

Primljen / Received: 23.7.2015.

Ispravljen / Corrected: 8.9.2016.

Prihvaćen / Accepted: 17.1.2017.

Dostupno online / Available online: 10.12.2017.

Ponašanje pri zamoru uslijed savijanja i mehanička svojstva betona s dodatkom gumenog granulata

Autori:



Mr.sc. **R. Bharathi Murugan**, dipl.ing.građ.
Nacionalni tehnološki institut u Trichyu
Odjel za građevinarstvo, Tamil Nadu, Indija
rbbmccivil@gmail.com



E. Rama Sai, dipl.ing.građ.
Nacionalni tehnološki institut u Trichyu
Odjel za građevinarstvo, Tamil Nadu, Indija
ramsai.eeda@gmail.com



Prof.dr.sc. **C. Natarajan**, dipl.ing.građ.
Nacionalni tehnološki institut u Trichyu
Odjel za građevinarstvo, Tamil Nadu, Indija
nataraj@nitt.edu



Prof.dr.sc. **Shen-En Chen**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Sjeverne Karoline
Odjel za građevinarstvo i okoliš
schen12@unc.edu

Prethodno priopćenje

R.Bharathi Murugan, E. Rama Sai, C. Natarajan, Shen-En Chen

Ponašanje pri zamoru uslijed savijanja i mehanička svojstva betona s dodatkom gumenog granulata

U radu se prikazuju rezultati eksperimentalnog ispitivanja betona s dodatkom gumenih granulata kako bi se utvrdila mehanička svojstva kao što su tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća cijepanjem te čvrstoća betona na savijanje. U istraživanju je korišten beton razreda tlačne čvrstoće C35/45, pri čemu je 5 do 25 % volumena pijeska zamijenjeno gumenim granulatom iz otpadnih guma, a dobiveni rezultati uspoređeni su s rezultatima ispitivanja običnog betona. Rezultati pokazuju malo poboljšanje u ponašanju od 1,46 % i 1,96 % s 5 %, odnosno 10 % gumenog granulata.

Ključne riječi:

gumeni granulati iz otpadnih guma, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća cijepanjem, čvrstoća na savijanje

Preliminary note

R.Bharathi Murugan, E. Rama Sai, C. Natarajan, Shen-En Chen

Flexural fatigue performance and mechanical properties of rubberized concrete

Results of experimental investigation of concrete containing waste tyre crumb rubber are presented in the paper to determine mechanical properties such as the compressive strength, splitting tensile strength, and flexural strength of concrete. The C35/45 compressive strength class concrete was used in this study. Five to twenty-five per cent of sand volume was replaced with waste tyre crumb rubber, and the results were compared to ordinary concrete test results. The results revealed that the performance slightly increased by 1.46 % and 1.96 % at 5 % and 10% of crumb rubber replacement compared to ordinary concrete.

Key words:

waste tyre crumb rubber, compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength

Vorherige Mitteilung

R.Bharathi Murugan, E. Rama Sai, C. Natarajan, Shen-En Chen

Verhalten bei Ermüdung infolge von Verbiegung und mechanische Eigenschaften von Beton mit Zugabe von Gummigranulat

In der Arbeit werden die Ergebnisse einer experimentellen Untersuchung von Beton mit Zugabe von Gummigranulat aus Altreifen zur Festlegung der mechanischen Eigenschaften wie Druck-, Reiß- und Biegefestigkeit dargestellt. In der Untersuchung wurde Beton mit der Druckfestigkeitsklasse C35/45 verwendet, wobei 5 bis 25% des Sandvolumens durch Gummigranulat aus Altreifen ersetzt wurde. Die gewonnenen Ergebnisse wurden mit den Ergebnissen der Prüfung von gewöhnlichem Beton verglichen. Beton mit 5 % bzw. 10 % Granulat ergab ein besseres Verhalten von 1,46 % und 1,96 % im Vergleich zum gewöhnlichen Beton.

Schlüsselwörter:

Gummigranulat aus Altreifen, Druckfestigkeit, Reißfestigkeit, Biegefestigkeit

1. Uvod

Mnoge su industrije u današnje vrijeme suočene s gorućim problemom odlaganja otpada. Taj je problem itekako značajan u državama poput Indije koja ima više od milijardu stanovnika. Sve veća potražnja za automobilima rezultira stvaranjem golemog broja otpadnih guma, a njihovo ekonomski i ekološki prihvatljivo odlaganje predstavlja velik izazov za sve države modernoga svijeta. S otpadnim se materijalom može postupati na dva načina: prvi se temelji na spaljivanju, a u okviru drugog otpad se može odlagati na odlagališta zbog njihove male gustoće i slabo izraženih svojstava degradacije, odnosno zbog njihove inertnosti. Ipak, neke države danas ne prihvaćaju odlaganje primjenom postupka spaljivanja jer se na taj način oslobađa velika količina CO₂ koji se miješa s prirodnim zrakom, što u konačnici doprinosi globalnom zatopljivanju. Druga metoda koja uključuje odlaganje na odlagališta također nije preporučljiva zbog nejednolikog slijeganja materijala. Neadekvatno odlaganje guma može u nekim slučajevima biti štetno za zdravlje ljudi (opasnost od požara, sklonište za glodavce i ostale nametnike kao što su komarci), te nepovoljno utjecati na okoliš. Kako bi se spriječili mogući ekološki problemi, trebaju se razviti novi postupci odlaganja otpadnih guma, a da pritom ne dolazi do štetnog utjecaja na okoliš. Ponovna uporaba otpadnih guma dodavanjem usitnjenog gumenog granulata betonskim mješavinama izbjegavaju se ekološki problemi povezani s odlaganjem otpadnih guma. Osnovni razlog zašto se otpadna guma dodaje betonu jest taj što takva guma ima malu gustoću, visoku sposobnost apsorpcije zvuka i povoljna svojstva elastičnosti [1-5]. S povećanjem udjela gume u betonu povećava se i duktilnost, otpornost na habanje, te otpornost na udar takvog betona [6]. Guma u betonu će pridonijeti i boljoj otpornosti na dinamičko opterećenje te pojavu pukotina, isto tako i smanjenju prijenosa buke [7], te povoljnijoj hidro-abrazivnoj otpornosti [8]. Do loma uslijed zamora dolazi kada je čvrstoća betonske konstrukcije prekoračena proračunskim opterećenjem nakon velikog broja ciklusa opterećenja. Zamor se može definirati kao progresivno i trajno unutarnje oštećenje materijala izloženog opetovanim opterećenjima. Na otpornost betona na zamor utječe raspon cikličkih opterećenja. Općenito, smanjenje najveće razine opterećenja ili raspona opterećenja dovodi do povećanja otpornosti betona na zamor, tj. do povećanja njegove trajnosti [9-12].

Što se tiče mogućnosti primjene betona s dodatkom gumenih granulata iz otpadnih guma, potrebno je naglasiti da se guma može dodavati u velikim postocima, čak i do 40 – 50 % ukupnog volumena agregata, a da pritom ne naruši značajno obradljivost betona. Međutim, u najvećem broju slučajeva kod visokog udjela gume ipak dolazi do bitnog smanjenja čvrstoće betona. Ako čvrstoća nije glavni zahtjev u projektiranju betona, kao primjerice u slučaju izvođenja laganih betonskih zidova, fasada zgrada te drugih arhitektonskih elemenata zgrada, tada takve betonske mješavine s dodatnom gumenog granulata mogu biti valjana zamjena za obični beton. S druge strane, beton s

gumenim granulatom mogao bi se koristiti u nekonstrukcijskim primjenama kao što su barijere za zaštitu od buke na cestama, pločnici i sportski tereni, te kao prikladan materijal i za druge nekonstrukcijske primjene [13].

2. Eksperimentalni program

2.1. Korišteni materijali

U ovom je istraživanju korišten portlandski cement CEM I (52,5 MPa) u skladu sa zahtjevima norme EN 197—1:2000 [14]. Njegova fizikalna svojstva prikazana su u tablici 1. Za izradu betona korišten je lokalno dostupan riječni pijesak najveće veličine zrna 4,75 mm, modula finoće 2,51, te volumenske mase 2,65. Korišten je i krupnozrnat agregat maksimalne veličine zrna 12,5 mm, modula finoće 5,94, te volumenske mase 2,72. U sklopu ovog istraživanja je gumeni granulati iz otpadnih guma korišten kao djelomična zamjena sitnozrnatog agregata. Modul finoće gumenog granulata iznosi 3,72, a volumenska masa 0,84. Korišteni gumeni granulati prikazani su na slici 1. Za poboljšanje obradljivosti upotrijebljen je svijetlosmeđi superplastifikator (SikaViscoCrete 20HE) gustoće 1,08.

Tablica 1. Fizikalna svojstva cementa

Red. broj	Svojstvo	Rezultati	Granične vrijednosti prema normi EN 197-1:2000
1	Početno vrijeme vezivanja [min]	85	≥ 45
2	Postojanost volumena prema Le-Chatelieru [mm]	1	≤ 10
3	Tlačna čvrstoća [MPa] nakon 2 dana nakon 28 dana	38,60 56,96	≥ 30 ≥ 52,5



Slika 1. Gumeni granulati

Tablica 2. Sastav mješavina (po m³)

Oznaka mješavine	R0	R5	R10	R15	R20	R25
C [kg]	380	380	380	380	380	380
FA [kg]	865,00	793,25	751,50	709,75	668,25	626,25
CA [kg]	1010	1010	1010	1010	1010	1010
CR [kg]	-	12,6	12,6	37,2	50,4	63,0
C - cement, FA - sitnozrnati agregat i CA - krupnozrnati agregat, CR - gumeni granulati						
R0 – udio gumenog granulata 0 % (obični beton)			R15 – udio gumenog granulata 15 %			
R5 – udio gumenog granulata 5 %			R20 – udio gumenog granulata 20 %			
R10 – udio gumenog granulata 10 %			R25 – udio gumenog granulata 25 %			

2.2. Podaci o uzorcima i sastavima mješavina

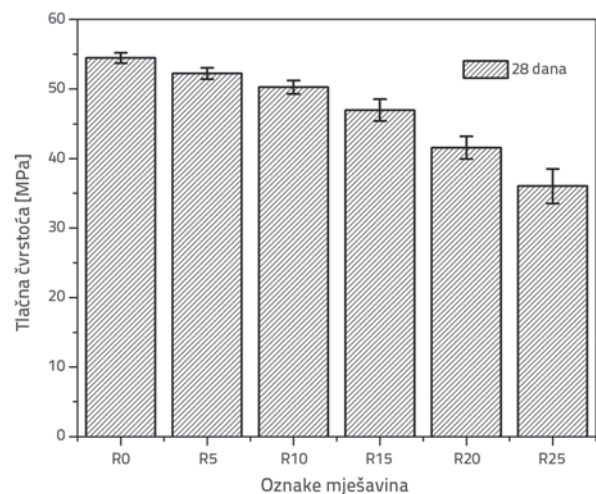
Za ispitivanje tlačne čvrstoće izrađene su betonske kocke veličine brida 150 mm. Za ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem izrađeni su betonski valjci promjera 150 mm i dužine 300 mm, a za ispitivanje statičke čvrstoće savijanjem i zamora izrađene su betonske prizme širine 100 mm, visine 100 mm i dužine 500 mm. U betonu razreda tlačne čvrstoće C35/45, omjer cementa, sitnozrnatog agregata i krupnozrnatog agregata iznosio je 1 : 2,27 : 2,65, a vodocementni omjer iznosio je 0,32. Radi poboljšanja obradljivosti, u betonsku je mješavinu dodan i 1 % superplastifikatora. Sitnozrnati agregat je djelomično zamijenjen gumenim granulatom (5 %, 10 %, 15 %, 20 % i 25 % zamjene po volumenu). Miješanje i njegovanje betonskih uzoraka provedeno je na sobnoj temperaturi, a u postupku miješanja i njegovanja korištena je obična voda iz slavine. Zbijanje svježeg betona u kalupu u trajanju od dvije minute provedeno je pomoću stolnog vibratora. Za svako su ispitivanje pripremljene tri serije uzoraka. Sastavi mješavina betona prikazani su u tablici 2.

3. Rezultati ispitivanja i rasprava

3.1. Tlačna čvrstoća

Betonske su kocke ispitane nakon 28 dana pomoću preše maksimalnog kapaciteta 2000 kN. Ispitivanje je provedeno u skladu s normom EN 12390-3:2009 [15]. Tlačna čvrstoća mješavine C35/45 ispitana je za različite postotke zamjene sitnozrnatog agregata gumenim granulatom iz otpadnih guma, nakon čega su rezultati ispitivanja uspoređeni s rezultatima dobivenima na kontrolnom betonu (bez gumenog granulata). Pojedinačne vrijednosti tlačnih čvrstoća mješavina prikazane su na slici 2. Rezultati pokazuju da se s dodavanjem gumenog granulata smanjuje tlačna čvrstoća u odnosu na vrijednosti čvrstoće kontrolnog betona. Smanjenje 28-dnevne tlačne čvrstoće betona s dodatkom 5, 10, 15, 20 i 25 % gumenog granulata iz otpadnih guma smanjena je za 7,85 %, 13,34 %, 21,92 %, 29,9 % i 46,44 % u odnosu na kontrolni beton. Do smanjenja čvrstoće betonskih kocaka dodatkom gume dolazi

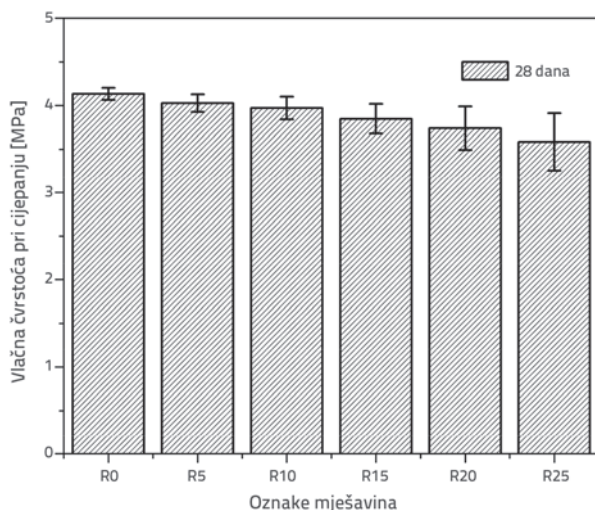
iz dva razloga. Prvo, gume čestice sadrže više zraka u odnosu na riječni pijesak, što dovodi do slabijeg prianjanja čestica gume s ostalim komponentama betona [13, 16]. Drugo, krutost gume manja je u odnosu na krutost agregata, pa se posljedično s većim udjelom gumenih čestica u betonu smanjuje njegova krutost i nosivost [17].



Slika 2. Tlačna čvrstoća betona nakon 28 dana

3.2. Vlačna čvrstoća cijepanjem

Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem provedeno je prema normi EN 12390-6:2009 [18]. Za ispitivanje su izrađeni i korišteni valjci promjera 150 mm i dužine 300 mm. Rezultati ispitivanja prikazani su na slici 3. Može se uočiti da se vlačna čvrstoća cijepanjem smanjuje ako se povećava količina gumenog granulata u betonu, što je slično ponašanju uočenom kod rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće. Uz dodavanje 5, 10, 15, 20 i 25 % gumenog granulata iz otpadnih guma, 28-dnevna vlačna čvrstoća smanjuje se za 1,65 %, 4,49 %, 8,74 %, 11,52 % i 14,65 % u odnosu na kontrolni beton. Dakle, može se uočiti da je kod betona s dodatkom gume prisutno manje smanjenje njegove vlačne čvrstoće cijepanjem nego tlačne čvrstoće.



Slika 3. Vlačna čvrstoća betona cijepanjem nakon 28 dana

3.2. Statička čvrstoća na savijanje

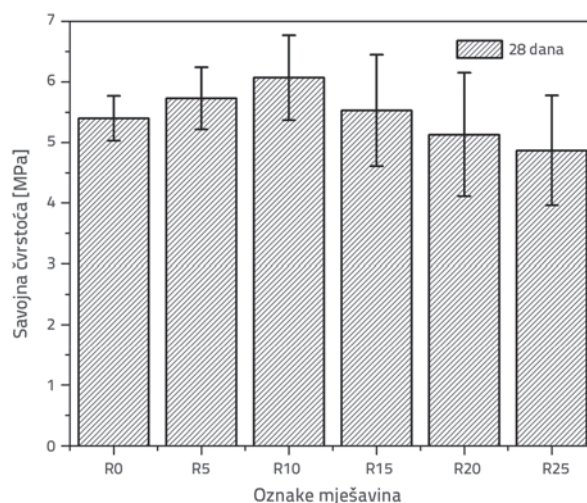
Cilj statičkog ispitivanja čvrstoće na savijanje bio je utvrditi najveće i najmanje granice opterećenja za ispitivanje na zamor. Čvrstoća na savijanje ispitana je prema normi EN 12390-5: 2009 [19]. Na uzorke je nanoseno opterećenje u dvije točke te je zabilježeno opterećenje uzoraka pri lomu. Podaci o sili loma korišteni za proračun čvrstoće uzorka na savijanje. Za svaku su mješavinu ispitana po tri uzorka, a njihova prosječna vrijednost je usvojena kao čvrstoća mješavine na savijanje. Rezultati ispitivanja prikazani su na slici 4.

Ti rezultati pokazuju da je čvrstoća na savijanje betona s dodatkom 10 % gumenog granulata visoka, ali da dolazi do njezinog smanjenja kada se betonu doda više od 15 % gumenog granulata. Do povećanja čvrstoće betona na savijanje dolazi uglavnom zbog elastičnog ponašanja gume. Iako je ponašanje gume duktilnije tj. elastičnije, poboljšanje čvrstoće na savijanje ograničeno je samo za relativno mali udio gume u betonu [20]. Opterećenje uzoraka bilo je ravnomjerno nanoseno prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće i čvrstoće cijepanjem, dok je opterećenje nanoseno u dvije točke (ne računajući ležajeve) u slučaju ispitivanja čvrstoće na savijanje. Pukotine su se vrlo brzo širile oko gumenih čestica u slučaju ispitivanja na vlak i tlak jer su gumene čestice mnogo mekše (posljedica manje krutosti) od cementne paste, što je dovelo do loma matrice gume i cementa. Upravo je iz tog razloga kod povećanja udjela gumenog granulata došlo do smanjenja tlačne i vlačne čvrstoće cijepanjem.

Prilikom ispitivanja čvrstoće na savijanje, uzorak je istovremeno izložen djelovanju tlačnih naprezanja (na vrhu) i vlačnih naprezanja (na dnu). Prilikom loma savijanjem, obično se mala pukotina počinje širiti od dna, a može nastati prije nanošenja maksimalnog opterećenja budući da se ulaskom u post-vršno područje formiraju mikropukotine, a počinju se širiti nakon prekoračenja te faze. Međutim, čestice gumenog granulata mogu odgoditi stvaranje mikropukotina i to amortizacijom naprezanja. Upravo radi toga se kod betona s gumenim granulatom uočavaju

mjerljiva poboljšanja otpornosti na stvaranje mikropukotina uslijed deformacija, pa bi takav materijal mogao najvjerojatnije na sličan povoljan način pridonijeti i smanjenju pojave pukotina uslijed skupljanja te poboljšati čvrstoću uzorka na savijanje [21]. To povećanje čvrstoće na savijanje prisutno je samo za relativno niski udio gume.

Stoga se može zaključiti da se čvrstoća betona na savijanje bitno povećava s dodavanjem manje količine gume. Sukladno tome, u ovom je istraživanju zabilježen porast čvrstoće na savijanje kod niskog udjela gume (5 i 10 %), dok je kod većeg udjela gume (15, 20 i 25 %) došlo do smanjenja čvrstoće.



Slika 4. Čvrstoća betona na savijanje nakon 28 dana

3.3. Ponašanje pri zamoru

Ponašanje betona pri zamoru analizirano je pomoću krivulje S-N, tj. krivulje primijenjenog naprezanja (omjer između naprezanja pri maksimalnom opterećenju i čvrstoće na savijanje) i broja nanesenih opterećenja (N), što definira čvrstoću na zamor. Za izračun čvrstoće na savijanje korištena je samo jedna logaritamska jednadžba. Dobiveni odnos poznat je pod nazivom Wohlerova jednadžba [12].

$$S = \frac{\sigma_{\max}}{MoR} = A - B \ln(N)$$

gdje je:

- S - omjer naprezanja
- σ_{\max} - naprezanje pri maksimalnom opterećenju [MPa]
- MoR - modul loma ili čvrstoća na savijanje [MPa]
- A & B - eksperimentalni koeficijenti koji variraju ovisno o mješavini i uvjetima opterećenja
- N - broj ponovljenih ciklusa opterećenja.

Oblik primijenjenog vala bio je polovica sinusoide, a nanoseno opterećenje je definirano na temelju usvojenog omjera naprezanja. Vrijednost nanesenog opterećenja je varirala, a frekvencija je držana konstantnom. Vrijednosti nanesenog

Tablica 3. Podaci o zamoru betona

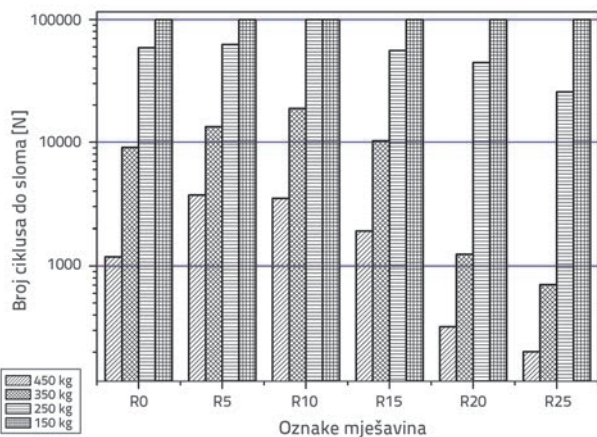
Omjer naprezanja	Udjeli gume [%]	Broj uzoraka	Prosječan broj ciklusa do loma [N]	Standardna devijacija
0,8	0	3	1182	24,98
	5	3	3720	65,06
	10	3	3492	67,26
	15	3	1920	32,16
	20	3	321	16,92
	25	3	204	12,16
0,7	0	3	9066	26,12
	5	3	13338	46,16
	10	3	18756	44,21
	15	3	10254	26,16
	20	3	1242	22,13
	25	3	705	20,16
0,6	0	3	58983	16,51
	5	3	62589	14,16
	10	3	100000	7,35
	15	3	55893	15,21
	20	3	44568	14,23
	25	3	25647	13,21
0,5	0	3	100000	Ispitivanje je prekinuto nakon 10 ⁵ ciklusa budući da svi uzorci s omjerom naprezanja 0,5 nisu pustili, odnosno nije došlo do loma.
	5	3	100000	
	10	3	100000	
	15	3	100000	
	20	3	100000	
	25	3	100000	

opterećenja i frekvencije opterećenja unesene su u računalni sustav. Pokrenut je hidraulički sustav uređaja za ubrzano određivanje zamora, a ispitivanje je trajalo sve do loma uzorka. Zabilježen je broj ciklusa opterećenja do loma uzorka. Tijekom ispitivanja zamora uslijed savijanja, zabilježen je nagli slom uzorka, uslijed čega je uređaj za ispitivanje isključen. Ispod uzorka postavljena je željezna podloga kako uzorak ne bi pao nakon loma. Osim toga, uređaj za ubrzano ispitivanje bio je opremljen prekidačem koji omogućuje automatsko isključivanje nakon loma uzorka. Broj ciklusa do loma zabilježen je i u računalnom sustavu i u pomoćnom pojačalu. Detaljni podaci o broju ciklusa do loma te o postavi ispitivanja i ispitanim uzorcima prikazani su na slikama 5.a i 5.b. Ispitivanje zamora uslijed savijanja provedeno je na tri uzorka za svaku mješavinu pri svakom omjeru naprezanja. Prosječni podaci o zamoru betona za razne udjele gumenog granulata iz otpadnih guma prikazani su u tablici 3.



Slika 5. Ispitivanje uzoraka: a) Postav za ispitivanje zamora, b) Lom uzorka

Što se tiče ponašanja pri zamoru, kod konstantne frekvencije od 3 Hz otpornost betona na zamor smanjila se s povećanjem opterećenja. Kao što se može vidjeti na slici 6., broj ciklusa do loma veći je kod mješavine R10. Lom uzorka prikazan je na slici 7.



Slika 6. Varijacija broja ciklusa do loma pri frekvenciji od 3 Hz

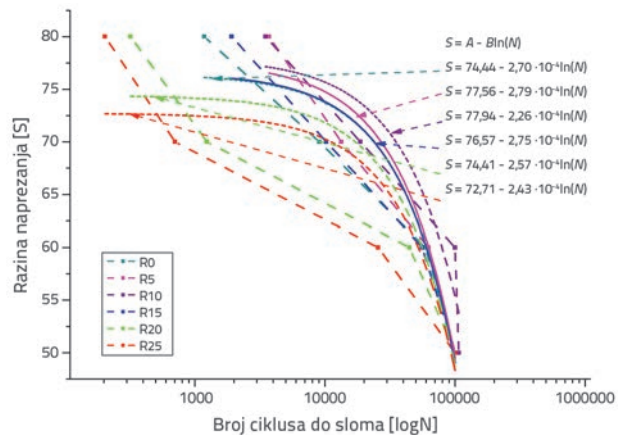
U većini istraživanja koja se bave pitanjem otpornosti betona na zamor, osnovni cilj je uspostaviti odnos između naprezanja koje uzrokuje zamor i otpornosti betona na zamor. Taj se odnos iskazuje kao krivulja S-N ili Wohlerova krivulja. Krivulja S-N omogućuje predviđanje srednje otpornosti na zamor pri zadanoj konstantnoj amplitudi ciklusa naprezanja. Većina istraživanja je usredotočena na jednostavne S-N odnose, koji omogućavaju predviđanje srednje otpornosti betona na zamor za danu razinu naprezanja koje uzrokuje zamor. Međutim, poznato je da podaci o zamoru betona uvelike variraju zbog heterogene prirode materijala. Osim toga, dobivaju se raspršeni rezultati koje nije jednostavno analizirati i interpretirati čak i kada se ispitivanja provedu na nekoliko identičnih uzoraka. Rezultati ispitivanja zamora analiziraju se pomoću regresijske analize.



Slika 7. Popuštanje uzoraka tijekom ispitivanja zamora

Rezultati ispitivanja na zamor uslijed savijanja prikazani su u obliku krivulja S-N za frekvenciju od 3 Hz i za razine naprezanja 0,80, 0,70, 0,60 i 0,50 (slika 8.). Na istoj su slici za sve uzorke prikazane i regresijske jednadžbe kojima se povezuje razina naprezanja s

brojem ciklusa do loma. Za frekvenciju od 3 Hz dobiven je odnos $S = A \ln(N) + B$ između frekvencije (F) i broja ciklusa zamora (N) koji je formuliran pomoću linearne regresije. Eksperimentalni koeficijenti u modelima F-N prikazani su u tablici 4. Ponašanje betona pri zamoru ovisi o dva značajna parametra koji su uključeni u jednadžbu zamora. Radi se o parametrima A i B koji označavaju visinu i nagib krivulje zamora. Kako raste parametar A, tako i krivulja zamora postaje viša, što označava bolju otpornost, tj. bolje ponašanje pri zamoru. S porastom vrijednosti parametra B krivulja zamora postaje strmija što upućuje na veću osjetljivost pojave zamora na varijacije naprezanja.



Slika 8. Krivulje S-N

Najveća otpornost na zamor zabilježena je kod 10 %-tne zamjene agregata s gumenim granulatom i to bez obzira na razinu primijenjenog naprezanja. Uočeno je da su uzorci izloženi naprezanju od 0,8 (80 % čvrstoće na savijanje) manje otporni na zamor, ali i da im otpornost na zamor raste usporedno sa smanjenjem vrijednosti naprezanja. Čvrstoća na zamor savijanjem rasla je za R0 do R10, te se nakon toga smanjivala za R15 do R25. Ispitivanje je prekinuto nakon 10^5 ciklusa jer niti jedan uzorak nije popustio kod razine naprezanja 0,5. Ponašanje pri zamoru bilježi isti trend kriterija loma za mješavine R0 do R25.

Odnos između razina naprezanja i broja ciklusa do loma dobiven je za sve uzorke pomoću regresijske jednadžbe, kao što je to prikazano na slici 8. Eksperimentalni koeficijenti definirani regresijskom jednadžbom prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. Eksperimentalni koeficijenti za beton s gumenim granulatom (RBC) i kontrolni beton (CC)

Koeficijenti	A	B	R ²
Oznaka mješavine			
R0	76,44	$-2,70 \cdot 10^{-4}$	0,9053
R5	77,56	$-2,79 \cdot 10^{-4}$	0,9191
R10	77,94	$-2,26 \cdot 10^{-4}$	0,8258
R15	76,57	$-2,75 \cdot 10^{-4}$	0,9039
R20	74,41	$-2,57 \cdot 10^{-4}$	0,8220
R25	72,71	$-2,26 \cdot 10^{-4}$	0,6856

Koeficijent A porastao je za 1,46 % i 1,96 % s povećanjem udjela gume od 5 % tj. 10 %. Ovo povećanje vrijednosti koeficijenta A prikazuje da se kod zamora uslijed savijanja beton koji sadrži do 10 % gumenog granulata iz otpadnih guma ponaša bolje od kontrolnog betona (R0). Neznatno smanjenje vrijednosti koeficijenta B uočeno je kod mješavina R5 i R10, što upućuje na pad osjetljivosti na zamor pri promjeni razine naprezanja.

4. Zaključci

Na temelju prikazanog istraživanja izvedeni su sljedeći zaključci:

- Vrijednosti tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem smanjile su se s povećanjem udjela gume. Zarobljeni zrak je ponajviše odgovoran za taj pad čvrstoće, a količina zarobljenog zraka raste s povećanjem postotka gume, što negativno utječe na prijanjanje čestica gume s drugim komponentama betona.
- Uočeno je da čvrstoća na savijanje raste s povećanjem količine gume u slučajevima kada udio gume ne prelazi 10 %. Navedeno bi se moglo pripisati elastičnom ponašanju gumenih čestica.
- Dodavanje gumenog granulata iz otpadnih guma betonu povećava njegovo ponašanje pri zamoru i to približno 10 %. Ponašanje betona pri zamoru poboljšano je kada udio gume iznosi od 5 % do 10 %, a pada kada udio gume u betonu iznosi 15 %, 20 % i 25 %.
- Broj ciklusa do nastupa zamora mješavina R0, R5, R10, R15, R20 i R25 raste sa smanjenjem razine naprezanja. Pri nižim razinama naprezanja zabilježeno je manje rasipanje parametara zamora za mješavine R0, R5, R10, R15, R20 i R25.
- Ciljana čvrstoća postignuta je kada je udio gume iznosio 5 %, 10 % i 15 %, ali ta čvrstoća nije postignuta pri višim udjelima gume, tj. kada je pijesak bio zamijenjen s 20 % i 25 % gumenog granulata. Dakle, smanjenje vrijednosti tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem u odnosu na običan beton bilo je prihvatljivo u slučajevima kada je udio gume iznosio najviše do 15 %.
- S praktičnog gledišta, udio gumenog granulata iz otpadnih guma koja zamjenjuje sitni agregat ne bi trebao biti veći od 15 % jer nakon te vrijednosti dolazi do naglog smanjenja čvrstoće (ne postiže se ciljna vrijednost čvrstoće). Rezultati ispitivanja pokazuju da se može proizvesti beton s gumenim granulatom visoke čvrstoće za konstrukcijske namjene s udjelom gume do 15 %, budući da je do te granice prisutno malo smanjenje tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće cijepanjem (dakle postiže se ciljana čvrstoća) te se postiže poboljšanje čvrstoće na savijanje i ponašanja pri zamoru. Međutim, kada udio gume prelazi 15 % tada se takav beton s gumenim granulatom može bez ikakvih opasnosti koristiti za nekonstrukcijske namjene.

LITERATURA

- [1] Lee, H.H., Lin, C.Y., Wang, H.Y.: A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting, *Concrete Construction and Building Materials*, 41 (2013), pp. 665–672, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.019>
- [2] Toutanji, H.A.: The Use of Rubber Tire Particles in Concrete to Replace Mineral Aggregates, *Cement & Concrete Composites*, 18 (1996), pp. 135–139, [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00010-0](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00010-0)
- [3] Singare, P.U.: Quantification Study of Non-Biodegradable Solid Waste Materials Accumulated in the Mangroves of Mahim Creek, Mumbai, *Marine Science*, 2 (2012), pp. 218–253.
- [4] Dhir, R.K., Limbachiya, M.C., Paine, K.A.: Recycling and reuse of used tires, Thomas Telford Publishing – Thomas Telford Ltd.; ISBN 072 77 29950, 2001.
- [5] Issa, C.A., Salem, G.: Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design, *Construction and Building Materials*, 42 (2013), pp. 48–52, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.054>
- [6] Bjegovic, D., Serdar, M., Jelcic Rukavina, M., Baricevic, A.: Study of reinforced-concrete sustainability criteria, *GRAĐEVINAR*, 62 (2010) 10, pp. 931–940.
- [7] Han, Z., Chunsheng, L., Kombe, T., Thong-On, N.: Crumb rubber blend in noise absorption study, *Mater Struct*, 41 (2008), pp. 383–390, <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9252-y>
- [8] Zoran, G., Gordana, T.C., Nenad, R., Dusan, G., Petar, M.: Hydro-abrasive resistance and mechanical properties of rubberized concrete, *GRAĐEVINAR*, 66 (2014) 1, pp. 11–20, <https://doi.org/10.14256/JCE.910.2013>
- [9] Lee, M.K., Barr, B.I.G.: An overview of the fatigue behavior of plain and fibre reinforced concrete, *Cement Concrete Composites*, 26 (2004), pp. 299–305, [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00139-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00139-7)
- [10] Kim, J.K., Kim, Y.Y.: Experimental study of the fatigue behavior of high strength concrete, *Cement Concrete Research*, 26 (1996), pp. 1513–1523, [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00151-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00151-2)
- [11] Naik, T.R., Singh, S.S.: Fatigue Property of Concrete With and Without Mineral Admixtures. Special Publication: *American Concrete Institute*, 144 (1994), pp. 269–288.
- [12] Ganesan, N., Bharathi raja, J., Shashikala, A.P.: Flexural Fatigue Behaviour of Self Compacting Rubberized Concrete. *Construction and Building Materials*, 44 (2013), pp. 7–14, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.077>
- [13] Khatip, Z., Bayomy, F.: Rubberized Portland cement concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11 (1999), pp. 206 – 213, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1999\)11:3\(206\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:3(206))
- [14] EN 197-1, Cement: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. European Committee for Standardization, 2000.

- [15] EN 12390-3, Testing hardened concrete: Compressive strength of test specimens. European Committee for Standardization, 2009.
- [16] Najim, K.B., Hall, M.R.: Crumb rubber aggregate coatings/pre-treatments and their effects on interfacial bonding, air entrapment and fracture toughness in self-compacting rubberised concrete, *Materials and Structures*, 46 (2013), pp. 2029-2043, <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0034-4>
- [17] Ganjian, E., Khorami, M., Maghsoudi, A.A.: Scrap tyre rubber replacement for aggregate and filler in concrete, *Construction and Building Materials*, 23 (2009), pp. 1828- 1836, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.020>
- [18] EN 12390-6, Testing hardened concrete: Tensile splitting strength of test specimens. European Committee for Standardization, 2009.
- [19] EN 12390-5, Testing hardened concrete: Flexural strength of test specimens. European Committee for Standardization, 2009.
- [20] Ling, T.C., Nor, H.M., Hainin M.R.: Properties of crumb rubber concrete paving blocks with SBR latex, *Road Materials Pavement Design*, 10 (2009), pp. 213-222, <https://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690188>
- [21] Najim, K.B., Hall, M.R.: Mechanical and dynamic of self-compacting crumb rubber modified concrete, *Construction and Building Materials*, 27 (2012), pp. 521-530.