone betona spravljenog sa agregatom od recikliranog betona. Napravljene su tri vrste betona: sa prirodnim agregatom (granit), sa agregatom dobijenim recikliranjem starog betona normalne čvrstoće i visoke čvrstoće. Mikrostruktura je proučavana na uzorcima betona uz upotrebu SEM/SE i EDS analize. Ispitivanja su urađena na uzorcima betona napravljenog od prirodnog agregata i betona dobijenog na bazi agregata dobijenog recikliranjem betona normalne (NB) i visoke čvrstoće (VB) kao i na model sistemima, slika 9. Model sistemi su pravljani sa agregatom prirodnog porekla (granit) i agregatom dobijenim recikliranjem starog betona. Agregati su isečeni dijamantskom testerom na dimenzije 20x50x5(10) mm. Površina agregata je ispolirana i ugrađeni u kalup na način prikazan na slici 9. Nakon 28 dana negovanja betona agregat je izvađen, a pristup tranzitnoj zoni za proučavanje na mikroskopu je oslobođen.



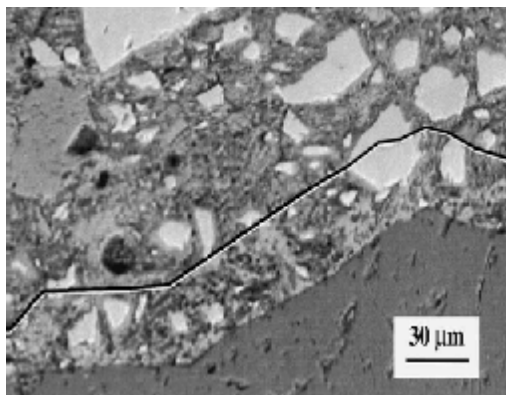
Slika 9. Model za ispitivanje mikrostrukture tranzitne zone

Rezultati ispitivanja su pokazali da se agregat dobijen recikliranjem betona normalne čvrstoće ponašaju kao agregat za lake betone (porozna struktura) dok je agregat dobijen recikliranjem starog betona visoke čvrstoće pokazao nešto veću čvrstoću na pritisak od čvrstoće betona napravljenog sa prirodnim agregatom (NB). Razlike u čvrstoći između betona NB i VB su prema autorima rezultat razlike u čvrstoćama zrna agregata ali i tipu mikrostrukture koji je formiran. Beton VB je formirao

prelaznu zonu veće gustine sa hidratiranim formama drugijeg oblika.

Gengying i dr. (2001) su proučavali mikrostrukturu i čvrstoću na smicanje tranzitne zone između starog i novog betona. Rezultati u ovom radu mogu biti interesantni i za razumevanje formiranja mikrostrukture tranzitne zone između agregata dobijenog recikliranjem betona i nove cementne paste. Ispitivanja su rađena korišćenjem SEM/SE i EDS analize. Kvalitet uspostavljene veze je procenjivan na osnovu morfologije, mineralogije i mikrostrukture formirane u prelaznoj zoni. Za spravljanje nove cementne paste korišćena su veziva: čist portland cement (C), ekspanzivni cement (E), cement sa dodatkom polimera-epoksidna smola (YJ-302) i cement sa dodatkom pucolana (F). Na osnovu određivanja čvrstoće pri smicanju na kontaktu star/novi beton utvrđeno je da je najbolja veza ostvarena upotrebom cementa sa dodatkom pucolana (F), potom ekspanzivnog cementa (E), a najlošija veza je dobijena sa upotrebom cementa sa dodatkom polimera (YJ-302). U objašnjenju rezultata autori ukazuju na hidrofilna svojstva betona, zbog čega postoji značajan tok vode iz nove cementne paste ka površini starog betona. Tok vode dovodi do lokalnog povećanja vodocementnog faktora. Zahvaljujući hemijskoj reakciji amorfnog silicijuma iz pucolana sa kalcijum hidroksidom dolazi do formiranja CSH jedinjenja te popunjavanja pora. Čestice pucolana efikasnije popunjavaju pore u tranzitnoj zoni, te se kao rezultat dobija tranzitna zona veće gustine. Kada se koristi ekspanzivni cement dominantno se formira etringit, a kod portland cementa kalcijum hidroksid i etringit. Kod cementa modifikovanog sa polimerom u prelaznoj oblasti se uočava samo film na bazi polimera.

Diamond i Huang (2001) su određivali udeo faze pora, kalcijum hidroksida i nehidratiranih zrna cementa u tranzitnoj zoni prirodnog agregata primenom SEM/BSE analize kao i analizom slike (Image analyzer). Udeo CSH jedinjenja nije mogao biti određen direktno već kao razlika koja se dobija oduzimanjem udela faze pora, kalcijum hidroksida i nehidratiranih zrna cementa od 100%. Autor je pretpostavio da se tranzitna zona nalazi na rastojanju od 30 µm od površine zrna agregata, slika 10.



Slika 10. SEM/BS snimak tranzitne zone oko zrna peska u dobro homogenizovanoj svežoj betonskoj mešavini, tri dana staro m betonu sa w/c 0.50. Granica je povučena na rastojanju od 30 mm od površine zrna

Autor na osnovu svojih istraživanja tvrdi da: a) postoji povećana poroznost uzrokovana "efektom zida", b) poroznost se kreće oko vrednosti 6-9%, a ne oko 30% kako tvrde drugi autori, c) ne postoji trend smanjenja poroznosti u pravcu od tranzitne zone ka cementnom kamenu.

4 ZAKLJUČAK

- Tranzitna zona kod betona spravljenog na bazi agregata dobijenog recikliranjem starog betona bi se mogla posmatrati kao zona koja ima svojstva između svojstava tranzitne zone u normalnom betonu (prirodni

agregat je neporozan) i svojstava tranzitne zone u betonu na bazi lakog agregata (porozan).

- Kada se radi analiza na skenirajućem elektronskom mikroskopu u režimu SEM/SE i u kombinaciji sa EDS analizom, dobijaju se kvalitativne informacije o faznom sastavu tranzitne zone.

- Kada se radi analiza na skenirajućem elektronskom mikroskopu u režimu SEM/BSE i u kombinaciji sa EDS analizom dobijaju se kvantitativni podaci o prosečnom gradijentu u pogledu faznog sastava (neizregovanom cementu, poroznosti, kalcijum hidroksidu i drugim produktima hidratacije).

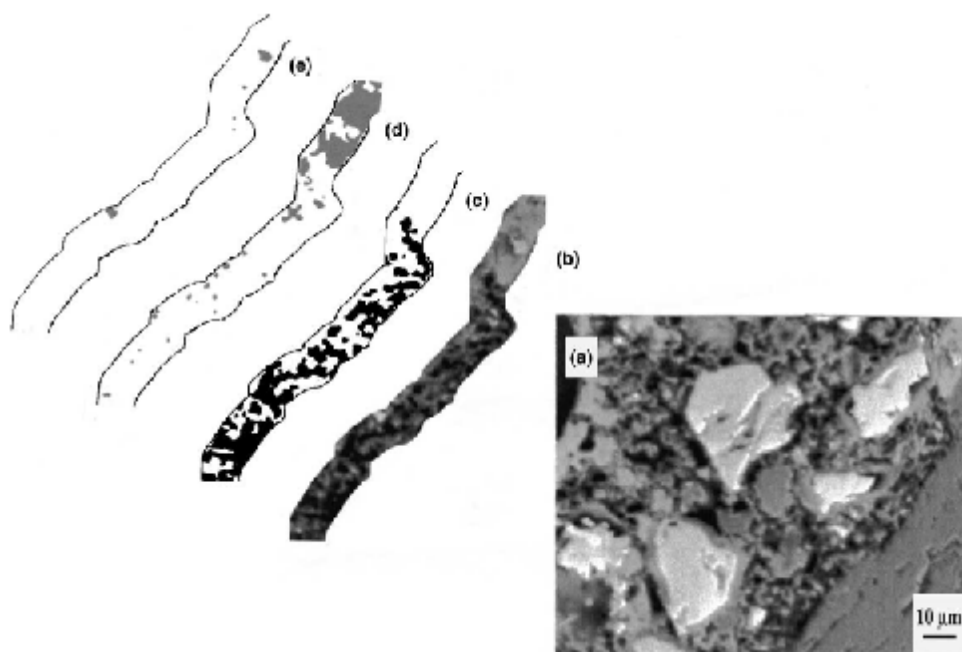
Rad u režimu SEM/BSE je dugotrajan proces jer zahteva:

- posebnu pripremu uzoraka (rad sa ispoliranim uzorcima,)

- rad sa većim brojem uzoraka uz obradu rezultata korišćenjem programa za analizu slike.

ZAHVALNOST

U radu je prikazan deo istraživanja koje je pomoglo Ministarstvo za nauku Republike Srbije u okviru tehnološkog projekta TR-16004 pod nazivom: "Istraživanje savremenih betonskih kompozita na bazi domaćih sirovina, sa posebnim osvrtom na mogućnosti primene betona sa recikliranim agregatom u betonskim konstrukcijama".



Slika 11. SEM/BSE snimak tranzitne zone: a) tri dana starog betona (w/c 0.50, loše homogenizovana sveža betonska masa, zrna agregata na bazi dolomita, b) snimak tranzitne zone širine 0-10 mm; tranzitna zona prikazana u segmentima prikazuje c) distribuciju pora, d) kalcijum hidroksid, e) nehidratirani cement

Primedba: na mestima gde je kalcijum hidroksid nema pora.

5 LITERATURA

- [1] Brandon D., Kaplan D.W. 2001: *Microstructural Characterisation of Metals*, second edition, 177-189, John Wiley&Sons Ltd., Chichester, England.
- [2] Diamond, S., Huang, J. 2001: *The ITZ in concrete-a different view based on image analysis and SEM observations*, Cement and Concrete Composites, 23, 179-188.
- [3] Gengying L., Huicai X., Guangjing X. 2001: *Transition zone studies of new-to old concrete with different binders*, Cement&Concrete Composites 23, 381/387.
- [4] Hansen T.C., Narud H. 1983: *Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate*, Concrete International-design and construction, 5 [1] 70-83, citirano prema Larranga E.M., *Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete*, doctoral thesis, Barcelona
- [5] Hasaba S., Kawamura M., Torik K., Takemoto K. 1981: *Drying shrinkage and durability of the concrete made of recycled concrete aggregate*, Trans. of the Japan Concrete Institute, 3 55-60, citirano prema Larranga E.M., doctoral thesis.
- [6] Massazza, F., Costa U. 1986: *Bond, paste-aggregate, paste-reinforcement and paste-fibres*, 8th International Congress chemistry of cements, Rio de Janeiro, 1, 159-180, preuzeto iz St John A. D., Poole W.A., Sims I., *Concrete petrography*, Arnold, 1998, England.
- [7] Larranga, E. M. 2004: *Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete*, doctoral thesis, Barcelona
- [8] Kuroda M., Watanabe T., Terashi N. 2000: *Increase of bond strength at interfacial transition zone by the use of fly ash*, Cement and Concrete Research 30, 253-258.
- [9] Poon, S.C., Shui, H. Z., Lam, L. 2003: *Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates*, Construction and Building Materials 18, 461-468.
- [10] Report IPRF-01-G-002-03-5, www.iprf.org/products/Final%20Report%20Project%2003-5%20July,%202006.pdf
- [11] Stutzman, E.P. 2000: *Scanning Electron Microscopy in Concrete Petrography*, Workshop on the role of Calcium Hydroxide in Concrete, Proceedings J. Skalny, J. Gebauer and I. Odler, eds., The American ceramic Society, November 1-3.
- [12] Topcu, I.B. 2006: *Physical and mechanical properties of concrete produced with waste concrete*. Cement and Concrete Research, 27(12) (1997) 1817-1823, preuzeto od Rakshvir M., Barai S. *Studies on recycled aggregates-based concrete*, Waste Manage Res. 24, 225-233.
- [13] Zhang M.H., Gjorv O.E. (1990): *Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste*, Cement and Concrete Research, 20, 610-618.
- [14] Wasserman R., Bentur A. 1996: *Interfacial interactions in lightweight aggregate concrete and their influence on the concrete strength*, Cement and Concrete Composites 18, 67-76.

REZIME

KARAKTERIZACIJA MIKROSTRUKTURE TRANZITNE ZONE BETONA NA BAZI AGREGATA OD RECIKLIRANOG BETONA POMOĆU SEM-a

Miroslava RADEKA

Ovaj pregledni rad odnosi se na metode koje su razvijene (elektronska mikroskopija-SEM) u cilju karakterizacije faznog sastava i strukture tranzitne zone u normalnom betonu i betonu spravljenom od agregata dobijenog recikliranjem starog betona. Razlike u karakteristikama prirodnog agregata (inertna komponenta) i agregata dobijenog recikliranjem starog betona (aktivna komponenta) mogle bi da utiču na izbor metodologije ispitivanja karakteristika tranzitne zone. Stoga ovaj članak ima za cilj da ukaže na svojstva tranzitne zone i metode njene karakterizacije sa ciljem da se utiče na promene svojstava betona napravljenog na bazi agregata dobijenog recikliranjem betona.

Cljučne reči: agregat dobijen recikliranjem betona, tranzitna zona, SEM

SUMMARY

THE CHARACTERISATION OF THE MICROSTRUCTURE OF THE RECYCLED AGGREGATE CONCRETE INTERFACIAL ZONE EMPLOYING SEM

Miroslava RADEKA

This state-of-the-art article deals with the methods that have been developed (scanning electron microscopy-SEM) to characterize the phase composition and structure of the interfacial transition zone (ITZ) in normal concrete and recycled aggregate concrete. The differences between the activity of natural (inert fillers) and recycled aggregate (active fillers) could influence the choice of methodology of studying the ITZ. That is why the article aims at highlighting the properties of the ITZ and methods used to characterize the ITZ in order to modify the properties of recycled aggregate concrete.

Key words: recycled aggregate, interfacial transition zone, scanning electron microscopy

JET GROUTING

Elefterija ZLATANOVIĆ

PREGLEDNI RAD
UDK: 624.131.53 = 861

1 UVOD

“Jet grouting” predstavlja svestranu i efikasnu tehniku stabilizacije tla koja se primenjuje u najrazličitijim uslovima građenja. Suština tehnologije je u upotrebi mlaza cementnog maltera koji pod pritiskom razbija tlo *in situ* i meša se sa njim, formirajući konglomerat sačinjen od zemlje i cementa (tzv. *soilcrete*), koji se odlikuje visokom čvrstoćom i niskom vodopropustljivošću. Ovaj koncept je prvi put ustanovljen u Japanu sedamdesetih godina prošlog veka, ali je u praksi prvi put primenjen u Italiji krajem 70-tih.



Slika 1. Raspršivanje veziva mlaznicama

Jet grouting je zapravo alternativa tradicionalnim sistemima injektiranja, kao što je iskop dubokih jarkova razmuljivanjem (*deep slurry trenching*), sistem podziđivanja (*proprietary underpinning system*), pobijanje šipova (*micropilling*), kao i upotreba komprimovanog vazduha ili smrzavanja u tunelogradnji. To je ne samo najsigurnija metoda koja danas nalazi sve širu primenu u svetu, već je u mnogim slučajevima i veoma brz postupak, što za rezultat ima i značajne uštede.

Adresa autora:

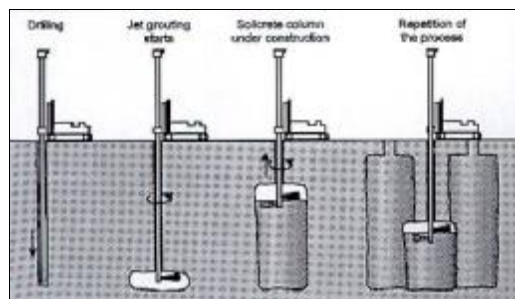
Elefterija Zlatanović, dipl.inž.građ. Građevinsko-arhitektonski fakultet Niš, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija, e-mail: elefterija@gaf.ni.ac.yu

2 FAZE JET GROUTING POSTUPKA

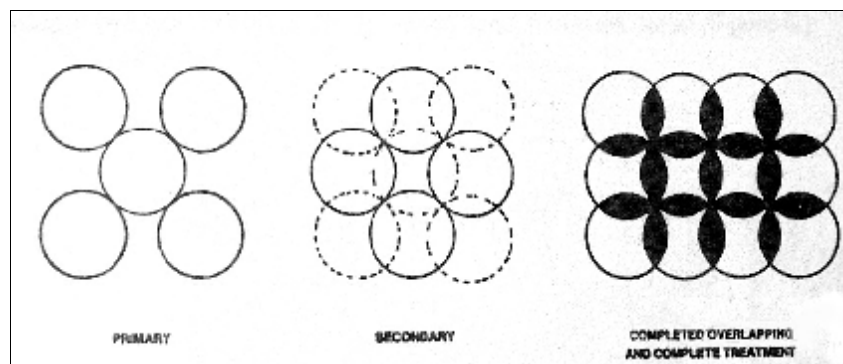
Postupak mlaznog cementiranja tla sastoji se u sledećem: najpre se u tlu formira bušotina prečnika u proseku 150 mm, do projektovane dubine. Nakon bušenja, rotirajuća bušača šipka opremljena mlaznicama, vrši raspršivanje vezivnog materijala pod pritiskom, koji vrši razbijanje strukture zemlje. Uz istovremeno rotiranje i postepeno izdizanje bušaće šipke iz tla, dolazi do formiranja stuba koji predstavlja mešavinu zemljanog i vezivnog materijala. Integriranjem tako nastalih stubova u nizu, nastaje tzv. “*soilcrete*” (eng. *soil*-tlo) masa, koja se odlikuje visokom čvrstoćom na pritisak i niskom vodopropustljivošću.

Iako postoji mogućnost korišćenja bilo kog tipa veziva kao injekcione mase, u praksi najčešću primenu imaju vodocementne mešavine, dok se u cilju postizanja nepropustljivosti tla najčešće koristi mešavina vode, cementa i bentonita (koloidne gline). Čvrstoća i vodopropustljivost stubova kontroliše se na osnovu vodocementnog faktora, kao i na bazi dodatka injekcionoj masi u vidu primesa. Prečnik stubova zavisi od brzine rotacije i izdizanja bušačkog alata. Oprema za mlazno cementiranje tla je specijalno dizajnirana tako da ima maksimalnu primenu kako u niskim i tesnim prostorima, tako i na ograničenim otvorenim površinama.

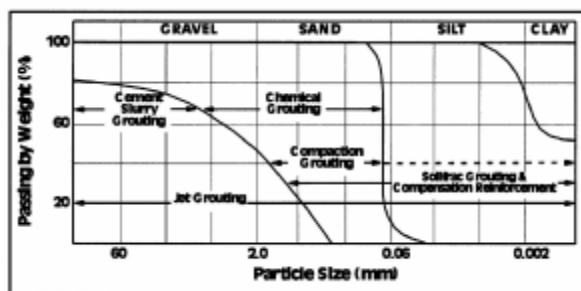
Ova tehnika najčešće se primenjuje na dubinama većim od 50 m, i to u gotovo svim vrstama zemljišta, uključujući prašnasta tla, neke vrste gline, kao i razne vrste peskova i šljunkova.



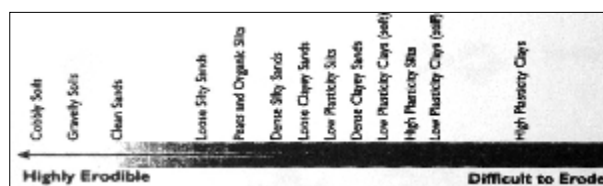
Slika 2. Faze “jet grouting” postupka



Slika 3. Typical Block Treatment Pattern



Slika 4. Primena "jet grouting" tehnike u najrazličitijim vrstama tla



Slika 5. Soil Erodibility Scale

3 JET GROUTING SISTEMI

Razlikuju se četiri tipa *jet grouting* tehnike, u zavisnosti od broja injekcionih mlaznica i medijuma koji se koristi u cilju razbijanja strukture tla, i to su:

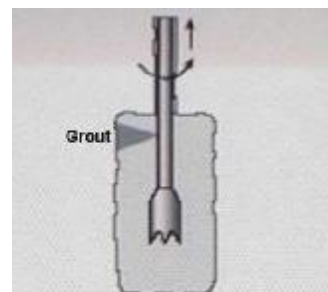
1. monofluidni sistem (*single jet grouting system*),
2. trifluidni sistem (*triple system*),
3. dvofluidni sistem (*double system*),
4. super jet grouting system.

3.1 Monofluidni JET GROUTING sistem

U okviru ovog sistema primenjeni vezivni materijal služi kako za razbijanje strukture tla, tako i za formiranje mešavine sa tlom. Vezivo se pod visokim pritiskom upumpava u bušaću šipku do odgovarajućeg seta mlaznica lociranih neposredno iznad burgije. Usled velike brzine rotiranja bušaće šipke (10÷30 o/min) i visokog pritiska injektiranja (20÷60 MPa) formira se stub od stabilizovanog materijala prečnika u opsegu od 40 do 120 cm. Ovaj sistem daje konglomerate veziva i tla koji se odlikuju najvećom čvrstoćom. Takođe se odlikuje i najmanjom količinom suvišnog materijala, ali s druge strane, kod određenih vrsta tla može da izazove pojavu bubrenja.

Opremu neophodnu za ovakav sistem mlaznog injektiranja čine:

- pumpa sa visokim pritiskom i velikog kapaciteta (70 MPa, 300 l/min);
- bušilica sa specijalnom bušaćom šipkom i adekvatnim tajmerom koji kontroliše nivoe izvlačenja šipke (20÷50 cm/min);



Slika 6. Monofluidni sistem



Slika 7. High Pressure Pump

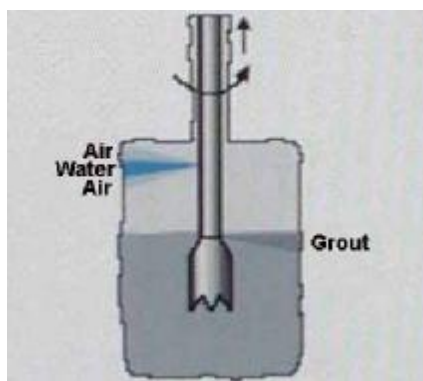


Slika 8. Jet Grout Drill

Najčešće se primenjuje u terenima od nevezanog materijala.

3.2 Trifluidni JET GROUTING sistem

Razlika ovog sistema u odnosu na prethodni je u tome što se za razbijanje strukture tla umesto veziva koristi voda pod pritiskom, čije dejstvo je potpomognuto molekulima komprimovanog vazduha, skoncentrisanih oko vodenog mlaza. Komprimovani vazduh doprinosi proširenju radijusa dejstva vodenog mlaza, kao i ispumpavanju suvišne vode i finih čestica tla na površinu, kroz prstenasti prostor između zida bušotine i bušaća šipke. Nakon što se izvrši bušenje do projektovane dubine, vezivo se raspršuje kroz posebnu mlaznicu lociranu neposredno iznad mlaznica za vodu i vazduh, uz istovremeno sporo izdizanje šipke iz tla. Nastali stub od mešavine zemljišta i veziva je prečnika koji doseže veličinu i do 2 m.



Slika 9. Sistem sa tri fluida

Neophodna oprema za ovaj sistem je:

- pumpa za vodeni mlaz, visokog pritiska i velikog kapaciteta (70 MPa, 300 l/min);
- pumpa za vezivo niskog pritiska (7 MPa, 120 l/min);
- oprema za bušenje koju sačinjavaju: bušaća šipka,

adapter za šipku, nosač mlaznica za vezivni materijal, držač mlaznica za vodu/vazduh, kao i trosmerni okretač;

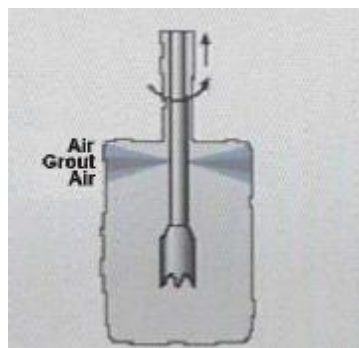
- bušaća oprema za mlazno injektiranje, sa odgovarajućim tajmerom za kontrolu nivoa izdizanja bušaće opreme;

- dozator za injekcionu masu – vezivo;
- rezervoar za vodu.

Ovaj sistem ima najveću efikasnost u koherentnim materijalima koji su otporni na bušenje. Fundamentalna razlika trifluidnog i monofluidnog sistema je u veličini prečnika stuba stabilizovanog materijala, a samim tim i u količini zemljišta obuhvaćenog ovim tretmanom.

3.3 Dvofluidni JET GROUTING sistem

Jet grouting sistem sa dva fluida je novijeg datuma, i predstavlja zapravo kombinaciju sistema sa jednim i sa tri fluida. Princip rada je isti kao i u slučaju monofluidnog sistema, s tom razlikom što se radijus dejstva vezivnog materijala povećava uz sadejstvo komprimovanog vazduha skoncentrisanog oko mlaza cementnog rastvora, čime se postiže dvostruko brže razaranje strukture tla. Prečnici stabilizovanih stubova kreću se u opsegu od 1.0m u zbijenim i srednje zbijenim terenima, do 1.8m u rastresitim terenima.



Slika 10. Sistem sa dva fluida

Oprema neophodna za primenu sistema sa dva fluida je adekvatna onoj kod monofluidnog sistema, uz dodatak dvovodne opreme za bušenje, kao i kompresora za vazduh.

Češće se primenjuje u vezanim materijalima.

Prednosti ovog sistema su:

- ušteda u energiji, uprkos turbulenciji nastaloj usled razbijanja tla;

- efikasnije uklanjanje nastalog šuta, zahvaljujući „mehur efektu“ komprimovanog vazduha;

Nedostaci:

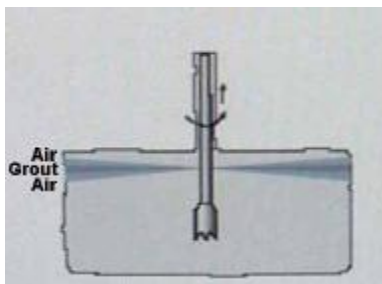
- viši nivo molekula vazduha rezultuje manjom težinom i nižom čvrstoćom tretiranog tla, naspram monofluidnog sistema;

- spoljni i unutrašnji set šipki su na rastojanju od svega 5mm, što može da izazove začepljenje tokom operacije, te stoga primena ovakve opreme nije moguća u podzemnim, visinski ograničenim prostorijama;

- prisutna količina vazduha je dovoljna da veoma lako izdigne naležuće slojeve tla, i time izazove reakciju bubrenja.

3.4 Super JET GROUTING sistem

Ovaj sistem predstavlja modifikaciju sistema sa dva fluida. Naime, cementni rastvor kao vezivni materijal i komprimovani vazduh pumpaju se kroz posebne komore bušaće opreme. Nakon što bude dostignuta projektom predviđena dubina, komprimovani vazduh i cementni rastvor erodiraju tlo, mešaju se s njim, i kao rezultat spore rotacije i izdizanja bušaće šipke nastaje stub stabilizovanog materijala prečnika 3-5m. Ovaj sistem je našao najširu primenu upravo u stabilizaciji zemljanih masa.



Slika 11. Super Jet System

4 IZBOR PARAMETARA JET GROUTING SISTEMA

- Veoma je važno da izvođač najpre utvrdi konačnu čvrstoću tla koja se želi postići *jet grouting* tehnologijom, i da na osnovu korelacije čvrstoće i količine cementnog rastvora utvrdi koja je to količina cementa po 1m³ zemljišta potrebna za izabrani sistem *jet grouting* postupka. Ova karakteristika cementno-zemljanih stubova zavisi od brojnih faktora: granulometrijskog sastava tla, vodocementnog faktora, količine veziva za 1m dužine stuba, i dr. U narednoj tabeli su date prosečne vrednosti čvrstoće na pritisak stubova prema podacima iz inostrane literature [5].

- Treba definisati i prečnik stuba koji se formira *jet grouting* metodom. Na grafiku (slika12) predstavljeno je vreme tretiranja segmenta tla visine 4cm. Pa tako, na primer, za formiranje stuba prečnika 1.7m i za debljinu segmenta tretiranog tla 4cm, sa grafika se očitava potrebno vreme obrade u trajanju od 9s, a što bi za visinu stuba od 1m (25 segmenata po 4cm) iznosilo oko 4min [5].

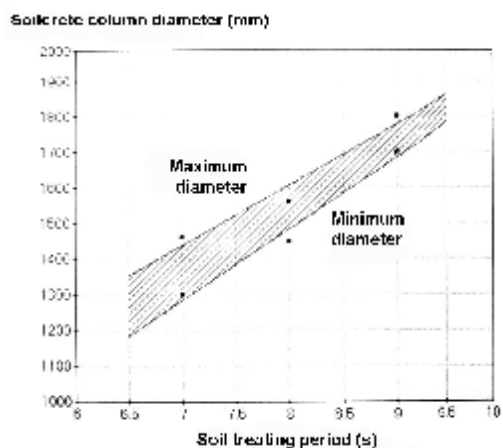
- Za postizanje željenog efekta veoma je važno pravilno odrediti odnos vode i cementa u cementnom rastvoru, koji se odražava i na njegovu viskoznost u pro-

Tabela 1. Opseg parametara karakterističnih za tri različita jet grouting sistema

PARAMETRI	1-FLUID		2-FLUID		3-FLUID	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Pritisak raspršivanja veziva (MPa)	20	60	30	60	3	7
Protok veziva (l/min)	40	120	70	150	70	150
Pritisak vazduha (MPa)	-	-	0.6	1.2	0.6	1.2
Protok vazduha (l/min)	-	-	2000	6000	2000	6000
Pritisak raspršivanja vode (MPa)	-	-	-	-	20	50
Protok vode (l/min)	-	-	-	-	70	150
Prečnik mlaznice za vezivo (mm)	1.5	3	1.5	3	4	8
Prečnik mlaznice za vodu (mm)	-	-	-	-	1.5	3
Prečnik mlaznice za vazduh (mm)	-	-	1	2	1	2
Brzina rotacije buš. šipke (o/min)	10	30	5	10	5	10
Brzina izdizanja šipke (cm/min)	10	50	7	30	5	30
Prečnik stuba stabiliz. mater. (m)	0.4	1.2	1.0	1.8	0.9	2.0

Tabela 2. Čvrstoće na pritisak stubova za različite vrste tla prema inostranim autorima

VRSTA TLA	ČVRSTOĆA (MPa)		
	Autori literature		
	Cristian Kutzner	Angelo Garassi	Cesare Melegari
Treset	< 3.0	< 2.0	0.3
Glina	< 12.0	1-4	1.8-3.0
Mulj	< 12.0		3.0-4.5
Glinovita ilovača	3-10	2-9	-
Peskovita ilovača	5-14		-
Pesak	< 15.0	5-15	6-9
Šljunak	< 20.0		10-30



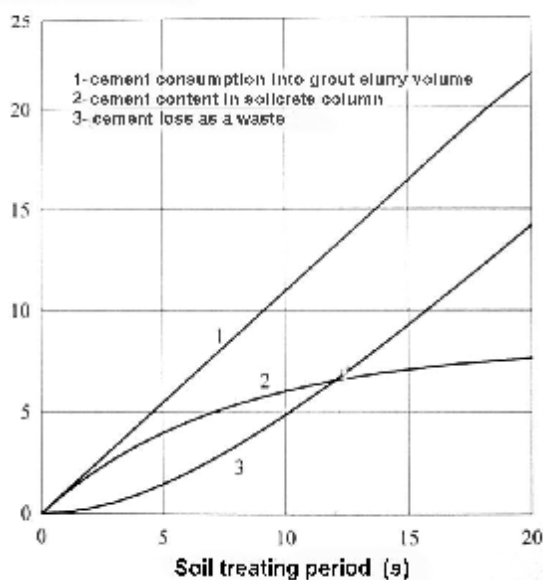
Slika 12. Grafik zavisnosti dijametristuba od vremena obrade tla

cesu ispušavanja. Što je veći vodocementni faktor, to je i pokretljivost cementnog rastvora veća, ali je finalna čvrstoća na pritisak manja.

Sastav mešavine zavisiće i od: vrste tla, veličine zrna tla, vodopropustljivosti i prirodne vlažnosti tla. Npr.: u vodopropustljivim, zrnastim materijalima terenska voda i voda iz veziva bivaju drenirane postupkom ojačanja tla, te stoga je u ovom slučaju neophodan cementni rastvor sa većim vodocementnim faktorom. I obrnuto, u koherentnim i vodonepropustljivim materijalima pojavice se veoma malo dreniranje, pa je u tom slučaju dovoljan i nešto niži odnos vode i cementa u cementnom rastvoru. U proseku, vodocementni faktor se kreće u opsegu od 1,0 do 1,5, ali se tačna vrednost utvrđuje terenskim istraživanjima.

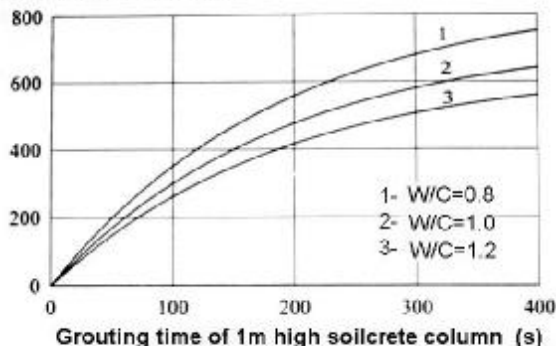
Takođe, značajnu ulogu ima i sadržaj cementa u stubu stabilizovanog tla, kao i najekonomičnije vreme tretiranja tla, što je ilustrovano sledećim dijagramima [6]:

Cement mass (kg)



Slika 13. Sadržaj cementa u volumenu stuba u zavisnosti od vremena obrade tla

Cement content by 1m³ of soilcrete column (kg)



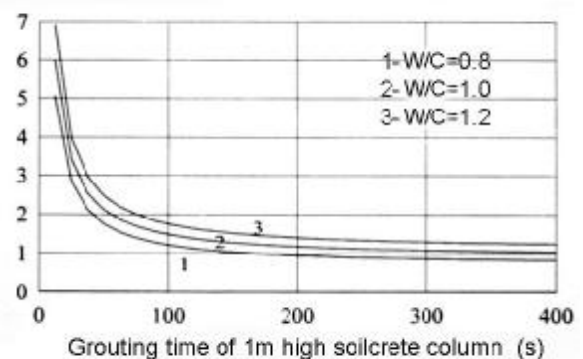
Slika 14. Sadržaj cementa u 1m³ stuba u funkciji vremena cementiranja 1m stuba

Na slici 13 prikazan je porast količine cementa u okviru volumena stuba (prečnik stuba 0.6m, visina tretiranog segmenta tla 4cm) u zavisnosti od vremena ciklusa tretiranja tla. Sa slike se može uočiti da produžetak vremena ciklusa tretiranja tla na više od 12 sekundi rezultuje gubitkom cementa većim u odnosu na količinu cementa ugrađenog u stub stabilizovanog materijala.

Na slikama 14, 15 i 16 sve karakteristike stuba stabilizovanog tla ustanovljene su u skladu sa vremenom cementiranja stuba visine 1m. Od posebnog interesa je drugi grafik, koji ilustruje naglo razblažavanje cementnog rastvora vodom koja se nalazi u porama tla, do veličine vodocementnog faktora 4-5. Stoga, da bi se obezbedio optimalan odnos vode i cementa u stubu, a u cilju postizanja visoke čvrstoće na pritisak, neophodno je produžiti vreme mlaznog cementiranja tla za više od 200 sekundi.

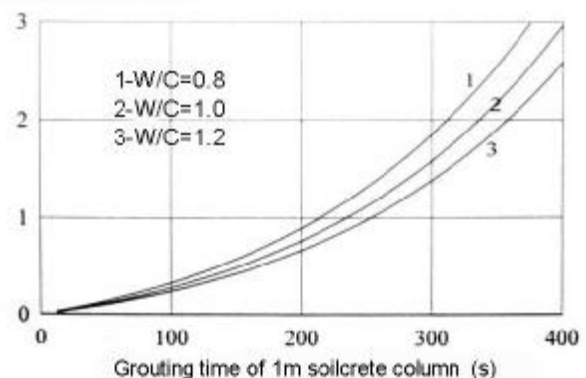
• Izvođač prethodno mora da utvrdi i pritisak pod kojim će biti izvršeno injektiranje (40-50 MPa), u zavisnosti od kapaciteta pumpe i od vrste tla. Što je veći pritisak ispušavanja veziva, to je veća i energija raspršivanja, odnosno brže je razaranje strukture tla. Pogrešno je mišljenje da visina pritiska rezultuje širim prečnikom stuba u tretiranom tlu. Prečnik stuba je pre svega u funkciji vremena delovanja raspršivanog veziva u fiksiranom nivou bušaće opreme.

Water-cement ratio



Slika 15. Vodocementni faktor veziva u funkciji vremena cementiranja 1m stuba

Cement-soil ratio



Slika 16. Odnos količine cementa i zemlje u funkciji vremena cementiranja 1m stuba

- Veoma je važno da se odabere i pravi sistem *jet grouting* tehnike, kako bi se tačno utvrdio potreban broj i veličina mlaznica, veličina nivoa izdizanja rotirajuće bušaće šipke (najčešće 3-8cm) kojom se određuje potrebna količina veziva u okviru svakog nivoa, kao i tačno utvrđivanje brzine rotacije šipke (1-2 obr./nivo).

- Formirana „soilcrete“ masa prihvata pritiske vode i zemlje, te stoga mora biti sprovedena kontrola na prevrtanje i klizanje, da bi se održala celovitost građevine i okolnih objekata.

5 KONTROLA KVALITETA

U cilju uspešne primene *jet grouting* postupka ojačanja tla neophodno je sprovesti adekvatni kontrolni i verifikacioni program testiranja, u kome učestvuju investitor, inženjer (projektant) i izvođač. Program testiranja obuhvata: prethodna testiranja, testiranja u toku rada i naknadna testiranja.

• Prethodna testiranja (Pre-Production Work)

U okviru ove faze formiraju se dva probna stuba na dubini od oko 5m ispod površine zemlje, koji se podvrgavaju vizuelnoj inspekciji.

• Testiranja u toku rada (Production Work)

Ova testiranja baziraju se na prikupljanju realnih podataka i snimanju (kompjuterskom praćenju) celokupne operacije injektiranja i na bazi kojih se formira serija dijagrama, koji pokazuju zavisnost odgovarajućih parametara mlaznog injektiranja od vremena i dubine. Time je omogućeno stvaranje potrebne dokumentacije

za svaki stub ponaosob, i kontrola da li je svaki od stubova izgrađen u skladu sa projektom.

• Naknadna testiranja (Post-Production Work)

Ova faza testiranja podrazumeva laboratorijsko ispitivanje postignute čvrstoće i zapreminske težine uzoraka uzetih in situ iz očvrslih stubova. Uzorci se izlažu testu kompresije sa dozvoljenim bočnim širenjem i testu permeabilnosti. Zbog heterogene prirode tla gotovo je nemoguće tačno utvrditi korelaciju čvrstoće i vrste tla. Na sledećem dijagramu predstavljene su procenjene očekivane vrednosti.

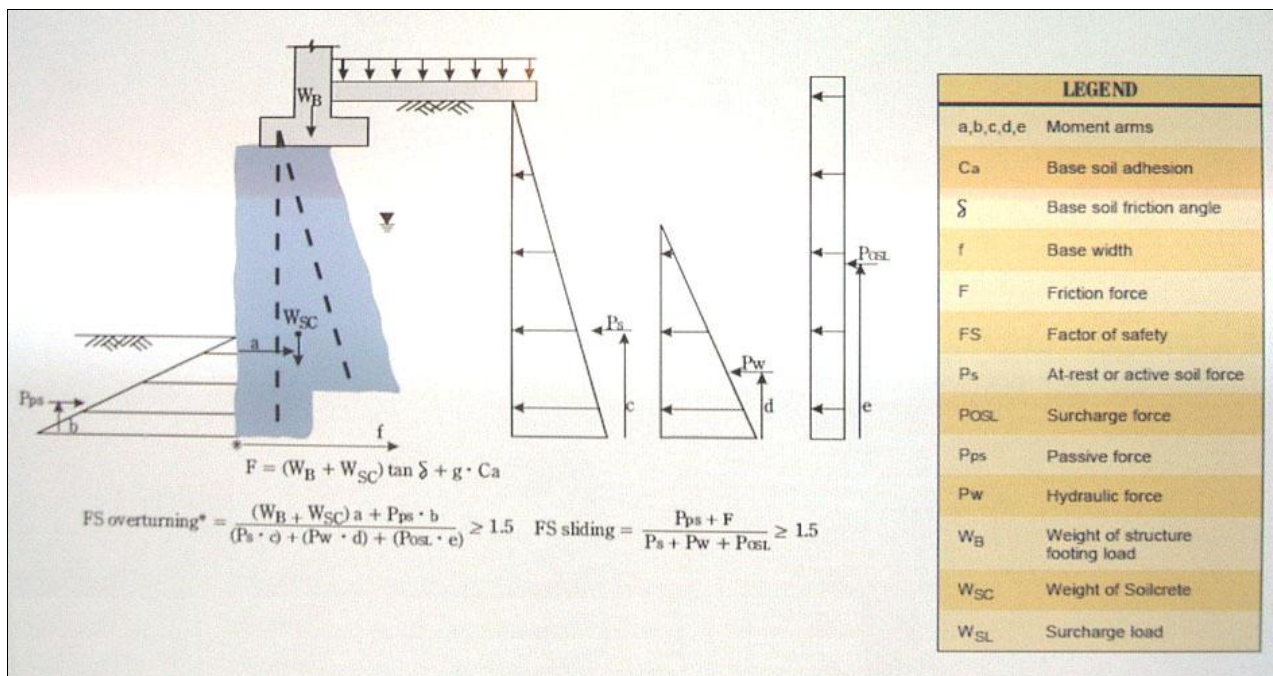
- U delovima za koje rezultati testa ukazu na neku devijantnost u odnosu na zahteve projekta, pristupa se sanacionim merama (remediation works), baziranim na hemijskom i cementnom injektiranju.

6 PRIMENA JET GROUTING SISTEMA

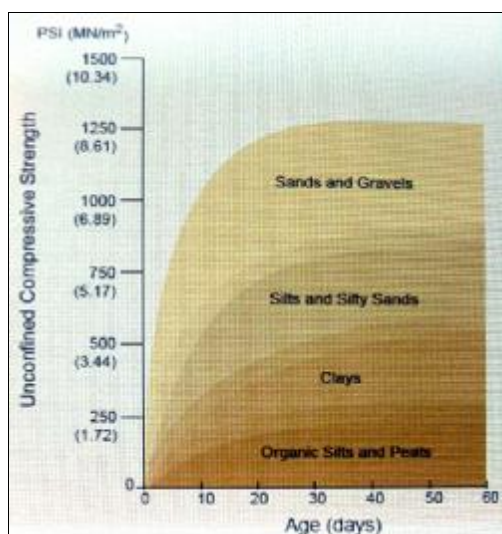
Jet grouting sistem ima veoma široku primenu u geotehničkom inženjerstvu.

- Koristi se kao mera geotehničke melioracije (ground improvement) u cilju povećanja krutosti i nosivosti tla, formiranjem stubova stabilizovanog tla u vidu rešetke (slika 18).

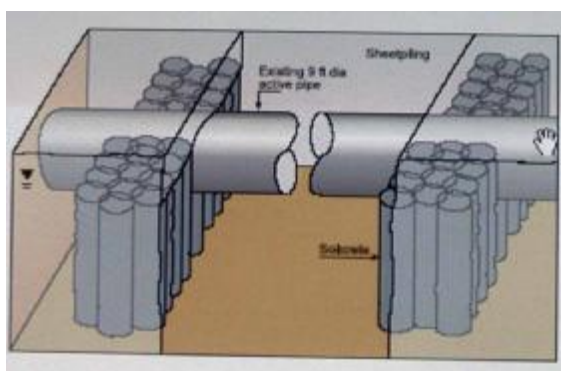
- Veoma često se primenjuje radi kontrole nivoa podzemne vode (groundwater control) oko brana ili u kontaminiranim područjima, što se postiže stubovima stabilizovanog materijala u vidu horizontalne zaštitne zavese (barijere) odgovarajuće debljine. Vodopropustljivost tla ovim postupkom može biti smanjena do reda veličine 10^{-9} m/s (slika 19). Ovakav postupak sniženja podzemne vode se može primeniti i pri izgradnji šahti za utiskivanje [11].



Slika 17. Kontrola „soilcrete“ stubova na klizanje i prevrtanje



Slika 18. Procenjene očekivane vrednosti čvrstoće stubova za odgovarajuće vrste tla

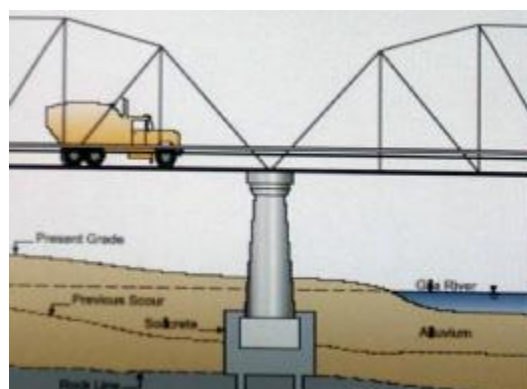


Slika 19. Ground improvement

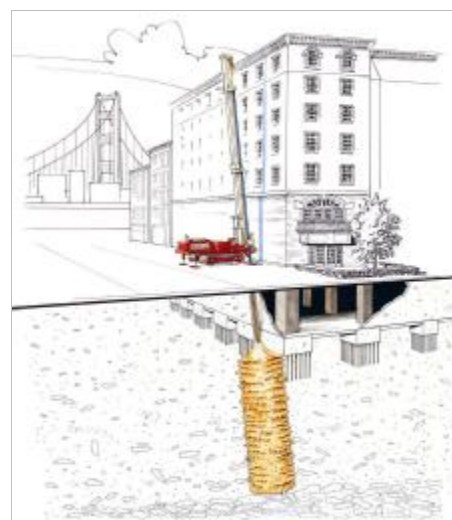


Slika 20. Groundwater control

- *Jet grouting* tehnika pruža mogućnost podziđivanja (underpinning) postojećih plitkih fundamenata, kada se bušenje vrši kroz postojeće temeljne stope, a stubovi stabilizovanog materijala formiraju se neposredno ispod temelja.



Slika 21. Zaštita postojećeg temelja od erozije

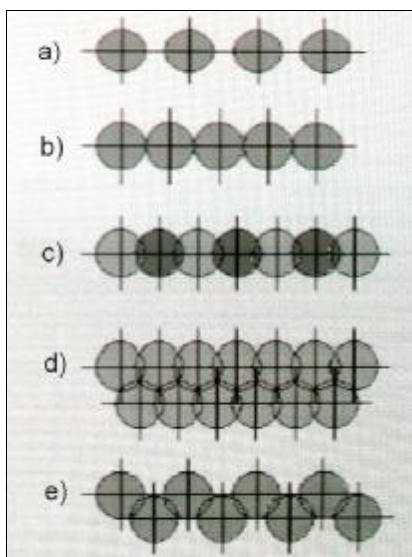


Slika 22. Podupiranje temelja postojećeg aktivnog objekta



Slika 23. Strana temeljne jame stabilizovana "soilcrete" stubovima

- Podupiranje iskopa (excavation support) – *Jet grouting* se primenjuje i u cilju izgradnje ploča i raspinjača za duboke iskope.



Slika 24. Varijante podupiranja iskopa temeljnih jama

Konstrukcija podupiranja iskopa zavisi od dubine temeljne jame, stabilnosti tla, nivoa podzemne vode, kao i od značaja objekta. Tako, npr., kod plitkih temeljnih jama koje se rade u vezanom tlu, podupiranje vertikalnih strana iskopa se može izvesti pojedinačnim stubovima stabilizovanog materijala (slika 24, a). U slučaju izrade jama u nevezanom tlu, ograđivanje se može izvesti stubovima koji se međusobno dodiruju (slika 24, b). Ukoliko čvrstoća tako formiranih stubova nije dovoljna, i ukoliko se temeljne jame izvode u natopljenim terenima, podupiranje strana iskopa postiže se stubovima koji se ukrštaju (slika 24, c). Kada su u pitanju građevine od velikog značaja, podupiranje iskopa se može izvesti formiranjem stubova u dva reda (slika 24, d) ili pak šahovskim rasporedom (slika 24, e) [7].

- Tunelogradnja (tunnelling) – *jet grouting* metodom u okolini vertikalnih šahtova mogu se oformiti zone koje obezbeđuju radni prostor mehanizacije za izbijanje tunela. Takođe, ovom tehnikom vrši se stabilizacija

terena oko tunelskog iskopa, a naročito u temenu tunelskog svoda, što je od posebnog značaja kod primene metoda iskopa tunela u punom profilu [8]. Ojačanje tla može se izvršiti: vertikalnim stubovima različite dubine (prednost ovog načina je mogućnost raspoređivanja potrebne mehanizacije na prostoru na površini terena neposredno iznad tunela) – slika 25a, zatim horizontalnim formama koje obrazuju zaštitni svod pod čijim okriljem se može nesmetano vršiti iskop tunelskog profila (slika 25,b), ili pak stubovima pod uglom (slika 25,c) [9].

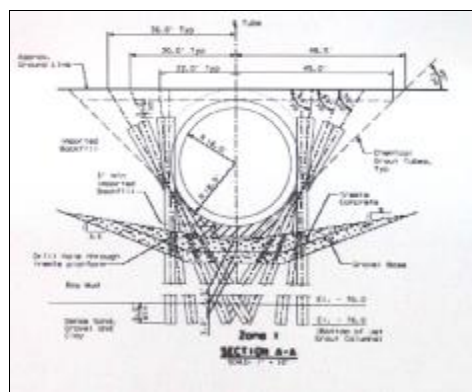
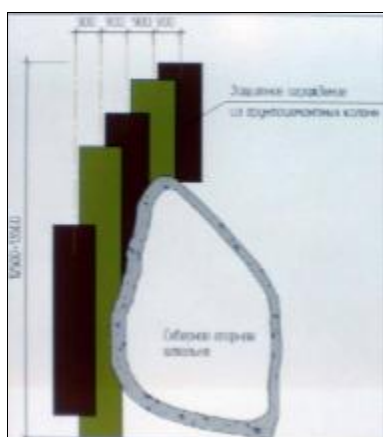
7 ZAKLJUČAK

Jet grouting metoda pokazala se veoma efikasnom merom stabilizacije tla, zbog čega u novije vreme nalazi sve veću primenu u svetu, zahvaljujući svojim brojnim prednostima:

- mogućnost primene u gotovo svim vrstama tla;
- postizanje projektom predviđene čvrstoće na pritisak i vodonepropustljivosti;
- nema štetnih vibracija;
- ne zahteva veliki radni prostor;
- formiranje stubova stabilizovanog zemljanog materijala najrazličitije geometrije;
- po okončanju postupka ne zahteva se nikakvo održavanje;
- najbezbednija metoda;
- mogućnost nesmetanog rada u blizini postojećih aktivnih objekata;
- daleko brži postupak u poređenju sa alternativnim;
- čuva prirodno okruženje.

ZAHVALNOST

"Ovaj rad finansiralo je Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, Beograd, Nemanjina 22-26 (Projekat 16021)"



Slika 25. Ojačanje tla u zoni tunelskog iskopa soilcrete stubovima : a) vertikalno; b) horizontalno; c) pod uglom

8 LITERATURA

- [1] Andromalos K., Bahner W.: The Application of Various Deep Mixing Methods for Excavation Support Systems
- [2] Gazaway H., Jasperse B.: Jet Grouting in Contaminated Soils
- [3] Coulter S., Martin D.: Ground Deformations Above a Large Shallow Tunnel Excavated Using Jet Grouting
- [4] Dash U., Lee T., Anderson R.: Jet grouting experience at Posey Webster Street Tubes Seismic Retrofit Project
- [5] Малинин А.: Применение струйной цементации грунтов в подземном строительстве, Подземное пространство мира 2000, НО2, Москва
- [6] Zlatanović E., Lukić D.: Jet Grouting - opšti principi, Naučno-stručna konferencija, Subotica: maj, 2006, str. 119- 127
- [7] Lukić D.: Savremene metode projektovanja i građenja podzemnih objekata, Građevinski kalendar, 2007, str. 234- 273
- [8] Абрамчук В., Педчик А.: Шипицын В., Максимов А., Яковлев Ю., Малинин А.: Укрепление зоны пластичных глин при строительстве автодорожного тоннеля в Уфе
- [9] Lukić D., Anagnosti P.: Deformacije i pomeranja u zoni plastifikacije oko tunelskog iskopa, Naučno-stručna konferencija, Subotica: Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica, maj, 2006, str. 62-68
- [10] Lukić D., Prokić A.: Numeričko rešenje reoloških problema u stenskoj masi, Naučno-stručna konferencija: Multidisciplinarno modeliranje i projektovanje građevinskih materijala i konstrukcija, Subotica: Univerzitet u Novom Sadu, Građevinski fakultet Subotica, 2007, str. 151- 156
- [11] Lukić, D., Prokić, A.: Prolaz kolektora kroz trup saobraćajnica - metoda utiskivanja cevi, Materijali i konstrukcije, 2005, No. 3, str. 33- 38

REZIME

JET GROUTING

Elefterija ZLATANOVIĆ

Pri građenju objekata često nije moguće izbeći lokacije sa slabo nosivim zemljištem. Zbog toga treba pribеći nekom od načina poboljšanja uslova građenja. Jedan od načina je zamena slabo nosivog materijala u slučaju manjih debljina. Kada su debljine slabo nosivih slojeva naglašenije, problem se daleko ekonomičnije rešava fundiranjem na većoj dubini. Treći način prevazilaženja ovog problema je postupak ojačavanja tla, među kojima tehnologija "jet grouting" (mlazno cementiranje tla) danas nalazi sve veću primenu u svetu. Ovom tehnologijom ostvaruju se povoljniji uslovi građenja i korišćenja objekata, pruža potrebna sigurnost i čuva prirodno okruženje. U radu je dat pregled dostupne literature i iskustava iz primene ovog načina pojačavanja tla.

Ključne reči: jet grouting, sistemi, parametri, primena

SUMMARY

JET GROUTING

Elefterija ZLATANOVIĆ

During the construction of utilities it is not possible allways to avoid soft soil locations. From that reason, it becomes necessary to appeal to some of the ways of construction conditions improvement. One of the techniques, which has gained wider acceptance around the world today, is "jet grouting", providing more convenient and better conditions for a construction, use and security. The environment is subject too. The paper give literature review and experience from application this method of strengthening of soil.

Key words: jet grouting, systems, parameters, application

POLIMER-BETONSKI KOMPOZITI NA BAZI RECIKLIRANOG AGREGATA

Vlastimir RADONJANIN
Mirjana MALEŠEV
Ivan LUKIĆ
Vesna MILOVANOVIĆ

PREGLEDNI RAD
UDK: 666.972.12 = 861

1 UVOD

Razvoj savremenog građevinarstva zasniva se u najvećoj meri na permanentnom traganju za novim visokovrednim materijalima i na usavršavanju i poboljšanju karakteristika postojećih materijala. Cilj aktuelnih istraživanja je razvoj materijala koji bi imali visoke mehaničke karakteristike, zadovoljavajuću otpornost na delovanje različitih agresivnih agenasa (trajnost), visoke estetske vrednosti i čija bi primena bila ekonomski opravdana. Pored toga, na istraživanja i razvoj građevinskih materijala, snažan uticaj ima opšteprihvaćeni koncept održivog razvoja, koji pored socioloških i ekonomskih aspekata, obuhvata uštedu energije, zaštitu životne okoline i očuvanje neobnovljivih prirodnih resursa.

Beton je već decenijama materijal koji se najviše koristi na svetu, posle vode. U toku poslednje decenije, prosečna godišnja proizvodnja u svetu je iznosila preko tri milijarde kubnih metara, odnosno oko sedam milijardi tona godišnje. Dvadeseti vek je zato sa pravom dobio ime "vek betona", a prema svim naučno-tehničkim prognozama i u dvadeset prvom veku se neće pojaviti nijedan novi materijal, koji bi mogao zauzeti njegovo mesto.

Adresa autora:

Vlastimir Radonjanin, vanredni profesor, dr, dipl.građ. inž., Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg. D. Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija;
e-mail: radonv@uns.ns.ac.yu
Mirjana Malešev, vanredni profesor, dr, dipl.građ.inž., Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg. D. Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija;
e-mail: miram@uns.ns.ac.yu
Ivan Lukić, dipl.građ.inž., Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg. D. Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija;
e-mail: lookic@uns.ns.ac.yu
Vesna Milovanović, dipl.građ.inž., Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg. D. Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija;
e-mail: vesnam@uns.ns.ac.yu

Zbog toga je beton i danas najviše analiziran i istraživani građevinski materijal.

Klasični betoni imaju niz nedostataka kao što su: usporeno očvršćavanje, mala čvrstoća na zatezanje, pojava prslina pri sušenju, nedovoljna duktilnost, relativno velika kapilarna poroznost, mala hemijska otpornost itd. Većina nabrojanih nedostataka je posledica formirane strukture klasičnog betona. Jedan od pokušaja eliminacije nedostataka klasičnog betona uz istovremeno poboljšanje pozitivnih svojstava, je istraživanje mogućnosti promene ili modifikacije unutrašnje strukture betona primenom polimera. Razvoj polimer-betonskih kompozita zahtevao je unapređenje tradicionalne tehnologije cementnih betona novom polimernom tehnologijom betona. Zbog toga je, nakon višegodišnjih istraživanja u mnogim laboratorijama širom sveta, čitava lepeza novih polimer-betonskih kompozita, počela da se primenjuje u svakodnevnoj praksi.

Sa druge strane, u urbanim sredinama se nakon rušenja objekata, javlja velika količina starog betona, čije uklanjanje i deponovanje predstavlja evidentan ekološki problem. Zbog toga, razmatranje mogućnosti za zamenу prirodnog agregata recikliranim materijalima, kao što su stari beton, keramički krš, zgura ili lomljeno staklo, postaju sve aktuelniji, naročito ako se u obzir uzme i činjenica da su rezerve prirodnog agregata u velikoj meri potrošene.

Kao rezultat ovakvog stanja u oblasti betona, započeta su istraživanja u kojima se kombinuju koncept poboljšanja svojstva betona primenom polimera i koncept upotrebe agregata od recikliranog betona. U nastavku rada su dati osnovni podaci o polimer-betonskim kompozitima i betonima na bazi agregata od recikliranog betona, kao i najnoviji rezultati istraživanja betona u kojima se istovremeno koriste i agregati od recikliranog betona i polimeri kao modifikatori strukture betona.

2 POLIMER-BETONSKI KOMPOZITI

Sve vrste polimer-betonskih materijala, mogu se generalno svrstati u tri grupe [24]:

- Betoni impregnirani polimerima,
- Polimer betoni i
- Betoni modifikovani polimerima.

Beton impregniran polimerom je očvršli cementni beton naknadno impregniran monomerom, koji u kasnijoj fazi polimerizuje. U svetu je za ovu vrstu polimer-betonskog kompozita usvojen skraćeni naziv "PIC", od "polymer impregnated concrete". U literaturi na ruskom jeziku koristi se naziv "betonopolimer - BP". Ova grupa polimer-betonskog kompozita nije detaljnije objašnjena u nastavku rada, zato što se u praksi primenjuje isključivo za poboljšanje svojstava postojećih AB konstrukcija ili prefabrikovanih elemenata. Naime, polimernom impregnacijom se može obezbediti relativna nepropustljivost betona u delu zaštitnog sloja u cilju povećanja trajnosti betona, a impregnacijom sa pogodnim polimerima, mogu se unaprediti i druge karakteristike kao što su: čvrstoća na zatezanje, pritiska čvrstoća, modul elastičnosti, otpornost na habanje, otpornost na vodu, kiseline i soli i otpornost na dejstvo zamrzavanja i odmrzavanja.

Polimer beton je kompozitni materijal u kome je agregat povezan u gustu matricu, pomoću polimernog veziva. Ovi kompozitni sistemi po pravilu ne sadrže hidratizani cement, iako se cement može koristiti, ali samo u svojstvu zamene dela agregata. Ova vrsta kompozita poznata je u svetu kao "polymer concrete" i uobičajen je skraćeni naziv "PC". U ruskoj literaturi koristi se skraćena oznaka "PB" od naziva "polimer-beton".

Betoni modifikovani polimerima dobijaju se dodavanjem monomera ili polimera u svežu betonsku masu. Za ovu grupu kompozita uobičajen je i naziv polimer portlandcementni beton, sa skraćenom oznakom na engleskom govornom području "PPCC" koja potiče od reči "polymer portland cement concrete". U ruskoj literaturi koristi se termin "polimercementni beton", sa skraćenom oznakom "PCB".

2.1 Osnovni pojmovi u polimernoj tehnologiji

Monomer je mala, prosta molekula koja se može hemijski vezivati sa drugim molekulama, obrazujući pri tome dugu lančanu strukturu sa visokom molekularnom težinom. Ta struktura poznata je kao polimer. Reč "monomer" potiče od grčkih reči "monos"-jedan i

"meros"-deo, a "polimer" od reči "poli"-mnogo i "meros"-deo. Prema P.C. Kreijger-u [preuzeto iz 11], polimeri su supstance formirane ponavljanjem jedne specifične grupe molekula. U sastav makromolekule polimera ulazi minimum 1000 atoma.

Hemijski proces povezivanja molekula naziva se **polimerizacija**. Ako se u procesu vezivanja koristi više od jedne vrste monomera, proces se naziva kopolimerizacija, a rezultatni materijal kopolimer.

Inhibitori su materijali koji se dodaju monomerima da bi sprečili prevremenu polimerizaciju tokom skladištenja ili transporta. Inicijatori (nazivaju se i katalizatori) su supstance koje kada se dodaju monomerima aktiviraju polimerizacioni proces.

Akceleratori su supstance koje se koriste za ubrzanje polimerizacionog procesa.

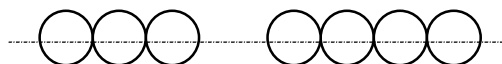
Polimerizacijom se dobijaju visokomolekularne materije od niskomolekularnih materija, bez izdvajanja sporednih proizvoda. Stvorena makromolekula ima isti elementarni sastav kao i početna materija. Pri polimerizaciji se, po pravilu, stvaraju molekule sa linearnom građom. Ako u reakciji polimerizacije učestvuju dva ili više monomera, u makromolekularnom lancu se javljaju strukturne jedinice svih početnih monomera. Na slici 1 dat je šematski prikaz lanca linearnog (a) i prostornog polimera (b), a na slici 2 linearnog (a) i prostornog (b) kopolimera.

Polimeri, kod kojih ne postoji nikakva geometrijska pravilnost u rasporedu lanaca, nazivaju se amorfnim polimerima. Nasuprot njima, kristalni polimeri imaju lance koji čine pravilan raspored.

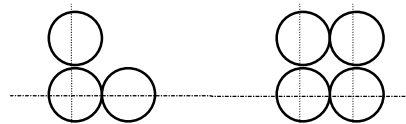
Pod pojmom kompozitnih materijala podrazumevaju se veštački stvoreni materijali, sastavljeni od najmanje dva ili više hemijski različitih materijala, pri čemu postoje jasno utvrđene granice razdvajanja između sastavnih komponenata, kako na mikrostrukturnom tako i na makrostrukturnom nivou. Tako dobijeni materijali odlikuju se sintezom najboljih svojstava svojih konstituenata, a često imaju i osobine koje konstituenti pojedinačno ne pokazuju.

2.2 Polimer beton

Polimer beton je kompozitni materijal u kome je agregat između sebe vezan u gustu matricu, pomoću polimernog veziva. Prema autorima Fontana i Bartholpmew, polimer betoni poseduju jedinstvenu kombinaciju osobina, koje uključuju [2]:



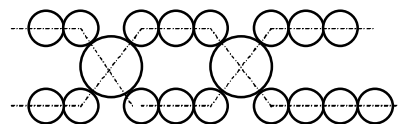
Slika 1a) Linearni polimer



b) Prostorni polimer



Slika 2a) Linearni kopolimer



b) Prostorni kopolimer

- kratak period nege na ambijentalnoj temperaturi od -18 do +40°C;
- visoku čvrstoću na zatezanje, savijanje i pritisak;
- odličnu prionljivost za mnoge površine;
- odličnu trajnost (pogotovo na ciklično zamrzavanje i odmrzavanje);
- nisku propustljivost za vodu i agresivne rastvore i
- dobru hemijsku otpornost.

Polimer betoni upotrebljavani su dosad u nekim specifičnim oblastima građevinarstva, kao:

- materijal za sanaciju ("krpljenje") oštećenih betonskih konstrukcija;
- zaštitni sloj otporan na habanje i kao noseći sloj betona;
- noseći i dekorativni konstruktivni paneli;
- kanalizacione cevi, svodovi, drenažni kanali i dr.;
- obloge za čelične cevi u geotermalnim aplikacijama i
- plivački bazeni i otvorene platforme.

Ovaj kratak pregled veoma široke primene, jasno ukazuje da se radi o jedinstvenom materijalu koji istovremeno može odgovoriti mnogim specifičnim zahtevima. Zbog toga se od polimer betona može koristiti čitava lepeza različitih proizvoda. Mogućnost primene i karakteristike polimer betona zavise pre svega od polimernog veziva, kao i od vrste agregata i granulometrijskog sastava. Kopolimerizacije tehnike omogućavaju proizvodnju različitih veziva sa širokim spektrom fizičkih osobina. Zbog toga bi korisnik polimer betona trebao da u svakoj prilici insistira na proveru inženjerskih performansi *in situ* da bi se potvrdili laboratorijski podaci.

Mnogi polimer-betonski reparaturni materijali su prvenstveno projektovani za sanaciju mostovskih i kolovoznih konstrukcija, gde saobraćajni uslovi dozvoljavaju zatvaranje radne površine samo nekoliko sati.

Za dobijanje polimer betona upotrebljavaju se monomeri, uključujući metil metakrilat, stiren, vinil estri i nezasićena polistirenska smola. Epoksidne smole su najčešće upotrebljavane veziva u polimer betonima. Radno vreme i vreme trajanja nege polimer betona zavisi od:

- količine inicijatora i akceleratora;
- uslova rada (temperatura i vlažnost);
- temperature komponentnih materijala;
- debljine sloja i
- zahtevanog vremena za mešanje, transport i ugrađivanje.

Epoksidna komponenta se obično sastoji iz dva dela:

- (A) epoksidna smola i
- (B) sistem za očvršćavanje.

Kao punioc mogu se upotrebljavati sve vrste agregata. Pri tome treba posebno obratiti pažnju na granulometrijski sastav agregata, zato što se povoljnom kompozicijom agregata mogu smanjiti šupljine, odnosno biće potrebna manja količina monomera za vezivanje. Maksimalna dimenzija agregata bira se najčešće kao jedna trećina od debljine reparaturnog sloja.

Ugrađivanje polimer betona (polimer maltera) može se izvršiti na jedan od sledećih načina:

Suvo ugrađivanje: Ova metoda podrazumeva postavljanje granulisanog agregata na predviđenu površinu i njegovo zbijanje. Zatim se kompaktirani agregat zasićuje monomernom mešavinom, što korisnika oslobađa upotrebe velikih miksera za pripremu materijala. U ovom postupku treba biti oprezan da bi se postigla kompletna natopljenost agregata.

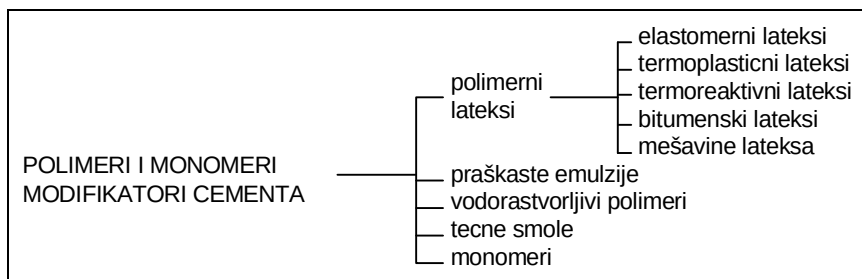
Ugrađivanje mešavina pripremljenih na licu mesta: Ovaj metod ugrađivanja je identičan sa tehnologijom ugrađivanja običnih betona. Polimerno vezivo se dodaje direktno u mešalicu, zatim sitan granulirani i na kraju krupan. Mešanje se obavlja sve dok sva zrna ne budu mokra. Sam postupak kompaktiranja vrši se zbijanjem sa šipkama ili vibriranjem. Za poboljšanje efekta sanacionih radova, obično se pre početka radova podloga obrađuje čistim polimernim vezivom (nanošenje prajmera).

Ugrađivanje gotovih komercijalnih mešavina:

Ovakvi reparaturni sistemi mogu biti mešani ručno ili mehaničkim mikserima. Prilikom mešanja i zbijanja polimer betona treba se strogo pridržavati uputstava proizvođača. Hemikalije koje se koriste u proizvodnji nekih polimer betona mogu biti zapaljive, ishlapljive i toksične. Proizvođači hemikalija i gotovih polimernih sistema daju preporuke za bezbedno čuvanje, mešanje i rukovanje. Drugo veliko polje primene polimer betona, pored reparaturnih radova, je izvođenje obloga i zaštitnih slojeva za klasične betone. Ovakvi zaštitni slojevi imaju za cilj da običnom betonu obezbede trajnost i otpornost na delovanje vode i hemijskih agenasa. Na takav način deluje se preventivno u smislu sprečavanja deterioracije betona i korozije armature. Polimer beton ima odlične adhezione karakteristike, kada se radi o čistom i kompaktnom betonu.

2.3 Polimer modifikovani betoni

Betoni modifikovani polimerima dobijaju se dodavanjem monomera ili polimera u svežu betonsku masu. Polimeri i monomeri koji se koriste u svojstvu modifikatora cementnih kompozita šematski su prikazani na slici 3.



Slika 3. Polimeri i monomeri koji se primenjuju za modifikaciju cementnih maltera i betona

Najčešće korišćeni modifikatori cementnih kompozita, na osnovu rezultata dosadašnjih istraživanja i prakse, su *polimerni lateksi*. U opštem slučaju polimerni lateksi predstavljaju kopolimerne sisteme, koji se sastoje iz dva ili više monomera, u obliku vodene disperzije. Dispergovane čestice su reda veličine od 0.05-5 μ m. Sastav polimernih lateksa varira u zavisnosti od konkretnog tipa polimera i obično sadrži 30-50% suve materije. U okviru suve materije sadržani su i emulgatori i stabilizatori, a u nekim slučajevima i antipenušavci. Opšta podela lateksa, šematski je prikazana na slici 4.

U tabeli 1 prikazana su karakteristična svojstva nekih lateksa.

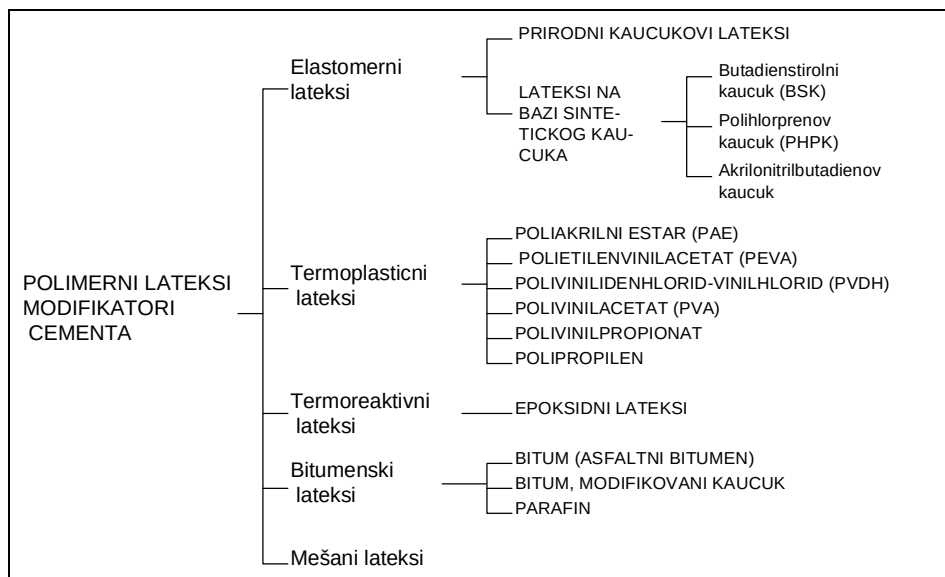
Standardni polimerni lateksi koji se mogu koristiti kao modifikatori cementnih kompozita, predstavljaju netoksične i bezopasne materijale, za koje nije potrebno preduzimati posebne mere opreza.

Praškaste emulzije su "suvi" polimeri koji se naknadno mešaju sa vodom. U ovu grupu polimera spadaju polietilenacetat, polivinilacetat-vinilversat i dr. U *vodorastvorljive polimere* ubrajaju se različite vrste celuloze (metilceluloza, karboksimetilceluloza i dr.), polivinil alkohol, polietilen oksid, poliakrilamid i druge slične supstance.

U grupu *tečnih smola* spadaju poliestarske smole, epoksidne smole, fenolformaldehidne smole, poliuretani itd. Najčešće primenjivani *monomeri* su metilmetakrilat, furilov špirit i hlorovodonični anilin.

Opšti principi modifikacije polimerima

Betoni modifikovani polimerima pripremaju se putem mešanja polimera ili monomera u disperznoj, praškastoj ili tečnoj formi sa svežom betonskom mešavinom. Za sve vrste polimera i monomera koji se koriste u cementnim kompozitima - malterima i betonima, posebno je važno istaći da se hidratacija cementa i obrazovanje polimerne faze (sjedinjavanje polimernih čestica i polimerizacija monomera) odvijaju nesmetano i paralelno. Pri tome dolazi do promene oblika monolitne matične faze sa rešetkastom strukturom, a faza hidratisanog cementa i polimerna faza se međusobno prožimaju. U strukturi betona modifikovanih polimerima, zrna granulata su povezana takvom bimatričnom fazom. Većina svojstava betona modifikovanih polimerima su u upoređenju sa običnim betonima promenjena zahvaljujući tako formiranoj strukturi. U sistemima, modifikovanim lateksom, praškastim emulzijama i vodorastvorljivim polimerima,



Slika 4. Polimerni lateksi

Tabela 1. Karakteristična svojstva polimernih lateksa

tip polimera	spoljni izgled (boja)	veličina čestica (A)	kol. suve materije (%)	spec. masa na 20°C (kg/m ³)	PH	viskozitet na 20°C (Pas)	površ. napon (N/m ²)
BSK	Mlečno bela	2000	46.5-49.5	1010	10-11	0.010-0.012	0.032
PAE	Mlečno bela	5000	44.5-45.5	1054	8.6-10.2	0.029	0.045
PHPK	Mlečno bela	1200	50	1100	9.0	0.016	0.035
PEVA	Mlečno bela	7000	52.8	1050	6.0	1.350	0.075
PVA	Mlečno bela	5000	42.5	1090	4.3	2.370	0.0445
PVDH	Mlečno bela	1700	47.0-51.0	1230	3.0-7.0	0.006-0.010	0.038-0.042

gubitak vode iz tih sistema, pri hidrataciji cementa, dovodi do obrazovanja tankog polimernog sloja (filma) ili membrane. Nasuprot tome, u sistemima modifikovanim tečnim smolama monomerima, dodatak vode stimuliše i hidrataciju cementa i polimerizaciju tečnih smola i monomera.

Modifikacija cementnih maltera i betona lateksima: Odvija se istovremeno sa hidratacijom cementa i sa procesom obrazovanja polimernog sloja. Proces hidratacije cementa obično prethodi procesu obrazovanja polimernog sloja [20]. Bimatrična faza, koja se sastoji iz cementnog gela i polimernog sloja, formira se kao spojna (vezna) faza u skladu sa uprošćenim trostepenim modelom, prikazanim na slici 5 [20] i [32].

Kada se polimerni lateks doda svežem cementnom malteru ili betonskoj mešavini, polimerne čestice dispergiraju u fazu cementnog testa (*faza a*). U takvom, polimer-cementnom testu cementni gel se postepeno formira usled hidratacije cementa. U isto vreme čestice polimera se postepeno talože na površini smese cementnog gela i nehidratiranih čestica cementa (*faza b*). Zahvaljujući razvijanju strukture cementnog gela, čestice polimera se postepeno orijentišu u prostore kapilarnih pora. Sa nastavljanjem procesa hidratacije cementa, količina kapilarne vode se smanjuje, a polimerne čestice koaguliraju uz formiranje zaptivajućeg sloja na površini smese cementnog gela i nehidratiranih čestica cementa, a zatim se vezuju i za smesu i za silikatni sloj na površini granulata (*faza c*) [25]. Na kraju, čestice upakovanog polimera na produktima hidratacije cementa povezuju se u kontinualne slojeve ili membrane (*faza d*). Pri tome se formira monolitna rešetka, u kojoj polimerna faza prožima fazu postojećih produkata hidratacije. Uprošćeni proces obrazovanja polimernog sloja preko produkata hidratacije, prikazan je na slici 6 [20].

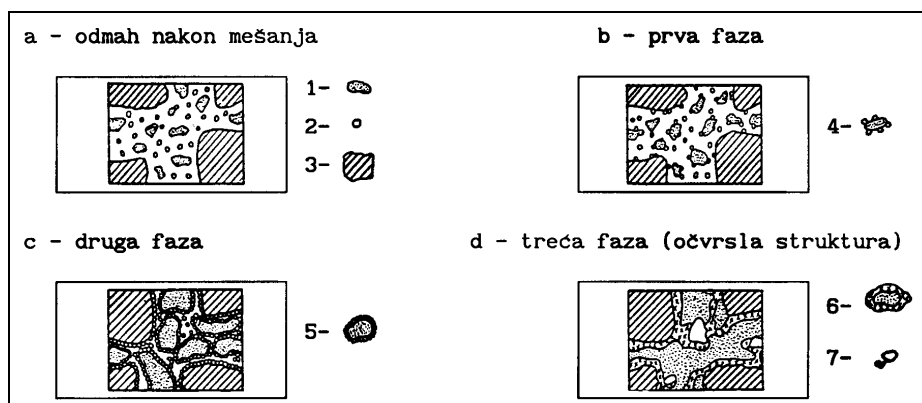
Modifikacija praškastim emulzijama: U većini slučajeva praškaste emulzije se uvode preko suvog mešanja sa cementom, zatim mešanjem sa granulatom i dodavanjem potrebne količine vode na kraju. U trenutku dodavanja vode praškasta emulzija reemulgira u malteru ili betonskoj mešavini i kao i lateks dobija osobinu modifikatora cementa. Proces modifikacije cementnih kompo-

zita praškastim emulzijama, zatim se odvija kao i proces modifikacije sa lateksom.

Modifikacija vodorastvorljivim polimerima: Pri modifikaciji vodorastvorljivim polimerima, mala količina polimera u formi praška ili vodenog rastvora dodaje se cementnom malteru ili betonskoj mešavini prilikom mešanja. Proces modifikacije poboljšava se uglavnom lakim "pakovanjem" usled površinske aktivnosti vodorastvorljivih polimera i sprečavanja efekta "isušivanja". Sprečavanje isušivanja, koje omogućava nesmetanu hidrataciju cementa, objašnjava se povećanjem viskoziteta tečne faze u cementnom malteru i betonu i izolatorskog efekta, zahvaljujući formiranju izuzetno tankih i vodonepropustljivih membrana.

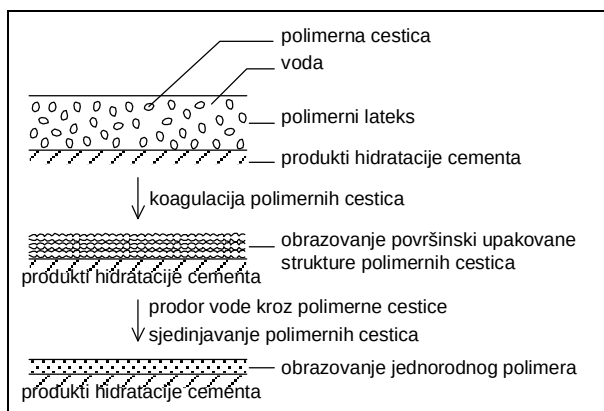
Modifikacija tečnim smolama: Pri modifikaciji tečnim termoplastičnim smolama, značajna količina polimera sa niskom molekularnom masom ili prepolimera u tečnoj formi, dodaje se u cementni malter ili beton prilikom mešanja. Sadržaj polimera u tako modifikovanim malterima ili betonima je generalno veći nego u sistemima modifikovanim lateksima. Pri takvoj modifikaciji polimerizacija se odvija u prisustvu vode uz obrazovanje polimerne faze i istovremenu hidrataciju cementa. Kao rezultat takvog procesa formira se bimatrična faza sa rešetkastom strukturom uz uzajamno prožimanje polimerne faze i produkata hidratacije cementa, što obezbeđuje visoku adheziju sa granulatom.

Modifikacija monomerima: Princip modifikacije cementnih kompozita monomerima je sličan kao i kod tečnih smola. Značajne količine monomera mešaju se sa cementnim malterima i betonima, pri čemu se hidratacija cementa i proces polimerizacije odvijaju paralelno. Proces polimerizacije može biti termokatalitički ili radijacioni, pri čemu se taj proces može odvijati za vreme ili posle faze vezivanja. Najčešće takav tip modifikacije ne obezbeđuje zadovoljavajuća svojstva modifikovanog sistema. Razlozi za to leže u narušavanju procesa hidratacije cementa, degradaciji monomera alkalijama iz cementa i problemima povezanim sa obezbeđivanjem homogenosti dispergovanog monomera i drugih komponenti u vreme mešanja.



- 1 - nehidratirane čestice cementa; 2 - polimerne čestice; 3 - granulati;
 4 - smesa čestica nehidr. cementa i cementnog gela, na kojoj su delimično nataložene pol. čestice;
 5 - smesa cem. gela i čestice nehidratiranog cementa, okružena površinski upakovanim slojem polimernih čestica;
 6 - hidratirani cement okružen polimernom membranom; 7 - uvučeni vazduh.

Slika 5. Model obrazovanja bimatrične faze



Slika 6. Uprošćeni model procesa obrazovanja polimernog sloja na produktima hidratacije cementa

Tehnologija dobijanja betona modifikovanih polimerima

Tehnologija dobijanja betona modifikovanih polimerima je skoro identična sa tehnologijom dobijanja običnih cementnih betona. Većina polimera, kao što su lateksi, nalazi se u disperznoj formi i dodaje se cementnom betonu prilikom mešanja. Pošto lateksi imaju najveću primenu u modifikaciji betona, u nastavku se daju osnove tehnologije dobijanja betona modifikovanih lateksima.

Za praškaste emulzije, polimere rastvorljive u vodi i epoksidne smole tehnološki postupci spravljanja, ugrađivanja i negovanja se bitno ne razlikuju od postupaka za betone modifikovane lateksima, dok je za monomere potrebno obezbediti termokatalitički ili radijacioni proces polimerizacije.

Komponentni materijali koji se koriste za dobijanje betona modifikovanih lateksima, su isti kao i materijali za dobijanje klasičnih cementnih betona. Čist portland cement se najčešće koristi za dobijanje betona modifikovanih lateksom. Dodatke i aditive za beton u principu ne treba koristiti bez prethodnih ispitivanja, a naročito ne dodatke tipa aeranata, zato što dodatak lateksa izaziva povećanje količine uvučenog vazduha. Opreznost pri eventualnoj primeni dodataka i aditiva je neophodna zato što, u opštem slučaju, kombinovanje polimera sa nekim od dodataka ili aditiva može dovesti do nepovoljnih efekata, zbog mogućih hemijskih reakcija. Za spravljanje betona modifikovanih lateksima koristi se sitan i krupan agregat, kao i za klasične betone. Za koroziono otporne betone upotrebljava se kvarcni pesak i drobljeni agregat od kvarcita. Treba izbegavati primenu agregata sa velikom površinskom vlagom, zato što je u tom slučaju teško postići željenu konzistenciju betona. Voda za spravljanje modifikovanih betona ne sme da sadrži sastojke koji mogu nepovoljno uticati na proces hidratacije cementa i/ili na proces polimerizacije. U principu voda koja ispunjava uslove za spravljanje klasičnih betona može se koristiti i za spravljanje modifikovanih betona. Pri spravljanju betona modifikovanih lateksom često se koriste dodaci tipa "antipenušavca" u cilju smanjenja količine uvučenog vazduha. U poslednje vreme na tržištu su se pojavili polimerni lateksi koji već sadrže odgovarajuće antipenušavce, pa se mogu koristiti

bez dodavanja takvih agenasa prilikom spravljanja betona.

Sastav betona modifikovanih lateksima određuje se na sličan način kao i za klasične betone, odnosno u zavisnosti od oblika i dimenzija konstruktivnog elementa, zahtevane ugradljivosti svežeg betona, projektovane čvrstoće, vodonepropustljivosti, hemijske otpornosti i drugih zahtevanih svojstava očvrstlog betona. Pri izboru sastava modifikovanih betona treba u prvom redu voditi računa o onim svojstvima (čvrstoća na zatezanje i savijanje, duktilnost, athezija i trajnost) koja se bitno poboljšavaju primenom polimera. Ova svojstva su zavisna od polimercementnog odnosa u većoj meri nego od vodocementnog odnosa, ali se ne sme zanemariti ni uticaj vodocementnog faktora na svojstva betona. Polimercementni odnos (kg/kg) predstavlja količnik između ukupne količine suve supstance u polimernoj disperziji i količine cementa u modifikovanom betonu. Zbog toga se prilikom usvajanja polimercementnog odnosa mora znati tačna količina suve materije u primenjenoj polimernoj disperziji. Pored toga, pri određivanju vodocementnog faktora mešavine mora se voditi računa i o količini vode koja se u mešavinu unosi preko polimerne disperzije. Najčešći polimercementni odnosi za modifikovane betone su u granicama od 5 - 20%, a vodocementni faktor od 30-50%. Sastav mešavine za betone modifikovane lateksima, u većini slučajeva, ne može se odrediti na jednostavan način zato što je potrebno uzeti u obzir veliki broj uticajnih faktora u fazi projektovanja sastava. Za projektovanje sastava modifikovanih betona mogu se koristiti i određeni računski modeli, kao što je "model racionalnog sistema izbora sastava, koji je predložio Ohama. Radi provere saglasnosti zahtevanih sa ostvarenim svojstvima modifikovanih betona, nakon izbora komponentnih materijala i računskog određivanja sastava mešavine, obavezno se sprovodi eksperimentalno ispitivanje - pomoću prethodnih proba. Stvarni sastav konkretnog modifikovanog betona definiše se na osnovu rezultata eksperimentalnog ispitivanja.

Betoni modifikovani lateksima mogu se lako pripremati korišćenjem svih raspoloživih tipova mešalica. Mogući postupci za spravljanje modifikovanih betona su:

- polimerna disperzija se pomeša sa potrebnom količinom vode za spravljanje betona i dodaje se mešavini agregata i cementa,
- homogenizovanoj mešavini cementa, agregata i vode dodaje se polimerna disperzija.

U praksi se drugi postupak pokazao kao bolji sa aspekta smanjenja sadržaja uvučenog vazduha (zbog sklonosti nekih polimera ka penušanju u fazi mešanja) i poboljšanja fizičko-mehaničkih karakteristika. Pri spravljanju modifikovanih betona mora se voditi računa o brzini, vremenu mešanja i tipu mešalice, da bi se izbeglo neželjeno uvlačenje vazduha, bez obzira na primenu dodatka antipenušavca. U praksi je, takođe, potvrđeno da je celishodnije koristiti gravitacione mešalice umesto protivstrujnih. Preporučuje se da brzina mešanja za polimerne disperzije sklone penušanju bude do 10 obrtaja u minuti i da vreme mešanja iznosi najduže 2-3 minuta. Nakon završenog mešanja, modifikovani betoni se ugrađuju i obrađuju istim postupcima kao i klasični betoni. Modifikovani betoni imaju nešto kraće vreme obradljivosti u upoređenju sa običnim cementnim betonima. Iako vreme obrade zavisi u velikoj meri od temperature spoljne sredine, generalno se može reći da se

modifikovani beton mora ugraditi u roku od 1 sata nakon mešanja. Budući da modifikovani betoni imaju mnogo bolju atheziju sa različitim materijalima, čak i sa metalima, sva oprema i alati moraju biti oprani i očišćeni odmah nakon korišćenja. Iz istog razloga, očišćenu površinu oplata ili kalupa treba pažljivo premazati specijalnim sredstvima za oplata. Modifikovane maltere i betone ne treba ugrađivati pri temperaturama nižim od 5°C i višim od 30°C. Prilikom kompaktiranja modifikovanog betona treba izbegavati dugo vibriranje, odnosno suviše vibracije, da se ne bi izazvalo izdvajanje vode zajedno sa polimerom na površinu betona.

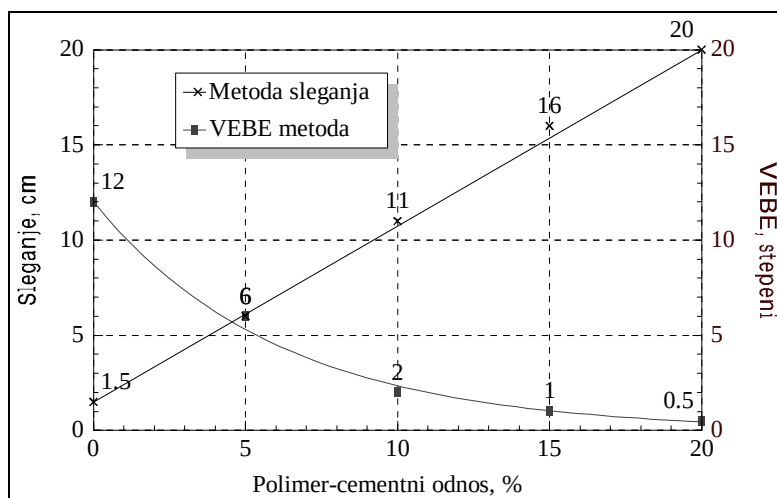
Nega betona modifikovanih polimerima razlikuje se od nege klasičnih betona zbog prirode očvršćavanja upotrebljenih veziva. Naime, poznato je da je za hidrataciju cementa potrebna vlažna sredina (voda), dok je za formiranje polimerne matrice potrebna suva sredina (vazduh). Zbog toga se optimalna svojstva modifikovanih betona dobijaju pri kombinovanom režimu nege, koji se sastoji od negovanja u vlažnoj sredini u početnom periodu, a zatim suvog negovanja na vazduhu. Za betone modifikovane lateksima preporučuje se da period nege u vlažnoj sredini traje 5-7 dana. Postupak ubrzanog očvršćavanja zagrejanom vodenom parom se ne preporučuje.

Svojstva betona modifikovanih polimerima

Obradljivost i ugradljivost betona modifikovanih polimerima je bolja u odnosu na klasične betone. Količina upotrebljenog polimernog lateksa ima direktan uticaj na **konzistenciju** svežeg betona zato što primenjeni polimer proizvodi efekat koji je karakterističan za aditive tipa superplastifikatora. Bolja ugradljivost i obradljivost svežeg betona modifikovanog polimerima može se objasniti poznatim efektom "kugličnih ležajeva" polimernih čestica, uticajem površinski aktivnih supstanci iz polimera i povećanom količinom uvučenog vazduha, koja takođe ima svojstvo "kugličnih ležajeva".

Ovakav uticaj polimernog dodatka omogućava spravljanje betonskih mešavina zahtevane konzistencije sa smanjenim vodocementnim faktorom u odnosu na klasične betone, što ima pozitivan uticaj na većinu svojstava očvrstlog betona. Sa povećanjem polimer-cementnog odnosa potrebna količina vode za spravljanje može se smanjiti i za 30%. Ilustracije radi, na narednom dijagramu prikazan je uticaj polimer-cementnog odnosa na konzistenciju svežeg betona (slika 7) [23].

Primer uticaja lateksa na konzistenciju betona ilustrovan je na narednoj slici [7].



Slika 7. Promena konzistencije svežeg betona u zavisnosti od odnosa m_p/m_c



a) referentni beton ($D_h=1.5\text{cm}$)



b) beton sa 15% polimernog dodatka ($D_h=15\text{cm}$)

Slika 8. Uticaj polimernog dodatka na veličinu sleganja svežeg betona

Modifikovani betoni u svežem stanju imaju manju sklonost ka izdvajanju vode i "mokroj" segregaciji, odnosno imaju povećanu *stabilnost, kohezivnost i homogenost*. Primera radi, modifikovani betoni vrlo tečne konzistencije ($\Delta h=20\text{cm}$) ne pokazuju nikakve znake izdvajanja cementnog mleka i raslojavanja, odnosno imaju zadovoljavajuću kohezivnost i plastičnost.

Modifikovani betoni imaju veći procenat *uvučenog vazduha* u odnosu na klasične betone zbog delovanja površinski aktivnih supstanci, sadržanih u polimernom lateksu u vidu emulgatora i stabilizatora. Određeni procenat uvučenog vazduha može biti čak i koristan jer se na takav način može popraviti konzistencija, kao i značajno povećati otpornost betona na dejstvo mraza. Suvišna količina uvučenog vazduha, koja u nekim slučajevima može iznositi i do 20%, izaziva smanjenje čvrstoće pri pritisku, pa se zbog toga koriste dodaci tipa "antipenušavaca". Korišćenjem ovih dodataka, uz pravilan izbor vrste mešalice i režima mešanja, količina uvučenog vazduha se kod modifikovanih betona može spustiti i do 3%.

Čvrstoća pri pritisku modifikovanih betona, pri starosti od 28 dana, se neznatno povećava sa povećanjem polimer-cementnog odnosa, u odnosu na klasične betone. Za modifikovane betone karakteristično je "produženo" očvršćavanje. Hidratacija cementa u modifikovanim betonima se produžava nesmanjenim intenzitetom i u suvoj sredini, zahvaljujući visokoj sposobnosti zadržavanja vode usled formiranja nepropustljivih polimernih membrana. Kod klasičnih betona period nakon 28 dana praćen je vrlo blagim porastom čvrstoće, dok je kod modifikovanih betona uočen intenzivan prirast čvrstoće u periodu do 6 meseci nakon ugrađivanja [18].

Čvrstoća na zatezanje modifikovanih betona je generalno uvek veća od čvrstoće na zatezanje klasičnih betona i raste sa povećanjem polimer-cementnog odnosa [24]. Naime, čvrstoća betona na zatezanje u najvećoj meri zavisi od ostvarene athezije između zrna agregata i cementnog kamena. Kod modifikovanih betona, formirane polimerne membrane, povećavaju atheziju između zrna agregata i cementnog kamena i sprečavaju progresivan razvoj početnih mikro prslina zbog svoje velike elastičnosti. Maksimalno povećanje čvrstoće na zateza-

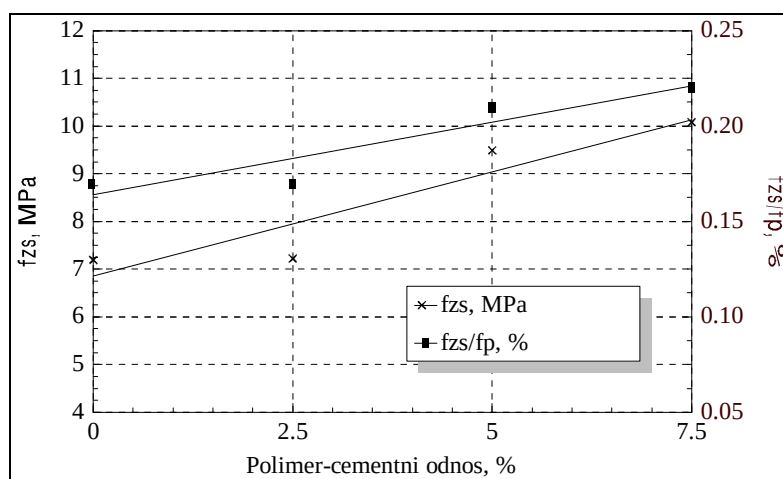
nje modifikovanih betona u odnosu na klasične betone može iznositi i više od 50%. Takođe, treba naglasiti da se prirast čvrstoće na zatezanje značajnije nastavlja i nakon 28 dana, sve do starosti betona od 6 meseci. Sa povećanjem količine primenjenog polimera povećava se i odnos čvrstoće na zatezanje i čvrstoće pri pritisku " f_{zs}/f_p ", što je potvrda konstatacije da čvrstoća na zatezanje ima izraženiji porast u odnosu na čvrstoću pri pritisku (slika 9) [24].

Habanje betona modifikovanih polimerima je manje nego kod klasičnih betona. Ovo smanjenje može iznositi i do 50% u zavisnosti od upotrebene vrste i količine polimera.

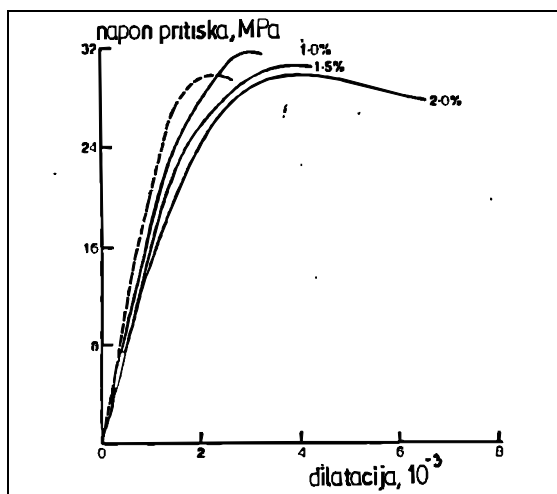
Upoređenjem radnih dijagrama utvrđeno je da je *kapacitet plastičnog deformisanja* modifikovanih betona veći u odnosu na klasične betone [28]. Sa povećanjem polimer-cementnog odnosa značajno se povećavaju vrednosti maksimalnih dilatacija pri pritisku u trenutku loma (slika 10). Pri m_p/m_c od 20% dostiže se dilatacija koja je za 2-3 puta veća od dilatacije nemodifikovanog betona. Posledica ovakvog ponašanja modifikovanih betona je povećana *žilavost* u odnosu na klasične betone.

U poređenju sa klasičnim betonima betoni modifikovani polimerima imaju značajno veću *ateziju* za različite vrste podloga, što je posledica svojstva "lepljivosti" koje karakteriše najveći broj polimera. Iz istog razloga i *napon prljanja između armature i betona* veći je kod modifikovanih betona, tj. atezija između armature i betona povećava se sa povećanjem polimer-cementnog odnosa.

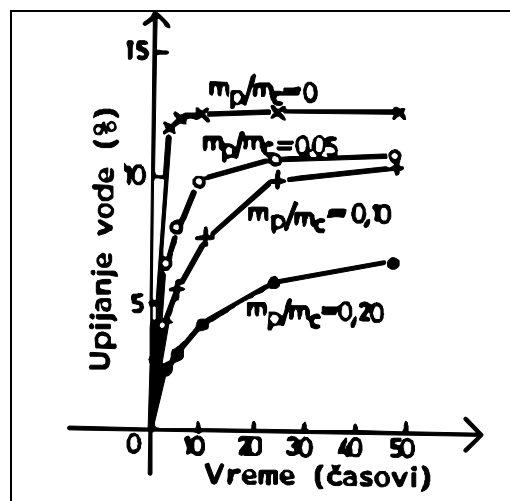
Upijanje vode modifikovanih betona je manje u odnosu na klasične betone i zavisi u najvećoj meri od polimer-cementnog odnosa [preuzeto iz 17]. Na slici 11 prikazana je zavisnost upijanja vode betona modifikovanih lateksom poliakrilnog estera u funkciji *polimer-cementnog* odnosa i dužine držanja u vodi. Razlozi ovakvog ponašanja modifikovanih betona leže u njihovoj unutrašnjoj i površinskoj strukturi, u kojoj su pore zapunjene polimerom ili prekrivene površinskim polimernim membranama. Ovo svojstvo je jedna od značajnih prednosti modifikovanih betona u odnosu na klasične betone, zato što se na posredan način odražava i na trajnost betona.



Slika 9. Zavisnost " f_{zs} " i " f_{zs}/f_p " od polimer-cementnog odnosa



Slika 10. "s-e" dijagram za referentni beton i za betone modifikovane lateksom



Slika 11. Zavisnost upijanja vode od polimer-cementnog odnosa i dužine držanja u vodi

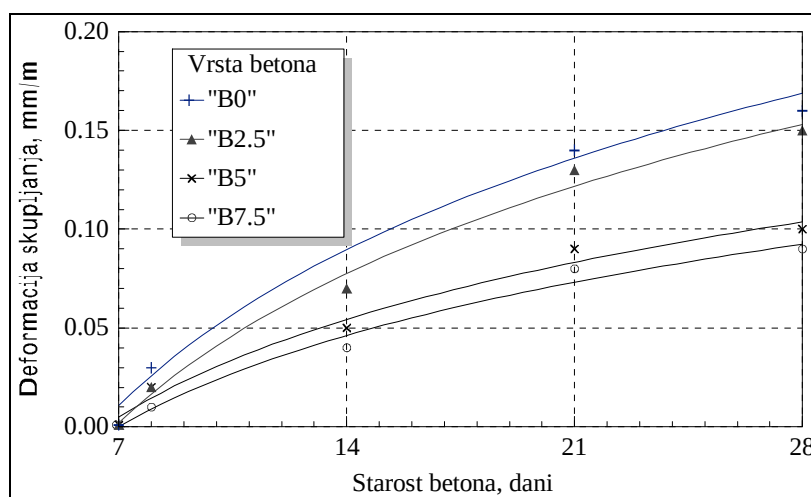
Skupljanje modifikovanih betona je manje u odnosu na klasične cementne betone. Primera radi, deformacija skupljanja betona modifikovanog sa 7.5% lateksne disperzije u odnosu na masu cementa, je za skoro 50% manja u odnosu na skupljanje referentnog (nemodifikovanog) betona (slika 12) [20] [24]. Razlog za ovakvo ponašanje modifikovanih betona je delovanje površinski aktivnih supstanci i antipenušavaca, sadržanih u lateksu [25].

Deformacija tečenja, kao i koeficijent tečenja su značajno manji kod modifikovanih betona nego kod klasičnih betona. Ova pojava objašnjava se povećanom čvrstoćom polimernog veziva i dugotrajnijim razvijanjem čvrstoće modifikovanih betona, usled veće sposobnosti zadržavanja vode, odnosno produžene hidratacije cementa [preuzeto iz 25].

Polimerima modifikovani betoni imaju veću otpornost na dejstvo mraza u poređenju sa klasičnim betonima.

Ovo je posledica smanjene kapilarne poroznosti (usled manjih vodocementnih faktora i popunjavanja kapilarnih pora u cementnom kamenu polimernim česticama) i povećane količine uvučenog vazduha. Takođe je značajno povećana i otpornost modifikovanih betona na kombinovano dejstvo mraza i soli za odmrzavanje.

Koroziona otpornost betona modifikovanih polimerima zavisi od vrste upotrebljenog polimera i cementa, od polimer-cementnog odnosa i vodocementnog faktora, kao i od prirode agresivnih materija. Generalno se može reći da betoni modifikovani polimerima imaju veću korozionu otpornost od klasičnih betona. Povećana hemijska otpornost je posledica smanjene otvorene poroznosti, čime se smanjuje mogućnost prodiranja agresivnih supstanci u beton. Pri tome se mora naglasiti da se u svakom konkretnom slučaju jedino eksperimentalnim ispitivanjem može dokazati koroziona otpornost modifikovanih betona.



Slika 12. Zavisnost deformacije skupljanja od starosti betona i količine polimera

Mogućnosti za primenu modifikovanih maltera i betona

Betoni i malteri modifikovani polimerima mogu se primenjivati u svim oblastima građevinarstva, kao i klasični betoni i malteri. Međutim, zbog više cene, modifikovani betoni i malteri koriste se u slučajevima kada se od betona, pored čvrstoće, zahtevaju posebna svojstva (koroziona otpornost, otpornost na habanje, otpornost na dejstvo mraza i soli za odmrzavanje, povećana duktilnost, manje skupljanje itd.). Naime, veća početna ulaganja u betone i maltere modifikovane polimerima, opravdavaju se produženjem eksploatacionog veka betonskih konstrukcija. Od svih betona i maltera modifikovanih raznim vrstama polimera, najširu primenu imaju malteri i betoni modifikovani lateksima. Ovi kompoziti se koriste u mnogim specijalnim oblastima, gde obični cementni malteri i betoni imaju ograničenu primenu. U nastavku je dat kratak pregled primene modifikovanih betona i maltera u svetu.

U poslednjih dvadeset godina polimer-betonski kompoziti na bazi lateksa najčešće se koriste za sanacione radove, pogotovo za ravne krovove, silose i mostove, zbog odlične adhezije sa betonskom podlogom, visoke otpornosti na dejstvo mraza i otpornosti na prodiranje hlor-jona. Malteri modifikovani lateksom mogu se uspešno primenjivati za nivelaciju opreme, za zalivanje ankera i dr.

Cementni kompoziti visoke gustine mogu se dobiti primenom lateksa i sa uspehom se primeniti za antikorozionu zaštitu, postizanje vodonepropustljivosti i reljefne dekorativne radove [6]. Modifikovani sistemi imaju niz prednosti u samoj primeni, zato što se lako nanose i ugrađuju, imaju odličnu adheziju za mokru podlogu, nezapaljivi su i poseduju odličnu otpornost na atmosferske uticaje.

U Kanadi je razrađen poseban sistem sanacije betonskih konstrukcija, koji se zasniva na primeni modifikovanih kompozita [27]. Na oštećenu betonsku površinu nanose se naizmenično slojevi modifikovanog maltera i tanke armaturne mreže, sve do dostizanja potrebne debljine. Polimer-betonski kompoziti su veoma uspešno primenjeni za izradu zidnih panela i tunelskih obloga u metrou u Montrealu [12].

Područje primene modifikovanih maltera i betona u Japanu je veoma prošireno [19]. Najveću popularnost su stekli malteri modifikovani polimerima "BSR", "PEVA" i "PAE", i to kao materijali za pokrivačke radove, zaštitne slojeve, vodonepropustljive obloge, sanacione radove ("krpljenje" oštećenih betonskih preseka), anti-korozione slojeve i sl. Malteri modifikovani polimerima ili modifikovana cementna pasta se uspešno primenjuju za injektiranje prslina i "popunjavanje" defekata usled raslojavanja.

Istraživanjima koja su obavljena u Japanu potvrđeno je da se modifikovani kompoziti mogu uspešno primeniti za izolaciju od vibracija [25]. U praksi je ovo svojstvo modifikovanih kompozita primenjeno za prigušivanje vibracija na železničkim mostovima i za izradu temelja mašina. U Japanu je, takođe, izvršeno i ispitivanje zidova za ukrućenje, izvedenih od modifikovanog betona [1]. Rezultati eksperimenta potvrdili su mogućnost primene modifikovanih betona za izvođenje duktilnih zidova, zato što u mnogo većoj meri mogu da apsorbuju energiju pri seizmičkom opterećenju u upoređenju sa običnim cementnim betonima.

Slična su i iskustva u dosadašnjoj primeni modifikovanih maltera i betona i u SAD i Velikoj Britaniji. Procenjuje se da se za izradu završnih slojeva na mostovskim pločama godišnje ugradi oko 1.4 miliona kvadratnih metara betona modifikovanog polimerima [8]. Najčešće upotrebljivani polimer je lateks butadien-stiren.

Pracenjem izvedenih mostova utvrđeno je da je sloj modifikovan lateksom "BSR" u debljini od oko 3 cm, dovoljna barijera protiv prodora hlorida, vode i drugih agenasa, čime je obezbeđena zaštita armature od korozije. Takođe je potvrđena i odlična trajnost kroz duži vremenski period novih mostova, kao i saniranih kolovoznih ploča. U SAD se poslednjih godina konstrukteri i vlasnici objekata, zbog lakšeg održavanja, gotovo isključivo odlučuju za izvođenje završnih slojeva na kolovoznim pločama mostova od betona modifikovanog lateksom. Iz sličnih razloga ("ranjivost" ploča usled dejstva agresivnih agenasa), garaže za parkiranje u više nivoa, izvide se primenom betona modifikovanih lateksom.

Trajnost industrijskih podova je obično narušena zbog dejstva hemijskih supstanci i zbog teškog saobraćaja. Betoni modifikovani polimerima imaju odličnu hemijsku otpornost, zadovoljavajuću čvrstoću pri pritisku i zatezanju, kao i izuzetnu otpornost na habanje, tako da su podesan materijal za izradu industrijskih podova ili za zaštitu postojećih podova. Pored toga, modifikovani malteri se zbog izražene adhezije koriste i kao međusloj za povezivanje starog i novog betona.

Kada je u pitanju sanacija postojećih objekata, betoni modifikovani polimerima, koriste se prvenstveno za "popravku" većih oštećenja ili zamenu pojedinih delova betonskih konstrukcija.

U našoj sredini još uvek nije otpočela masovnija primena betona modifikovanih polimerima, a poslednjih godina započela je primena gotovih maltera modifikovanih polimerima, koji se uglavnom koriste za sanacione radove i izvođenje industrijskih podova.

Prema dostupnim podacima, primena betona modifikovanih polimerima u razvijenim zemljama, obuhvata praktično sve vrste objekata i sve oblasti građevinarstva, ali je najizraženija kod industrijskih i saobraćajnih objekata. Ova primena odnosi se kako na građenje novih, tako i na sanaciju postojećih objekata.

3 BETONI SA AGREGATOM OD RECIKLIRANOG BETONA

U ovom poglavlju je dat kratak prikaz najvažnijih svojstva svežeg i očvrslog betona sa recikliranim agregatom. Prikazani podaci su rezultati uporednih ispitivanja svojstava običnog betona i betona sa recikliranim agregatom drugih autora.

Betoni spravljani sa 100% recikliranim krupnim agregatom i sa manjim vodocementnim odnosom od običnih betona, mogu imati čak i veću čvrstoću pri pritisku. U slučajevima kada obe vrste betona imaju isti vodocementni faktor, čvrstoća pri pritisku betona sa recikliranim agregatom je generalno manja od čvrstoće običnih betona [15]. Zbog toga je uobičajeno da se betoni sa recikliranim agregatom (zamenjeno 100% krupnog agregata) spravljaju sa povećanom količinom cementa da bi se dobila ista čvrstoća pri pritisku kao kod običnih betona.

Upotreba recikliranog agregata različitog kvaliteta za proizvodnju "novog" betona utiče na povećanje koeficijenta varijacije ostvarenih čvrstoća pri pritisku [29]. Kontrola i kontinualno osiguranje kvaliteta recikliranog agregata je uglavnom otežano zbog sledećih činjenica:

- betonski krš je najčešće kontaminiran različitim drugim "štetnim" materijalima (plastika, staklo, drvo, metali, hloridi, sulfati, itd.) i

- zrna recikliranog agregata su uvek obavijena slojem relativno "mekog" cementnog maltera, što ovaj agregat generalno čini poroznijim i manje otpornim na mehaničke uticaje [21].

Ove slabosti recikliranog agregata, koje se prvenstveno odnose na povećanu poroznost, veću količinu prslina, veći sadržaj sulfata i hlorida, štetne primese i određenu količinu malterskog sloja oko zrna agregata, nesumnjivo utiču nepovoljno na mehanička svojstva agregata od recikliranog betona, a samim tim i na svojstva "novog" betona [10]. Jedan od pokušaja povećanja mehaničkih karakteristika betona sa agregatom od recikliranog betona je, pored upotrebe hemijskih i mineralnih dodataka, istraživanje mogućnosti dvofaznog spravljanja betona [31]. Naime, u standardnoj proceduri spravljanja betona postupak se sastoji iz sledećih operacija:

- mešalica se prvo puni sa polovinom količine krupnog agregata,

- dodaje se sitan agregat,

- dodaje se cement,

- dodaje se preostala količina krupnog agregata,

- dodaje se potrebna količina vode i

- obavlja se mešanje betona.

Novi dvofazni postupak spravljanja betona sa agregatom od recikliranog betona prikazan je grafički na slici 13. Autori su predloženim postupkom spravljanja – mešanja betona pokazali da se athezija između recikliranog agregata i nove cementne paste može poboljšati i da se istovremeno novim cementnim gelom mogu popuniti postojeće pore i prsline u malterskom sloju obavijenom oko zrna agregata. Unapređenje kvaliteta "tranzitne zone" doprinelo je povećanju čvrstoće pri pritisku.

Dostupni rezultati ispitivanja betona sa recikliranim agregatom variraju u širokim granicama, ponekad su i kontradiktorni, ali se generalno može uzeti da beton sa recikliranim krupnim agregatom u odnosu na obični beton sa prirodnim agregatom, ima sledeća svojstva [26]:

- Veće skupljanje usled sušenja (do 40%),

- Veće tečenje (do 50%),

- Upijanje vode zavisi od razlike između vodocementnih faktora novog i starog betona od koga je dobijen reciklirani agregat (ne razlikuje se ako novi beton ima veće "ω" od recikliranog betona),

- Manju čvrstoću pri pritisku (5-30%),

- Manju čvrstoću na zatezanje cepanjem (0-10%),

- Manju čvrstoću na zatezanje savijanjem (0-10%),

- Manji modul elastičnosti (10-30%),

- Istu ili veću otpornost na dejstvo mraza.

Na osnovu komparativne analize rezultata sopstvenog eksperimentalnog ispitivanja svojstava svežeg i očvrstlog betona sa prirodnim krupnim agregatom, kombinovanim krupnim agregatom i sa recikliranim krupnim agregatom [16, 22], zaključeno je:

- Vrsta krupnog agregata nema uticaja na količinu uvučenog vazduha,

- Sa povećanjem učešća recikliranog agregata smanjuje se zapreminska masa betona,

- Način pripreme recikliranog agregata za spravljanje betonskih mešavina utiče na konzistenciju betona. U slučaju primene vodom zasićenog, površinski suvog recikliranog agregata konzistencija betona sa prirodnim i recikliranim agregatom se neće bitnije razlikovati. U slučaju upotrebe suvog recikliranog agregata i dodatne količine vode, može se postići ista konzistencija nakon zahtevanog vremena.

- Reciklirani agregat utiče na konzistenciju betona, tako što smanjuje pokretljivost betonske mešavine, smanjenjem slobodne količine vode u cementnoj pasti, zbog upijanja vode. Dodavanjem određene količine vode može se postići ista konzistencija kao kod betona sa prirodnim agregatom. Dodatna količina vode zavisi od vremena kada se želi postići ista konzistencija i određuje se na osnovu količine vode koju upije reciklirani agregat u istom vremenskom periodu.

- Čvrstoća betona pri pritisku zavisi prvenstveno od kvaliteta recikliranog agregata. Ukoliko se za spravljanje betona koristi kvalitetan agregat, dobijen drobljenjem betona viših marki, tada on neće uticati na smanjenje čvrstoće pri pritisku, bez obzira na procenat učešća u krupnom agregatu.

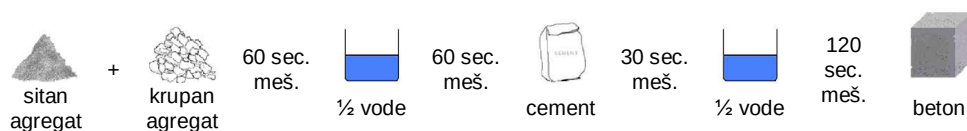
- Količina recikliranog agregata utiče na upijanje vode. Sa povećanjem količine recikliranog agregata proporcionalno se povećava količina upijene vode.

- Betoni sa recikliranim agregatom mogu biti vodonepropustljivi. Na VDP betona utiče kapilarna poroznost cementnog kamena novog betona i kapilarna poroznost cementnog kamena recikliranog betona. Ukoliko je agregat dobijen drobljenjem betona male poroznosti, tada vodonepropustljivost novog betona zavisi od izbora granulometrijskog sastava i ostvarene strukture novog cementnog kamena.

- Na vrednosti čvrstoća na zatezanje cepanjem i na zatezanje savijanjem, vrsta upotrebljenog agregata nema bitniji uticaj.

- Količina recikliranog agregata utiče na otpornost betona prema habanju. Sa povećanjem količine recikliranog agregata smanjuje se otpornost betona prema habanju, zbog povećane količine cementnog kamena koji se lakše haba od zrna prirodnog agregata.

- Na prionljivost između betona i armature agregat od recikliranog betona nema značajniji uticaj, jer se prionljivost ostvaruje preko novog cementnog kamena.



Slika 13. Dvofazni postupak mešanja betona

3.1 Primena betona sa agregatom od recikliranog betona

Prema [6], kvalitet agregata od recikliranog betona se najčešće ocenjuje na osnovu stepena upijanja vode i otpornosti na dejstvo mraza pomoću ubrzane metode potapanja u rastvor Na_2SO_4 . Naime, visok stepen upijanja vode ukazuje na veliku količinu malterskog sloja obavijenu oko zrna agregata, što generalno utiče na smanjenje čvrstoće i trajnosti i povećanje deformacionih svojstava i skupljanja. Zbog toga su praktično limitirane vrednosti čvrstoća betona sa recikliranim agregatom i mogućnosti za izvođenje različitih elemenata konstrukcije.

Tomosawa i Noguchi [6] su na osnovu svojih istraživanja klasifikovali agregate od recikliranog betona u tri kategorije krupnog (C1, C2 i C3) i dve kategorije sitnog agregata (F1 i F2). Uslovi kvaliteta za predložene klase recikliranog agregata prikazane su u tabeli 2:

Tabela 2. Klase agregata od recikliranog betona

Vrsta agregata	Reciklirani krupni agregat				Reciklirani sitni agregat	
Klasa agregata	C1	C2		C3	F1	F2
Upijanje vode (%)	≤ 3	≤ 3	≤ 5	≤ 7	≤ 5	≤ 10
Otpornost na dejstvo mraza – metoda potapanja u rastvor Na ₂ SO ₄ (%)	≤ 12	≤ 40	≤ 12	-	≤ 10	-

Klasa agregata C1 ima najbolji kvalitet sa najmanjom vrednošću upijanja vode. Autori pomenutog istraživanja su za uvedene klase recikliranog agregata predložili sledeću moguću upotrebu (tabela 3):

Prema [14] krupan agregat od recikliranog betona nije prepreka za dobijanje čak i betona visokih čvrstoća (>50MPa).

Autori Poon, Kou i Lam [4] su istraživali mogućnost primene betona sa agregatom od recikliranog betona za proizvodnju blokova za zidanje i betonske galanterije (slika 13). Ispitivanja su sprovedi u laboratorijskim i u fabričkim uslovima. Pri tome su varirali učešće recikliranog agregata od 25%, 50% i 100%. Kao recilirani agregat korišćen je šut od rušenja starih i šut od građenja novih objekata. Za spravljanje betona upotrebljena

je mešavina sitnog i krupnog recikliranog granulata sa $D_{\text{max}}=10\text{mm}$. Na osnovu analize dobijenih rezultata zaključili su da zamena prirodnog agregata recikliranim u količini do 50% neznatno utiče na čvrstoću pri pritisku i obezbeđuje zadovoljavajuće skupljanje betona i otpornost na klizanje. Veće količine recikliranog agregata značajnije smanjuju čvrstoću pri pritisku.



Slika 14. Izgled prefabrikovanih elemenata od betona sa recikliranim agregatom

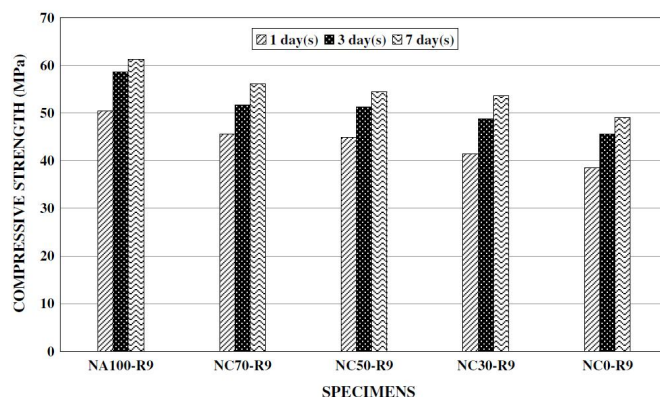
4 POLIMER-BETONSKI KOMPOZITI SA AGREGATOM OD RECIKLIRANOG BETONA

Ova vrsta betonskih kompozita je u početnoj fazi istraživanja, tako da je do sada objavljeno svega nekoliko radova sa rezultatima eksperimentalnih ispitivanja.

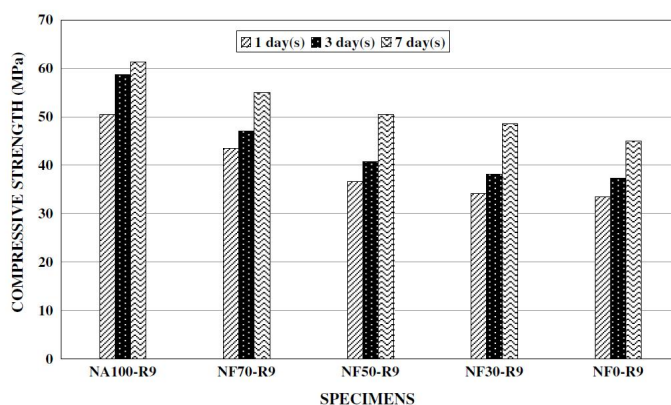
Autori Byung-Wan Jo, Seung-Kook Park i Jong-Chil Park [3] istraživali su mogućnost dobijanja i svojstva polimer betona, spravljenog sa nezasićenom poliestarskom smolom dobijenom od reciklirane plastike i sa agregatom od recikliranog betona. Svojstva ovog polimer-betonskog kompozita upoređivali su sa polimer betonom na bazi prirodnog agregata. Za spravljanje betona koristili su i mleveni krečnjak, kao mineralni dodatak, u cilju poboljšanja adhezije između polimerne matrice i zrna neorganskog agregata. Ispitivani betoni nose oznaku NA (prirodni agregat), a broj iza te oznake označava učešće prirodnog agregata u mešavini (100%, 70%, 50%, 30% i 0%). Prikazani rezultati se odnose na betonske mešavine sa 9% polimernog veziva u odnosu na masu betona (slike 15-17).

Tabela 3. Klase agregata od recikliranog betona i moguća primena u građevinarstvu

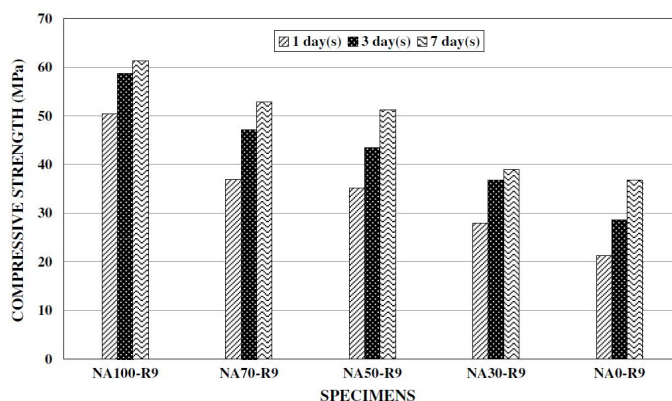
Oznaka primene	Krupan agregat	Sitan agregat	Čvrstoća betona (MPa)	Predložena upotreba betona sa recikliranim agregatom
<i>Inženjerski objekti</i>				
CI	C1	prirodni	18 – 24	Armirani i nearmirani beton: donji stroj mostova, tunnelske obloge, potporni zidovi
CII	C2	prirodni ili F1	16 – 18	Nearmirani beton: blokovi za zidanje, podloga za puteve, dokovi, potporni zidovi, itd.
CIII	C3	F2	< 16	Tamponi, slojevi za izravanjavanje
<i>Zgrade</i>				
BI	C1	prirodni	≥ 18	Elementi konstrukcije zgrada
BII	C2	prirodni	≥ 18	Temelji, šipovi,
BIII	C2	F1	≥ 18	Temeljne ploče, ploče na tlu, sloj za izravanjavanje
BIV	C3	F2	≥ 18	Podloge, slojevi za izravanjavanje



Slika 15. Čvrstoća pri pritisku polimer betona sa recikliranim krupnim agregatom



Slika 16. Čvrstoća pri pritisku polimer betona sa recikliranim sitnim agregatom

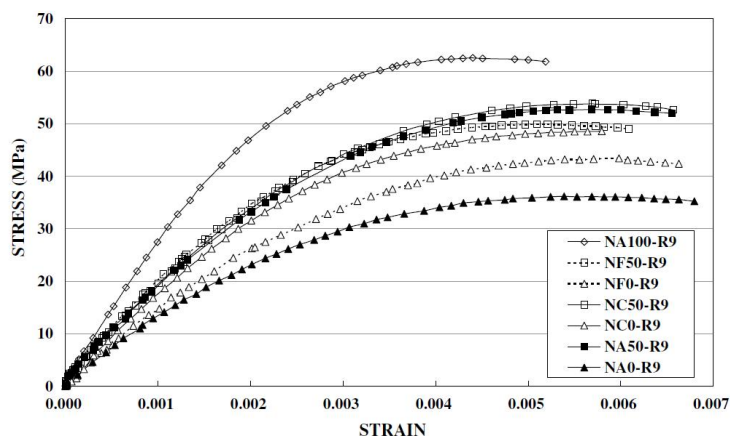


Slika 17. Čvrstoća pri pritisku polimer betona sa recikliranim sitnim i krupnim agregatom

Analizom dobijenih čvrstoća pri pritisku, zaključili su da se u slučaju primene recikliranog krupnog agregata čvrstoća betona neznatno smanjuje, dok se sa povećanjem učešća recikliranog sitnog agregata čvrstoća evidentno redukuje. Sličan zaključak izveli su i u odnosu na čvrstoću na zatezanje pri savijanju i pri cepanju. Pad mehaničkih karakteristika objašnjen je slabijom adhezijom između "starog" maltera kojim su obavijena zrna recikliranog agregata i polimernog veziva.

Sa dijagrama "napon-dilatacija" na slici 18 uočava se smanjenje nagiba krive " σ - ϵ " sa povećanjem učešća recikliranog agregata, što ukazuje na drugačiji mehanizam loma u odnosu na beton sa prirodnim agregatom.

Ispitivanjem hemijske otpornosti, autori istraživanja, zaključili su da je polimer beton sa prirodnim agregatom otporan na dejstvo hlorovodonične kiseline, dok se sa povećanjem učešća recikliranog agregata ta otpornost značajno smanjuje.



Slika 18. "s-e" krive polimer betona sa recikliranim agregatom

Liu i Chu [13] su sprovedi eksperimentalno istraživanje ponašanja betona modifikovanih polimerima sa agregatom od recikliranog betona. Na osnovu dobijenih rezultata su zaključili da se mehaničke karakteristike betona sa recikliranim agregatom mogu poboljšati primenom polimera u količini od 7.5% u odnosu na masu cementa. povećanje čvrstoće pri pritisku iznosilo je 10%, povećanje čvrstoće na zatezanje pri savijanju 40%, a povećanje čvrstoća na zatezanje pri cepanju 35%.

Eui-Hwan, Young Soo i Jong-Ki su u okviru svog istraživanja [5] definisali efekte polimernog modifikatora cementa na fizička i mehanička svojstva polimer-modifikovanog maltera sa recikliranim agregatom. Kao modifikatori cementa korišćeni su lateks tipa stiren-butadien kaučuk (SBR) i poliakrilna esterska emulzija (PAE), a varirano je i učešće sitnog agregata dobijenog usitnjavanjem "starog" betona. Varirano je i učešće polimera, ali su zaključci izvedeni za količinu polimera od 20% u odnosu na masu cementa. Dodavanjem polimera značajno je smanjen vodocementni faktor mešavine, uz očuvanje konzistencije. Veći uticaj imao je polimer tipa PAE. Upijanje vode je za obe vrste polimernih modifikatora bitno redukovano. Čvrstoća pri pritisku polimer-modifikovanih maltera je smanjena u odnosu na referentni cementni malter. Čvrstoća na zatezanje pri savijanju maltera modifikovanog sa PAE emulzijom je veća u odnosu na maltere modifikovane sa polimerom SBR.

Eksperimentalnim ispitivanjem 30 različitih uzoraka polimer-modifikovanih maltera sa agregatom od recikliranog veštačkog mermera i agregatom od recikliranog betona, Eui-Hwan i Taek-Sung [9], istraživali su istovremeni uticaj polimera "poliakrilni estar" i dve vrste recikliranog agregata na osnovna fizička i mehanička svojstva. Ispitivali su sadržaj uvučenog vazduha, zapreminsku masu, upijanje vode, ukupnu zapreminu pora, čvrstoću pri pritisku, čvrstoću na zatezanje pri savijanju i otpornost na delovanje "zagrejane" vode. Analizom dobijenih rezultata autori istraživanja su zaključili da se čvrstoća pri pritisku smanjuje sa povećanjem sadržaja recikliranog agregata, dok se čvrstoća pri pritisku povećava sa povećanjem količine primenjenog polimera. Za uzorke, koji su bili pripremljeni od polimer-modifikovanog maltera sa agregatom od recikliranog veštačkog mermera, nakon izlaganja delovanju "zagrejane" vode, utvrdili su

da se značajno redukuju i čvrstoća pri pritisku i čvrstoća na zatezanje pri savijanju.

Corinaldesi i Moriconi su ispitivali betone u kojima je prirodni agregat u celosti zamenjen agregatom od recikliranog betona [30]. Betonske mešavine su spravljane sa letećim pepelom i silikatnom prašinom, kao mineralnim dodacima i sa superplastifikatorom na bazi akril polimera. Ispitivanjem su bile obuhvaćene tri vrste betona sa recikliranim agregatom, kod kojih je držan konstantan vodocementni faktor od 0.40 uz uslov obezbeđenja iste konzistencije (tečna konzistencija). Referentni beton je spravljan sa prirodnim agregatom sa istim granulometrijskom krivom kao i za reciklirani agregat, ali sa vodocementnim faktorom 0.56. Sa tako odabranim sastavom referentni beton je takođe imao tečnu konzistenciju. Na osnovu dobijenih rezultata, autori su zaključili da se primenom mineralnih dodataka i uz primenu superplastifikatora na bazi akril polimera može redukovati vodocementni faktor, čime se dobijaju betoni sa sličnim mehaničkim karakteristikama kao i kod referentnog betona. Upotreba recikliranog agregata, uz zamenju dela cementa letećim pepelom kao mineralnim dodatkom, mogu se značajno smanjiti troškovi proizvodnje betona i smanjiti štetni uticaji na životnu sredinu u odnosu na klasične betone.

5 ZAKLJUČAK

Na osnovu višegodišnjeg istraživanja različitih vrsta polimer-betonskih kompozita pokazalo se da je modifikacija betona pomoću polimera jedan od mogućih pravaca dobijanja materijala sa zadovoljavajućim mehaničkim karakteristikama, sa poboljšanom trajnošću u različitim sredinama i sa visokim estetskim vrednostima. Da bi se postigla željena svojstva betona neophodna su eksperimentalna istraživanja u cilju iznalaženja optimalne količine i vrste dodataka. Promene fizičko-mehaničkih karakteristika materijala kod upotrebe polimernih dodataka objašnjavaju se promenama u unutrašnjoj strukturi betona. Naime, poznato je da se uvođenjem polimernih dodataka modifikuje struktura betona, formiranjem dvostruke matrice. Prva je matrica produkata hidratacije cementa a druga polimerizovani skelet formiran od upotrebljenog polimernog dodatka. Najizraženiji efekti

ovih promena u odnosu na klasičan beton su povećanje čvrstoće pri zatezanju, duktilnosti, prijanjanja armature i betona, i poboljšanje svojstava koja povećavaju trajnost AB konstrukcija.

Sve veća potrošnja agregata i ograničenja u eksploataciji prirodnih sirovina za proizvodnju agregata, dovela su do primene alternativnih materijala. Ovi materijali su najčešće industrijski sekundarni proizvodi ili građevinski otpad, čije deponovanje predstavlja veliki ekološki problem. Jedan od takvih materijala je betonski krš, nastao rušenjem objekata. Poslednjih dvadeset godina se u pojedinim zemljama Evrope, Severne Amerike i u Japanu, stimuliše upotreba agregata od recikliranog betona od strane državnih institucija. U ovim zemljama su uvedeni nacionalni standardi za ovu vrstu agregata, a kao rezultat višegodišnjih istraživanja proizašle su i preporuke za spravljanje i primenu novih betona spravljenih sa agregatom od recikliranog betona.

Primenom agregata od recikliranog betona za spravljanje novog betona mogu se dobiti betoni zadovoljavajućih, pa čak i visokih performansi, što prvenstveno zavisi od čvrstoće pri pritisku betona čijim drobljenjem je dobijen agregat, a zatim i od poznavanja svih specifičnosti vezanih za projektovanje sastava i spravljanje ovih vrsta betona. Međutim, u praksi je za konstrukcijsku primenu, upotreba agregata od recikliranog betona limitirana prvenstveno zbog velikih varijacija u kvalitetu, što je direktna posledica porekla i stanja "starog" betona.

Poslednjih godina započeta su istraživanja betona i maltera u kojima se kombinuje mogućnost modifikacije strukture betona primenom polimera i upotreba agregata od recikliranog betona. Iako se radi o malom broju eksperimentalnih istraživanja, prvi rezultati ukazuju da se primenom polimera mogu "popraviti" pojedina svojstva betona sa agregatima od recikliranog betona, čime se otvaraju šire mogućnosti za primenu ovih vrsta betona u svakodnevnoj građevinskoj praksi.

ZAHVALNOST

U radu je prikazan deo istraživanja, u okviru tehnološkog projekta TR-16004 - "Istraživanje savremenih betonskih kompozita na bazi domaćih sirovina, sa posebnim osvrtom na mogućnosti primene betona sa recikliranim agregatom u betonskim konstrukcijama", čiju je realizaciju pomoglo Ministarstvo za nauku Republike Srbije.

6 LITERATURA

- [1] Akihama, S., Morita, H., Watanabe, S. and Chida, W.: Improvement of mechanical properties of concrete through the addition of polymer latex, *Polymers in concrete*, ACI SP-40, 1973.
- [2] Applications of polymer concrete, SP-69, American Concrete Institute, 1981, pp. 21-30.
- [3] Byung-Wan Jo, Seung-Kook Park, Jong-Chil Park: Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates, *Journal Construction and Building Materials* 22, 2008, pp. 2281–2291.
- [4] C.S. Poon, S.C. Kou, L. Lam: Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks, *Construction and Building Materials* 16, 2002, pp. 281–289.
- [5] Eui-Hwan, Hwang, Ko, Young Soo, Jeon, Jong-Ki: Effect of polymer cement modifiers on mechanical and physical properties of polymer-modified mortar using recycled waste concrete fine aggregate, *Journal of industrial and engineering chemistry*, 13 (3), 2007, pp. 387-394.
- [6] F. Tomosawa, T. Noguchi: New technology for the recycling of concrete - Japanese experience, *Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st century*, E & FN Spon, London, 2000, pp. 274–287.
- [7] Folić, R., Radonjanin, V.: Experimental research on polymer modified concrete, *Materials Journal*, ACI, VOL. 95, No. 4, July/August 1998, pp.463-470.
- [8] Guide for use of polymers in concrete, ACI Committee 548, American Concrete Institute, 1986.
- [9] Hwang, Eui-Hwan, Hwang, Taek-Sung: Comparison of physical properties of PAE polymer-modified mortars from recycled waste artificial marble and waste concrete fine aggregates, *Journal of industrial and engineering chemistry*, 13 (4), 2007, pp. 585-591.
- [10] J.S. Ryu: An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties, *Magazine of Concrete Research* 54 (1), 2003, pp. 7 – 12.
- [11] Knežević-Vuksanović, N.: Sintetička smola u građevinskim materijalima i konstrukcijama, Sarajevo, 1976.
- [12] Laliberte, J.: Application of polymer concrete in Canada, *Polymers in concrete*, Fourth International Congress, 1984.
- [13] Liu, H; Deng, A; Chu, J: Some studies on recycled aggregate concrete with and without polymer, 2nd International Conference for Disaster Mitigation and Rehabilitation, Nanjing, China, Proceedings, 2008, pp. 1019-1025.
- [14] M. C. Limbachiya, A. Koulouris, J. J. Roberts and A. N. Fried: Performance of Recycled Aggregate Concrete, *Rilem International Symposium on Environment – Conscious Materials and Systems for Sustainable Development*, 2004, pp. 127-136.
- [15] M. Tavakoli, P. Soroushian: Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate, *ACI Materials Journal* 93 (2), 1996, 182–190.
- [16] Malešev, M., Radonjanin, V., Dimča, M.: Research of possibility of application of recycled concrete as

- aggregate for new concrete - Part I, 4th International Scientific Meeting "INDIS 2006 - Planning, design, construction and renewal in the construction industry", Novi Sad, Proceeding, November 2006, pp. 495-504.
- [17] Muravljov, M., Denić, N., Jevtić, D., Kovačević, T.: Polimerima modifikovani malteri i betoni, Građevinski kalendar 1994-95, Beograd, str.127-211.
- [18] Ohama, Y., Kan, S.: Effects of Specimen Size on Strength and Drying Shrinkage of Polymer Modified Concretes, The Inter. Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 1982.
- [19] Ohama, Y.: Recent research and development of concrete-polymer composites in Japan, Polymers in concrete, Fourth International Congress, 1984.
- [20] Ohama, Y.: Study on properties and mix proportions of polymer modified mortars for buildings, Report of the Building Research Institute No-65, Tokyo, Japan, 1973.
- [21] R.S. Ravindrarajah, C.T. Tam: Methods of improving the quality of recycled aggregate concrete, Demolition and Reuse of Concrete and Masonry: Reuse of Demolition Waste, Chapman and Hall, London, 1988, pp. 575-584.
- [22] Radonjanin, V., Malešev, M., Dimča, M.: Research of possibility of application of recycled concrete as aggregate for new concrete - Part II, 4th International Scientific Meeting "INDIS 2006 – Planning, design, construction and renewal in the construction industry", Novi Sad, Proceeding, November 2006, pp. 505-516.
- [23] Radonjanin, V., Folić, R., Muravljov, M.: Eksperimentalno istraživanje nekih karakteristika betona modifikovanih polimerima, Naučni skup "Mehanika, Materijali i Konstrukcije, Srpska Akademija Nauka i Umetnosti, Zbornik radova, Beograd, 1996, Knjiga 2, str. 335-343.
- [24] Radonjanin, V.: Prilog istraživanju osnovnih karakteristika betona modifikovanih polimerima sa aspekta njihove primene u armiranobetonskim konstrukcijama, Magistarski rad, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, 1994, str. 289.
- [25] Ramachandran, V.S.: Concrete Admixtures Handbook, Noyes Publications, 1984.
- [26] Recycling of demolished concrete and masonry, RILEM, Report 6, Edited by T.C. Hansen, 1992., pp. 316.
- [27] Riley, V. R. and Razl, I.: Polymer additives for cement composites, A Review, Composites, 1974.
- [28] Sridharan, A., Nagaraj, T. S., Chandrakaran, S.: Dynamic Response of Latex Modified Concrete Machine Foundation, Magazine of Concrete Research, 42, 1990.
- [29] T.C. Hansen: Recycled aggregate and recycled aggregate concrete, Second State-of-the-art Report developments 1945–1985, Materials and structures, vol. 111, RILEM, 1986.
- [30] V. Corinaldesi, G. Moriconi: Admixtures on Performance and Economics of Recycled Aggregate Concrete, Publication SP 199-50, 2001, pp. 869-884.
- [31] Vivian W.Y. Tam, X.F. Gaob, C.M. Tam: Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, Cement and concrete research, 35, 2005, pp. 1195-1203.
- [32] Wagner, H. B.: Methylcellulose in Water-retentive Hydraulic Cements, Industrial and Engineering Chemistry, 1960.

**POLIMER-BETONSKI KOMPOZITI NA BAZI
RECIKLIRANOG AGREGATA**

Vlastimir RADONJANIN
Mirjana MALEŠEV
Ivan LUKIĆ
Vesna MILOVANOVIĆ

Jedan od načina dobijanja materijala visokih mehaničkih karakteristika, sa zadovoljavajućom trajnošću i sa visokim estetskim vrednostima je modifikacija betona pomoću polimera. U radu su objašnjeni osnovni pojmovi u polimernoj tehnologiji i principi modifikacije betona polimerima. Takođe je prikazan deo rezultata sopstvenog eksperimentalnog istraživanja betona modifikovanih polimerima, kao i rezultati istraživanja drugih autora. Najveći efekti polimerne modifikacije su povećanje čvrstoće betona na zatezanje, duktilnosti, athezije između armature i betona, i poboljšanje svojstava kojima se obezbeđuje povećana trajnost armiranobetonskih konstrukcija. Navedene su mogućnosti za primenu polimerbetonskih kompozita, koje su proverene u praksi razvijenih zemalja.

Koncept održivog razvoja, koji pored socioloških i ekonomskih aspekata, obuhvata uštedu energije, zaštitu okoline i očuvanje neobnovljivih prirodnih resursa, predstavlja strateško opredeljenje mnogih privrednih grana, među kojima se poseban doprinos očekuje od građevinarstva. Nedostatak prirodnog agregata u urbanim sredinama i sve veće rastojanje između nalazišta kvalitetnog prirodnog agregata i gradilišta prisilili su graditelje na razmatranje mogućnosti zamene prirodnog agregata recikliranim materijalima. Sa druge strane, u urbanim sredinama se često javlja velika količina starog betona čije uklanjanje i deponovanje predstavlja ekološki problem. U radu su ukratko opisani, najbitnija svojstva, kao i mogućnosti primene betona sa agregatom od recikliranog betona.

Poslednjih godina započeta su istraživanja betona i maltera u kojima se kombinuje mogućnost modifikacije strukture betona primenom polimera i upotreba agregata od recikliranog betona. Iako se radi o malom broju eksperimenata, prvi rezultati ukazuju da se primenom polimera mogu "popraviti" pojedina svojstva betona sa agregatima od recikliranog betona, čime se otvaraju šire mogućnosti za primenu ovih vrsta betona u svakodnevnoj građevinskoj praksi.

Ključne reči: beton, polimeri, agregat od recikliranog betona, svojstva betona

**POLYMER-CONCRETE COMPOSITE WITH
RECYCLED AGGREGATES**

Vlastimir RADONJANIN
Mirjana MALEŠEV
Ivan LUKIĆ
Vesna MILOVANOVIĆ

Concrete modification by polymers is one of possibilities to obtain material of high mechanical properties with satisfactory durability and also with high aesthetic values. Basic terms of polymer technology and rules of polymer concrete modification are described. Some results from own experimental research on polymer modified concrete, as well as testing results of other authors are presented. The greatest effects of polymer modification are on the increase of concrete tensile strength, ductility, bonding of reinforcement and concrete, and on improvement of properties contributing the durability of reinforcement structures. Possibilities for use of polymer-concrete composites, which are confirmed in practice of developed countries, are pointed out.

Concept of sustainable development, which beside sociological and economic aspects, include saving of energy, environment protection and preservation of a restorable natural resources, presents strategic determination of various economic sectors. In that way great contribution is expected from construction industry. Lack of natural aggregate in urban areas and increasing distance between deposits of high-quality natural aggregate and building sites, forced building contractors to analyze possibility of change of natural aggregate with recycled materials. On the other hand, huge amount of old concrete exists in urban areas and its removal and deposition is a big ecological problem. In the paper are briefly described basic properties, as well as possibilities of application of concrete with recycled aggregate.

Investigation of concrete and mortar in which possibility of modification of concrete structure and use of recycled concrete aggregate are combined, has been started last few years. Although, at the moment there are only few experiments, first results shows that with use of polymers certain properties of recycled aggregate concrete could be improved, that open wide possibilities for use of these concrete types in civil engineering practice.

Key words: concrete, polymer, recycled concrete aggregate, concrete properties

SOLUTION OF BOUNDARY VALUE PROBLEMS

Bujar EMRA

Milić MILIČEVIĆ

PRETHODNO SAOPŠTENJE

UDK: : 624.073.11.046 = 861

1 INTRODUCTION

The best way to solve any physical problem governed by a differential equation is to obtain the analytical solution. There are many situations, however, where the analytical solution is difficult to obtain. The region under consideration may be so irregular that it is mathematically impossible to describe the boundary. The configuration may be composed of several different materials whose regions are mathematically difficult to describe. Problems involving anisotropic materials are usually difficult to solve analytically, as are equations having nonlinear terms.

There are several procedures for obtaining a numerical solution to a differential equation. The methods can be separated into three basic groupings: (1) the finite difference method, (2) the variation method, and (3) the methods that weight a residual. These methods are briefly discussed in the following paragraphs.

1.1 Finite Difference Method

The finite difference method approximates the derivatives in the governing differential equation using difference equations. This method is useful for solving heat transfer and fluid mechanics problems and works well for two-dimensional regions with boundaries parallel to the coordinate axes. The method, however, is rather cumbersome when regions have curved or irregular boundaries, and it is difficult to write general computer programs for the method.

1.2 Variational Method

The variational approach involves the integral of functional that produces a number. Each new function produces a new number. The functional that produces the lowest number has the additional property of satisfying a specific differential equation. To help clarify this concept, consider the integral

$$\Pi = \int_0^l \left[\frac{D}{2} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 - Qy \right] dx \quad (1.1.)$$

The numerical value of Π can be calculated given a specific equation $y = f(x)$. The calculus of variations shows, however, that the particular equation $y = g(x)$, which yields the lowest numerical value for Π , is the solution to the differential equation

$$D \frac{d^2y}{dx^2} + Q = 0 \quad (1.2.)$$

with the boundary conditions $y(0) = y_0$ and $y(l) = y_1$.

The process can be reversed. Given a differential equation, an approximate solution can be obtained by substituting different trial functions into the appropriate functional. The trial functional that gives the minimum value of Π is the approximate solution.

The variation method is the basis for many finite element formulations, but it has a major disadvantage: It is not applicable to any differential equation containing a first derivative term.

1.3 Weighted Residual Methods

The weighted residual methods also involve an integral. In these methods, an approximate solution is substituted into the differential equation. Suppose that $y = h(x)$ is an approximate solution to (1.2.). Substitution gives

Adresa autora:

Bujar Emra, Građevinsko Arhitektonski Fakultet Univerziteta u Prištini

Prof. dr Milić Milićević

Građevinski fakultet Univerziteta u Nišu

$$D \frac{d^2 h(x)}{dx^2} + Q = R(x) \neq 0 \quad (1.3.)$$

Since $y = h(x)$ does not satisfy the equation. The weighted residual methods require that

$$\int_0^l W_i(x) R(x) dx = 0 \quad (1.4.)$$

The residual $R(x)$ is multiplied by a weighting function $W_i(x)$, and the integral of the product is required to be zero.

Galerkin's Method – uses the same functions for $W_i(x)$ that were used in the approximating equation. This approach is the basis of the finite element method for problems involving first-derivative terms. This method yields the same result as the variation method when applied to differential equations that are self-adjoint.

2 FORMULATIONS

The example is a simply supported beam subjected to concentrated moments at each end. The beam and its bending moment diagram are shown in Figure 1.1.

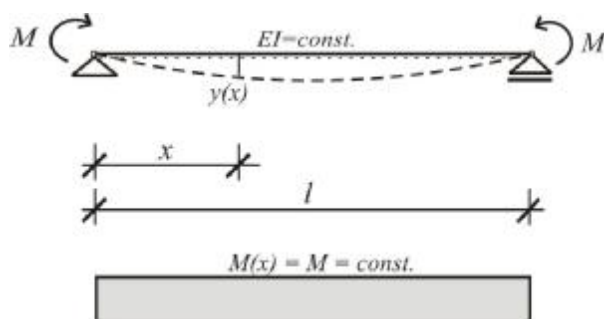


Fig. 1.1.

In this example, $M(x)$ has the constant value M , and $EI = \text{const.}$

The governing differential equation is

$$E \cdot I \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} = M(x) \quad (1.5.)$$

with the boundary conditions

$$y(0) = 0 \quad \text{and} \quad y(l) = 0 \quad (1.6.)$$

An approximate equation for the beam deflection is

$$y(x) = A \cdot \sin \frac{\pi \cdot x}{l} \quad (1.7.)$$

where A is an undetermined coefficient.

This solution is an acceptable candidate because it satisfies the boundary conditions $y(x) = y(l) = 0$ and has a shape similar to the expected deflection curve. The exact solution of the differential equation is

$$y(x) = \frac{M \cdot x}{2 \cdot E \cdot I} (x - l) \quad (1.8.)$$

When using **Variation Method**, then integral for differential equation (1.5.) is

$$\Pi = \int_0^l \left[\frac{E \cdot I}{2} \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 - M y \right] dx \quad (1.9.)$$

The value of A that makes (1.7.) the best approximation to the deflection curve is the value that makes Π a minimum. To evaluate A , Π must be written as a function of A and then minimized with respect to A . Noting that

$$\frac{dy}{dx} = \pi \cdot \frac{A}{l} \cdot \cos \frac{\pi \cdot x}{l}$$

we find that Π becomes

$$\Pi = \int_0^l \left[\frac{E \cdot I}{2} \left(\pi \cdot \frac{A}{l} \cdot \cos \frac{\pi \cdot x}{l} \right)^2 + M \cdot A \cdot \sin \frac{\pi \cdot x}{l} \right] dx$$

or

$$\Pi = A \cdot \left(A \cdot \frac{E \cdot I \cdot \pi^2}{4 \cdot l} + \frac{2 \cdot M \cdot l}{\pi} \right) \quad (1.10.)$$

Minimizing Π yields

$$\frac{\partial \Pi}{\partial A} = 2 \cdot \left(A \cdot \frac{E \cdot I \cdot \pi^2}{4 \cdot l} + \frac{M \cdot l}{\pi} \right) = 0$$

Solving gives

$$A = - \frac{4 \cdot M \cdot l^2}{\pi^3 \cdot E \cdot I} \quad (1.11.)$$

and the approximate solution is

$$y(x) = - \frac{4 \cdot M \cdot l^2}{\pi^3 \cdot E \cdot I} \cdot \sin \frac{\pi \cdot x}{l} \quad (1.12.)$$

This solution is identical to the solution obtained using **Galerkin's Method**.

3 REFERENCES

- [1] Apostol POCESKI, Mešoviti metod konačnih elemenata. Građevinska knjiga. Beograd, 1990.
- [2] Miodrag SEKULOVIĆ, Teorija Konstrukcija, Građevinska knjiga Beograd, 1992.
- [3] Conte S. D. and Carl deBoor, 1980. Elementary Numerical Analysis: An Algorithmic Approach, New York.
- [4] Miodrag SEKULOVIĆ, Metod konačnih elemenata, Građevinska knjiga, Beograd, 1988.
- [5] Applied Finite Element Analysis. Larry J. SEGERLIND, New York, 1984.

SUMMARY

SOLUTION OF BOUNDARY VALUE PROBLEMS

Bujar EMRA

Milić MILIČEVIĆ

A numerical method can be used to obtain an approximate solution when an analytical solution cannot be developed. All numerical solutions produce values at discrete points for one set of the independent parameters. The numerical solution, however, are more desirable than no solution at all. The calculated values provide important information about the physical process even though they are at discrete points.

REZIME

REŠENJE VREDNOSTI GRANIČNIH PROBLEMA

Bujar EMRA

Milić MILIČEVIĆ

Rešavanje diferencijalnih jednačina numeričkim metodama koristi se kada ne postoji razvijeno analitičko rešenje, iako numeričke metode daju rešenja u diskretnim tačkama za jedan set nezavisnih parametara. Međutim, numeričko rešenje je poželjnije nego nemati nikakvo rešenje. Tako sračunate vrednosti obezbeđuju vredne informacije o fizičkim procesima iako su one poznate samo u diskretnim tačkama.

UPUTSTVO AUTORIMA

Prihvatanje radova i vrste priloga

U časopisu Materijali i konstrukcije štampaće se neobjavljeni radovi ili članci i konferencijska saopštenja sa određenim dopunama ili bez dopuna, prema odluci Redakcionog odbora, a samo izuzetno uz dozvolu prethodnog izdavača prihvaćaju se i objavljeni rad. Vrste priloga autora i saradnika koji će se štampati su: originalni naučni radovi, prethodna saopštenja, pregledni radovi, stručni radovi, konferencijska saopštenja (radovi sa naučno-stručnih skupova), kao i ostali prilozi kao što su: prikazi objekata i iskustava - primeri, diskusije povodom objavljenih radova i pisma uredništvu, prikazi knjiga i zbornika radova, kao i obaveštenja o naučno-stručnim skupovima.

Originalni naučni rad je primarni izvor naučnih informacija i novih ideja i saznanja kao rezultat izvornih istraživanja uz primenu adekvatnih naučnih metoda. Dobijeni rezultati se izlažu kratko, jasno i objektivno, ali tako da poznavalac problema može proceniti rezultate eksperimentalnih ili teorijsko numeričkih analiza i tok razmišljanja, tako da se istraživanje može ponoviti i pri tome dobiti iste ili rezultate u okvirima dopuštenih odstupanja, kako se to u radu navodi.

Prethodno saopštenje sadrži prva kratka obaveštenja o rezultatima istraživanja ali bez detaljnih objašnjenja, tj. kraće je od originalnog naučnog rada. U ovu kategoriju spadaju i diskusije o objavljenim radovima ako one sadrže naučne doprinose.

Pregledni rad je naučni rad koji prikazuje stanje nauke u određenoj oblasti kao plod analize, kritike i komentara i zaključaka publikovanih radova o kojima se daju svi neophodni podaci pregledno i kritički. Navode se sve bibliografske jedinice korišćene u obradi tematike, kao i radovi koji mogu doprineti rezultatima daljih istraživanja. Ukoliko su bibliografski podaci metodski sistematizovani, ali ne i analizirani i raspravljani, takvi pregledni radovi se klasifikuju kao stručni pregledni radovi.

Stručni rad predstavlja koristan prilog u kome se iznose poznate spoznaje koje doprinose širenju znanja i prilagođavanja rezultata izvornih istraživanja potrebama teorije i prakse. On sadrži i rezultate razvojnih istraživanja.

Konferencijsko saopštenje ili rad sopsšten na naučno-stručnom skupu koji mogu biti objavljeni u izvornom obliku ili ih autor, u dogovoru sa redakcijom, bitno preradi i proširi. To mogu biti naučni radovi, naročito ako su sopsštenja po pozivu Organizatora skupa ili sadrže originalne rezultate prvi put objavljene, pa ih je korisno uz određene dopune učiniti dostupnim široj stručnoj javnosti. Štampaće se i stručni radovi za koje Redakcioni odbor oceni da su od šireg interesa.

Sinopsis-opsežni sažetak (Extended abstract) predstavlja skraćen članak na dve strane font 10pt, koji će se štampati na engleskom jeziku za članke pisane na srpskom, a na srpskom jeziku za članke pisane na engleskom jeziku. U njemu se daje sažet opis predmeta i cilja rada, primenjenih metoda i postupaka istraživanja, prikazuju svi originalni rezultati potkrepljeni ilustracijama, kao i popis citirane literature. Objavljivanje Sinopsisa ne isključuje objavljivanje sažetka-rezimea od oko 150 reči uz tekst članka.

Ostali prilozi su prikazi objekata, tj. njihove konstrukcije i iskustava-primeri u građenju i primeni različitih materijala, diskusije povodom objavljenih radova i pisma uredništvu, prikazi knjiga i zbornika radova, kao i obaveštenja o naučno-stručnim skupovima.

Autori uz rukopis predlažu kategorizaciju članka. Svi radovi pre objavljivanja se recenziraju, a o prihvatanju za publikovanje o njihovoj kategoriji konačnu odluku donosi Redakcioni odbor. Recenzenti mogu, kada je to potrebno, direktno kontaktirati sa autorima, da bi se pre pisanja konačne recenzije otklonili eventualni nedostaci u radu. Da bi se ubrzao postupak prihvatanja radova za publikovanje, potrebno je da autori uvažavaju Uputstva za pripremu radova koja su navedena u daljem tekstu.

Uputstva za pripremu rukopisa

Rukopis slati, na adresu Redakcionog odbora, otkucan jednostrano na listovima A-4 sa marginama od 31 mm (gore i dole) a 20 mm (levo i desno), u Wordu fontom Arial sa 12 pt i jednu kopiju svih delova rada i priloga. Uz rukopis se predaje i elektronska kopija teksta fajlova, na disketi ako je

sadržaj pretežno tekst, ili na CD-u ako ima više slika i grafičkih priloga. Autor je obavezan da čuva jednu kopiju rukopisa kod sebe zbog eventualnog oštećenja ili gubitka rukopisa.

Svaka stranica treba da bude numerisana, a optimalni obim članka je oko 16 stranica (30000 slovnih mesta) uključujući slike, fotografije, tabele i popis literature. Za radove većeg obima potrebna je saglasnost Redakcionog odbora.

Naslov rada treba sa što manje reči (poželjno osam, a najviše do jedanaeset) da opiše sadržaj članka. U naslovu ne koristiti skraćenice ni formule. U radu se iza naslova daju ime i prezime autora, a titule i zvanja, kao i ime institucije u podnožnoj napomeni. Autor za kontakt daje telefone, faks i adresu elektronske pošte, a za ostale autore poštansku adresu.

Uz sažetak (rezime) od oko 150 do 200 reči, na srpskom i engleskom jeziku daju se ključne reči (do deset). To je jezgrovit prikaz celog članka i čitaocima omogućuje uvid u njegove bitne elemente.

Rukopis se deli na poglavlja i potpoglavlja uz numeraciju, po hijerarhiji, arapskim brojevima. Svaki rad ima uvod, sadržinu rada sa rezultatima, analizom i zaključcima. Na kraju rada se daje popis literature.

Kod svih dimenzionalnih veličina obavezna je primena međunarodnih SI mernih jedinica.

Formule i jednačine treba pisati pažljivo vodeći računa o indeksima i eksponentima. Autori uz izraze u tekstu definišu simbole redom kako se pojavljuju, ali se može dati i posebna lista simbola u prilogu.

Prilozi (tabele, grafikoni, sheme i fotografije) rade se u crno-beloj tehnici, u formatu koji obezbeđuje da pri smanjenju na razmere za štampu, po širini jedan do dva stupca (8cm ili 16.5cm), a po visini najviše 24.5cm, ostanu jasni i čitljivi, tj. da veličine slova i brojeva budu najmanje 1.5mm. Originalni crteži treba da budu kvalitetni i u potpunosti pripremljeni za presnimavanje. Mogu biti i dobre, oštre i kontrastne fotokopije. Koristiti fotografije, u crno-beloj tehnici, na kvalitetnoj hartiji sa oštrim konturama, koje omogućuju jasnu reprodukciju. Skraćenice u prilogima koristiti samo izuzetno uz obaveznu legendu. Prilozi se posebno označavaju arapskim brojevima, prema redosledu navođenja u tekstu. Objašnjenje tabela daje se u tekstu.

Potrebno je dati spisak svih skraćenica korišćenih u tekstu.

U popisu literature na kraju rada daju se samo oni radovi koji se pominju u tekstu. Citirane radove treba prikazati po azbučnom redu. Literaturu u tekstu označiti arapskim brojevima u uglastim zagradama, kako se navodi i u Popisu citirane literature, napr [1]. Svaki citat u tekstu mora se naći u Popisu citirane literature i obrnuto svaki podatak iz Popisa se mora navesti u tekstu.

U Popisu literature se navode prezime i inicijali imena autora, zatim potpuni naslov citiranog članka, iza toga sledi ime časopisa, godina izdavanja i početna i završna stranica (od - do). Za knjige iza naslova upisuje se ime urednika (ako ih ima), broj izdanja, prva i poslednja stranica poglavlja ili dela knjige, ime izdavača i mesto objavljivanja, ako je navedeno više gradova navodi se samo prvi po redu. Kada autor citirane podatke ne uzima iz izvornog rada, već ih je pronašao u drugom delu, uz citat se dodaje «citirano prema...». Neobjavljeni članci mogu se pominjati u tekstu kao «usmeno saopštenje».

Autori su odgovorni za izneseni sadržaj i moraju sami obezbediti eventualno potrebne saglasnosti za objavljivanje nekih podataka i priloga koji se koriste u radu.

Ukoliko rad bude prihvaćen za štampu, autori su dužni da, po uputstvu Redakcije, unesu sve ispravke i dopune u tekstu i prilogima.

Za detaljnija tehnička uputstva za pripremu rukopisa autori se mogu obratiti Redakcionom odboru časopisa.

Rukopisi i prilozi objavljenih radova se ne vraćaju. Sva eventualna objašnjenja i uputstva mogu se dobiti od Redakcionog odbora.

Radovi se mogu slati i na e-mail: folic@uns.ns.ac.yu ili miram@uns.ns.ac.yu

