

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 učestvostručena. 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, nametnuo 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 obavija 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. opter. (dani)	f_{bp} (MPa)	f_{bz} (MPa)	M_{cr} (kNm)	w_{av} (mm)	δ_{200} (mm)	M_y (kNm)	M_u (kNm)
		pod.	\square (%)								
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 pravljen 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 pravljen 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 na 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 armiranobeton-
skih greda od betona na bazi recikliranog agregata, u
fazi eksploatacije i fazi loma. Analiza je izvršena pre
svoga 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 recikli-
ranih agregata pravljani su sa istim efektivnim vodo-
cementnim faktorom kao i odgovarajući betoni na bazi
prirodnih agregata, odnosno veoma slične recepture.
Zbog toga, dobijene čvrstoće pri pritisku BRA i odgo-
varajućih 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 (KRSP) 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

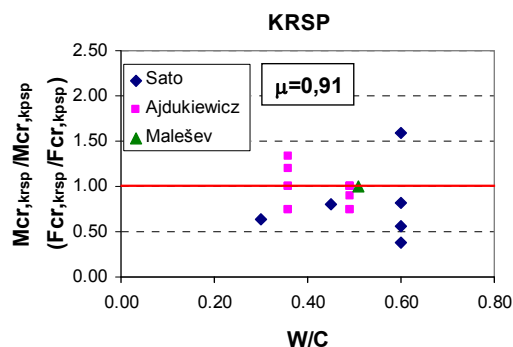
Od veličina koje karakterišu ponašanje armirano-
betonskih elemenata u eksploataciji, u ispitivanjima su
praćene sledeće: opterećenje koje izaziva pojavu prslina,
razmak i širina prslina i veličina ugiba.

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 poduž-
nom 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).

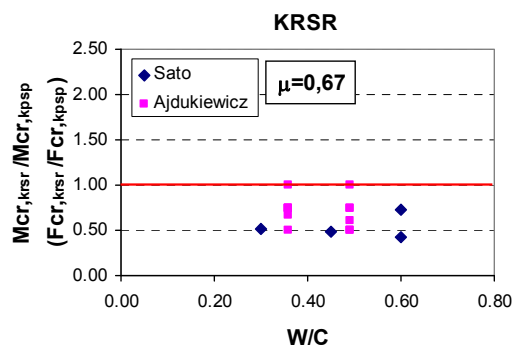
Srednja vrednost ovog odnosa za sve ispitivane
uzorke iznosi 0,91, odnosno momenat (sila) pojave
prslina kod greda od betona sa recikliranim krupnim
agregatom (KRSP) je u proseku 9% manji od momenta
(sile) pojave prslina odgovarajućih greda od BPA
(KPSP).

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

ovom slučaju, srednja vrednost ovog odnosa za sve ispi-
tivane uzorke je nepovoljnija i iznosi 0,67, odnosno
momenat (sila) pojave prslina kod greda od betona sa
recikliranim krupnim agregatom i sitnim (KRSP) 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

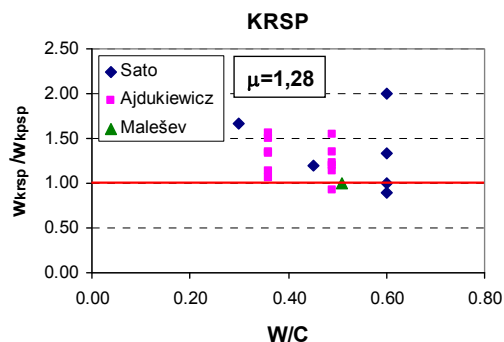


Slika 2. Odnos momenta (sile) pri pojavi prslina greda od BRA (krupan i sitan agregat recikliran) i od BPA

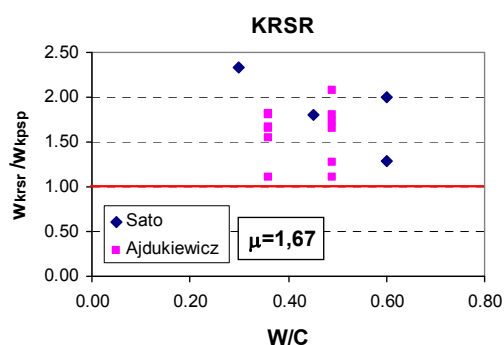
Za nivo eksploatacionog opterećenja, merene širine
prslina gotovo uvek su veće kod greda od betona na
bazi recikliranih agregata nego kod greda od odgo-
varajućeg BPA betona. Na slici 3 prikazan je odnos
prosečne merene širine prslina [7] i [13], odnosno
merene sabrane širine svih prslina sa obe strane 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 osred-
njena širina prslina kod greda od betona sa recikliranim
krupnim agregatom je u proseku 28% veća od osred-
njene 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 (KRSP) i istih tih veličina kod
odgovarajućih greda od betona na bazi prirodnog
agregata (KPSP), sa istim procentom armiranja poduž-
nom 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



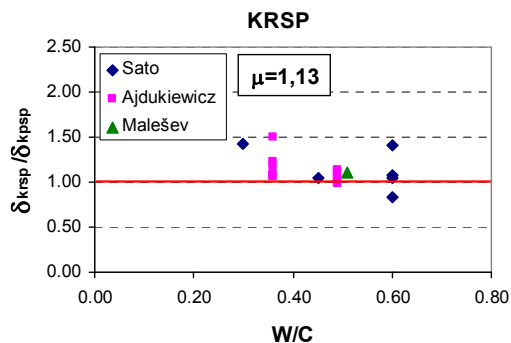
Slika 4. Odnos merenih širina prslina greda od BRA (krupan i sitan agregat recikliran) i od BPA

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

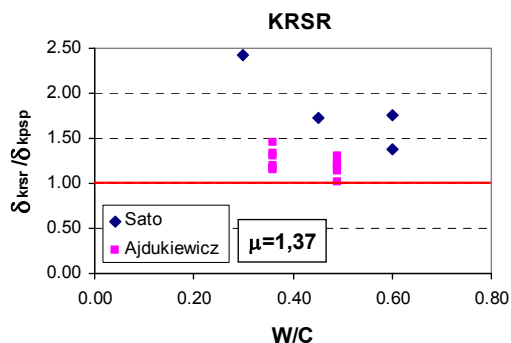
Mereni ugibi greda pod uticajem kratkotrajnog eksploatacionog opterećenja su takođe, gotovo bez izuzetka, veći kod greda od BRA. Na slici 5 prikazan je odnos merenog ugiba u sredini greda od betona sa recikliranim krupnim agregatom (KRSP) i merenog ugiba u sredini odgovarajućih greda od betona na bazi 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).



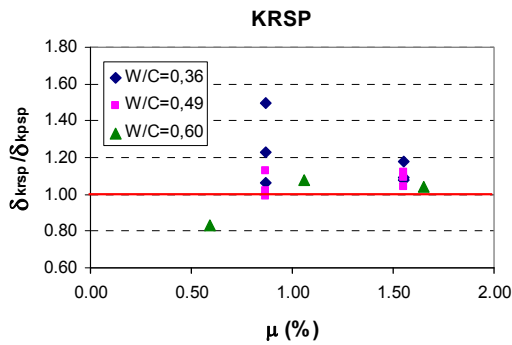
Slika 5. Odnos merenih ugiba greda od BRA (krupan agregat recikliran) i od BPA



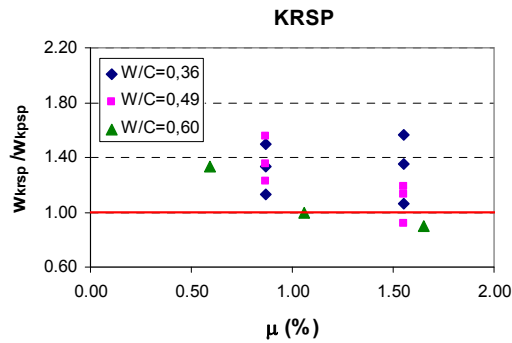
Slika 6. Odnos merenih ugiba greda od BRA (krupan i sitan agregat recikliran) i od BPA

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.

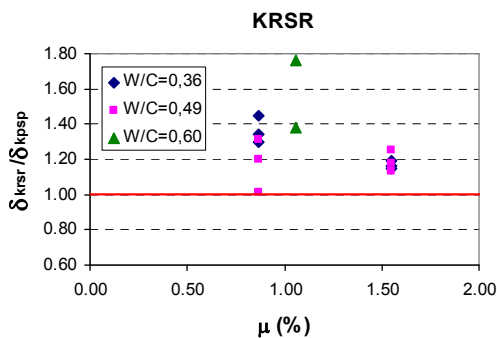
Kod greda od betona sa recikliranim i krupnim i sitnim agregatom, ovaj trend se ne može uočiti. Naime, odstupanja u odnosu na ponašanje odgovarajućih greda od BPA betona slična su za sve ispitivane kvalitete betona. Na slikama 9 i 10 prikazan je odnos merenih ugiba, odnosno merenih širina prslina greda 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.



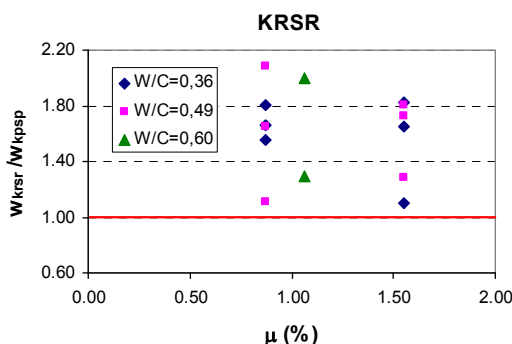
Slika 7. Odnos merenih ugiba greda od BRA (krupan agregat recikliran) i od BPA u funkciji čvrstoće pri pritisku



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

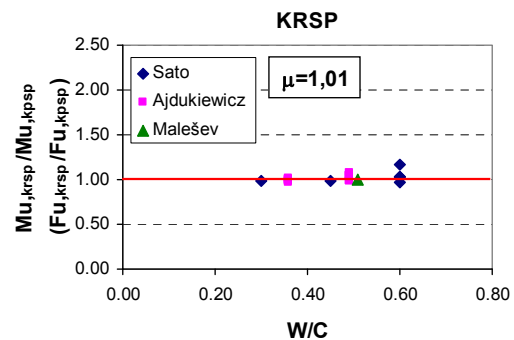


Slika 10. Odnos merenih širina prslina greda od BRA (krupan i sitan agregat recikliran) i od BPA u funkciji čvrstoće pri pritisku

2.2.2 Faza loma

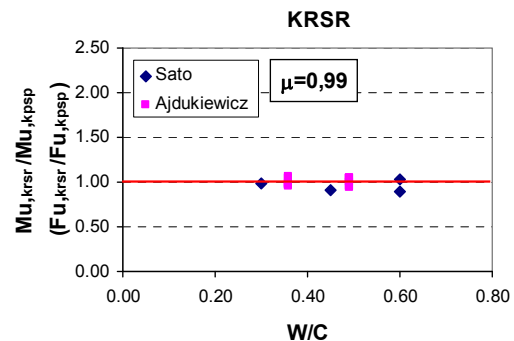
Granična nosivost greda od betona na bazi recikliranog agregata praktično se ne razlikuje od granične nosivosti odgovarajućih greda od betona na bazi prirodnog agregata.

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.



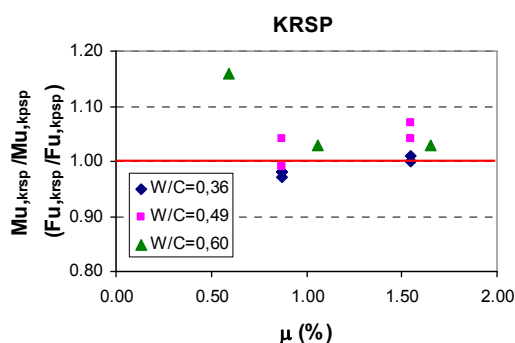
Slika 11. Odnos merenog momenta (sile) loma greda od BRA (krupan agregat recikliran) i od BPA

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.



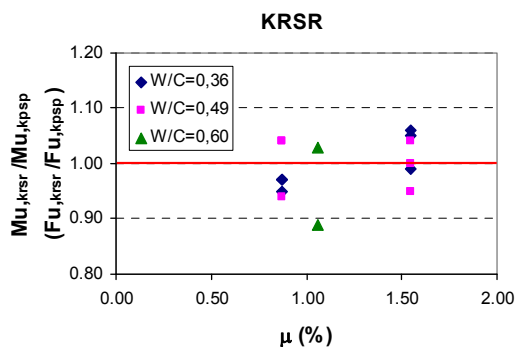
Slika 12. Odnos merenog momenta (sile) loma greda od BRA (krupan i sitan agregat recikliran) i od BPA

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]

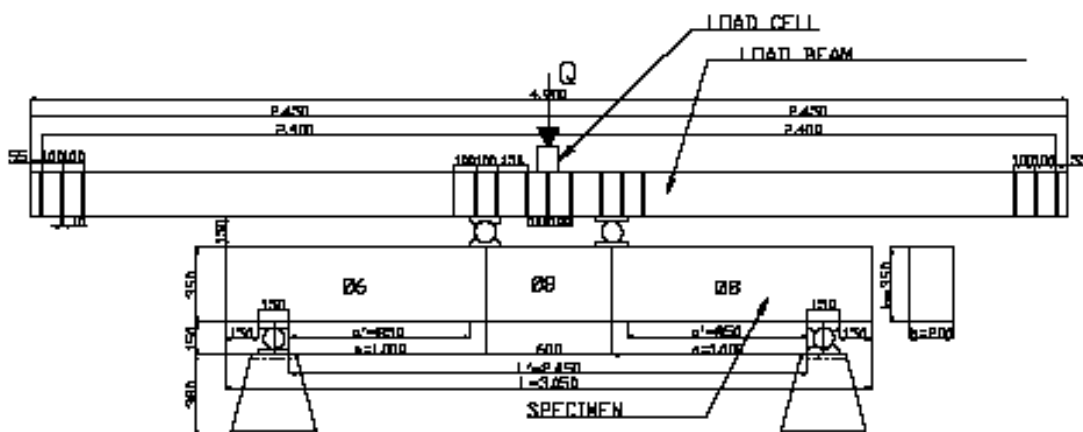
Oznaka	W/C	f_{bpm} (MPa)	f_{bzm} (MPa)	b (mm)	h(mm)	a/h	ρ_u (%)	ρ (%)	V_u (kN)	V_{cr} (kN) približno	V_y (kN)
KP-1-SP-55-000	0,55	41,91	2,64	200,00	309,00	3,32	0,000	2,92	100,50	96,00	
KR25-1-SP-55-000	0,55	42,38	3,13	200,00	309,00	3,32	0,000	2,92	104,00	85,00	
KR50-1-SP-52-000	0,52	41,34	3,22	210,00	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 predviđivom 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 armiranobeton-skih 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

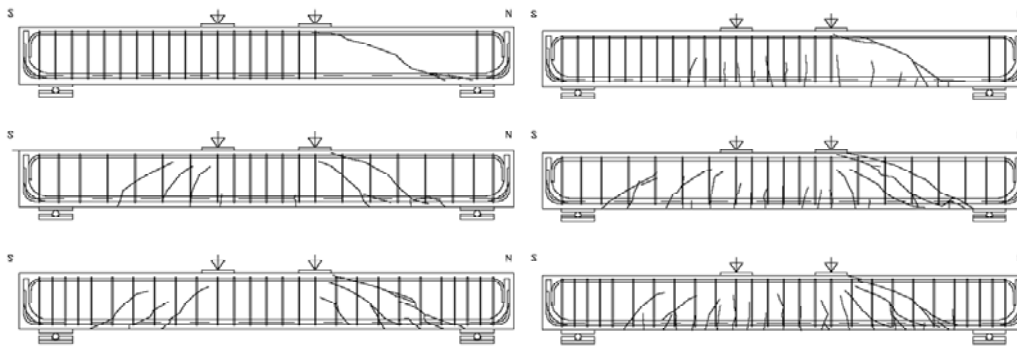
nezavisno od procenta zamene prirodnog recikliranim agregatom.

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 je količina 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



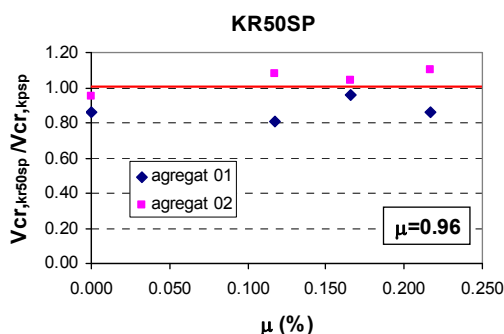
Slika 16. Slika prslina pri lomu greda od BRA i greda od BPA [14]

55-000

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)

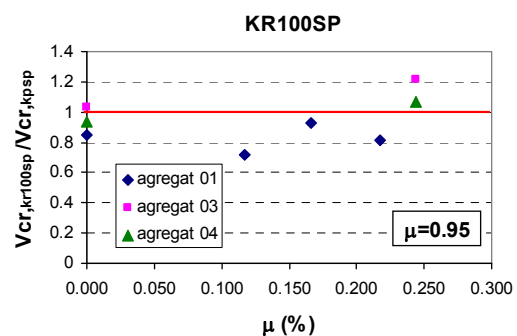
Na slici 17 prikazan je odnos merene vrednosti sile koja izaziva formiranje prve dijagonalne prsline greda od betona sa 50% recikliranog krupnog agregata (KR50SP) i iste te veličine kod odgovarajućih greda od betona na bazi prirodnog agregata (KPSP), sa istim procentom armiranja uzengijama, a u funkciji 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

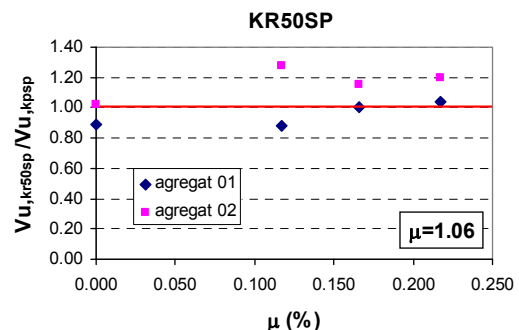
Kod greda od betona sa 100% recikliranog krupnog agregata (KR100SP), sila koja izaziva formiranje dijagonalne prsline takođe je manja nego kod odgovarajućih greda od betona na bazi prirodnog agregata, i to u pro-

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



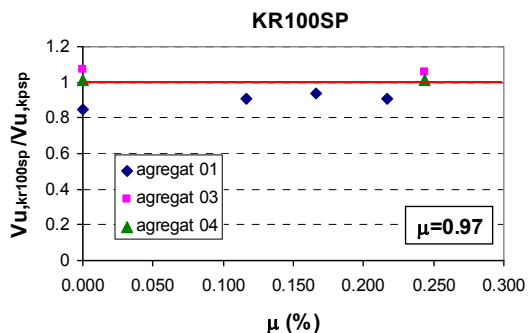
Slika 18. Odnos sile koja izaziva kosu prslinu greda od BRA (100% recikliranog krupnog agregata) i greda od BPA

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.



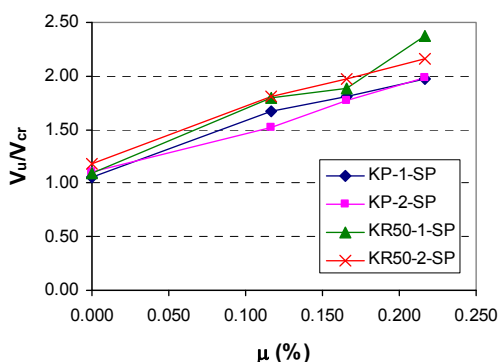
Slika 20. Odnos sile loma greda od BRA (100% recikliranog krupnog agregata) i greda od BPA

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 krtoq loma. 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.

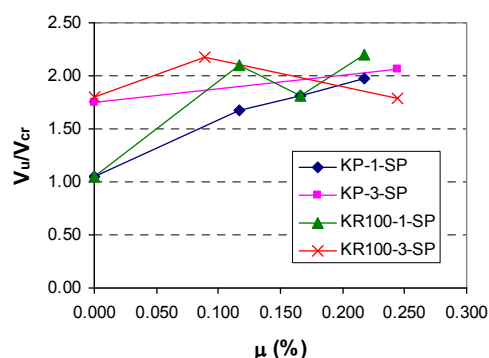
Na slici 21 prikazana je zavisnost odnosa sile loma i sile koja izaziva formiranje dijagonalne prsline u funkciji procenta armiranja uzengijama, za nekoliko različitih vrsta



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 recikliranom 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 Insitute, 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, Vo.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 Insitute, 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-Fonteboia B., Martinez-Abella F.: Shear strenght 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.