

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 **BRBS** (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

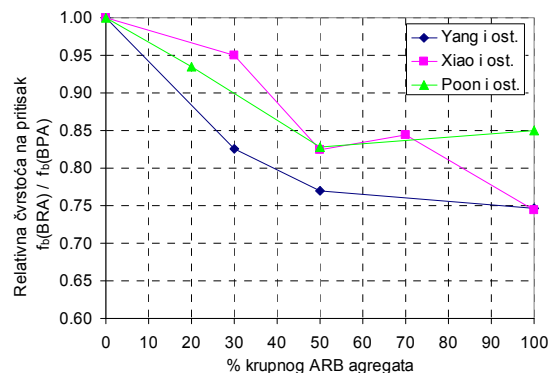
2 ČVRSTOĆA PRI PRITISKU

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

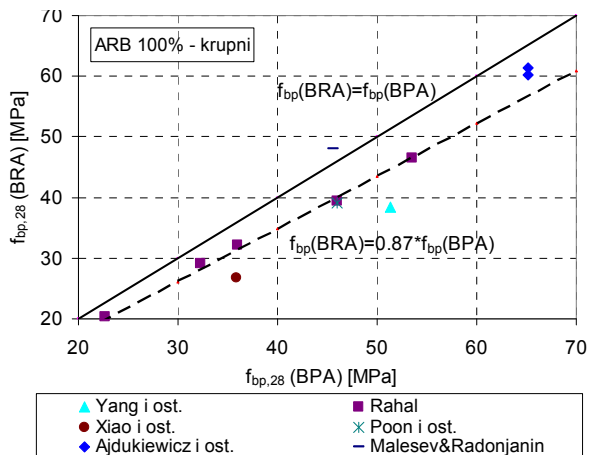
Nakon zaključka Hansena o uticaju količine recikliranog agregata na čvrstoću BRA betona, sprovedeno je još nekoliko istraživanja sa istim ciljem. Osim radova koji u principu potvrđuju navode Hansena i koji će kasnije biti prikazani, ima i eksperimenata sa rezultatima koji govore o značajnijem smanjenju 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. Crkasta 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:

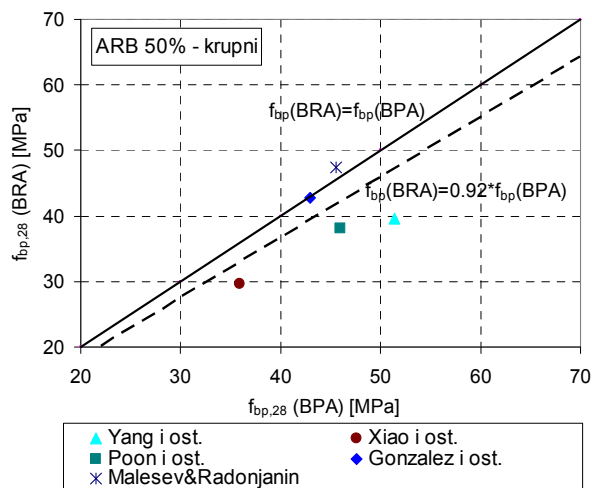
$f_{bp,28}(BRA)$ – čvrstoća pri pritisku BRAK betona sa 50% ARB agregata,

$f_{bp,28}(BPA)$ – 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%.

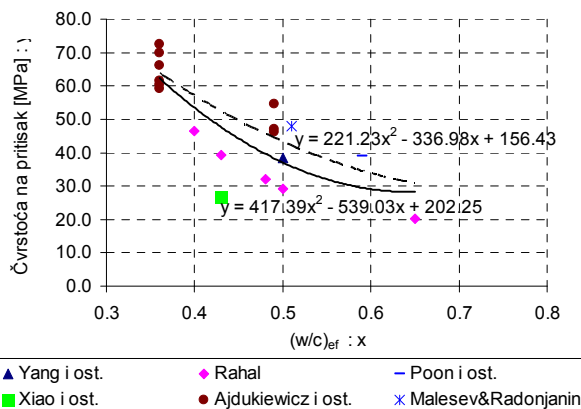
Iz postojećih istraživanja nije bilo moguće izvršiti sličnu analizu za još neke značajne procenete zamene prirodnog ARB agregatom, npr. 30%. O takvim betonima se može zaključiti samo posredno, na osnovu slika 2 i 3 i imajući u vidu trend čvrstoće sa povećanjem (ili smanjenjem) količine krupnog ARB agregata. 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. Crkastom 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%.

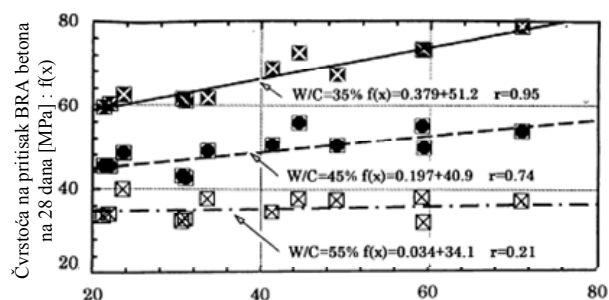
Eksperimenti čiji se rezultati nalaze u okviru granica koje je naveo Hansen [1], urađeni su u Španiji [3], Turskoj [13] i Japanu [2]. S obzirom da iz pomenutih

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 ciljana 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.

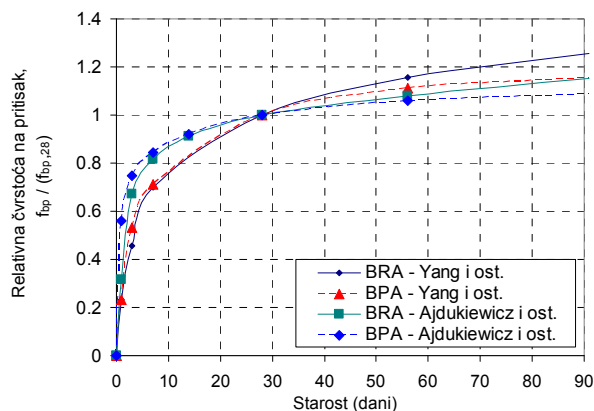
Obimno eksperimentalno ispitivanje Doshu-a i ostalih [2] potvrdilo je zaključke iz Izveštaja Hansena koji se tiču odnosa kvaliteta recikliranog agregata, tj. čvrstoće pri pritisku originalnog betona i čvrstoće pri pritisku betona na bazi krupnog recikliranog agregata. Ukoliko se uporede čvrstoće betona 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 pritisak 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).



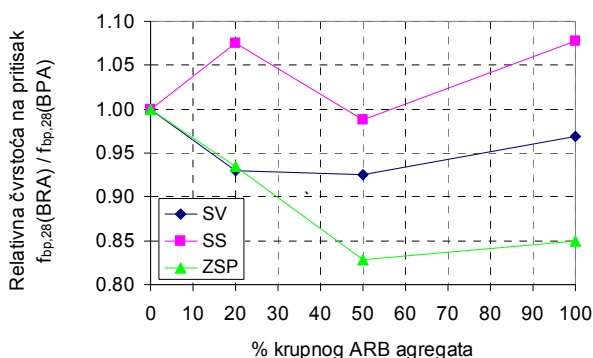
Slika 6. Dijagram relativnog prirasta čvrstoće pri pritisku BRA i BPA betona tokom vremena

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 dozaže, 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 izdavanjem vode na površini uzorka prilikom vibriranja svežeg betona (engl. *bleeding*). Voda iz agregata dolazi u kontakt sa cementnom 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.

Izdavanje 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,

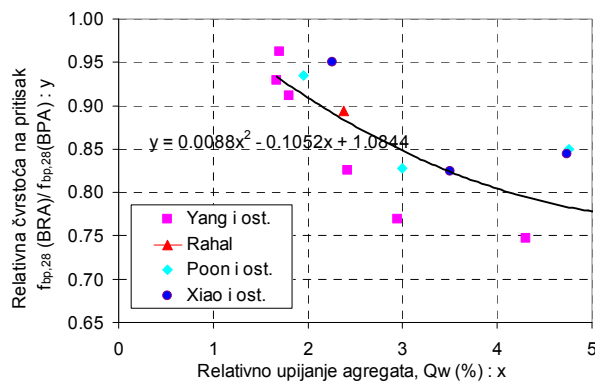
a, b - količine prirodnog krupnog i sitnog agregata

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 izdavanje 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.



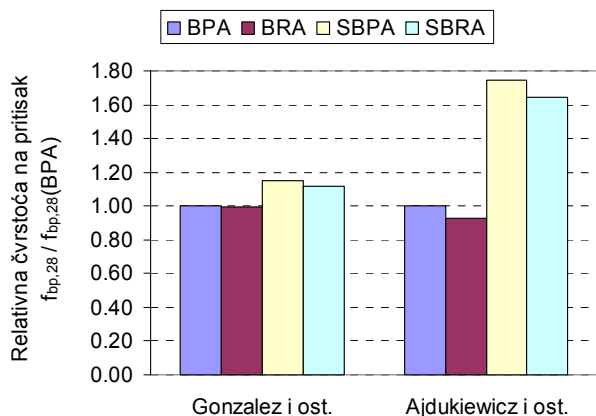
Slika 8. Dijagram zavisnosti relativne čvrstoće pri pritisku BRA betona od relativnog upijanja agregata

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

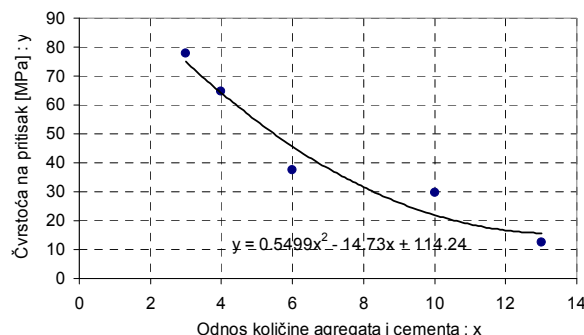
Gonzalez-Fonteboa i Martinez-Abella [6] su poredili čvrstoće pri pritisku četiri betona- BPA, BRA betona sa 50% krupnog recikliranog agregata, dok su još dve betonske mešavine spravljene od pomenutih BPA i BRA betona dodavanjem 8% silikatne prašine Portland cementu. Ispitivanje je izvršeno pri starosti 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.

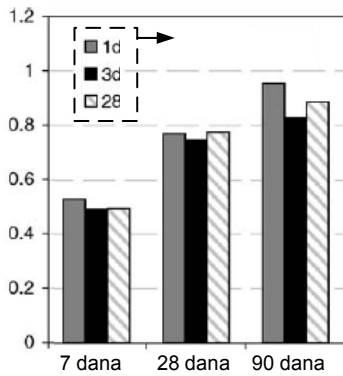
2.5 Uticaj ostalih faktora

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 odlaže 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.

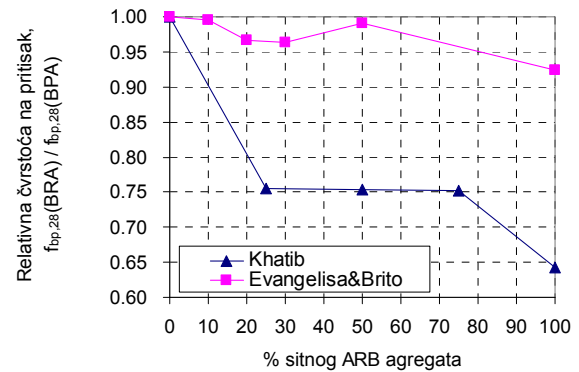


Slika 11. Dijagram relativne čvrstoće pri pritisku BRAK betona (100% ARB), u zavisnosti od starosti originalnog betona

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

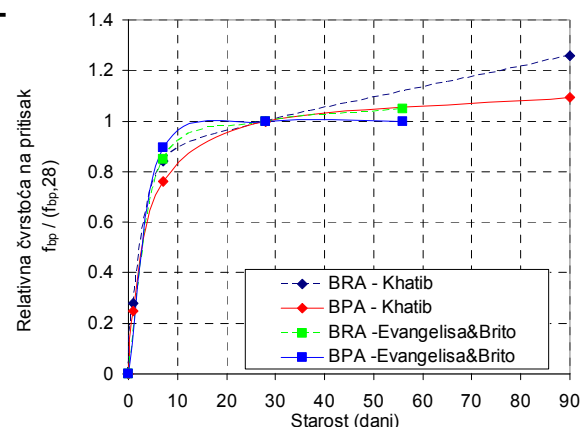
Nakon što je Hansen [1] izneo zaključak da sitna frakcija recikliranog agregata ($d < 4$ mm) ima uglavnom štetan uticaj na fizičko-mehaničke karakteristike betona, u velikoj većini istraživanja BRA betona podrazumevala se primena prirodne sitne frakcije (peska) i različitih procenata krupnog ARB agregata. Ovdje 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 i 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

$$f_{bp}(BRA) / f_{bp}(BPA)$$



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.

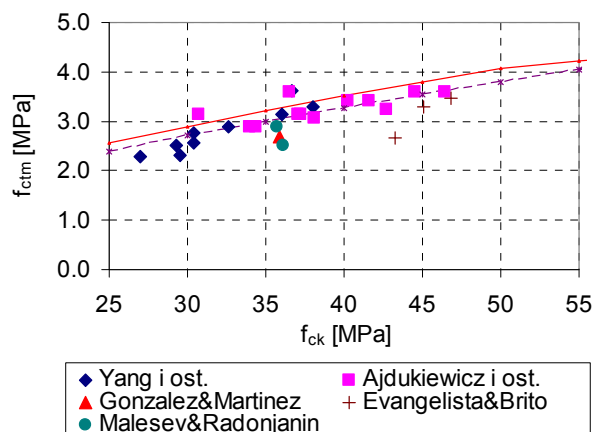
Rezultati koje su prezentovali Poon i Lam [7] takođe idu u prilog tezi da korišćenje recikliranog agregata umesto prirodnog nema značajan uticaj na čvrstoću pri zatezanju. Ipak, oni su zaključili da zatezna čvrstoća zavisi od odnosa količine agregata i cementa – sa povećanjem ovog odnosa smanjuje se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

$$\begin{aligned} f_{ctm} &= 0.30 \times f_{ck}^{2/3}, \text{ za klase do C50/60} \\ f_{ctm} &= 2.12 \times \ln(1 + (f_{cm}/10)), \text{ za klase iznad C50/60} \end{aligned} \quad (3)$$

gde je:

f_{ctm} – 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:

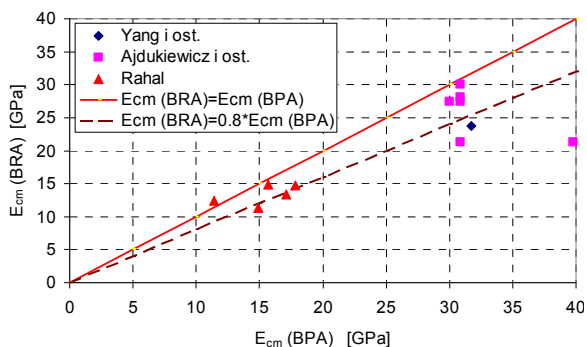
$$f_{ctm} = 0.28 \times f_{ck}^{2/3} \quad (4)$$

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 (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 crkasta 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:

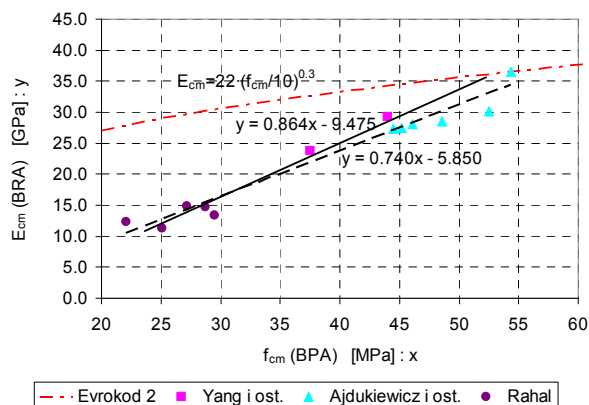
f_{cm} – srednja vrednost čvrstoće betona na pritisak u MPa, probno telo cilindar

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-Fontebova, 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