

Primljen / Received: 10.6.2020.
 Ispravljen / Corrected: 30.9.2020.
 Prihvaćen / Accepted: 3.11.2020.
 Dostupno online / Available online: 10.1.2021.

Mehanička svojstva pri savijanju betona armiranog vlaknima od nehrđajućeg čelika

Autori:



¹Doc.dr.sc. **Predrag Blagojević**, dipl.ing.građ.
predrag.blagojevic@gaf.ni.ac.rs



²Nikola Blagojević, mag. ing. aedif.
blagojevic@ibk.baug.ethz.ch



³Izv.prof.dr.sc. **Danijel Kukaras**, dipl.ing.građ.
danijel.kukaras@gmail.com
 Autor za korespondenciju



¹Dr.sc. **Darko Živković**, dipl.ing.građ.
darko.zivkovic@gaf.ni.ac.rs



¹Aleksandar Šutanovac, mag. ing. aedif.
aleksandar.sutanovac@gaf.ni.ac.rs

¹Sveučilište u Nišu, Srbija
 Građevinsko-arhitektonski fakultet

²ETH Zurich

Odsjek za građevinsko, okolišno i geotekničko inženjerstvo

³Sveučilište u Novom Sadu, Srbija
 Građevinski fakultet

Prethodno priopćenje

Predrag Blagojević, Nikola Blagojević, Danijel Kukaras, Darko Živković, Aleksandar Šutanovac Mehanička svojstva pri savijanju betona armiranog vlaknima od nehrđajućeg čelika

Eksperimentalno istraživanje provedeno je kako bi se ispitalo utjecaj vlakana od nehrđajućeg čelika na mehanička i savojna svojstva betona. Koristila su se 72 uzorka kako bi se utvrdila optimalna doza vlakana i odredila mehanička svojstva nearmiranog betona te betona ojačanog čeličnim vlaknima. Dvanaest uzoraka greda realnih veličina ispitano je savijanjem u četiri točke. Provedenim ispitivanjem kvantificiran je utjecaj vlakana nehrđajućeg čelika na mehanička svojstva pri savijanju greda. Provedeno je i ispitivanje uzorka greda savijanjem u četiri točke nakon što je na njemu provedeno ispitivanje na zamor s 15000 ciklusa opterećenja. Uspoređena su i analizirana mehanička svojstva pri savijanju greda s čeličnim vlaknima prije i poslije ispitivanja na zamor.

Ključne riječi:

beton ojačan čeličnim vlaknima, vlakna nehrđajućeg čelika, mehanička svojstva, ispitivanje na zamor

Research Paper

Predrag Blagojević, Nikola Blagojević, Danijel Kukaras, Darko Živković, Aleksandar Šutanovac Mechanical flexural properties of concrete with melt-extract stainless steel fibres

An experimental study is performed to evaluate the effect of melt-extract stainless steel fibres on mechanical and flexural properties of concrete. A total of seventy-two specimens are used to determine an optimum fibre dosage and mechanical properties of plain and steel fibre reinforced concrete. Twelve full-scale beam specimens are then exposed to four-point bending tests. The effect of melt-extract stainless steel fibres on flexural behaviour of beams is quantified in this testing. A beam specimen is exposed to four-point bending, after being subjected to 15000 cycles of fatigue load. Pre- and post-fatigue flexural properties of beams with melt-extract steel fibres are compared and discussed.

Key words:

steel fibre reinforced concrete, melt-extract stainless steel fibres, mechanical properties, fatigue test

Vorherige Mitteilung

Predrag Blagojević, Nikola Blagojević, Danijel Kukaras, Darko Živković, Aleksandar Šutanovac Mechanische Eigenschaften beim Biegen von Beton, der mit Edelfasern bewehrt ist

Eine experimentelle Studie wurde durchgeführt, um den Einfluss von Edelfasern auf die mechanischen und Biegeeigenschaften von Beton zu untersuchen. 72 Proben wurden verwendet, um die optimale Faserdosierung und die mechanischen Eigenschaften von Stahlbeton und Stahlfaserbeton zu bestimmen. Zwölf Proben von Balken realer Größe wurden durch Biegen an vier Punkten getestet. Der Test quantifizierte den Einfluss von Edelfasern auf die mechanischen Eigenschaften von Biegebalken. Ein Vierpunkt-Biegetest wurde auch durchgeführt, nachdem ein Ermüdungstest mit 15.000 Lastzyklen durchgeführt wurde. Die mechanischen Eigenschaften beim Biegen von Stahlfaserträgern vor und nach Ermüdungsprüfungen wurden verglichen und analysiert.

Schlüsselwörter:

Stahlfaserbeton, Edelfasern, mechanische Eigenschaften, Ermüdungsprüfung

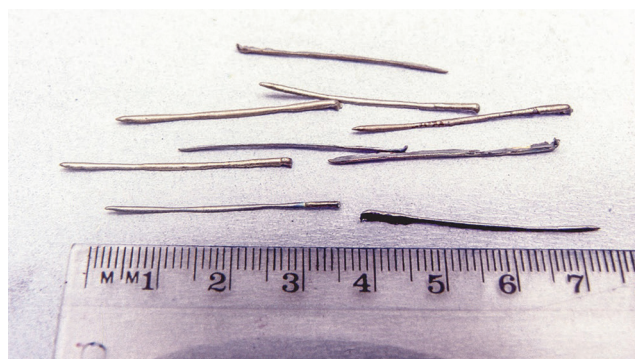
1. Uvod

Glavni nedostaci betona u mehaničkom smislu su kruti način loma i manjak vlačne čvrstoće. Ti se nedostaci u praksi ublažavaju uporabom čeličnih armaturnih šipki. No, unatoč čeličnoj armaturi, neizbježno je pucanje armiranog betona. Čvrstoća i uporabivost armiranog betona uvelike se smanjuje zbog pojave pukotina. U posljednjih nekoliko desetljeća značajno se istražuje uporaba čeličnih vlakana kao dodatak ili alternativa čeličnoj armaturi [1, 2]. U usporedbi s čeličnim šipkama, mala veličina čeličnih vlakana omogućava homogeniju raspodjelu čelika u betonu čime se sprječava ili odgađa nastanak pukotine. Mehanizmi zadržavanja ili premošćivanja pukotine [1] koji se razvijaju u betonu ojačanom čeličnim vlaknima (eng. *steel fiber reinforced concrete* - SFRC) prepoznati su kao glavni mehanizmi putem kojih se unaprjeđuju mehanička svojstva betona poput vlačne čvrstoće i posmične čvrstoće. Te pogodnosti vode do nekoliko poboljšanja u konstrukcijskoj izvedbi, među kojima su povećanje duktilnosti pri savijanju, zamorna čvrstoća, veći otpor udarnom opterećenju te duže trajanje [1, 3, 4]. Glavni je nedostatak SFRC-a nemogućnost kontrole raspodjele i smjera vlakana koji vode do neusklađenog ponašanja konstrukcije [5, 6]. Utjecaj čeličnih vlakana na svojstva betona u velikoj mjeri ovisi o volumnom udjelu vlakana (tj. omjer između volumena čeličnih vlakana i volumena betona) i oblika vlakana (primjerice ravni, nepravilni, vlakna savijena na krajevima) i dimenziji vlakana. Vlačna i savojna čvrstoća betona povećavaju se s povećanjem volumnog udjela vlakana [7-9]. Nekoliko eksperimentalnih i teoretskih istraživanja utvrdilo je da nepravilan oblik vlakana poput nabora ili savijenih krajeva ima pozitivan utjecaj na savojnu i vlačnu čvrstoću betona [8, 10-12]. Razlog je veća izvlačna čvrstoća tih vlakana zbog mehaničkog uporišta koje stvara deformirani oblik [11]. Ipak, obradivost betona smanjuje se s povećanjem volumnog udjela vlakana zbog pojave stvaranja gruda vlakana (ježeva), posebno izraženog kod vlakana savijenih krajeva te kod čeličnih vlakana nepravilne geometrije [7, 10, 13].

Proturječni su eksperimentalni rezultati koji se tiču utjecaja čeličnih vlakana na tlačnu čvrstoću i modul elastičnosti. Određena istraživanja potvrdila su da čelična vlakna smanjuju tlačnu čvrstoću i modul elastičnosti [13, 14], dok se kod drugih opazilo povećanje tih svojstava betona [15].

Ipak, utjecaj čeličnih vlakana na tlačnu čvrstoću i modul elastičnosti nije značajan. Čelična vlakna ne utječu značajno na svojstva betona prije pucanja, njihov je utjecaj očit onda kad se pojavi pukotina [10, 16]. Čelična vlakna omogućavaju povoljniju raspodjelu pukotina te zbog toga pukotine imaju manji otvor i ravnomjernije su rasprostranjene [17]. Kad se uzdužna armatura (odnosno šipka) koristi zajedno s čeličnim vlaknima, u uzdužnoj armaturi deformacija se smanjuje zbog čeličnih vlakana. Ipak, smanjuje se relativno poboljšanje svojstava pri savijanju betona koje uzrokuju čelična vlakna [17]. U ovom radu ispituju se svojstva betona ojačanog taljenim ekstraktima

vlakana nehrđajućeg čelika (MESS). MESS vlakna stvara okretni kotač koji okreće rastaljeni metal na otvorenom zraku. Stoga su vlakna nepravilne, djelomično nasumične geometrije budući da proces proizvodnje dopušta određenu promjenjivost oblika vlakna (slika 1.). Zbog toga što im sastav čini nehrđajući čelik, vlakna su prikladna za uporabu u okolišu sklonom koroziji [18, 19]. Osim toga, ta se vlakna obično koriste u vatrostalnom betonu jer on podnosi visoke temperature [20]. Ipak, deficitarni su eksperimentalni rezultati mehaničkih i konstrukcijskih pogodnosti uporabe MESS vlakana. Cilj je ovog istraživanja ispitati svojstva betona ojačanog taljenim vlaknima nehrđajućeg čelika (eng. *melt-extract stainless steel fiber reinforced concrete* - MESSFRC) i kvantificirati pogodnosti dodavanja tih vlakana betonu, te na taj način ispitati njihovu vrijednost u praksi. Iz tog se razloga provelo eksperimentalno istraživanje kako bi se odredila mehanička i konstrukcijska svojstva MESSFRC-a. Idenični uzorci običnog betona ispituju se i uspoređuju s rezultatima MESSFRC-a. Osim toga, greda realne veličine izlaže se niskocikličnom ispitivanju zamora i nakon toga se statički ispituje da bi se utvrdilo kako zamor utječe na mehanička i konstrukcijska svojstva greda s MESS vlaknima.



Slika 1. Taljeni ekstrakti vlakana nehrđajućeg čelika

2. Eksperimentalni program

Uzorci koji imaju različiti volumni udio MESS vlakna, koji varira između 0,75 % i 2,5 %, ispituju se prvi kako bi se odredila optimalna doza vlakana. Određuju se mehanička svojstva poput elastičnog modula te tlačne i vlačne čvrstoće ispitanih uzoraka običnog betona i MESSFRC-a. Kako bi se ispitalo savijanje MESSFRC greda, dvanaest greda realnih veličina (176 mm x 100 mm x 2000 mm) izlaže se savijanju u četiri točke i uspoređuje s uzorcima običnog betona. Dijelovi ispitivanja izloženi u ovom radu, ispitivanje savijanjem u četiri točke, objavljeni su u [21] te se ponavljaju ovdje radi cjelovitosti. Greda se tada izlaže niskocikličnom ispitivanju zamora. Uzorak se statički ispita nakon 15000 ciklusa opterećenja. Cilj je bio usporediti svojstva pri savijanju MESSFRC greda prije i poslije ispitivanja zamora. Tablica 1. daje pregled izvedenih testova i dimenzija uzoraka, količinu, udio vlakana i starost uzorka.

Tablica 1. Pregled provedenih ispitivanja

Vrsta ispitivanja	Oblik i dimenzija uzorka	Broj uzoraka	Sadržaj vlakana [%]	Starost uzorka
Zbijanje	Kocka 100 mm	3	0,75	7 dana
		3	1,5	
		3	2	
		3	2,5	
Savijanje u 4 točke	Prizma 100 mm x 100 mm x 500 m	3	0,75	
		3	1,5	
		3	2	
		3	2,5	
Cijepanje	Cilindar 100 mm x 200 mm	3	0,75	
		3	1,5	
		3	2	
		3	2,5	
Zbijanje	Kocka 100 mm	6	0	28 dana
Savijanje u četiri točke	Prizma 100 mm x 100 mm x 500 m	6	1,5	
		6	0	
Cijepanje	Cilindar 100 mm x 200 mm	6	1,5	
		6	0	
Ispitivanje ISO 6784 kako bi se postigao modul elastičnosti	Cilindar 100 mm x 200 mm	3	0	
		3	1,5	
Savijanje grede bez uzdužnog ojačanja u četiri točke (serija B)	Greda 100 m x 176 mm x 2000 mm	3	0	
		3	1,5	
Savijanje grede s uzdužnim ojačanjem u četiri točke (serija RB)		3	0	
		3	1,5	
Savijanje u četiri točke nakon zamora		1	1,5	

2.1. Svojstva mješavine

Tablica 2. prikazuje omjere mješavine prema težini. Maksimalni promjer agregata bio je ograničen na 10 mm. Upotrebljava se obični portlandski cement. Omjer vode i cementa je 0,4. Vlakna su duga 35 mm s istovrijednim promjerom od 0,64 mm te omjerom duljine i promjera od 55. Vlačna čvrstoća vlakana je 897 MPa. Agregat, cement i čelična vlakna najprije se miješaju tri minute kako bi se spriječilo grudanje i neravnomjerna raspodjela. Zatim se mješavini dodaje voda uz miješanje dvije minute. Svi uzorci, osim dvanaest greda u punoj veličini, vibriraju se na stolu za vibriranje. Grede se nisu mogle staviti na vibrostol zbog svojih dimenzija, pa su pažljivo vibrirane pervibratorom kako se ne bi smanjila homogenost mješavine. To je postignuto tako što se je najprije vertikalno umetnuo i izvukao pervibrator bez povlačenja kroz gredu, te potom tako što se pervibrator naslanjao na vanjsku površinu okvira čime je prenio vibracije s okvira na beton.

Uzorci se vade iz kalupa nakon 24 sata i njeguju u vodi 28 dana prije ispitivanja. Izuzetak su uzorci koji se koriste kako bi se dobila optimalna doza vlakana koja se ispitala sedmog dana.

Tablica 2. Omjeri mješavine prema težini za 1,5 % volumnog udjela vlakana

	Težina [kg/m ³]	Omjer težine
Portlandski cement	750	1
Pijesak (0 mm-4 mm)	885	1,18
Grubi agregat (4-10 mm)	645	0,86
Voda	300	0,4
Vlakna (duljina = 35 mm, promjer = 0,64 mm)	117	0,156

2.2. Optimalna doza vlakana

Prvi je korak eksperimentalnog istraživanja odrediti optimalnu dozu vlakana. Volumen frakcije vlakana varirao je od 0,75 % do 2,5 %. Tlačna čvrstoća ispitivala se na tri betonske kocke veličine 100 mm. Ispitivanje savijanjem u četiri točke i ispitivanje cijepanjem provedena su kako bi se odredila vlačna čvrstoća uzoraka čije doze vlakana variraju. Dimenzije prizmi izloženih ispitivanju savijanjem u četiri točke iznosile su 100 mm x 100 mm x 500 mm, a raspon je iznosio 410 mm. Uzorci koji su se koristili za ispitivanje cijepanja bili su cilindri duljine 200 mm i promjera 100 mm. Ukupno je ispitano 36 uzoraka.

2.3. Mehanička svojstva

Jednom kad se utvrdila optimalna doza vlakana, izrađeni su novi uzorci koji sadrže optimalnu dozu vlakana i koji su se njegovali 28 dana prije ispitivanja. Dimenzije uzoraka bile su iste kao i one opisane u dijelu 2.2, a mogu se naći i u tablici 1.

Tlačna čvrstoća

Tlačna se čvrstoća ispitivala na šest uzoraka običnog betona i šest uzoraka MESSFRC-a.

Vlačna čvrstoća betona

Ispitivanje savijanjem prizme u četiri točke te ispitivanje cijepanjem valjka provedena su se kako bi se utvrdila vlačna čvrstoća uzorka s optimalnom dozom vlakana pri savijanju. Ispitana su ukupno 24 uzorka.

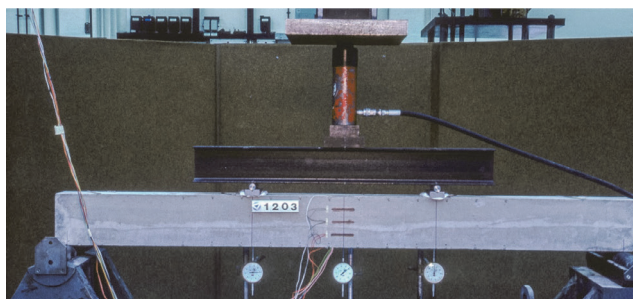
Modul elastičnosti

Modul elastičnosti izračunao se na temelju ispitivanja valjka običnog betona i MESSFRC valjka. Primjenjuje se opterećenje u skladu s normom ISO 6784 [22].

2.4. Savijanje MESSFRC greda u četiri točke

Ispitivanje savijanjem u četiri točke provedeno je na dvanaest MESSFRC greda, od kojih šest bez uzdužne armature (označene kao B) te šest s dvije šipke promjera 8 mm (označenih kao RB). Tri grede serije B sadržavale su MESS vlakna, s oznakom B-SF uzorci (grede s čeličnim vlaknima). Grede koje su bile od običnog betona nosile su oznaku B-PC. Grede koje su imale samo uzdužnu armaturu bile su označene kao RB-PC (tj. armirane grede – obični beton, od engl. *reinforced beams–plain concrete*), a grede s uzdužnom armaturom i MESS vlaknima označene su kao RB-SF (tj. armirane grede – čelična vlakna, od engl. *reinforced beams–steel fibers*). Dimenzije poprečnog presjeka grede su 100 mm x 176 mm, a duljina greda je 2000 mm s ukupnim rasponom od 1920 mm (slika 2.). Granica popuštanja rebraste armature je 460 MPa. Zaštitni sloj na armiranim gredama je 14 mm. Grede nisu bile poprečno ojačane. Volumen vlakana bio je 1.5% za sve uzorke. Progibi su se mjerili na sredini grede te na trećinama raspona

grede. Pet tenzometara postavljeno je po visini presjeka sa svake strane na sredini raspona (slika 2.). Nadalje, u jednom uzorku RB-PC i RB-SF serije tenzometri su postavljeni na uzdužnu armaturu. Grede su opterećene uz pomoć hidraulične preše na trećini raspona grede (slika 2.). Opterećenje je nanošeno kontrolom sile, brzinom od 10 kN/h, s prirastom od 1 kN.



Slika 2. Struktura grede koja se savija u četiri točke

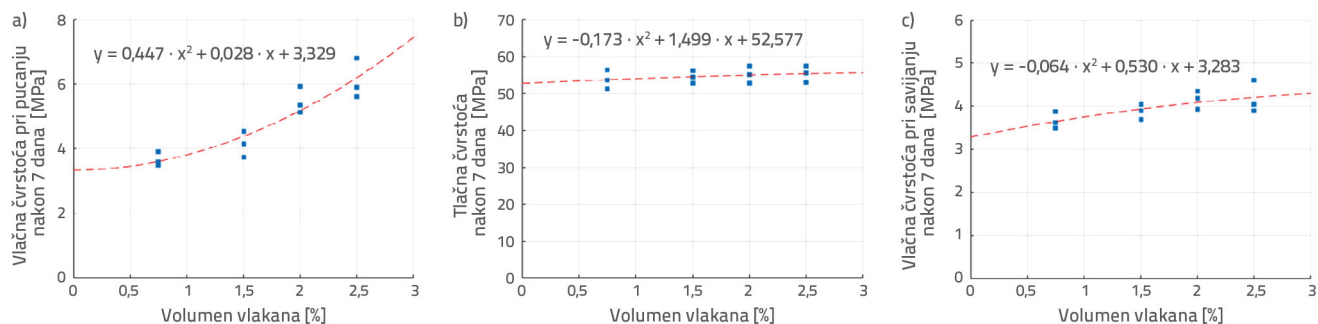
2.5. Ispitivanje MESSFRC greda savijanjem nakon ispitivanja na zamor

Jedan uzorak MESSFRC grede, identičan onima koji su se koristili u statičkom ispitivanju savijanjem (100 mm x 176 mm x 2000 mm, raspona 1920 mm), najprije je ispitan na zamor, a onda statički. Tijekom ispitivanja na zamor opterećenje se nanosilo na trećine raspona s frekvencijom od 0,5 Hz koristeći ispitni uređaj Losenhausen kapaciteta 100 kN. Niža razina opterećenja bila je 2 kN, a gornja 22,5 kN, što je približno 60 % eksperimentom dobivene čvrstoće pri savijanju. Nakon 15.000 ciklusa, greda je izložena statičkom ispitivanju savijanjem u četiri točke, istom onom koje je opisano u poglavlju 2.4. Dobivaju se odnosi opterećenja i deformacija te opterećenja i progiba te se uspoređuju s rezultatima ispitivanja prije zamora.

3. Rezultati i rasprava

3.1. Optimalna doza vlakana

Slika 3. prikazuje tlačnu i vlačnu čvrstoću uzoraka starih sedam dana s varirajućim volumnim udjelom vlakana, kao i postavljenu polinomnu funkciju drugog stupnja koja ilustrira trend proučavanih podatkovnih točaka. Tablica 3. prikazuje srednje vrijednosti i koeficijente varijacije za te mehaničke parametre koji su izračunani na temelju rezultata ispitivanja na tri uzorka za svaki volumni udio vlakana. Vrijednosti ispitanih mehaničkih svojstava rasle su s porastom volumnog udjela vlakana. Povećanje vlačne čvrstoće pri savijanju i cijepanju bilo je izraženije nego povećanje tlačne čvrstoće. U usporedbi s uzorcima koji imaju volumni udio vlakana od 0,75 %, srednja vrijednost vlačne čvrstoće pri savijanju povećana je za 14 %, a srednja vrijednost vlačne čvrstoće pri cijepanju povećana je za 66 % kod uzoraka čiji je volumni udio vlakana bio 2,5 %, dok



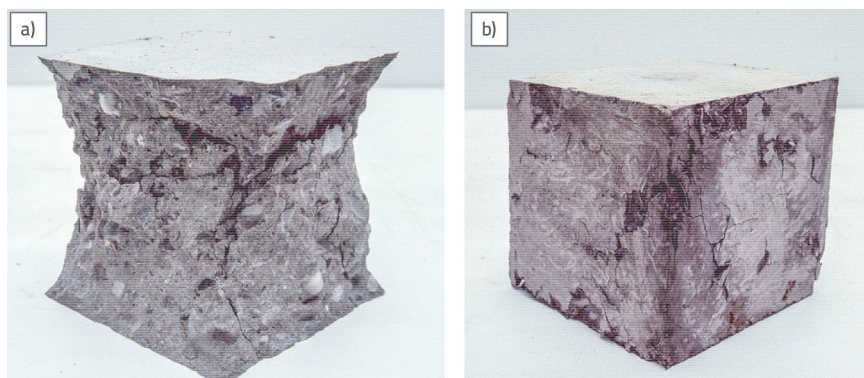
Slika 3. a) Vlačna čvrstoća pri pucanju; b) tlačna čvrstoća; c) čvrstoća pri savijanju za uzorke čiji udio vlakana varira

Tablica 3. Srednje vrijednosti i koeficijenti varijacije za mehanička svojstva uzoraka starih 7 dana s varirajućim volumnim udjelom vlakana

Volumni udio [%]	Vlačna čvrstoća pri cijepanju [MPa]	Vlačna čvrstoća pri savijanju [MPa]	Tlačna čvrstoća [MPa]
0,75	3,66 (5,8 %)	3,66 (5,4 %)	53,63 (4,8 %)
1,5	4,14 (9,8 %)	3,87 (4,4 %)	54,34 (3 %)
2	5,46 (7,6 %)	4,16 (5,1 %)	55,01 (4,2 %)
2,5	6,09 (10,2 %)	4,18 (8,9 %)	55,2 (4 %)

*Vrijednosti izražene u zagradama koeficijenti su varijacije

se vrijednost tlačne čvrstoće povećala za samo 3 %. Kako bi se kvantificirala promijenjivost rezultata, koeficijent varijacije (CoV) izračunan je za svaki volumni udio vlakana i to na temelju rezultata triju ispitivanja (tablica 3.). Rezultati koeficijenta varijacije tlačne čvrstoće bili su konstantni za sve volumne udjele i to oko 4 %. Koeficijent varijacije vlačne čvrstoće pri cijepanju povećao se s povećanjem volumnog udjela vlakana, i to s 5,8 % za udio vlakana 0,75 % na 10,2 % za udio vlakana 2,5 %. Koeficijent varijacije vlačne čvrstoće pri savijanju bio je oko 5 % za volumne udjele vlakana u rasponu od 0,75 %, 2,5 % i 8,9 % za 2,5 % vlaknastog udjela. Primijećeno je veće stvaranje vlaknastih gruda (ježeva) kad je volumen vlakana iznad 1,5 %, te je obradivost betona znatno smanjena. Stoga, kako bi se izbjegla neravnomjerna raspodjela vlakana u većim uzorcima, odlučeno je volumni udio vlakana ograničiti na 1,5 % u budućim ispitivanjima.



Slika 4. a) Uzorak kocke bez MESS vlakana; b) Uzorak kocke s MESS vlaknima nakon ispitivanja tlačne čvrstoće

3.2. Mehanička svojstva

Tablica 3. prikazuje srednje vrijednosti i koeficijente varijacije mehaničkih svojstava za uzorke običnog betona (bez vlakana) i za uzorke s 1,5 % MESS vlakana (s vlaknima).

3.2.1. Tlačna čvrstoća

Nije se uočilo značajno povećanje tlačne čvrstoće dodavanjem MESS vlakana. Ipak, uočena je razlika u ponašanju uzoraka pri lomu. Prisutnost MESS vlakana spriječila je odlamanje betona (slika 4.). To otkriće u skladu je s [7, 23, 24].

3.2.2. Vlačna čvrstoća pri savijanju

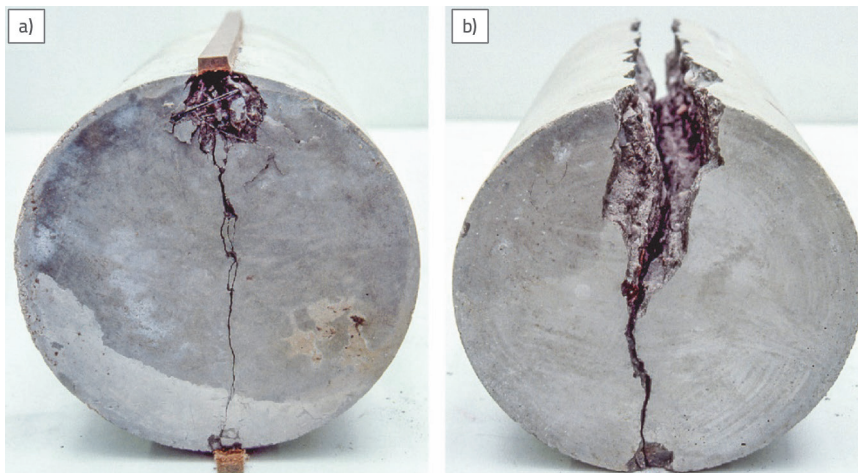
Tablica 4. prikazuje usporedbu vlačne čvrstoće običnog betona i betona ojačanog čeličnim vlaknima. Eksperimentalni rezultati

pokazuju da su MESS vlakna povećala vlačnu čvrstoću uzoraka pri savijanju i to za 33,75 % u prosjeku. Nadalje, primijećeno je povećanje varijacije rezultata, koeficijent varijacije povećao se s 9,7 % za uzorke bez vlakana na 16,7 % za uzorke s vlaknima (tablica 4.).

3.2.3. Vlačna čvrstoća pri cijepanju

Slika 5. prikazuje utjecaj koji ima dodavanje MESS vlakana na vlačnu čvrstoću betona cijepanjem. Nakon ispitivanja cijepanjem, uzorak cilindra

koji sadržava MESS vlakna (slika 5.a) značajno je manje raspucan nego uzorak bez MESS vlakana (slika 5.b). Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem pokazuju da se dodavanjem MESS vlakana povećava vlačna čvrstoća betona cijepanjem za približno 45 %. Povećanje vlačne čvrstoće cijepanjem usporedivo je s povećanjem koje omogućuju vlakna sa savijenim krajevima istog volumnog udjela [15]. Uočeno je povećanje varijacije rezultata dodavanjem MESS vlakana (tablica 4.). Koeficijent varijacije vlačne čvrstoće cijepanjem povećao se s 2,8 % na 10,9 % kad su se MESS vlakna dodala mješavini betona.



Slika 5. Uzorci cilindra nakon ispitivanja cijepanjem: a) s MESS vlaknima, b) bez MESS vlakana

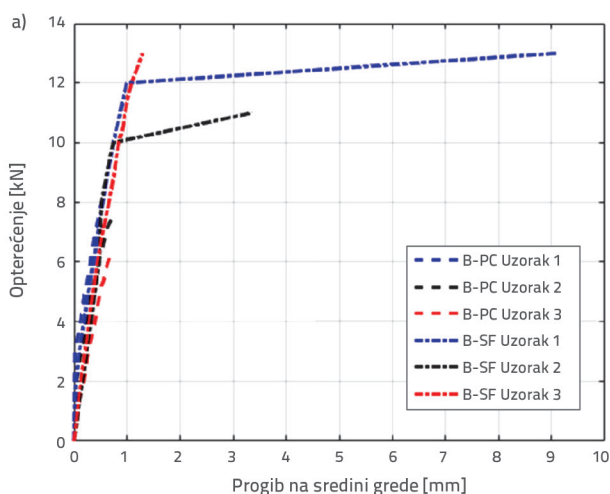
3.2.4. Modul elastičnosti

Vrijednost modula elastičnosti određena je kao srednja vrijednost triju ispitanih uzoraka. Rezultati su prikazani u tablici 4. Modul elastičnosti povećao se za 10 % dodavanjem MESS vlakana. Rasipanje rezultata također se povećalo s dodavanjem vlakana, a koeficijent varijacije povećao se s 1,3 % na uzorcima običnog betona na 4,1 % u uzorcima s vlaknima. Ipak, ukupni utjecaj MESS vlakana na modul elastičnosti nije značajan.

Tablica 4. Eksperimentalno dobivena MESSFRC mehanička svojstva

Mehanička svojstva [MPa]	Bez vlakana	S vlaknima
Tlačna čvrstoća	66,9 (6,4 %)	68,9 (4,2 %)
Vlačna čvrstoća pri savijanju	8,0 (9,7 %)	10,7 (16,5 %)
Vlačna čvrstoća pri pucanju	4,2 (2,8 %)	6,1 (10,9 %)
Modul elastičnosti	28320 (1,3 %)	31250 (4,1 %)

*Vrijednosti izražene u zagradama koeficijenti su varijacije uzorka



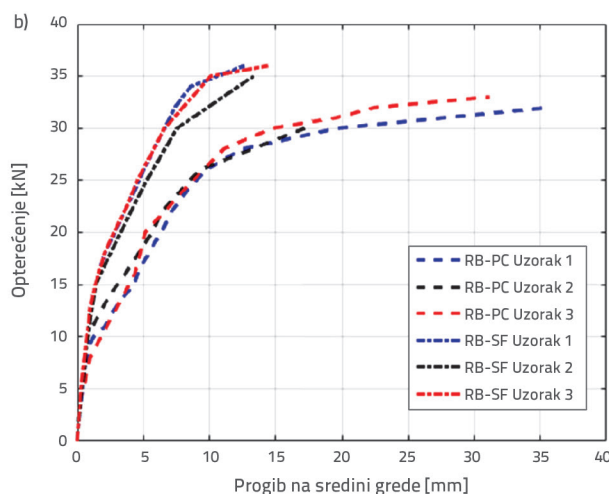
3.3. Ispitivanje grede savijanjem u četiri točke

3.3.1. Grede bez uzdužnog ojačanja (serija B)

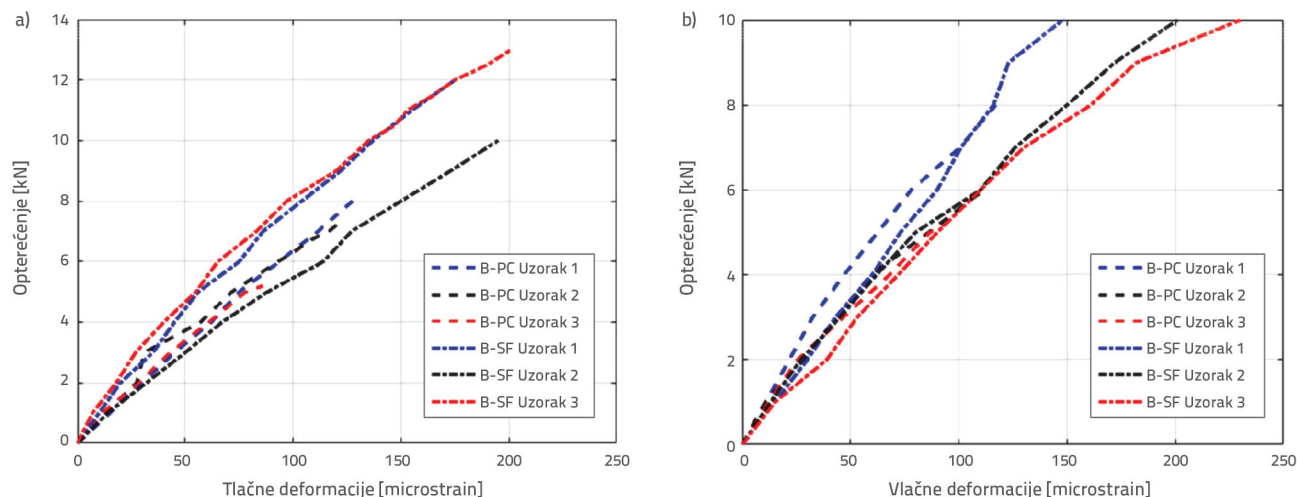
Slika 6.a prikazuje eksperimentalno dobivenu krivulju opterećenje - progib za grede serije B. MESSFRC grede (B-SF) imale su veću čvrstoću pri savijanju i do 70 % u prosjeku u odnosu na grede od običnog betona (B-PC) (tablica 5.). Čelična su vlakna premošćivala pukotine, a to je vodilo prema povećanju postpukotinske nosivosti u dva od tri B-SF uzorka. Nasuprot tome, grede bez MESS vlakana slomile su se čim se pojavila makropukotina. Slika 7. prikazuje krivulje opterećenje-deformacije. Bila je uočena manja promjena tlačne i vlačne deformacije betona u B-SF uzorcima u usporedbi s B-PC uzorcima (slika 7.). Dok je bilo moguće mjeriti deformacije, omjer opterećenja i deformacija bio je linearan u B-PC i B-SF uzorcima.

3.3.2. Grede s uzdužnom armaturom (serija RB)

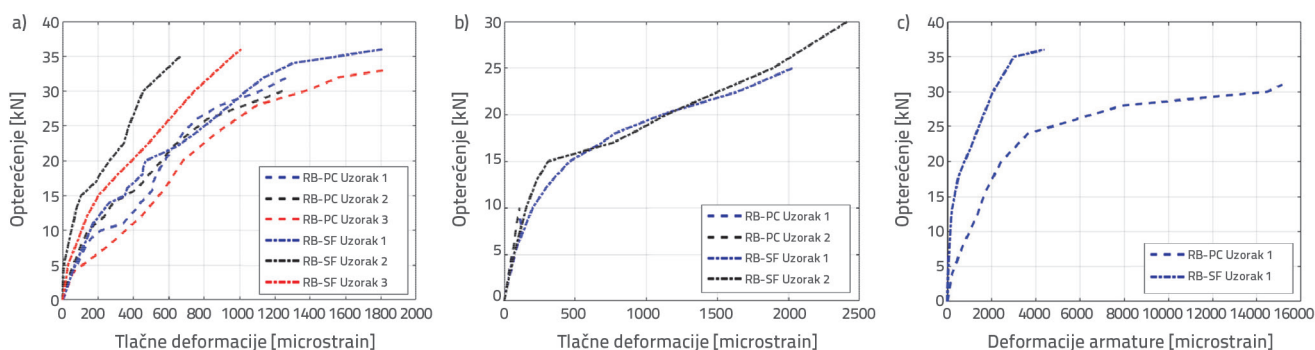
Odnos opterećenja i progiba za grede s uzdužnom armaturom prikazan je na slici 6.b. Grede armirane šipkama i čeličnim



Slika 6. Krivulja opterećenje-progib na sredini grede za: a) grede bez armature – serija B; b) grede s armaturom – serija RB



Slika 7. Krivulje za grede bez armature: a) opterećenje – tlačne deformacije; b) opterećenje – vlačne deformacije



Slika 8. Krivulje za armirane grede: a) opterećenje – tlačne deformacije; b) opterećenje – vlačne deformacije; c) opterećenje – deformacije armature

vlaknima (RB-SF) imale su 13 % veću savojnu čvrstoću nego grede armirane samo šipkama (RB-PC) (tablica 5.).

Tablica 5. Prosječna nosivost betona pri pojavi prve pukotine i granična čvrstoća greda B serije i RB serije

Čvrstoća [kN]	B-PC	B-SF	RB-PC	RB-SF
Čvrstoća betona pri pojavi prve pukotine	-	-	12	17,7
Granična čvrstoća	7,33	12,33	31,7	35,7

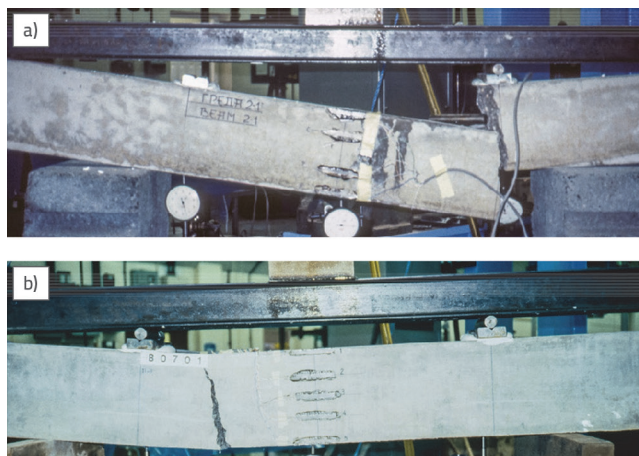
Čvrstoća kod prve pukotine povećala se za 48 % zbog prisutnosti MESS vlakana (tablica 5.). Rezultati koji se tiču najvećega progiba poprilično su zbunjujući jer se čini da su uzorci običnog betona (RB-PC) ostvarili veći progib nego grede s čeličnim vlaknima (RB-SF). Ipak, moguće je da je to posljedica ispitivanja kontrolom sile. Naime, ispitivanjem kontrolom pomaka mogao bi se utvrditi plato u dijagramu opterećenje – progib ili popuštajuće ponašanje kod RB-SF uzoraka, što bi vodilo do većega progiba i duktilnosti greda koje imaju čelična vlakna.

Tlačne deformacije uzoraka RB-PC-a bile su u prosjeku nešto veće nego tlačne deformacije na uzorcima RB-SF-a kad su bili pod istim opterećenjem (slika 8.a). Budući da su se u nekim slučajevima pukotine pojavile blizu tenzometra, nije bilo moguće izmjeriti deformacije u betonu do loma. Primjerice, vlačne deformacije uzorka RB-PC mjerene su do trenutka kad se prva makropukotina pojavila blizu tenzometra. U slučaju RB-SF uzoraka, mjerenje je bilo moguće i u nelinearnom području. Do pojave prve makropukotine, vlačne deformacije bile su gotovo iste za RB-PC grede i RB-SF grede. Utjecaj dodavanja MESS vlakana betonu najvidljiviji je na slici 8.c gdje je prikazan odnos između opterećenja i deformacija rebraste armature. Deformacije rebraste armature znatno su smanjene zbog prisutnosti MESS vlakana. S povećanjem opterećenja, razlika se povećala. Pri opterećenju koje vodi gotovo do loma (30 kN) RB-PC grede, deformacije rebraste armature iznosile su 1,44 %, dok su pri istom opterećenju, deformacije rebraste armature RB-SF grede bile 0,2 %. Treba naglasiti da su to rezultati za samo jednu gredu po seriji. Osim toga, smanjenje deformacija rebraste armature zbog prisutnosti čeličnih vlakana također proučavaju Zhang i dr. [17].

3.4. Raspored pukotina i načini loma

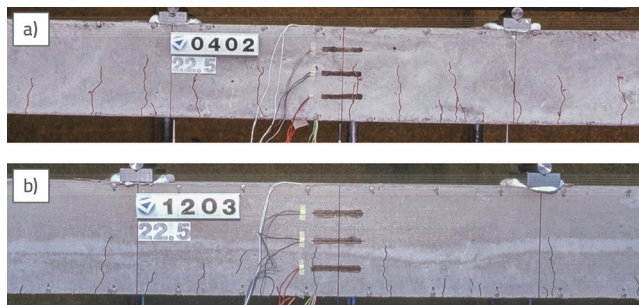
Slike 9. do 11. prikazuju razlike između rasporeda pukotina i načina loma greda običnog betona i greda betona ojačanog MESS vlaknima.

Slika 9. prikazuje načine loma kod greda bez rebraste armature – grede B serije. Grede običnog betona (slika 9.a) doživjele su kruti lom na sredini trećine raspona grede. Kad su se dodala MESS vlakna, dvije od tri ispitane grede pokazale su duktilno ponašanje. MESS vlakna spriječila su kruti lom grede (slika 9.b). U oba slučaja, oblikovala se makropukotina koja je vodila do loma.



Slika 9. Načini loma: a) B-PC greda; b) B-SF greda

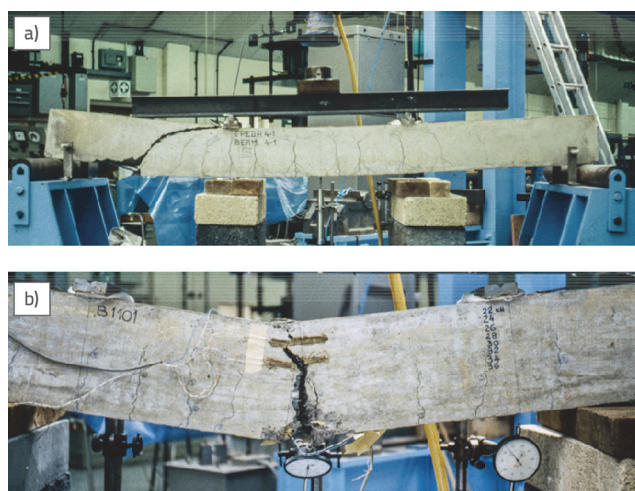
Slika 10. prikazuje razdiobu pukotina na gredi s uzdužnom armaturom serije RB zbog nanese sile od 22,5 kN. Pod istim opterećenjem, pukotine su više napredovale po visini poprečnog presjeka (slika 10.a) u gredama s običnim betonom (RB-PC serija) nego u gredama koje imaju MESS vlakna (RB-SF serija) (slika 10.b). Pri nanese sili od 22,5 kN, horizontalna udaljenost između pukotina na sredini trećine raspona grede u prosjeku je bila oko 10 cm u slučaju RB-PC greda i RB-SF greda.



Slika 10. Pukotine pri nanese sili od 22,5 kN: a) RB-PC greda; b) RB-SF greda

Slika 11. prikazuje načine loma RB-PC greda i RB-SF greda. U slučaju greda bez MESS vlakana došlo je do krto loma zbog posmika (slika 11.a), dok su grede s MESS vlaknima pokazale duktilnosti pri savijanju na sredini raspona grede (slika 11.b). Stoga su MESS vlakna povećala posmičnu čvrstoću grede, te

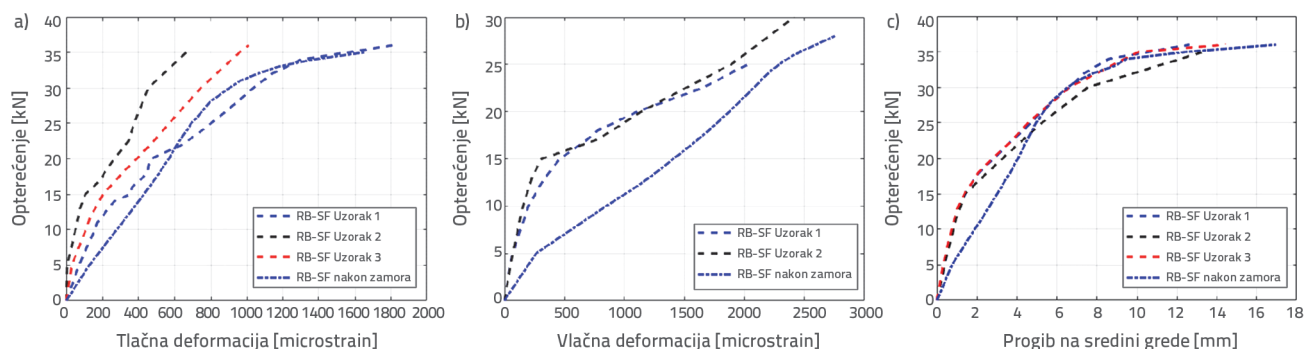
je na taj način došlo do promjene loma iz krto u duktilni način otkazivanja. Nadalje, pukotine u RB-SF gredama pri lomu manje se šire po visini poprečnog presjeka grede te se ravnomjernije raspoređuju duž grede. Horizontalna udaljenost pukotina je oko 6 cm za RB-SF grede pri lomu, nasuprot RB-PC seriji gdje su pukotine više napredovale duž poprečnog presjeka te su na većoj horizontalnoj udaljenosti od 10 cm. To pak dokazuje da MESS vlakna omogućavaju ravnomjerniju raspodjelu naprezanja u betonu povećavajući savojnu čvrstoću.



Slika 11. Načini loma: a) RB-PC greda; b) RB-SF greda

3.5. Opterećenje nakon zamora

Slika 12. prikazuje uspoređene dijagrame opterećenja i deformacija te opterećenja i progiba na sredini raspona za statički ispitane grede i jednu gredu koja je bila izložena niskocikličnom zamoru. Maksimalno opterećenje pri ispitivanju zamora bilo je 22,5 kN, što je otprilike 60 % savojne čvrstoće grede. Na toj razini opterećenja pukotine se pojavljuju u srednjoj trećini raspona grede u slučaju statičkog opterećenja kao što je to prikazano na slici 10. Stoga se statičkim ispitivanjem nakon ispitivanja zamora očekuje smanjenje savojne krutosti grede zbog pukotina koje je izazvalo prethodno ciklično opterećenje. Smanjenje savojne krutosti grede vidi se u dijagramima opterećenje-deformacija te opterećenje-progib na sredini grede. Tako, na primjer, pri opterećenju od 10 kN, progib na sredini grede te tlačne i vlačne deformacije su tri ili četiri puta su veće nego u ispitivanjima prije zamora (slika 12.). Kako se s povećanjem opterećenja počinju pojavljivati pukotine u gredama i u gredama koje nisu izložene zamoru, razlike se smanjuju. To je najbolje prikazano na dijagramu koji pokazuje odnos opterećenja i progiba (slika 12.c) gdje je ponašanje prije i poslije zamora gotovo isto za opterećenje veće od 27 kN. Savojna čvrstoća nije se značajno promijenila zbog opterećenja zamorom, došlo je do sloma grede pri otprilike 36 kN. Za uzorak izložen zamoru progib je nešto veći pri najvećem opterećenju, tj. 16,5 cm umjesto 14 cm kao u ispitivanjima prije zamora. Stoga, zbog 15.000



Slika 12. Dijagram: a) opterećenje – tlačne deformacije; b) opterećenje – vlačne deformacije; c) opterećenje – progib na sredini grede za RB-SF grede izložene zamoru

ciklusa opterećenja od 2/22,5 kN, uočava se dominantna promjena savojnog ponašanja u linearnom području, pri čemu se savojna krutost smanjila tri do četiri puta. Pojava pukotina uslijed zamora uzrok je promjene ponašanja grede. Budući da se pukotine počinju pojavljivati i na uzorcima greda koji nisu bili izloženi zamoru, savojno ponašanje između greda prije i poslije zamora postaje sličnije.

4. Zaključak

Eksperimentalno istraživanje provedeno je kako bi se procijenio utjecaj dodavanja betonu taljenih vlakana od nehrđajućeg čelika. Koristila su se taljena vlakna nehrđajućeg čelika nepravilnog oblika s omjerom širine i visine 55, ekvivalentnog promjera 0,64 mm te duljine 35 mm. Vežano uz utjecaj tih vlakana na mehanička svojstva betona, može se zaključiti sljedeće:

- U slučaju kad je volumni dio vlakana veći od 1,5 %, uočena je pojava stvaranja gruda vlakana koja je znatno smanjila obradivost betona. Zato je prihvaćen volumni udio od 1.5 %.
- Tlačna čvrstoća povećala se za 3 %, a modul elastičnosti za 10 %. Čelična vlakna spriječila su odslamanje betona kod tlačnog sloma.
- Vlačna čvrstoća pri savijanju povećala se za 35 %, a pri cijepanju za 45 %. Dodavanjem vlakana povećala se varijacija eksperimentalnih rezultata.
- Grede bez uzdužne armature povećale su graničnu savojnu čvrstoću za 70 %. Vlakna su spriječila krti lom grede u dva od tri uzorka tako što su premostila makropukotinu koja je vodila do sloma grede.
- Grede s uzdužnom armaturom povećale su čvrstoću pri pojavi prve pukotine za 48 % te graničnu čvrstoću za 13 %.

Dijagrami opterećenja i deformacija pokazali su da su čelična vlakna smanjila tlačne i vlačne deformacije betona, te posebice deformacije uzdužne armature. Udaljenost među pukotinama smanjila se zbog čeličnih vlakana. Stoga je udaljenost među pukotinama u običnom betonu pri lomu gotovo dvaput veća nego udaljenost među pukotinama u gredama s čeličnim vlaknima. Dodavanjem čeličnih vlakana promijenio se način loma grede iz krtog posmičnog loma u duktilni savojni lom.

- Nakon 15000 ciklusa opterećenja od 2/22,5 kN (5 %/60 % granične čvrstoće grede), savojna se krutost grede smanjila otprilike 3 do 4 puta. Kako se razina opterećenja povećavala, sve je bila manja razlika između savojnog ponašanja greda prije i poslije zamora. Granična čvrstoća grede nije se promijenila nakon ispitivanja na zamor.

Eksperimentalni rezultati prikazani u ovom radu pokazali su da taljena vlakna nehrđajućeg čelika mogu značajno poboljšati karakteristike betona pri savijanju, što ih čini zanimljivom alternativom za ravna vlakna ili vlakna sa savijenim krajevima, pogotovo u okolišu sklonom koroziji ili visokim temperaturama.

Zahvala

Autori zahvaljuju Sveučilištu Aston iz Birminghama u Ujedinjenom Kraljevstvu jer su omogućili provedbu eksperimentalnog programa. Istraživanje djelomično financira Ministarstvo prosvjete, znanosti i tehnološkog razvoja Republike Srbije pod projektnim brojem TR 036037 i projektnim brojem III 42012.

LITERATURA

- [1] Singh, H.: Steel fiber reinforced concrete, Springer Berlin Heidelberg, New York, NY, 2016.
- [2] Zollo, R.F.: Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development, Cement and Concrete Composites, 19 (1997) 2, pp. 107–122, [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(96\)00046-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(96)00046-7).
- [3] Daniel, J.I., Gopalaratnam, V.S., Galinat, M.A.: Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI Committee 544, 2002.
- [4] Serdar, M., Baricevic, A., Bjegovic, D., Lakusic, S.: Possibilities of use of products from waste tyre recycling in concrete industry, Journal of Applied Engineering Science, 12 (2014) 1, pp. 89–93, 2014, <https://doi.org/10.5937/jaes12-5671>.

- [5] di Prisco M., Plizzari, G., Vandewalle, L.: Fibre reinforced concrete: new design perspectives, *Materials and Structures*, 42 (2009) 9, pp. 1261–1281, <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9529-4>.
- [6] Abrishambaf, A., Barros, J.A.O., Cunha, V.M.C.F.: Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels, *Cement and Concrete Research*, 51 (2013), pp. 57–66, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.04.009>.
- [7] Ghadban, A.A., Wehbe, N.I., Underberg, M.: Effect of Fiber Type and Dosage on Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete for Highway Bridges, *ACI Materials Journal*, 115 (2018) 3, pp. 413–424 <https://doi.org/10.14359/51702036>.
- [8] Pająk, M., Ponikiewski, T.: Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers, *Construction and Building Materials*, 47 (2013), pp. 397–408, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.072>.
- [9] Song, P.S., Hwang, S.: Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 18 (2004) 9, pp. 669–673, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027>.
- [10] Wu, Z., Shi, C., He, W., Wu, L.: Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 103, pp. 8–14, Jan. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.028>.
- [11] Zile, E., Zile, O.: Effect of the fiber geometry on the pullout response of mechanically deformed steel fibers, *Cement and Concrete Research*, 44 (2013), pp. 18–24, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.10.014>.
- [12] Soroushian, P., Bayasi, Z.: Fiber-Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, 88 (1991) 2, pp. 129–134,
- [13] Frančić Smrkić, M., Damjanović, D., Baričević, A.: Application of recycled steel fibres in concrete elements subjected to fatigue loading, *GRADEVINAR*, 69 (2017) 10, pp. 893–905, <https://doi.org/10.14256/JCE.2059.2017>.
- [14] Olivito, R.S., Zuccarello, F.A.: An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete, *Composites Part B: Engineering*, 41 (2010) 3, pp. 246–255, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.12.003>.
- [15] Thomas, J., Ramaswamy, A.: Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete, *J. Mater. Civ. Eng.*, 19 (2007) 5, pp. 385–392, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:5\(385\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:5(385)).
- [16] Caggiano, A., Folino, P., Lima, C., Martinelli, E., Pepe, M.: On the mechanical response of Hybrid Fiber Reinforced Concrete with Recycled and Industrial Steel Fibers, *Construction and Building Materials*, 147 (2017) pp. 286–295, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.160>.
- [17] Zhang, C., Han, S., Hua, Y.: Flexural performance of reinforced self-consolidating concrete beams containing hybrid fibers, *Construction and Building Materials*, 174 (2018), pp. 11–23, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.075>.
- [18] Mangat, P. S., Gurusamy, K.: Long-term properties of steel fibre reinforced marine concrete, *Materials and Structures*, 20 (1987) 4, pp. 273–282, <https://doi.org/10.1007/BF02485924>.
- [19] Marcos-Meson, V., Michel, A., Solgaard, A., Fischer, G., Edvardsen, C., Skovhus, T.L.: Corrosion resistance of steel fibre reinforced concrete - A literature review, *Cement and Concrete Research*, 103 (2018), pp. 1–20, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.05.016>.
- [20] Meddah, A., Belagraa, L., Beddar, M.: Effect of the Fibre Geometry on the Flexural Properties of Reinforced Steel Fibre Refractory Concrete, *Procedia Engineering*, 108 (2015), pp. 185–192, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.135>.
- [21] Purkiss, J.A., Blagojević, P.: Comparison between the short and long term behaviour of fibre reinforced and unreinforced concrete beams, *Composite Structures*, 25 (1993) 1–4, pp. 45–49, [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(93\)90149-K](https://doi.org/10.1016/0263-8223(93)90149-K).
- [22] ISO 6784:1982: Concrete - Determination of static modulus of elasticity in compression, International Organization for Standardization, 1982, Geneva, Switzerland
- [23] Foster, S.J.: On Behavior of High-Strength Concrete Columns: Cover Spalling, Steel Fibers, Ductility, *ACI Structural Journal*, 98 (2001) 4, 2001, <https://doi.org/10.14359/10301>.
- [24] Tomičić, I.: Use of high performance concrete in frame structures, *GRADEVINAR*, 54 (2002) 10, pp. 1–7