

Primljen / Received: 26.8.2023.

Ispravljen / Corrected: 10.3.2024.

Prihvaćen / Accepted: 18.5.2024.

Dostupno online / Available online: 10.7.2024.

Analiza greda od samozbijajućeg betona ojačanih GFRP-om

Autori:

Doc.dr.sc. **Prithiviraj Chidambaram**, dipl.ing.građ.SRM Tehnički fakultet
Odjel za građevinarstvo
Kanchipuram, Indija
rajprithivi3@gmail.com

Autor za korespondenciju

Izv.prof.dr.sc. **Saravanan Jagadeesan**, dipl.ing.građ.Sveučilište Annamalai
Odjel za građevinarstvo i visokogradnju
Chidambaram, Indija
ausjs5070@gmail.com

Prethodno priopćenje

Prithiviraj Chidambaram, Saravanan Jagadeesan

Analiza greda od samozbijajućeg betona ojačanih GFRP-om

U ovom istraživanju ispitano je ponašanje pri savijanju greda ojačanih staklenim vlaknima armiranim polimerom (eng. *Glass Fiber Reinforced Polymer* - GFRP) dvaju različitih omjera (0,68 % i 1,03 %) upotrebom tradicionalnog samozbijajućeg betona (eng. *Self-Compacting Concrete* - SCC) i SCC-a s 30 % ultrasitne troske (UFS). U istraživanju su analizirani uzorci pukotina, načini loma, odnosi opterećenje-progib, deformacije betona i armature te utjecaj omjera armature i tlačne čvrstoće SCC-a. Rezultati pokazuju da je premalo armature uzrokovalo pucanje polimera sa staklenim vlaknima, uravnotežena armatura dovela je do loma šipki i betona, a grede koje su sadržavale previše armature uglavnom su doživjele drobljenje betona u zoni stlačivanja. Ovo istraživanje usporedilo je ACI smjernice za projektiranje savijanja (2015.) s eksperimentalnim podacima.

Ključne riječi:

karakteristike savijanja, polimer ojačan staklenim vlaknima (GFRP), samozbijajući beton (SCC), ultrasitna troska (UFS), smjernice za projektiranje savijanja

Research Paper

Prithiviraj Chidambaram, Saravanan Jagadeesan

Analysis of GFRP-reinforced beams in enhanced SCC

This study investigated the flexural behaviour of glass fibre-reinforced polymer (GFRP)-reinforced beams with two different ratios (0.68 % and 1.03 %) using traditional Self-Compacting Concrete (SCC) and SCC with 30 % Ultrafine Slag (UFS). The study analysed crack patterns, failure modes, load-deflection responses, strains in the concrete and reinforcement, and the influence of the reinforcement ratio and SCC compressive strength. The results indicated that under-reinforcement led to the rupture of the GFRP, balanced reinforcement resulted in bar and concrete failures, and over-reinforced beams mainly experienced compression zone concrete crushing. This study compared the ACI Flexural Design Guidelines (2015) with the experimental data.

Key words:

flexural behaviour, glass fibre reinforced polymer (GFRP), self-compacting concrete (SCC), ultrafine slag (UFS), flexural design guidelines

1. Uvod

Građevinska industrija u posljednje vrijeme značajno napredovala, osobito u području tehnologije betona. Zbog rastuće potražnje za održivom i ekološki prihvatljivom građevinskom praksom, znanstvenici neprestano istražuju inovativne materijale i tehnike za optimizaciju izvedbe betonskih konstrukcija. Jedan takav primjer je upotreba staklenim vlaknima armiranog polimera (engl. *Glass Fiber Reinforced Polymer* - GFRP) u kombinaciji sa samozbijajućim betonom s ultrasitnom troskom (UFS) u armiranobetonskim (RC) gredama izloženih opterećenjima na savijanje.

Čelične šipke tradicionalno se upotrebljavaju za armaturu u morskim i obalnim betonskim konstrukcijama, međutim, njihova osjetljivost na koroziju u agresivnom okruženju smanjuje trajnost. Treba istražiti alternativne materijale i strategije za ojačanje kako bi se učinkovito riješilo ovo ključno pitanje [1-3]. U građevinskoj industriji posebno se ističu vlaknima armirane polimerne (engl. *Fiber Reinforced Polymer* - FRP), koje se odlikuje izuzetnom otpornošću na koroziju i preporučuju se kao nehrđajuća alternativna čeličnoj armaturi u agresivnim okruženjima, učinkovito rješavajući ovaj problem [4]. Vlakna se obično proizvode od materijala kao što su staklo, bazalt, ugljik i aramidi. Međutim, alternativna vlakna kao što su papir, drvo i azbest također su upotrijebljena u raznim istraživanjima [5-9]. Među njima se kao armaturi u građevinarstvu prednost daje staklenim vlaknima armirani polimeri (GFRP) zbog njegove otpornosti na koroziju, superiorne uzdužne vlačne čvrstoće u smjeru vlakana, nemagnetskih i laganih svojstava [10-12]. Osim toga, primjena FRP-a u pomorskim konstrukcijama, osobito u okruženjima sklonim koroziji čelika, dovodi do veće dugotrajnosti i izdržljivosti pomorskih konstrukcija. Kao rezultat toga, smanjeni su ukupni troškovi životnog ciklusa [13, 14].

Upotreba samozbijajućeg betona (SCC) također predstavlja značajan napredak u građevinarstvu, koji ima široku primjenu u različitim komponentama kao što su grede, stupovi i ploče [15-17]. Ovu vrstu betona karakterizira izvanredna lakoća manipulacije, iznimna sposobnost ispunjavanja kompliciranih prostora i jednolika konzistencija, što ga čini prvim izborom za složene geometrije i sabijene armature [18, 19]. Kako bi se postigla željena svojstva samozbijajućeg betona, potrebna je mješavina koju karakteriziraju povećani udjeli praha, smanjeni udio krupnijeg agregata, upotreba jakog plastifikatora s velikom snagom raspršivanja i uključivanje sredstva za modificiranje viskoznosti (engl. *Viscosity Modifying Agent* - VMA) [20, 21]. Među tim sastojcima, udio praha ključni je čimbenik koji utječe na specifična inženjerska svojstva samozbijajućeg betona [22, 23]. U pravilu je za SCC-a mješavinu potrebna količina praha od 380 do 600 kg/m³ [24, 25]. Međutim, oslanjanje isključivo na cement za postizanje ovog raspona količine praha manje je poželjno zbog povezanih većih emisija ugljičnog dioksida (CO₂) koje proizlaze iz povećanih količina cementa.

Da bi riješili ovaj problem, razni su istraživači [25-37, 38] u posljednja tri desetljeća poduzeli opsežne istraživačke napore kako bi istražili alternative cementu, kao što su mineralni dodatci (engl. *supplementary cementing materials* - SCM) poput letećeg

pepela (engl. *Fly Ash* - FA), mljevena granulirana zgura visokih peći (engl. *Ground Granulated Blast furnace Slag* - GGBS), metakaolin (MK), silicijska prašina (engl. *Silica Fume* - SF), ultrasitna troska (engl. *Ultrafine Slag* - UFS) i slične tvari. Ovi napori rezultirali su poboljšanim svojstvima betona u svježem i očvrslom stanju, smanjenjem emisije CO₂ i trajnošću konstrukcije. Značajan nedavni napredak u vezi s trajnosti građevine je uključivanje aditiva na bazi UFS-a. UFS mineralni dodatak koji poboljšava mehanička svojstva i svojstva trajnosti betona [29, 39-45]. Sastoji se od mikroniziranih čestica prosječne veličine manje od 5 mikrona. UFS, koji se dobiva iz granulirane troske iz visokih peći, nusproizvod je industrije željeza i čelika i pomno se melje kako bi se postigao njegov ultrafini oblik. Istraživanja su pokazala da UFS može doprinijeti smanjenoj poroznosti, poboljšanom pakiranju čestica i poboljšanim vezama između betonske matrice i armature [17, 45-48]. Učinak UFS-a na karakteristike savijanja greda novo je područje istraživanja [16, 49, 50].

U brojnim je istraživanjima ispitivano ponašanje uslijed savijanja betonskih greda vlaknima armirani polimer (FRP) i konvencionalnim šipkama. Nanni [51] je uočio povećanu čvrstoću na savijanje kod ojačanja FRP-om, što upućuje na utjecaj armature i svojstava betona na čvrstoću. Benmokrane i sur. [52] usporedili su modele pucanja, nosivosti i sloma između ojačanja FRP-omi konvencionalnih šipki, dok su GangaRao i Vijay [53] istaknuli čimbenike koji utječu na duktilnost grede ojačane FRP-RC-om. Xiao-jie i sur. [54] pronašli su sličnosti u dugoročnom ponašanju samozbijajućeg betona i greda od normalnog vibriranog betona (engl. *Normal Vibrated Concrete* - NVC) i uočili su smanjeni progib zbog nižeg modula elastičnosti u samozbijajućem betonu. Kalpana i Subramanian [55] ispitali su grede ojačane GFRP-RC-om s različitim razredima betona i promjerima šipki i uočili su bolje rezultate kod betona većeg razreda. You i sur. [56] proučavali su savijanje greda izrađenih sa samozbijajućim betonom i uspoređivali AB greda od hibridnih i čeličnih vlakana, a Roja i sur. [6] uspoređivali ojačanja GFRP-om i termomehanički-obrađene šipke te dokazali ograničenja GFRP-a. Mazaheripour i sur. [57] uveli su hibridni prednapeti čelik ojačan GFRP-om i SCC grede za poboljšanje deformabilnosti. Nikbin i sur. [58] istraživali su lomove i duktilnost SCC-a upotrebom mineralnih prahova. Goldston i sur. [13] istraživali su betonske grede visoke čvrstoće ojačane GFRP-om i promatrali različite karakteristike greda s premalo i previše armature. Balachandru Koya i Sureshkumar [59] proučavali su ponašanje pri savijanju SCC greda visoke čvrstoće ojačanih čelikom/GFRP-om i pronašli usporedive učinke. Mithra i sur. [60] istraživali su SCC s GGBS-om i došli do optimalnih smjesa s poboljšanim karakteristikama uslijed savijanja. Patel i Balakrishna [61] istraživali su zamjene za cement s GGBS-om i troske s finim agregatom i pronašli optimalne zamjene. Marshaline i sur. [62] analizirali su armirane SCC grede s poboljšanim svojstvima u svježem i očvrslom stanju. Manju i sur. [63] zamijenili su leteći pepeo u SCC gredama i uočili razlike u učinku. Vivek i sur. [64] proučavali su SCC s mineralnim dodacima MK + GGBS + SF + GGBS, koji su pokazali povećanu čvrstoću na savijanje. Shijumon i Nalanth [65] istraživali su NVC i SCC grede s recikliranim betonskim otpadnim

agregatima i aditivima silicijske prašine kako bi poboljšali njihova svojstva i smanjili pukotine uslijed smicanja.

Mnogi su istraživali čimbenike kao što su vrsta armature, svojstva betona i aditivi. Rezultati uključuju povećanu čvrstoću s FRP ojačanjima, sličnosti u ponašanju između SCC i NVC greda i poboljšanu izvedbu s betonom višeg razreda i hibridnim prednapetim GFRP-čeličnim SCC gredama. Istraživanja su također ispitivala učinke mineralnih prahova, aditiva i zamjena na karakteristike uslijed savijanja. Neka su istraživanja bila usmjerena na poboljšanje svojstava ojačanih SCC greda u svježem i očvrslom stanju, dok su druga ispitivala učinke aditiva na posmično pucanje i općenita svojstva. Međutim, nisu provedena istraživanja o ponašanju uslijed savijanja greda ojačanih GFRP-om, SCC-om i UFS-om. Nastojalo se istražiti ponašanje greda ojačanih GFRP-om umjesto čelikom uslijed savijanja. Grede su nastale upotrebom tradicionalnog SCC-a i SCC-a koji sadrži 30 % ultrasitne troske. Uspoređeni su rezultati eksperimentalnog ispitivanja i preporuke ACI smjernica za projektiranje greda ojačane FRP-RC-om.

2. Eksperimentalni program

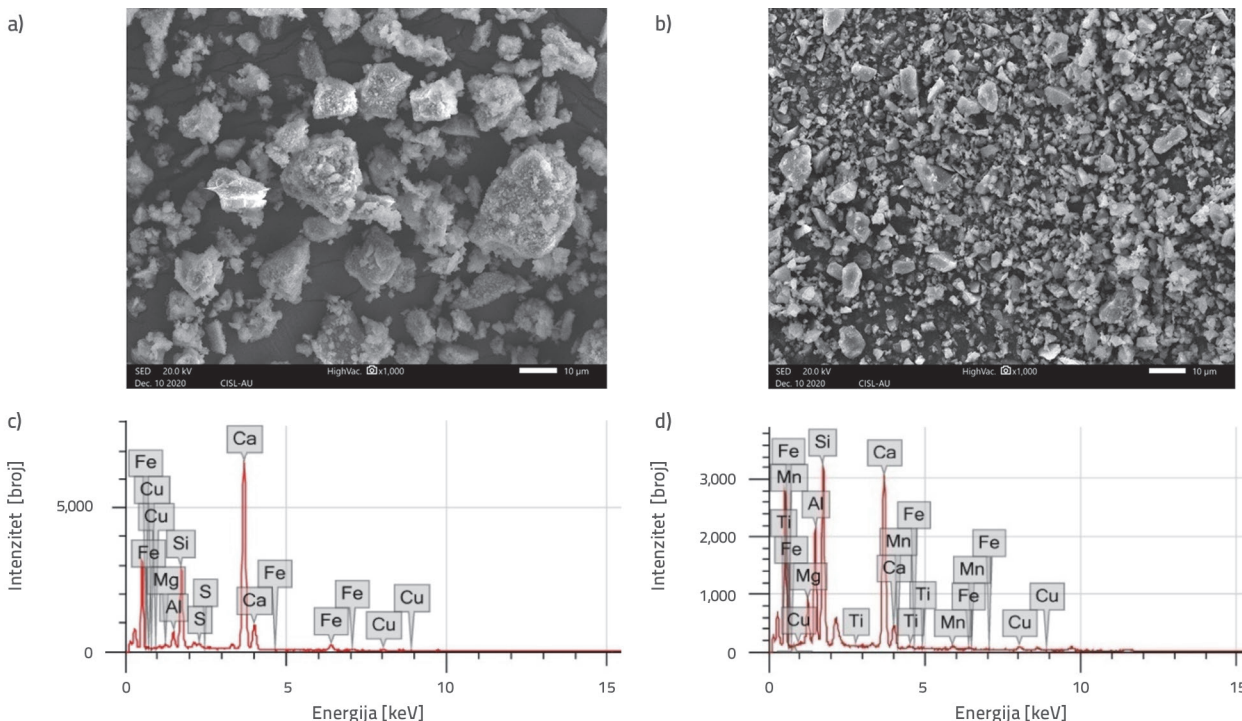
2.1. Ispitni materijali i omjeri mješavina

Prema smjernicama IS 12269-2013 [66], upotrijebljen je obični portlandski cement (OPC) razreda 53, nabavljen od društva Ultra-Tech Pvt. Ltd. [66]. Umjesto OPC-a, UFS je na tržištu prepoznat kao Alccofine 1203, koji proizvodi tvrtka Counto Micro Fine Products Pvt. Ltd., Goa. U tablici 1. navedena su kemijska svojstva cementa i ultrasitne troske nabavljene od dobavljača.

Tablica 1. Kemijska svojstva običnog portlandskog cementa i ultrasitne troske

Kemijski sastav [%]		
Komponenta	Cement	Ultrasitna troska
CaO	66,67	32,20
SiO ₂	18,91	35,30
Fe ₂ O ₃	4,94	1,20
Al ₂ O ₃	4,51	21,40
SO ₃	2,5	0,13
MgO	0,87	6,20
K ₂ O	0,43	-
Na ₂ O	0,12	-

Slika 1. prikazuje rezultate snimanja pretražnim elektronskim mikroskopom (SEM) pri povećanju od 1000x i analize energetske disperzivne spektroskopije (EDS) običnog portlandskog cementa razreda 53 i ultrasitnih čestica troske. Ispitivanjem je utvrđeno da su čestice cementa nepravilnog oblika, a ultrasitne čestice troske također, ali oštih rubova. Riječni pijesak iz lokalnih izvora odgovara specifikaciji zone III kao sitni agregat, dok se upotrebljava drobljeni uglati krupni agregat u skladu sa smjernicama IS 383-1970 [67]. U tablici 2. navedena su svojstva materijala, a na slici 2. prikazana je granulometrijska struktura agregata. U skladu sa smjernicama IS: 9103-2018 [68] korišten je BASF-ov superplastifikator (polikarboksilni eter) Master Glenium Sky 8233 [68]. U istraživanju je korištena isključivo obična voda iz slavine. Prethodna istraživanja procijenila su ključna svojstva sastavnih komponenti i njihove karakteristike u svježem i očvrslom stanju

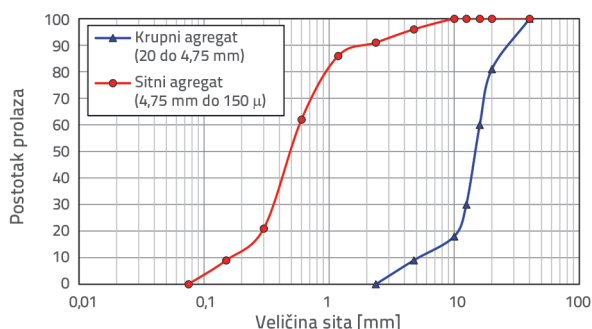


Slika 1. a) i b) SEM; c) i d) rezultati EDS-a za OPC i UFS

Tablica 2. Fizikalna svojstva sastavnih materijala

Opis	Veličina	Specifična težina	Upijanje vode	Modul finoće	Specifična površina
Cement	90 μ	3,15	-	-	225 m ² /kg
Ultrasitna troska	4 do 6 μ	2,86	-	-	1200 m ² /kg
Sitni agregat	< 4,75 mm	2,68	0,42	2,88	-
Krupni agregat	20 mm – 4,75 mm	2,7	0,92	7,08	-

[20, 44, 46]. Svojstva svježeg samozbijajućeg betona ispitana su u skladu s normom ISO 1920-13:2018 [25], uključujući ispitivanje rasprostiranja slijeganjem, V-lijevak test i razred prema L-kutiji. Ovi testovi daju važne uvide za procjenu sposobnosti protoka, punjenja i prolaza SCC-a. U tablici 3. navedeni su materijali potrebni za SCC grede korištene za mjerenja i ugradnju. Osim toga, prikazana su svojstva svježeg betona i tlačna čvrstoća.



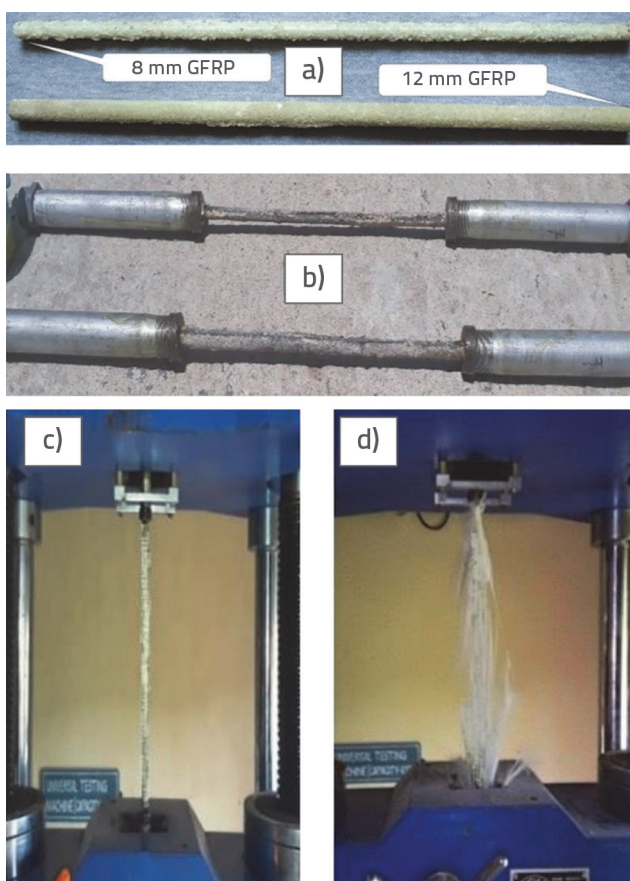
Slika 2. Granulometrijska krivulja agregata

Tablica 3. Omjer smjese i svojstva SCC-a

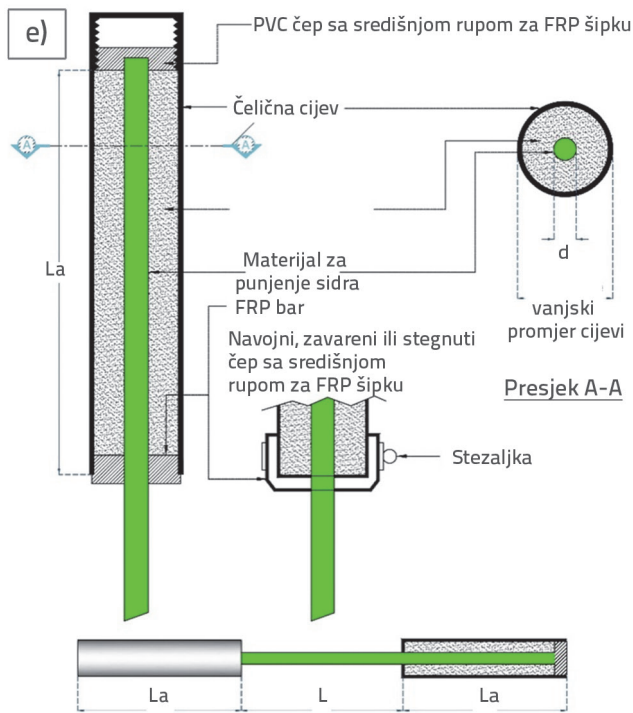
Opis	SCCA0	SCCA30
Cement [kg/m ³]	465	325,5
UFS [kg/m ³]	0	139,5
Sitni agregat [kg/m ³]	915	915
Krupni agregat [kg/m ³]	836	836
Voda [kg/m ³]	186	186
Superplastifikator [kg/m ³]	4,65	4,65
Rasprostiranje slijeganjem [mm]	610	690
T50 [s]	5	4
V-lijevak [s]	6	3
Omjer L-kutije	0,81	0,95
Tlačna čvrstoća [N/mm ²]	30,69	48,13

2.2. Armatura

GFRP šipke obložene pijeskom dobivene su od tvrtke Meena Fibres, Pondicherry te su upotrebljene kao armaturene šipke, kako je prikazano na slici 3.a. Promjer vlačnih i tlačnih armaturenih šipki iznosio je 12 mm, dok su stremeni sa zatvorenim prstenovima bez preklopa imali promjer 8 mm. Stremeni su ravnomjerno postavljani duž grede kako bi se održala dosljednost i izolirale varijable. Budući da je istraživanje usmjereno na karakteristike uslijed savijanja, mijenjanje razmaka moglo bi utjecati na strukturne karakteristike. Uzorci koji se sastoje od tri armaturene šipke svih promjera ispitani su i ocijenjeni prema propisanim normama ASTM D7205/D7205M [69], kao što je prikazano na slikama 3.b, 3.c i 3.d.



Slika 3. a) GFRP šipke obložene pijeskom; b) GFRP šipke sa sidrištem; c) Ispitni postav; d) Slom

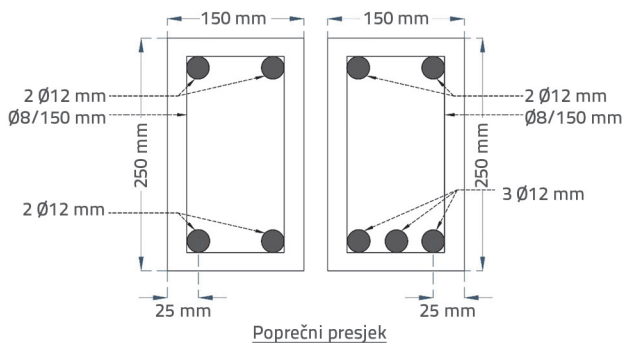


Slika 3. e) Detaljni prikaz sidrišta

Detaljni prikaz sidrišta nalazi se na slici 3.e. Mehanička svojstva armature navedena su u tablici 4. Slika 4. prikazuje dijagrame prosječnog naprezanja i deformacije za ispitane armaturene šipke, uključujući krivulju naprezanja i deformacije posebno za čeličnu šipku za usporedbu.

2.3. Priprema greda

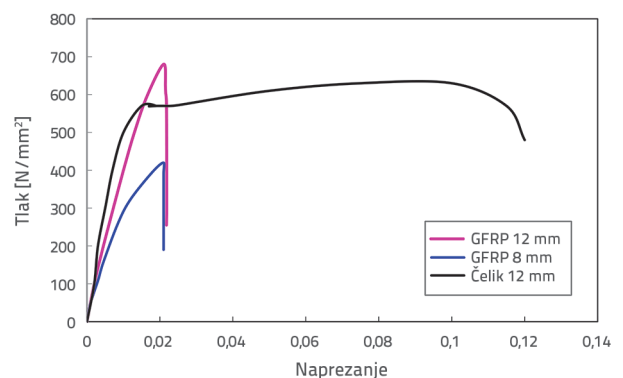
Izrađeno je dvanaest greda u punom opsegu, koje su podvrgnute statičkom opterećenju u dvije točke, u skladu sa smjernicom ACI [70]. Ove su grede imale duljinu 3000 mm i dimenzije poprečnog presjeka 150 x 250 mm. Zaštitni sloj iznosio je 25 mm od vanjskog ruba stremena duž svih strana greda. Slika 5. prikazuje izgled poprečnog presjeka.



Slika 5. Poprečni presjek greda od samozbijajućeg betona

Tablica 4. Mehanička svojstva GFRP armature

Promjer armature [mm]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Modul elastičnosti [GPa]
8	420,00	46,36
8	419,00	46,34
8	421,00	46,37
Srednja vrijednost	420,00	46,36
12	680,00	54,87
12	681,00	54,91
12	680,00	54,85
Srednja vrijednost	680,33	54,88



Slika 4. Krivulja naprezanja i deformacije GFRP šipki

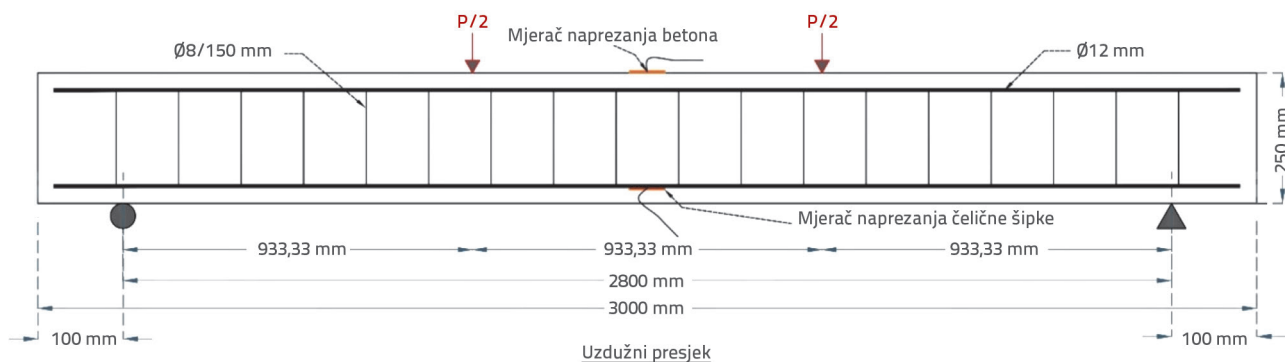
Grede su podijeljene u četiri skupine na temelju sastava mješavine i omjera armature. Svaka od četiri grupe sastojala se od tri grede. Za grede I. i II. skupine korištena je mješavina SCCA0, a za grede III. i IV. skupine korištena je mješavina SCCA30. Grede I. i II. skupine imaju isti koeficijent armiranja (ρ_f) od 0,68 %, dok grede grupe II. i IV. imaju koeficijent armiranja od 1,03 %. Grede su označene slovima A–B–C, gdje A označava udio aditiva Alcofine (UFS), B označava koeficijent armiranja, a C predstavlja broj uzoraka greda. Na primjer, greda A30-G1-B1 proizvedena je od ultrasitne troske s udjelom od 30 % (A30) i GFRP-a s koeficijentom vlačne armature od 0,68 % (G1) i označena kao uzorak B1. Tablica 5. daje opsežan pregled pojedinosti o gredi.

2.4. Ispitni postav i postupak

Nakon ugradnje betona, uslijedilo je očvršćivanje svih greda do 28 dana starosti, pri čemu su korištene mokre jutene vreće kako bi se održala stalna razina vlage i kako bi se zaštitilo grede od ekstremnih temperaturnih razlika radi odgovarajuće hidratacije i očvršćivanja. Grede su postavljene na jednostavnu konfiguraciju nosača i opterećene dvjema monotono koncentriranim gredama. Efektivni raspon greda iznosio je 2800 mm, s posmičnim rasponom od 933,33 mm ($L/3$) i prepustom od 100

Tablica 5. Sažetak detaljnih informacija o gredama

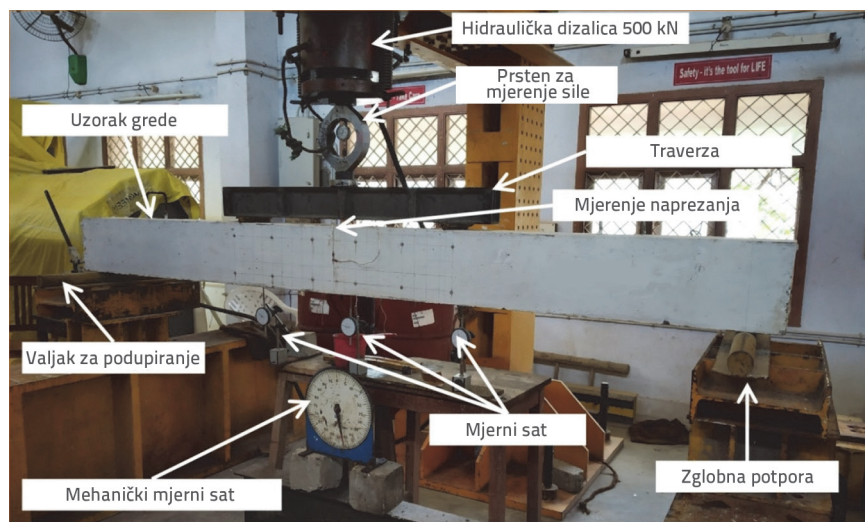
Mješavina	Skupina	ID grede	Tlačna armatura	Vlačna armatura	ρ_f [%]	Stanje armature
SCCA0	I	A0-G1-B1	2Ø12	2Ø12	0,68	Premalo armature
		A0-G1-B2	2Ø12	2Ø12		
		A0-G1-B3	2Ø12	2Ø12		
	II	A0-G2-B1	2Ø12	3Ø12	1,03	Previše armature
		A0-G2-B2	2Ø12	3Ø12		
		A0-G2-B3	2Ø12	3Ø12		
SCCA30	III	A30-G1-B1	2Ø12	2Ø12	0,68	Premalo armature
		A30-G1-B2	2Ø12	2Ø12		
		A30-G1-B3	2Ø12	2Ø12		
	IV	A30-G2-B1	2Ø12	3Ø12	1,03	Uravnotežena armatura
		A30-G2-B2	2Ø12	3Ø12		
		A30-G2-B3	2Ø12	3Ø12		



Slika 6. Eksperimentalni ispitni postav

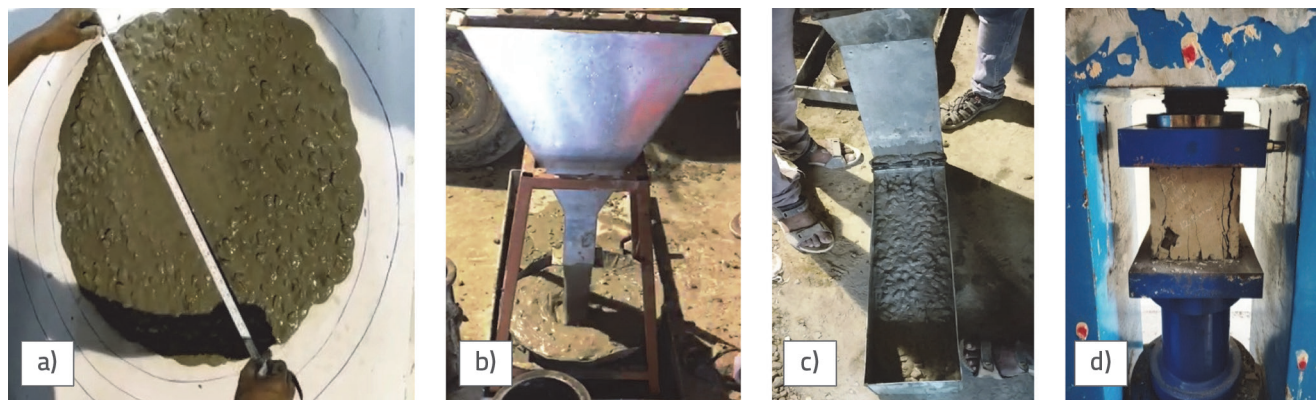
mm obostrano, kao što je prikazano na slici 6. Grede su bile usidrene na svojim krajevima pomoću šarke i kolotura, što im je omogućilo da se savijaju pod postupno rastućim opterećenjem.

Za opterećenje je upotrijebljena hidraulična dizalica nosivosti 500 kN. Ovo se opterećenje postupno povećavalo u razmacima od 2,5 kN pomoću čeličnog raspodjeljivača (I-presjek) za prijenos



Slika 7. Eksperimentalni ispitni postav

opterećenja na uzorak grede. Opterećenje je pomno nadzirano pomoću prstena za ispitivanje. Za određivanje deformacije tijekom opterećenja ugrađena su dva površinska mjerača deformacija duljine 5 mm sa svake strane svih greda i dva mjerača deformacija u sredini GFRP armature, koji su bili spojeni na indikator deformacija. Progib srednjeg raspona mjeren je pomoću mjernog sata s minimalnim brojem od 0,01. Tijekom postupka opterećenja provedena su različita očitovanja, uključujući progibe, naprezanja betonske površine, naprezanja armaturnih šipki i pukotine na čeonj strani grede, koja su pažljivo bilježena pri svakom povećanju opterećenja. Eksperimentalni postav prikazan je na slici 7.



Slika 8. Ispitivanje SCC-a u svježem i očvrslom stanju: a) Rasprostiranje slijeganjem; b) V-lijevak; c) L-kutija, d) Tlačna čvrstoća

3. Rezultat i rasprava

3.1. Svojstva SCC-a u svježem i očvrslom stanju

Istraživanjem svojstava samozbijajućeg betona (SCC) otkriveno je da dodavanje ultrasitne troske rezultira značajnim poboljšanjima. Na temelju prethodnih istraživanja [20,44,46], smjese s dodatkom ultrasitne troske imale su poboljšanu obradivost, bolje svojstvo punjenja, svojstvo prolaza i tlačnu čvrstoću, osobito pri udjelu od 30%. Ograničena istraživanja vezana za SCC s dodatkom ultrasitne troske naglašavaju novitet ovog istraživanja, pri čemu upotreba 30 % ultrasitne troske predstavlja značajan iskorak. Unatoč početnim nedoumicama oko troškova, upotreba ultrasitne troske nudi dugoročnu održivu korist, što opravdava njezino dodavanje smjesi samozbijajućeg betona. Ultrasitna troska dovela je do poboljšanja pakiranja čestica, smanjila odvajanje betona i

poboljšala svojstva svježeg materijala, dok je njezina pucolanska reaktivnost značajno povećala tlačnu čvrstoću i time dokazala svoju učinkovitost kao dopunskog cementnog materijala. Ispitivanje svojstava samozbijajućeg betona dopunjeno je slikom 8. koja prikazuje ključne laboratorijske rezultate iz eksperimenta, kao što su ispitivanje rasprostiranja slijeganjem, V-lijevak test, L-kutija test i ispitivanje tlačne čvrstoće. Ovo sveobuhvatno razumijevanje svojstava i izvedbe SCC-a dovelo je do ispitivanja analiza SCC greda uz dodavanja ultrasitne troske i bez toga dodavanja, o čemu se raspravlja u nastavku.

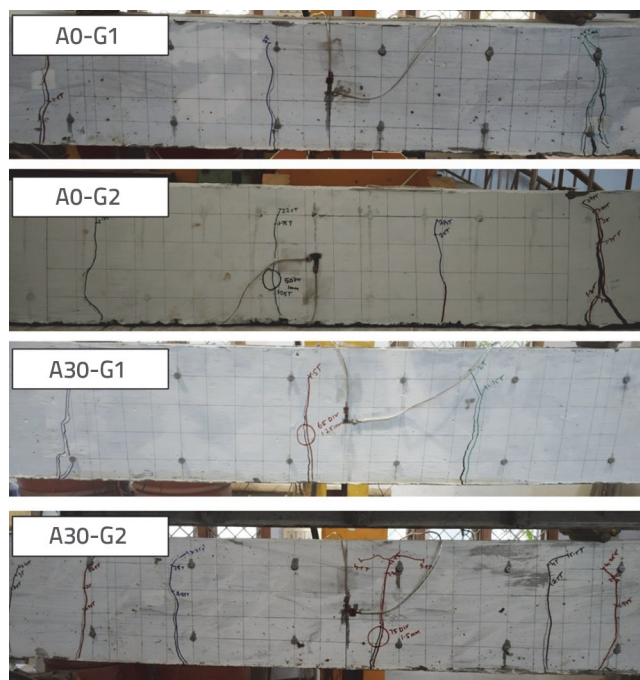
3.2. Ponašanje SCC greda pri pucanju

Tablica 6. prikazuje rezultate eksperimentalnih ispitivanja na SCC gredama. Prije nego što su bile izložene opterećenjima, grede su zadržale svoju krutost i nisu imale pukotina. Postupnim

Tablica 6. Eksperimentalni rezultati ispitivanja greda od samozbijajućeg betona

ID grede	Opterećenje [kN]		Progib [mm]		Konačna deformacija		Širina pukotine [mm]	Način loma
	Prvo pucanje	Konačno	Prvo pucanje	Konačno	Beton	Armatura		
A0-G1-B1	12,5	59,34	1,1	32,87	0,00173	0,0148	0,6	Lom FRP obloge
A0-G1-B2	12,5	59,21	1,8	31,73	0,00211	0,0179	0,58	
A0-G1-B3	15	60,13	1,99	32,68	0,00195	0,0173	0,62	
Srednja vrijednost	13,33	59,56	1,63	32,43	0,00193	0,0167	0,60	
A0-G2-B1	12,5	70,13	1,11	33,83	0,00317	0,0148	0,54	Drobljenje betona
A0-G2-B2	12,5	71,2	1,78	29	0,00323	0,0133	0,55	
A0-G2-B3	10	67,5	1,11	31,72	0,00301	0,0137	0,52	
Srednja vrijednost	11,67	69,61	1,33	31,52	0,0031	0,0139	0,54	
A30-G1-B1	17,5	61,11	9	33,24	0,00228	0,0171	0,63	Lom FRP obloge
A30-G1-B2	15	60,62	8,75	33,32	0,00223	0,0166	0,62	
A30-G1-B3	17,5	62,7	10,66	33,76	0,00231	0,0162	0,67	
Srednja vrijednost	16,67	61,48	9,47	33,44	0,0023	0,0166	0,64	
A30-G2-B1	17,5	57,5	4,8	30,2	0,00332	0,01577	0,6	Lom FRP obloge i drobljenje betona
A30-G2-B2	17,5	77,35	4,97	34	0,0032	0,01634	0,68	
A30-G2-B3	17,5	70	3,09	35,19	0,00316	0,01721	0,63	
Srednja vrijednost	17,50	73,69	4,29	33,13	0,0032	0,0164	0,64	

djelovanjem vanjskih sila grede su se deformirale, što je dovelo do pojave pukotina unutar vlačne zone. Tijekom početnih faza, manje pukotine postale su uočljive u području s dosljednim momentom pucanja. Povećanjem opterećenja pojavile su se nove pukotine, a postojeće su se proširivale. Kako su grede i dalje bile pod opterećenjem, smjer putanje pukotina udaljenih od zone savijanja postao je kos, a pukotine su se nastavile širiti prema točki opterećenja u zoni stlačivanja grede. Uzorci opće zabilježenih pukotina u SCC gredama prikazani su na slici 9.



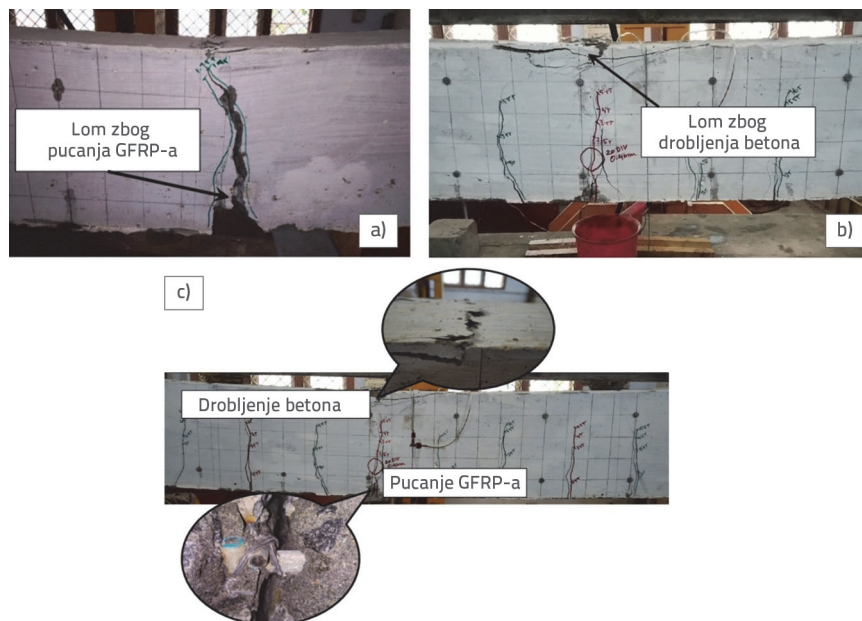
Slika 9. Tipični uzorci pukotina SCC greda

Grede su podijeljene u četiri skupine: I. i III. skupina (s malo armature, pri čemu je $\rho_f < \rho_{fb}$), te II. i IV. skupina (prekomjerno armirane, pri čemu je $\rho_f > \rho_{fb}$ te uravnotežene, pri čemu je $\rho_{fb} \leq \rho_f \leq 1.4$). Grede I. i III. skupine (označene s AO-G1 i A30-G1) imale su sličan obrazac pucanja, obilježen manjim brojem pukotina, većim razmakom između pukotina i većom širinom pukotina. Ovaj se ishod može povezati s nižim koeficijentom armiranja ($\rho_f = 0,68 \%$). Prema navodu Kalpana i Subramaniana [55] veće širine pukotina u gredama ojačanim GFRP-om prihvatljive su zbog svojstva otpornosti na koroziju GFRP-a. Uzorak pukotina greda iz II. skupine (AO-G2), s koeficijentom armiranja od $\rho_f = 1,08 \%$, bio je sličan onome iz I. skupine, ali s većim brojem pukotina, uzim razmakom

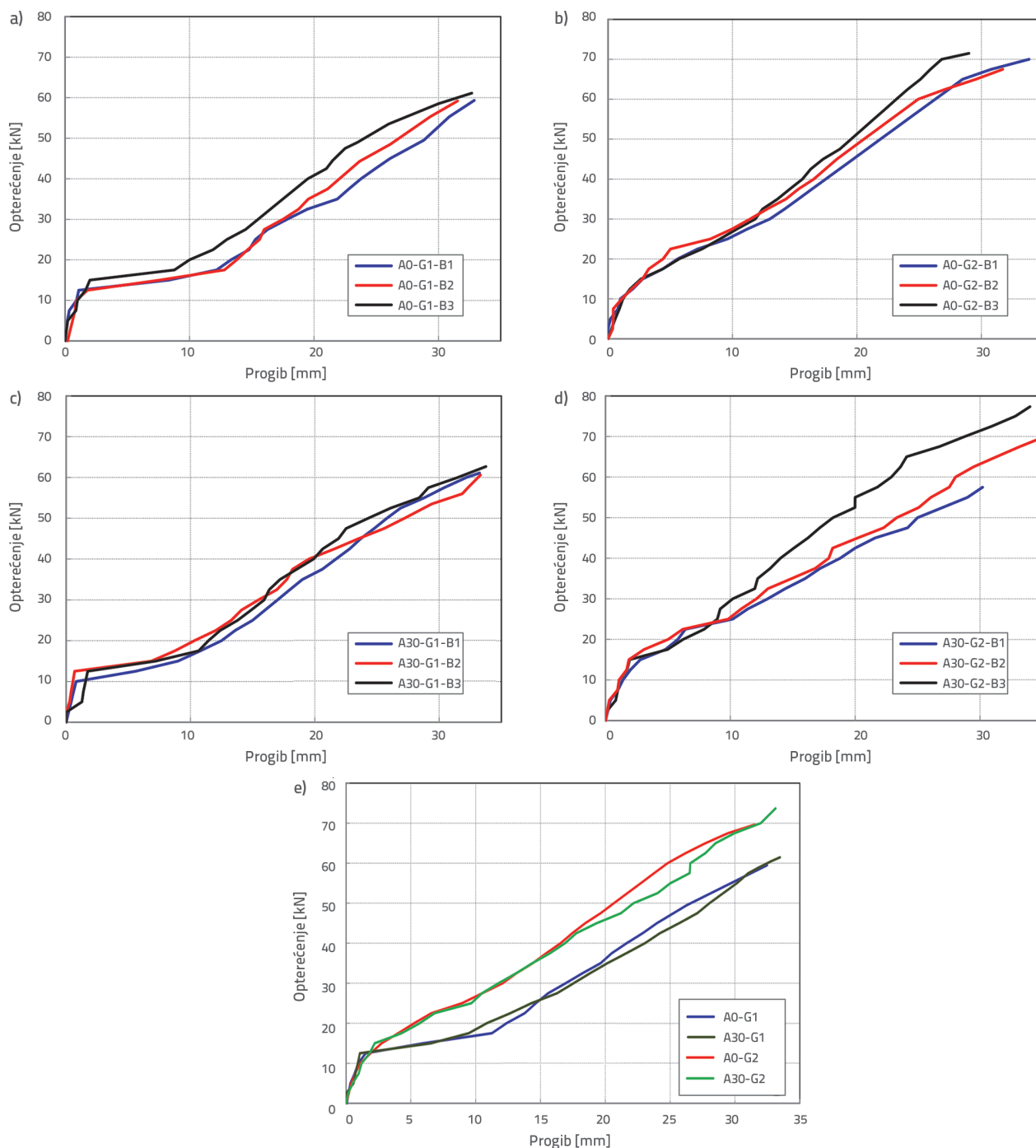
između pukotina i manjom širinom pukotina. To upućuje na veću nosivost. Slično tome, grede iz IV. skupine (A30-G2), također s koeficijentom armiranja od $\rho_f = 1,08 \%$, imale su šire pukotine s minimalnim razmakom. U svim je gredama došlo do preranog pucanja zbog nižeg Youngovog modula elastičnosti GFRP-a. Taj nizak modul priječi njegovu sposobnost da izdrži deformacije i učinkovito raspoređuje opterećenja, čime se povećava vjerojatnost preranog pucanja.

3.3. Način loma SCC greda

Slom greda ojačanih SCC-om u I. i III. skupini dogodio se u točki najvećega momenta savijanja. Do ovog loma dolazi uslijed pucanja GFRP armature, kako je prikazano na slici 10.a. Nije bilo prethodnih naznaka loma na tim gredama, umjesto toga, lom je bio iznenađan i krhak. Ovu vrstu loma također su u literaturi zabilježili Adam i sur., Ashour i Habeeb i Goldston i sur. [71, 72, 13]. U tim je slučajevima primijećen slom armaturnih šipki ojačanih FRP-om, dok je gornja betonska površina ostala netaknuta na mjestu sloma. Obrasci loma uravnoteženih armiranih greda u IV. skupini prikazani su na slici 10.c. Do ovog je loma došlo zbog puknuća GFRP šipke, nakon čega je uslijedilo drobljenje betona. U međuvremenu, grede s previše armature u II. skupini imale su prepoznatljiv način sloma, kako je prikazano na slici 10.b. U ovom slučaju, vertikalne pukotine pojavile su se oko sredine pretjerano armirane grede ojačane GFRP-om i zatim su se proširile prema nosačima. Povećanjem opterećenja pukotine uslijed savijanja i smicanja približavale su se nosačima. U konačnici su se te grede slomile uslijed tlačnog sloma betona na gornjoj površini.



Slika 10. Tipični način loma SCC greda: a) Nedovoljno armature; b) Prekomjerna armatura; c) Uravnotežena armatura



Slika 11. Krivulje opterećenja i progiba: a) A0-G1; b) A0-G2; c) A30-G1; d) A30-G2; e) prosjek

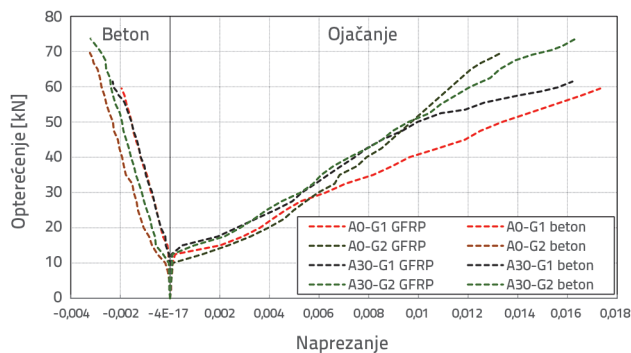
3.4. Karakteristike deformacije uslijed opterećenja

Slika 11. prikazuje eksperimentalne uzorke opterećenja i progiba greda. Profili opterećenja i progiba FRP-RC greda mogu se ugrubo podijeliti u dvije linearne faze, što upućuje na nagle promjene nagiba unutar krivulje. Početna točka, koja se naziva točka prvog pucanja, označava pojavu prve savojne pukotine u gredi. Nakon pojave pukotina uslijed savijanja, došlo je do smanjenja nagiba u gredama. Zbog nepopustljive

prirode FRP armature, krivulja opterećenja i progiba također je zadržala gotovo linearnu putanju prema slomu od točke prvog pucanja. Kao rezultat toga, ove krivulje opterećenja i progiba pokazale su višestruke manje promjene, što upućuje na to da nosivost naglo i blago pada tijekom procesa opterećenja. Zbog tih promjena krivulje opterećenja i progiba očituju se manjim cik-cak uzorcima umjesto ravnim linearnim slijedom. Do tih je promjena došlo uslijed klizanja vlakana unutar matrice.

3.5. Ponašanje pri deformaciji betona i armature

Slika 12. prikazuje ponašanje uslijed opterećenja i deformacije armaturnih šipki i betona, pri čemu koordinate (XY) i (-XY) pokazuju deformaciju armature i betona. Raspon deformacije betona uslijed pucanja obično iznosi između 0,0019 i 0,0035, kako je navedeno u američkim i kanadskim normama [70, 73]. S druge strane, do deformacije GFRP-a obično dolazi pri pucanju u rasponu između 0,013 i 0,017, prema kanadskim normama [74]. Ni u betonu ni u armaturi nisu uočene značajnije deformacije prije nastanka prve pukotine, nakon čega je došlo do bržeg povećanja vrijednosti deformacije. Krivulje opterećenja i deformacije GFRP-a i betona bile su gotovo linearne do sloma. Postoji značajan odnos između deformacije armature i betona i načina pucanja. U nedovoljno armiranim gredama deformacija armature približava se konačnoj deformaciji, dok to nije slučaj za deformaciju betona, što upućuje na način loma uslijed vlaka. Niže vrijednosti deformacije betona predstavljaju pukotine uslijed loma, pri čemu se pretpostavljene vrijednosti naprezanja ne mogu postići jer se beton učinkovito odupire vlačnim silama do nastanka prve pukotine. Povećanje opterećenja dovodi do širenja pukotina i omogućuje armaturi da izdrži vlačne sile, što rezultira konačnom deformacijom armature. U slučaju uravnotežene armirane grede, deformacije armature i betona približile su se konačnoj deformaciji, što upućuje na uravnoteženo pucanje. Kod prekomjerno armirane grede, deformacija betona gotovo je dosegla konačnu deformaciju, ali ne i u armaturi, što upućuje na tlačni slom.



Slika 12. Ponašanje SCC greda uslijed deformacije

3.6. Utjecaj koeficijenta armiranja

Povećanje udjela vlačne armature poboljšalo je svojstva greda pod statičkim opterećenjem. Povećana vlačna armatura također je ključna za povećanje nosivosti i smanjenje progiba u jednostavno poduprtim gredama, kako je navedeno u [71, 72]. Ovo otkriće također podupire empirijske nalaze koji su pokazali da povećanje vlačne armature dovodi do povećanja nosivosti i smanjenja progiba u sredini raspona. Na primjer, u konvencionalnim SCC gredama povećanjem koeficijenta armiranja s 0,68 % (A0-G1) na 1,03 % (A0-G2) došlo je do povećanja nosivosti od 20,33 % i smanjenja progiba u sredini

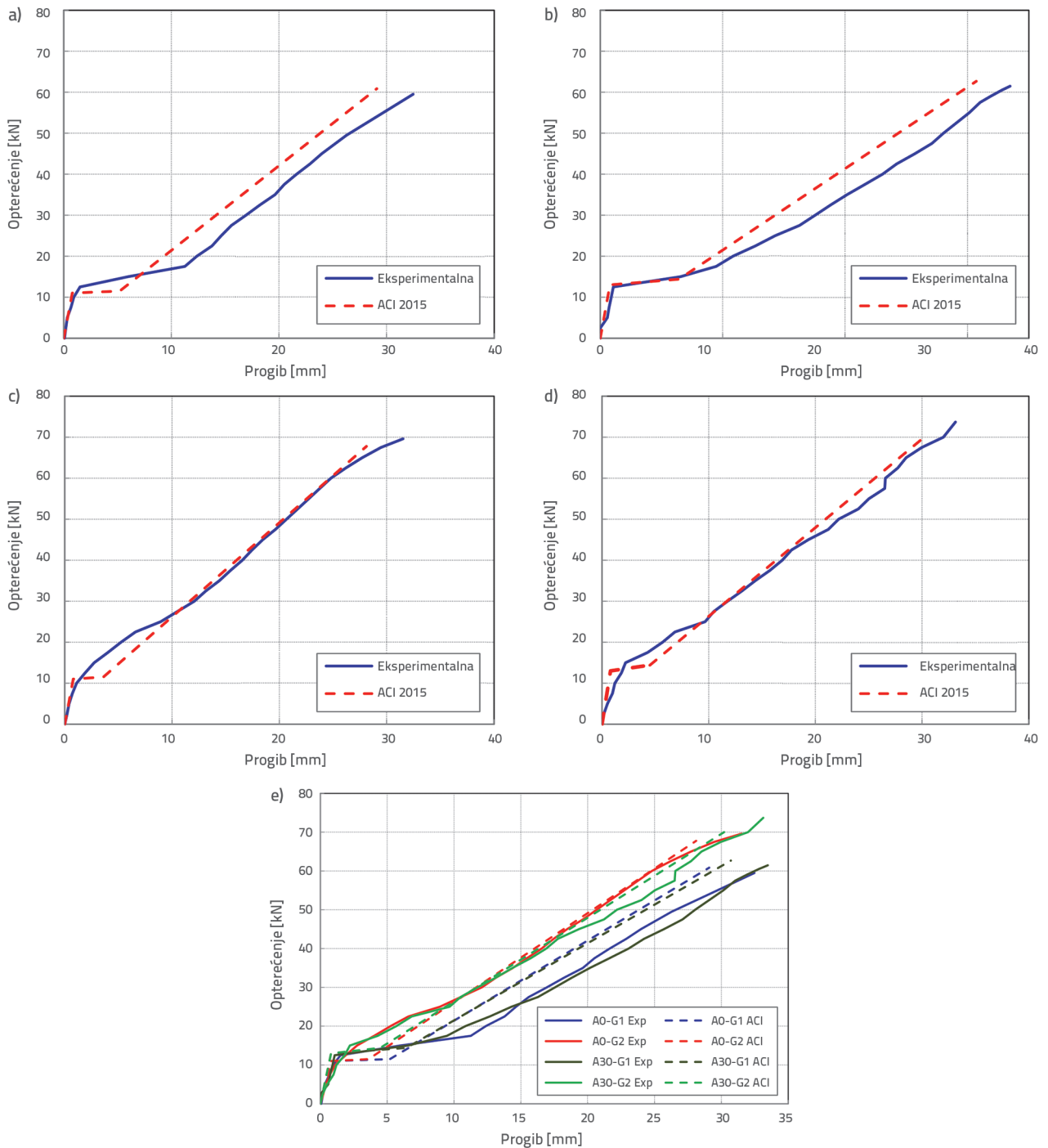
raspona od 9,83 %. Slično tome, u gredama ojačanim UFS-om, povećanje koeficijenta armiranja s 0,68 % (A30-G1) na 1,03 % (A30-G2) dovelo je do poboljšanja kapaciteta nosivosti od 11,55 % uz povećanje progiba u sredini raspona od 7,63 %.

3.7. Utjecaj tlačne čvrstoće betona

Učinak čvrstoće betona na sve ispitivane parametre ograničen je u slučaju konvencionalnih greda i samozbijajućih betonskih greda ojačanih UFS-om s koeficijentom armiranja (ρ_f) od 0,68 %. Za grede označene s A0-G1 i A30-G1, nosivost se povećala s 58,83 kN na 68,9 kN, bilježeći porast od približno 15,7 % jer je konvencionalna tlačna čvrstoća betona od 30,69 N/mm² zamijenjena čvrstoćom betona na bazi UFS-a od 48,15 N/mm². Međutim, povećanje nosivosti bilo je ograničeno jer su grede bile nedovoljno armirane, zbog čega se slom određivao vlačnom čvrstoćom armature. Srednji progib smanjio se za 1,57 % te je prešao s 32 mm (A0-G1) na 31,5 mm (A30-G1). Nasuprot tome, na ponašanje prekomjerno armiranih greda više je utjecala tlačna čvrstoća betona, kako je prikazano u istraživanju Goldstona i sur. iz 2017. [13], jer je slom u ovom slučaju bio uvjetovan samom čvrstoćom betona. Ovo istraživanje obuhvatilo je grede ojačane GFRP-om s koeficijentom armiranja (ρ_f) od 1,03 %, svrstane s obzirom na uvjete s prekomjernom (A0-G2) i uravnoteženom armaturom (A30-G2). Ova promjena konfiguracije armature potaknuta je povećanjem tlačne čvrstoće betona s 30,69 N/mm² do 48,15 N/mm². Kao rezultat toga, povećana nosivost porasla je za relativno skromnih 7,8 % (s 71,5 kN na 77,35 kN), uz povećanje deformacije srednjeg raspona od 15,87 % (s 29 mm na 34 mm).

3.8. Usporedba eksperimentalnih rezultata sa standardnom preporukom

Rezultati eksperimentalnih ispitivanja uspoređeni su s preporukama Američkog instituta za beton (American Concrete Institute, ACI) [69] za upotrebu FRP-a. Kao što je navedeno u ovim smjernicama, preferirani način loma armiranobetonskih greda ojačanih FRP-om je drobljenje betona. Razlog tome je činjenica da armiranobetonske grede ojačane FRP-om pokazuju određeni stupanj „duktilnosti“ i plastičnosti prije pucanja, što je naglašeno u smjernicama ACI-ja [69]. Za razliku od konvencionalnih čeličnih armiranobetonskih greda, kod kojih elastičnost čelika povećava duktilnost i služi kao indikator loma, armiranobetonske grede ojačane FRP-om slijede drugačiju filozofiju oblikovanja. Iznenadni lom uzrokovan pucanjem FRP šipki, što je svojstveno linearnoelastičnim FRP materijalima, smatra se vrlo štetnim i treba ga izbjegavati [51, 75, 76]. Kako bi se smanjio rizik od takvih iznenadnih lomova, oblik armiranobetonskih konstrukcija ojačanih FRP-om usmjeren je na promicanje loma drobljenjem betona. Ovaj pristup nudi vrstu pseudoduktilnog loma koji osigurava rano upozorenje prije rušenja strukture [4]. Za izračun nazivnog kapaciteta savijanja (projektiranog za savijanje) i progiba



Slika 13. Usporedba krivulja opterećenja i progiba iz eksperimenta u odnosu na ACI preporuke: a) A0-G1; b) A0-G2; c) A30-G; d) A30-G2; e) Sve prosječne vrijednosti grede (eksperimentalni rezultati i ACI preporuke)

srednjeg raspona armiranobetonskih greda ojačanih FRP-om, smjernice prikazane u tablici 8 pružaju odgovarajuće upute sa šiframa projekta za FRP [70]. Tablica 7. prikazuje usporedbu rezultata eksperimenata i predviđanja prema ACI-ju [70]. Ovom usporedbom izmjeren je postotak nepodudaranja između dva skupa rezultata. Pozitivne vrijednosti označavaju slučajeve u kojima su šifre projekta podcijenile učinak, dok negativne

vrijednosti upozoravaju na slučajeve u kojima su šifre projekta precijenile učinak. ACI [70] je točno predvidio načine loma SCC greda ojačanih GFRP-om. Za grede s koeficijentom armiranja od 1,07 došlo je do loma zbog istovremenog loma GFRP šipki i betona. U međuvremenu, grede označene s A0-G1 i A30-G1, s koeficijentima armiranja od 0,95 odnosno 0,71, otkazale su isključivo zbog loma GFRP šipke. Nasuprot tome, greda

označena s A0-G2, s koeficijentom armiranja od 1,42 (veći od 1,4), slomila se uslijed drobljenja betona na strani tlačne sile. Slika 13. prikazuje usporedbu između krivulja opterećenja i deformacije eksperimentalnih rezultata i onih koji su u skladu s ACI smjernicama. Općenito, smjernice za upotrebu FRP-a dale su precizne rezultate koji su bili u skladu s eksperimentalnim

rezultatima za tradicionalni samozbijajući beton i za SCC grede ojačane GFRP-om na bazi ultrazvukne troske. Prosječno odstupanje iznosilo je samo 0,90 na temelju ACI smjernica [70]. Nosivosti konvencionalnih i SCC greda ojačanih GFRP-om na bazi ultrazvukne troske razlikovale su se u prosjeku za manje od 6 %, što ističe točnost preporuka za upotrebu FRP-a.

Tablica 7. Usporedba rezultata eksperimenta i predviđanja

Greda	ρ_f/ρ_{fb}	Eksperiment		Teorija (ACI 440-1R-15)		Eksp.: ACI [%]	
		P [kN]	Δ [mm]	P [kN]	Δ [mm]	P [kN]	Δ [mm]
A0-G1	0,95	59,5	32,47	60,87	30,09	-2,27	7,60
A0-G2	1,42	69,61	31,52	67,78	28,11	2,66	11,43
A30-G1	0,71	61,47	33,47	62,68	30,71	-1,94	8,60
A30-G2	1,07	73,7	33,13	70,01	30,21	5,13	9,22
Srednja vrijednost						0,90	9,21

Tablica 8. Smjernice ACI-ja za šifre projekta za FRP [70]

Projektiranje savijanja		
Opis	ACI 440. 1R-15	Napomene
Za projektiranje vlačne čvrstoće	$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$ $\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^*$	Osiguravanje optimalne vlačne čvrstoće za upotrebu FRP-a
Uravnoteženi koeficijent armiranja	$\rho_f = 0,85 \beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{\varepsilon_{cu} E_f}{\varepsilon_{cu} E_f + f_{fu}}$	Omjer osigurava optimalnu ravnotežu između vlačne armature i čvrstoće betona za armiranobetonske elemente
Parametri naponsko-deformacijske veze	$\beta_1 = \left(0,85 - 0,05 \left(\frac{f'_c - 28}{7} \right) \right) \geq 0,65$	Utjecaj na strukturno ponašanje i točnost projektiranja u analizi betona
Koeficijent armiranja FRP-a	$\rho_f = \frac{A_f}{bd}$	Kada $\rho_f > 1,4 \rho_f$, presjek je pretjerano armiran Kada $\rho_f < \rho_{fb}$, presjek je nedovoljno armiran Kada $\rho_{fb} \leq \rho_f \leq 1,4 \rho_{fb}$, presjek je uravnoteženo armiran
Kapacitet nazivnog momenta	$M_n = \rho_f f_f \left(1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2$ $f_f = \sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0,85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0,5 E_f \varepsilon_{cu} \leq f_{fu}$	Za ojačani dio, pri čemu f_f - naprezanje u FRP armaturi uslijed vlaka mora biti manje od ili jednako krajnjoj vlačnoj čvrstoći FRP armature (f_{fu})
	$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right)$ $c_b = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_f} \cdot d$	Za nedovoljno armirani presjek, ACI pruža tradicionalnu i jednostavnu metodu za dobivanje nazivnog kapaciteta savijanja, a mora iznositi $M_n \geq M_u/\phi$
Izračun progiba srednjeg raspona		
Učinkovit moment inercije	$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \left[1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right]} \leq I_g$	Upotrebljava se za izračunavanje progiba srednjeg raspona.

Tablica 8. Smjernice ACI-ja za šifre projekta za FRP [70]

Projektiranje savijanja		
Opis	ACI 440. 1R-15	Napomene
Faktor γ	$\gamma = 1,72 - 0,72 \frac{M_{cr}}{M_a}$	Na njega utječu opterećenje i rubni uvjeti, a uzima u obzir duljinu nenapuknutih dijelova elementa i promjenu u krutosti u napuknutim dijelovima FRP-RC grede
Moment pucanja	$M_{cr} = \frac{(1,24 I_g \sqrt{f'_c})}{h}$	Moment pucanja je manji ili jednak primijenjenom momentu, tj. $M_{cr} \leq M_a$
Bruto moment inercije	$I_g = \frac{bd^3}{12}$	Bruto moment inercije je veći ili jednak momentu inercije, tj. $I_e \leq I_g$
Moment inercije	$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1-k)^2$	Izračunati moment inercije transformiranog napuknutog presjeka
Omjer k	$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f$	Omjer dubine neutralne osi i dubine armature
Omjer n_f	$n_f = \frac{E_f}{E_c}$	Omjer modula elastičnosti FRP šipki i modula elastičnosti betona

4. Zaključak

U ovom je istraživanju analizirano 12 greda ojačanih GFRP-om podijeljenih u dvije skupine: šest od tradicionalnog SCC-a i šest od SCC-a na bazi UFS-a (s udjelom UFS-a od 30 %). Cilj je bio procijeniti njihovu izvedbu pod opterećenjem u dvije točke. Istraživanje je uključivalo analizu odnosa opterećenja i deformacije, projektiranje savijanja na temelju smjernica ACI-ja i usporedbu eksperimentalnih rezultata s predviđanjima ACI-ja. Na temelju ukupnih nalaza iz eksperimentalnih i analitičkih istraživanja izvedeni su sljedeći zaključci:

- Nedovoljno armirane grede lome se zbog pucanja GFRP-a, dok uravnotežena armatura dovodi do kombiniranog pucanja šipke i loma uslijed drobljenja betona. Prekomjerno armirane grede uglavnom su se slomile uslijed drobljenja betona u tlačnoj zoni.
- Teorijska predviđanja ACI-ja precijenila su ($\rho_f = 0,68$) i podcijenila ($\rho_f = 1,03$) vrijednosti opterećenja za grede ojačane GFRP-om.
- Povećanje koeficijenta armiranja s 0,68 % na 1,03 % u SCC gredama povećalo je nosivost i smanjilo progib srednjeg raspona. Čvrstoća betona minimalno je utjecala na parametre, pri čemu SCCA30 malo nadmašuje SCCA0.
- Nedovoljno armirane grede imale su deformacije gotovo do konačne deformacije armature, što ukazuje na vlačni slom. Uravnotežene grede imale su deformacije koje su se približavale krajnjim razinama u armaturi i u betonu, što ukazuje na uravnoteženi slom. Kod prekomjerno armiranih greda gotovo je došlo do konačne deformacije betona, ali ne i deformacije armature, što označava tlačni slom.

- Najbolja kombinacija postignuta je kod SCC-a s 30 % UFS-a koji zamjenjuje cement u kombinaciji s GFRP-om. Za sveobuhvatno istraživanje karakteristika savijanja ovog kompozitnog sustava potrebni su daljnji eksperimenti i numeričke simulacije.

Popis nazivlja

- a - duljina posmičnog raspona
- A_f - područje armirano FRP-om
- b - širina pravokutnog poprečnog presjeka
- c - udaljenost od krajnjeg tlačnog vlakna do neutralne osi
- c_b - udaljenost od krajnjeg tlačnog vlakna do neutralne osi u uvjetima uravnotežene deformacije
- c_E - okolišni faktor umanjenja
- d - učinkovita dubina grede
- E_c - modul elastičnosti betona
- E_f - modul elastičnosti FRP-a
- f'_c - točno određena tlačna čvrstoća betona
- f_f - naprezanje u FRP armaturi u vlaknu
- f_{fu} - projektirana vlačna čvrstoća FRP-a
- f_{fu}^* - zajamčena vlačna čvrstoća FRP-a
- I_{cr} - moment inercije transformiranog napuknutog presjeka
- I_e - učinkovit moment inercije
- I_g - bruto moment inercije
- k - omjer dubine neutralne osi i dubine armature
- L - duljina

Popis nazivlja

- M_a - najveći moment radnog opterećenja
 M_{cr} - moment pucanja
 M_n - kapacitet nazivnog momenta
 M_u - faktorirani moment na presjeku
 n_f - omjer modula elastičnosti FRP šipki i modula elastičnosti betona
 P - opterećenje
 β - parametar naponsko-deformacijske veze
 Δ - progib srednjeg raspona
 ε_c - deformacija u betonu
 ε_{cu} - konačna deformacija u betonu
 ε_f - deformacija u FRP armaturi
 ε_{fu} - projektirana deformacija puknuća u FRP armaturi
 ε_{fu}^* - zajamčena deformacija puknuća u FRP armaturi
 ϕ - faktor smanjenja čvrstoće
 γ - faktor na koji utječu opterećenja i rubni uvjeti
 ρ_f - koeficijent armiranja FRP-a
 ρ_{fb} - uravnoteženi koeficijent armiranja FRP-a

LITERATURA

- [1] Dai, L., Bian, H., Wang, L., Potier-Ferry, M., Zhang, J.: Prestress loss diagnostics in pretensioned concrete structures with corrosive cracking, *J. Struct. Eng.*, 146 (2020) 3, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002554.
- [2] Wang, L., Dai, L., Bian, H., Ma, Y., Zhang, J.: Concrete cracking prediction under combined prestress and strand corrosion, *Struct. Infrastruct. Eng.*, 15 (2019) 3, pp. 285–295, doi: 10.1080/15732479.2018.1550519.
- [3] Sun, Z.Y., Yang, Y., Qin, W.H., Ren, S.T., Wu, G.: Experimental study on flexural behavior of concrete beams reinforced by steel-fiber reinforced polymer composite bars, *J. Reinf. Plast. Compos.*, 31 (2012) 24, pp. 1737–1745, doi: 10.1177/0731684412456446.
- [4] Saleh, Z., Goldston, M., Remennikov, A.M., Sheikh, M.N.: Flexural design of GFRP bar reinforced concrete beams: An appraisal of code recommendations, *J. Build. Eng.*, 25 (2019) 3, p. 100794, doi: 10.1016/j.job.2019.100794.
- [5] Ascione, L., Mancusi, G., Spadea, S.: Flexural behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars, *Strain*, 46 (2010) 5, pp. 460–469, doi: 10.1111/j.1475-1305.2009.00662.x.
- [6] Roja, S.Y., Gandhi, P., Pukazhendhi, D., Elangovan, R.: Studies on flexural behavior of concrete beams reinforced with GFRP bars, *Int. J. Sci. Eng. Res.*, 5 (2014) 6, pp. 82–90, doi: 10.5762/kais.2014.15.8.5318.
- [7] Zemour, N., Asadian, A., Ahmed, E.A., Khayat, K.H., Benmokrane, B.: Experimental study on the bond behavior of GFRP bars in normal and self-consolidating concrete, *Constr. Build. Mater.*, 189 (2018), pp. 869–881, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.045.
- [8] Mehany, S., Mohamed, H.M., Benmokrane, B.: Contribution of lightweight self-consolidated concrete (LWSCC) to shear strength of beams reinforced with basalt FRP bars, *Eng. Struct.*, 231 (2021) 8, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111758.
- [9] Mehany, S., Mohamed, H.M., El-Safty, A., Benmokrane, B.: Bond-dependent coefficient and cracking behavior of lightweight self-consolidating concrete (LWSCC) beams reinforced with glass- and basalt-FRP bars, *Constr. Build. Mater.*, 329 (2022) 4, p. 127130, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127130.
- [10] Jagadeesan, S., Kumaran, G.: Struct and tie model for the analysis of RC beam-column joints reinforced with non-metallic reinforcements, *Journal of Structural Engineering India*, 39 (2012) 1, pp. 140–145
- [11] Saravanan, J., Kumaran, G.: Joint shear strength of exterior beam-column joints reinforced with non-metallic reinforcements, *Int. J. Struct. Eng.*, 3 (2012) 3, pp. 137–159, doi: 10.1504/IJSTRUCT.2012.047708.
- [12] Golafshani, E.M., Rahai, A., Sebt, M.H.: Bond behavior of steel and GFRP bars in self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.*, 61 (2014), pp. 230–240, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.021.
- [13] Goldston, M.W., Remennikov, A., Sheikh, M.N.: Flexural behaviour of GFRP reinforced high strength and ultrahigh strength concrete beams, *Constr. Build. Mater.*, 131 (2017), pp. 606–617, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.094.
- [14] Goldston, M., Remennikov, A., Sheikh, M.N.: Experimental investigation of the behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars under static and impact loading, *Eng. Struct.*, 113 (2016), pp. 220–232, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.01.044.
- [15] Uğur, A.E., Ünal, A.: Assessing the structural behavior of reinforced concrete beams produced with macro synthetic fiber reinforced self-compacting concrete, *Structures*, 38 (2022), pp. 1226–1243, doi: 10.1016/j.istruc.2022.02.051.
- [16] Sashidhar, C., Jawahar, J.G., Kavyateja, B.V.: Structural behaviour of reinforced self-compacting concrete incorporating Alccofine and fly ash, *J. Civ. Eng. Inter. Discip.*, 2 (2021) 1, pp. 10–16, 2021
- [17] Kavyateja, B.V., Guru Jawahar, J., Sashidhar, C.: Effectiveness of Alccofine and fly ash on mechanical properties of ternary blended self-compacting concrete, *Mater. Today. Proc.*, 33 (2020), pp. 73–79, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.152.
- [18] Okamura, H., Ouchi, M.: Sel-Compacting Concrete, *J. Adv. Concr. Technol.*, 1 (2003) 1, pp. 5–15
- [19] Ghoddousi, P., Salehi, A.M.: Effect of mix proportion on robustness of self-compacting concrete, *Građevinar*, 67 (2015) 1, pp. 1–9, doi: 10.14256/JCE.1136.2014.
- [20] Chidambaram, P., Jagadeesan, S.: Characteristics of self-compacting concrete with different size of coarse aggregates and Alccofine, *Trends Sci.*, 19 (2022) 5, doi: 10.48048/tis.2022.3042.
- [21] Prithiviraj, C., Swaminathan, P., Kumar, D.R., Murali, G., Vatin, N.I.: Fresh and hardened properties of self-compacting concrete comprising a copper slag, *Buildings*, 12 (2022) 7, doi: 10.3390/buildings12070965.
- [22] Dinakar, P.: Design of self-compacting concrete with fly ash, *Mag. Concr. Res.*, 64 (2012) 5, pp. 401–409, doi: 10.1680/mac.10.00167.
- [23] Dinakar, P., Sethy, K.P., Sahoo, U.C.: Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag, *Mater. Des.*, 43 (2013), pp. 161–169, doi: 10.1016/j.matdes.2012.06.049.
- [24] EFNARC: The European Guidelines for selfcompacting concrete, *Eur. Guidel. Self-compact. Concr.*, <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>, [2.5.2023.]
- [25] ISO 1920-13: Testing of concrete — Part 13: Properties of fresh self-compacting concrete, *Int. Stand. Organ.*, <https://www.iso.org/standard/69414.html>, [2.5.2023.]

- [26] Mazloom, M., Ranjbar, A.: Relation between the workability and strength of self-compacting concrete relation between the workability and strength of self-compacting concrete, Proceedings of the 35th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, 2010.
- [27] Khatri, R.P., Sirivivatnanon, V.: Effect of different supplementary cementitious materials on mechanical properties of high - performance concrete, *Cem. Concr. Res.*, 25 (1995) 1, pp. 209–220
- [28] Srinath, B.L.N.S., Patnaikuni, C.K., Balaji, K.V.G.D., Kumar, B.S., Manjunatha, M.: A prospective review of Alccofine as supplementary cementitious material, *Mater. Today. Proc.*, 47 (2021), pp. 3953–3959, doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.719.
- [29] Boobalan, S.C., Srivatsav, V.A., Nisath, A.M.T., Babu, A.P., Gayathri, V.: A comprehensive review on strength properties for making Alccofine based high performance concrete, *Mater. Today. Proc.*, 45 (2021), pp. 4810–4812, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.278.
- [30] Kanellopoulos, A., Petrou, M.F., Ioannou, I.: Durability performance of self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.*, 37 (2021), pp. 320–325, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.049.
- [31] Sethy, K., Pasla, D., Sahoo, U.C.: Effect of slag on the rheological and strength properties of self-compacting concrete, *Key Eng. Mater.*, 629 (2015), pp. 399–404, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.629-630.399.
- [32] Narender Reddy, A., Meena, T.: A study on compressive behavior of ternary blended concrete incorporating Alccofine, *Mater. Today. Proc.*, 5 (2018) 5, pp. 11356–11363, doi: 10.1016/j.matpr.2018.02.102.
- [33] Ahmad, S., Umar, A., Masood, A., Nayeem, M.: Performance of self-compacting concrete at room and after elevated temperature incorporating Silica fume, *Adv. Concr. Constr.*, 7 (2019) 1, pp. 31–37, doi: 10.12989/acc.2019.7.1.031.
- [34] Balamuralikrishnan, R., Saravanan, J.: Effect of Alccofine and GGBS addition on the durability of concrete, *Civ. Eng. J.*, 5 (2019) 6, pp. 1273–1288, doi: 10.28991/cej-2019-03091331.
- [35] Raja Rajeshwari, B., Sivakumar, M.V.N.: Influence of coarse aggregate properties on specific fracture energy of steel fiber reinforced self-compacting concrete, *Adv. Concr. Constr.*, 9 (2020) 2, pp. 173–181, doi: 10.12989/acc.2020.9.2.173.
- [36] Schackow, A., Effting, C., Marcon Neto, D., Bonifácio, D.E., Gomes, I.R.: Properties of the self-compacting concrete with fly ashes, *Rev. Eng. Civ.*, 57 (2020) 7, pp. 26–35
- [37] Karthik, D., Nirmalkumar, K., Priyadarshini, R.: Characteristic assessment of self-compacting concrete with supplementary cementitious materials, *Constr. Build. Mater.*, 297 (2021), p. 123845, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123845.
- [38] Marinković, S., Protić, M., Paunović, S., Nešović, I., Bijeljić, J.: Application of industrial by-products as mineral admixtures for self-compacting concrete, *Građevinar*, 70 (2018) 1, pp. 31–38, doi: 10.14256/JCE.1516.2015.
- [39] Balamuralikrishnan, R., Saravanan, J.: Effect of addition of Alccofine on the compressive strength of cement mortar cubes, *Emerg. Sci. J.*, 5 (2021) 2, pp. 155–170, doi: 10.28991/esj-2021-01265.
- [40] Srinivas, K., Sankar, L.P., Swamy, C.K.: Experimental investigation on rapid strength gain by adding Alccofine in high strength concrete, *Mater. Today. Proc.*, 46 (2021), pp. 925–929, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.068.
- [41] Parveen, S., Lim, Y.Y., Pham, T.M.: Effective utilisation of ultrafine slag to improve mechanical and durability properties of recycled aggregates geopolymer concrete, *Clean. Eng. Technol.*, 5 (2021) 11, p. 100330, doi: 10.1016/j.clet.2021.100330.
- [42] Sagar, B., Sivakumar, M.V.N.: An experimental and analytical study on Alccofine based high strength concrete, *Int. J. Eng. Trans. A Basics*, 33 (2020) 4, pp. 530–538, doi: 10.5829/IJE.2020.33.04A.03.
- [43] Reddy, P.N., Jindal, B.B., Kavayateja, B.V., Narender Reddy, A.: Strength enhancement of concrete incorporating Alccofine and SNF based admixture, *Adv. Concr. Constr.*, 9 (2020) 4, pp. 345–354, doi: 10.12989/acc.2020.9.4.345.
- [44] Prithiviraj, C., Saravanan, J.: Influence of W/B ratio and chemical admixture on fresh and hardened properties of self-compacting concrete using Alccofine, *J. Xidian Univ.*, 14 (2020) 5, pp. 4906–4915, doi: 10.37896/jxu14.5/537.
- [45] Kavayateja, B.V., Jawahar, J.G., Sashidhara, C.: Durability performance of self-compacting concrete incorporating Alccofine and fly ash, *Int. J. Eng. Trans. B Appl.*, 33 (2020) 8, pp. 1522–1528, doi: 10.5829/ije.2020.33.08b.10.
- [46] Prithiviraj, C., Saravanan, J., Kumar, D.R., Murali, G., Vatin, N.I., Swaminathan, P.: Assessment of strength and durability properties of self-compacting concrete comprising Alccofine, *Sustain.*, 14 (2022) 10, p. 5895, doi: 10.3390/su14105895.
- [47] Sagar, B., Sivakumar, M.V.N.: Mechanical and microstructure characterization of Alccofine based high strength concrete, *Silicon*, 14 (2022) 3, pp. 795–813, doi: 10.1007/s12633-020-00863-x.
- [48] Saloni, A., Singh, V., Sandhu, A., Jatin, I., Parveen, J.: Effects of Alccofine and curing conditions on properties of low calcium fly ash-based geopolymer concrete, *Mater. Today. Proc.*, 32 (2020), pp. 620–625, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.763.
- [49] Vivek, K.C., Palanisamy, M., Debnath, S., Munagala, M.: Performance evaluation of durability and flexural behaviour of self-compacting concrete blended with Alccofine, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 1126 (2021) 1, p. 012083, doi: 10.1088/1757-899x/1126/1/012083.
- [50] Prithiviraj, C., Saravanan, J.: Flexural performance of Alccofine-based self-compacting concrete reinforced with steel and GFRP bars, *Int. Trans. J. Eng. Manag. Appl. Sci. Technol.*, 12 (2021) 8, pp. 1–12, doi: 10.14456/ITJEMAST.2021.168.
- [51] Nanni, A.: Flexural behavior and design of RC members using FRP reinforcement, *J. Struct. Eng.*, 119 (1993) 11, pp. 916–917, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(1995)121:5(916.2).
- [52] Benmokrane, B., Chaallal, O., Masmoudi, R.: Glass fibre reinforced plastic (GFRP) rebars for concrete structures, *Constr. Build. Mater.*, 9 (1995) 6, pp. 353–364, doi: 10.1016/0950-0618(95)00048-8.
- [53] Ganga Rao, P.V., Vijay, H.V.S.: Design of Concrete Members Reinforced with GFRP Bars, Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), 1997.
- [54] Xiao-jie, L., Zhi-wu, Y., Li-zhong, J.: Long term behavior of self-compacting reinforced concrete beams, *J. Cent. South Univ.*, 15 (2008) 3, pp. 423–428, doi: 10.1007/s11771.
- [55] Kalpana, V.G., Subramanian, K.: Behavior of concrete beams reinforced with GFRP bars, *J. Reinf. Plast. Compos.*, 30 (2011) 23, pp. 1915–1922, doi: 10.1177/0731684411431119.
- [56] You, Z., Chen, X., Dong, S.: Ductility and strength of hybrid fiber reinforced self-consolidating concrete beam with low reinforcement ratios, *Syst. Eng. Procedia*, 1 (2011), pp. 28–34, doi: 10.1016/j.sepro.2011.08.006.
- [57] Mazaheripour, H., Barros, J.A.O., Soltanzadeh, F., Sena-Cruz, J.: Deflection and cracking behavior of SFRSCC beams reinforced with hybrid prestressed GFRP and steel reinforcements, *Eng. Struct.*, 125 (2016), pp. 546–565, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.07.026.

- [58] Nikbin, I.M., Davoodi, M.R., Fallahnejad, H., Rahimi, S., Farahbod, F.: Influence of mineral powder content on the fracture behaviors and ductility of self-compacting concrete, *J. Mater. Civ. Eng.*, 28 (2016) 3, pp. 1–14, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001404.
- [59] Koya, B., Sureshkumar, M.: High strength self-compacting concrete reinforced beams with steel and GFRP bars: Performance of fly-ash and GGBS-based materials, *Eur. Chem. Bull.*, 12 (2023) 6, pp. 4286–4295
- [60] Mithra, M., Ramanathan, P., Muthupriya, P., Venkatasubramani, R.: Flexural behavior of reinforced self-compacting concrete containing GGBFS, *Int. J. Eng. Innov. Technol.*, 1 (2012) 4, pp. 124–129
- [61] Patel, S., Balakrishna, H.B.: Flexural behaviour of reinforced concrete beams replacing GGBS as cement and slag sand as fine aggregate, *Int. J. Civ. Struct. Eng. Res.*, 2 (2014) 1, pp. 66–75
- [62] Marshaline Seles, M., Suryanarayanan, R., Vivek, S.S., Dhinakaran, G.: Study on flexural behaviour of ternary blended reinforced self-compacting concrete beam with conventional RCC beam, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 80 (2017) 1, doi: 10.1088/1755-1315/80/1/012026.
- [63] Manju, R., Premalatha, J., Shanthi, R., Aishwaryalakshmi, V.: Flexural behaviour of self-compacting concrete beams, *Int. J. Civ. Eng. Technol.*, 8 (2017) 9, pp. 305–318
- [64] Vivek, S.S., Narayanan, R.S., Dhinakaran, G.: Comparative study on flexural behaviour of RCC beam and SCC ternary beams with mineral admixtures, *Constr. Build. Mater.*, 152 (2017), pp. 57–64, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.160.
- [65] Shijumon, V., Nalanth, N.: Flexural behaviour of self-compacting concrete beams modified using recycled concrete waste aggregates, *Int. J. Recent Technol. Eng.*, 8 (2019) 2, pp. 3413–3417, doi: 10.35940/ijrte.B2296.078219.
- [66] IS:12269-2013: Ordinary Portland Cement, 53 grade specification, *Indian Stand.*, (2013) 3 pp. 1–14
- [67] IS:383-2016: Specification for coarse and fine aggregates from natural sources for concrete, *Indian Stand.*, (2016) 4, pp. 1–24
- [68] IS:9103-2018: Concrete admixtures specification, *Indian Stand.*, (2018) 4.
- [69] D7205/D7205M – 06: Standard Test Method for tensile properties of fiber reinforced polymer matrix composite bars, *Am. Soc. Test. Mater.*, (2006) 2, pp. 1–12, https://www.astm.org/d7205_d7205m-06r16.html, [10.4.2010.]
- [70] ACI Committee: Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars (ACI440.1R-15), 22 (2015) 4.
- [71] Adam, M.A., Said, M., Mahmoud, A.A., Shanour, A.S.: Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars, *Constr. Build. Mater.*, 84 (2015), pp. 354–366, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.057.
- [72] Ashour, A.F., Habeeb, M.N.: Continuous concrete beams reinforced with CFRP bars, *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.*, 161 (2008) 6, pp. 349–357, doi: 10.1680/stbu.2008.161.6.349.
- [73] Canadian Standards Association: Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers (CAN/CSA S806-02), p. 177, 2009.
- [74] ISIS Canada Research Network: Reinforcing concrete structures with fibre reinforced polymers, (2007) 3.
- [75] Faza, S.S., Ganga Rao, H.V.S.: Theoretical and experimental correlation of behavior of concrete beams reinforced with fiber reinforced plastic rebars, *American Concrete Institute Special Publication*, 138 (1993), pp. 599–614, doi: 10.14359/3942.
- [76] Theriaule, M., Benmokrane, B.: Effects of FRP reinforcement ratio and concrete strength, *J. Compos. Constr.*, 2 (1998) 2, pp. 7–16