

Optimizacija mikroarmiranog betona za opterećenje na savijanje

Marijan Skazlić, Damir Tkalčić, Dejan Šomoši

Ključne riječi

mikroarmirani beton, optimizacija, čelična vlakna, opterećenje na savijanje, orijentacija vlakana, žilavost

Key words

fibre reinforced concrete, optimisation, steel fibres, bending load, orientation of fibres, toughness

Mots clés

béton fibré, optimisation, fibres d'acier, charge à la flexion, orientation des fibres, dureté

Ключевые слова

микроармированный бетон, оптимизация, стальные волокна, нагрузка на изгиб, ориентация волокон, жилистость

Schlüsselworte

mikrobewehrter Beton, Optimierung, Stahlfasern, Biegebelastung, Orientierung der Fasern, Zähigkeit

M. Skazlić, D. Tkalčić, D. Šomoši

Prethodno priopćenje

Optimizacija mikroarmiranoga betona za opterećenje na savijanje

U radu se polazi od toga da najčešće upotrebljavani sastav mikroarmiranoga betona sadrži 30 kg/m³ čeličnih vlakana. U istraživanju koje je predmet ovoga članka odabran je optimalni sastav mikroarmiranoga betona s navedenom količinom čeličnih vlakana i ispitivano je ponašanje u očvrslom stanju pod djelovanjem opterećenja koje izaziva savijanje. Uz razmatranje utjecaja hibridnih čeličnih vlakana na svojstva mikroarmiranoga betona analiziran je i utjecaj orijentacije tih vlakana.

M. Skazlić, D. Tkalčić, D. Šomoši

Preliminary note

Optimisation of fibre reinforced concrete for bending load

The paper starts with assertion that the fibre reinforced concrete most frequently contains 30 kg/cu.m. of steel fibres. An optimum fibre reinforced concrete composition, with the mentioned quantity of steel fibres, was selected and, after hardening, the FRC resistance to bending load was tested. In addition to testing influence of hybrid steel fibres on fibre reinforced concrete properties, the influence of fibre orientation was also analyzed.

M. Skazlić, D. Tkalčić, D. Šomoši

Note préliminaire

Optimalisation de béton fibré pour la charge à la flexion

L'ouvrage commence par l'assertion que le béton fibré contient le plus souvent 30 kg/m³ des fibres d'acier. Une composition optimale de béton fibré, contenant la quantité susmentionnée des fibres d'acier, a été choisie et, suite au durcissement, la résistance de ce béton à la flexion a été analysée. En plus de l'essai de l'influence des fibres hybrides d'acier sur les propriétés de béton fibré, l'influence de l'orientation des fibres a également été analysée.

M. Сказлич, Д. Ткалчич, Д. Шомоши

Предварительное сообщение

Оптимизация микроармированного бетона для нагрузки на изгиб

В работе исходит из того что, чаще всего употребляемый состав микроармированного бетона содержит 30 кг/м³ стальных волокон. В исследовании, являющемся предметом этой статьи выбран оптимальный состав микроармированного бетона с приведённым количеством стальных волокон, и проводились испытания поведения в затвердевшем состоянии при действии нагрузки, вызывающей изгиб. Наряду с рассмотрением влияния гибридных стальных волокон на свойства микроармированного бетона анализировано и влияние ориентации тех волокон.

M. Skazlić, D. Tkalčić, D. Šomoši

Vorherige Mitteilung

Optimierung des mikrobewehrten Betons für Biegebelastung

Im Artikel geht man von der Tatsache aus dass die meisstens benützte Zusammensetzung des mikrobewehrten Betons 30 kg/m³ Stahlfasern enthält. In der Untersuchung die in diesem Artikel bearbeitet ist erwählte man die optimale Zusammensetzung des mikrobewehrten Betons mit der angeführten Menge von Stahlfasern. Untersucht wurde das Verhalten in abgehärtetem Zustand unter Biegebelastung. Man erwägte den Einfluss von hybriden Stahlfasern auf die Eigenschaften des mikrobewehrten Betons und analysierte den Einfluss der Orientation dieser Fasern.

Autori: Doc. dr. sc. **Marijan Skazlić**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; mr. sc. **Damir Tkalčić**, dipl. ing. građ., Institut građevinarstva Hrvatske d.d.; **Dejan Šomoši**, dipl. ing. građ., Mapei Hrvatska

1 Uvod

Mikroarmirani je beton vrsta betona koja osim uobičajenih komponenata sastava posjeduje i vlakna. Pri sličnoj se primjeni sastav mikroarmiranog betona razlikuje od običnog betona osim po dodanim vlaknima i po povećanoj količini cementa, manjoj količini krupnog agregata i manjem najvećem zrnju agregata.

Osnovna je podjela vlakana koja se rabe za mikroarmiranje na čelična, staklena, polimerna i prirodna. Jedinstveni je parametar koji karakterizira svako vlakno koeficijent oblika. Koeficijent oblika je omjer duljine i promjera vlakna, pa o njemu ovise i svojstva betona u svježem i očvrslom stanju.

Intenzitet poboljšanja svojstava betona zbog mikroarmiranja varira u ovisnosti o količini vlakana i kvaliteti betona. Najvažniji su učinci vlakana na svojstva betona sprječavanje nastanka pukotina, smanjenje njihove širine i razmaka, poboljšanje žilavosti i postpukotinske nosivosti, povećanje vlačne čvrstoće i poboljšanje dinamičkih svojstava betona. [1, 2]

Krajem prošlog stoljeća su razvijeni, a ubrzo nakon toga su se počeli i praktično primjenjivati, hibridni mikroarmirani betoni. Hibridni mikroarmirani betoni sadrže dvije ili više vrsta vlakana različitog oblika, veličine ili podrijetla. Pri tome svaka vrsta vlakana zadržava svoja pojedinačna svojstva, što dovodi do optimizacije svojstava i količine upotrijebljenih vlakana. Ideja uporabe čeličnih vlakana različitih duljina u mikroarmiranom betonu slična je odabiru agregata različitih veličina zrna, jer vlakna različite duljina djeluju na poboljšanje različitih svojstava mikroarmiranog betona u svježem i očvrslom stanju. Kod granulometrijskog sastava agregata također se optimizira udio pojedinih zrna agregata različite veličine u ukupnom granulometrijskom sastavu. [3, 4, 5]

Prema podacima mikroarmirani se beton najviše upotrebljava u Europi za industrijske podove (oko 50 %), u tunelogradnji (oko 45 %) i u industriji predgotovljenih elemenata (< 5 %). Ostala su područja primjene prema količini uporabljenih vlakana zanemariva [5]. Može se reći da se u Hrvatskoj čak i više od 50 % ukupne količine čeličnih vlakana upotrijebi za industrijske podove.

Ovisno o količini dodanih čeličnih vlakana razlikuju se mikroarmirani betoni s malim i velikim obujamskim udjelom vlakana. Ovi drugi se često nazivaju i mikroarmiranim betonima visokih uporabnih svojstava (skraćeno MAB VUS). [6] U Hrvatskoj se u praktičnoj primjeni rabe isključivo mikroarmirani betoni s malim udjelom vlakana. Pritom se najčešće dozira količina čeličnih vlakana od 30 kg/m^3 , a raspon doziranja vlakana obično je u granicama od 20 kg/m^3 do 50 kg/m^3 . [5]

Glavni je cilj istraživanja prikazanog u ovome radu određivanje optimalnog sastava mikroarmiranog betona s 30 kg/m^3 čeličnih vlakana uzevši u obzir ponašanje pri opterećenju na savijanje. Analiziran je utjecaj različitih čeličnih vlakana, i hibridnih čeličnih vlakana na ponašanje mikroarmiranog betona u očvrslom stanju. Prikazan je utjecaj orijentacije čeličnih vlakana na ponašanje mikroarmiranog betona pri opterećenju na savijanje.

2 Eksperimentalni rad

2.1 Cilj i program istraživanja

Ciljevi istraživanja su sljedeći:

- pronaći najpovoljniju vrstu čeličnih vlakana u količini od 30 kg/m^3 za ponašanje betona pri opterećenju na savijanje u očvrslom stanju
- analizirati utjecaj hibridnih čeličnih vlakana na svojstva očvrsluloga mikroarmiranog betona
- analizirati utjecaj orijentacije čeličnih vlakana na svojstva mikroarmiranog betona.

Na mješavinama se ispituju sljedeća svojstva betona u svježem stanju:

- gustoća (prema HRN EN 12350-6)
- sadržaj pora (prema HRN EN 12350-7)
- temperatura
- konzistencija slijeganjem (prema HRN EN 12350-2)
- konzistencija rasprostiranjem (prema HRN EN 12350-5)

Za ispitivanje svojstava mikroarmiranog betona u očvrslom stanju primijenjene su sljedeće metode ispitivanja:

- tlačna čvrstoća (prema HRN EN 12390-3)
- žilavost (prema [7]).

Eksperimentalni rad proveden je u laboratoriju Zavoda za materijale Građevinskog fakulteta u Zagrebu i u centralnom laboratoriju Zavoda za betonske i zidane konstrukcije Instituta građevinarstva Hrvatske.

2.2 Projektirani sastav betona

Istraživanje je provedeno na 12 mješavina mikroarmiranog betona. Projektiranje sastava mješavina izvršeno je uz uvjet izloženosti XD3, razred tlačne čvrstoće C30/37, mjeru slijeganja S4 i mjeru rasprostiranja F4. Najveće zrno agregata iznosi 16 mm. Odabran je stroži uvjet izloženosti djelovanju okoliša da bi se optimalno dobiveni sastav mikroarmiranog betona mogao osim za industrijske podove rabiti i za betonske kolnike, koji su česti na prometnim površinama oko predgotovljenih betonskih hala i cestarskih prolaza na autocestama.

Sve su mješavine imale sastav prikazan u tablici 1.

Tablica 1. Sastav mikroarmiranog betona

Komponenta	Masa (kg)
cement	364
voda	174
superplastifikator	1,8
agregat	1933
čelična vlakna	30

Mješavine su pripravljene vodocementnim omjerom 0,47, a različitim doziranjem superplastifikatora osiguravala se željena konzistencija u svježem stanju. Uporabljena je trofrakcijski drobljeni agregat, i to u omjerima:

- 0-4 mm = 55 %
- 4-8 mm = 20 %
- 8-16 mm = 25 %.

Upotrijebljen je portlandski cement CEM II/B-M (S-V) 42,5 N i superplastifikator na osnovi polikarboksilatnih etera. Uporabljeno je pet različitih vrsta čeličnih vlakana (prikazani su na slici 1., proizvođač je Krampe Harex Fibrin), i to (l = duljina vlakna):

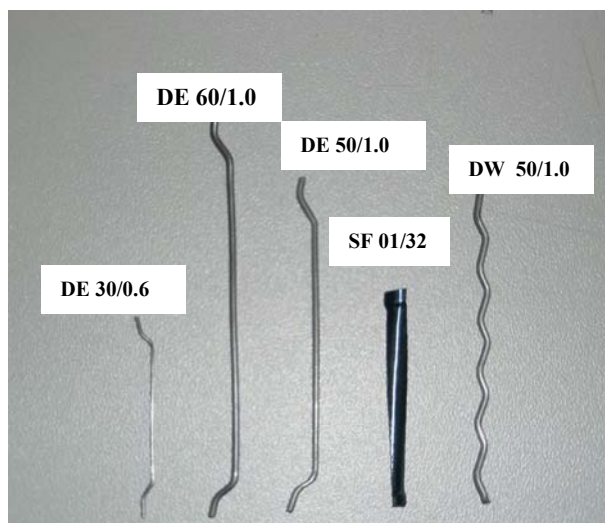
- vlakna sa zavnutim krajevima DE 30/0, 6N (l = 30 mm), DE 60/1,0N (l = 60 mm) i DE 50/1,0N (l = 50 mm)
- srpasta čelična vlakna SF 01/32 (l = 32 mm)
- valovita vlakna DW 50/1,0N (l = 50 mm).

Sva vlakna posjedovala su najmanju karakterističnu vlačnu čvrstoću od 1100 MPa.

Mješavine mikroarmiranog betona međusobno su se razlikovale po upotrijebljenim vlaknima, i to na način prikazan u tablici 2.

Tablica 2. Vrste i udio vlakana po pojedinim mješavinama

Mješavina	Vrsta vlakana
M1	DE 30/0,6
M2	DE 60/1,0
M3	DE 50/1,0
M4	DW 50/1,0
M5	70 % (DE 60/1,0) + 30 % (DE 30/0,6)
M6	60 % (DE 60/1,0) + 40 % (DE 30/0,6)
M7	50 % (DE 60/1,0) + 50 % (DE 30/0,6)
M8	70 % (DE 50/1,0) + 30 % (DE 30/0,6)
M9	60 % (DE 50/1,0) + 40 % (DE 30/0,6)
M10	50 % (DE 50/1,0) + 50 % (DE 30/0,6)
M11	30 % (SF 01/32) + 40 % (DE 60/1,0) + 30 % (DE 30/0,6)
M12	70 % (DW 50/1,0) + 30 % (DE 30/0,6)



Slika 1. Čelična vlakna uporabljena u istraživanju

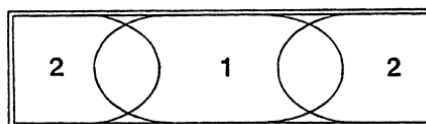
2.3 Tehnologija pripravljanja i njege uzoraka

Sve mješavine su pripravljene u laboratorijskoj miješalici obujma 50 litara. Svaka se mješavina pripravlja po dva puta radi uvida u ponovljivost rezultata ispitivanja.

Za svaku mješavinu napravljeno je po 4 uzoraka dimenzija 150 x 150 x 600 mm za ispitivanje žilavosti pri opterećenju na savijanje i tri kocke 150 x 150 x 150 mm za određivanje tlačne čvrstoće.

S obzirom da način ugradnje mikroarmiranog betona u uzorke bitno utječe na orijentaciju čeličnih vlakana, a tako i na mehanička svojstva u očvrslom stanju, za sve uzorke dimenzija 150 x 150 x 600 mm primijenjen je način ugradnje prikazan na slici 2. [8]. Na dva ugrađivanja betona zidarskom žlicom, u bočne dijelove čeličnog kalupa dodaje se i po jedno ugrađivanje u sredinu kalupa.

Nakon ugradnje uzorci su prekriveni najlonom i čuvaju se 24 sata na temperaturi od 20 ± 2 °C. Nakon toga su raskalupljeni i potopljeni u vodu do starosti od 28 dana, kada su provedena ispitivanja.



Slika 2. Shema načina ugrađivanja mikroarmiranog betona u kalupe

3 Rezultati ispitivanja

3.1 Svojstva svježeg betona

Sve mješavine posjedovale su u svježem stanju razred konzistencije slijeganjem S4, razred konzistencije rasprostiranjem F4. Mješavine se nisu znatnije razlikovale s obzirom na svojstva betona u svježem stanju (tempera-

tura, gustoća, sadržaj zraka). Temperatura mješavina u svježem stanju bila je u granicama od 15 °C do 23 °C, a sadržaj zraka iznosio je od 1,3 % do 2,2 %. Gustoća u svježem stanju iznosila je od 2400 do 2560 kg/m³.

3.2 Tlačna čvrstoća

U tablici 3. prikazane su srednje vrijednosti tlačnih čvrstoća nakon 28 dana. Vrijednost prikazana u tablici predstavlja srednju vrijednost tlačne čvrstoće određene na tri kocke brida 15 cm. Analizom dobivenih rezultata može se zaključiti da sve mješavine zadovoljavaju uvjet razreda tlačne čvrstoće C30/37.

Tablica 3. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće

Mješavina	Tlačna čvrstoća (MPa)
M1	53,9
M2	53,9
M3	56,2
M4	59,8
M5	47,9
M6	54,6
M7	54,6
M8	45,3
M9	51,2
M10	46,7
M11	59,7
M12	57,1

3.3 Žilavost

Jedna je od glavnih prednosti mikroarmiranog betona pred običnim betonom povećanje žilavosti. Postoje različite normirane metode ispitivanja žilavosti mikroarmiranog betona, a neke od poznatijih norma su američka ASTM C 1609, japanska JCI SF 4 itd. Nedostatak je svih prethodno nabrojanih norma što se ispitivanjem žilavosti savijanjem dobivaju mehaničke karakteristike mikroarmiranog betona koje služe za optimizaciju sastava, a ne mogu se rabiti i za dimenzioniranje konstrukcije od mikroarmiranog betona (kao npr. industrijskog poda). Zbog toga je za određivanje žilavosti odabrana metoda ispitivanja prema austrijskim preporukama za mikroarmirani beton [7], kod kojih se vrijednosti dobivene ispitivanjem žilavosti rabe za dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata od mikroarmiranog betona.

Žilavost se ispitivala na uzorcima dimenzija 150 x 150 x 600 mm u preši s kontroliranim prirastom progiba od 0,1 mm/min (slika 3.). Ispitivanje je obavljeno do progiba od 4 mm. Raspon između ležajeva iznosio je 450 mm, a uzorak se opterećivao na savijanje s dvije koncentrirane sile u trećinama raspona.

Mehaničke karakteristike materijala koje se dobiju ovim ispitivanjem, a služe i za daljnji proračun konstrukcijskih elemenata od mikroarmiranog betona, ekvivalentne su vrijednosti čvrstoće pri savijanju za dokaz nosivosti (f_{eqmu}) i uporabljivosti (f_{eqms}).

Ekvivalentna vrijednost vlačne čvrstoće pri savijanju za dokaz uporabljivosti definira se kao:

$$f_{eqms} = \frac{P_{0.5} \times l}{b \times h^2} = \frac{P_{0.5}}{7500} [MPa] \quad (1)$$

gdje je

l - raspon ležajeva (mm)

b, h - dimenzije poprečnog presjeka uzorka (mm)

$P_{0.5 \text{ mm}}$ - nosivost kod ispitivanja žilavosti pri progibu od 0,5 mm (N).

Ekvivalentna vrijednost vlačne čvrstoće pri savijanju za dokaz nosivosti dobiva se izrazom:

$$f_{eqmu} = \frac{P_{0.5-3} \times l}{b \times h^2} = \frac{P_{0.5-3}}{7500} [MPa] \quad (2)$$

gdje je

l - raspon ležajeva (mm),

b, h - dimenzije poprečnog presjeka uzorka (mm),

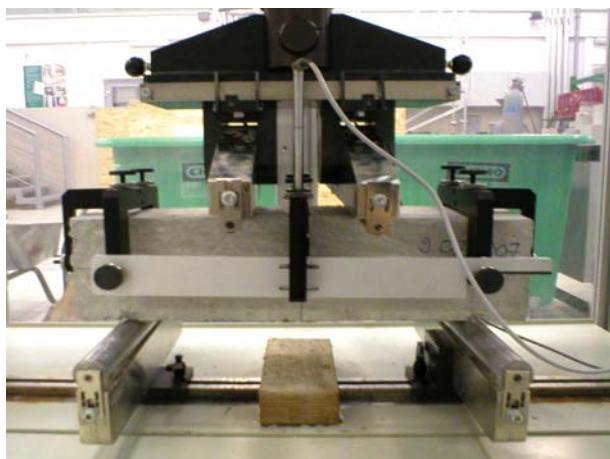
$P_{0.5-3 \text{ mm}}$ - rad između progiba od 0,5 mm i 3 mm, tj. ploština ispod krivulje žilavosti između ta dva progiba, a računa se kao:

$$P_{0.5-3} = \frac{A_{0.5-3}}{l/180} = \frac{A_{0.5-3}}{2.5} [N] \quad (3)$$

Vrijednosti u tablici 4. predstavljaju srednju vrijednost od četiri rezultata ispitivanja žilavosti savijanjem na mikroarmiranom betonu. Slika 4. prikazuje srednje krivulje žilavosti dobivene za svaku pojedinu mješavinu.

Tablica 4. Mehaničke karakteristike mikroarmiranog betona dobivene ispitivanjem žilavosti

Mješavina	P_{\max} (kN)	$P_{0.5 \text{ mm}}$ (kN)	$P_{3.0 \text{ mm}}$ (kN)	f_{eqms} (MPa)	f_{eqmu} (MPa)
M1	36,4	25,0	12,4	3,3	2,9
M2	37,8	21,9	21,3	2,9	3,0
M3	35,5	14,5	10,0	1,9	1,8
M4	35,4	10,0	4,4	1,2	1,0
M5	33,6	17,1	16,6	2,3	2,3
M6	35,6	19,2	18,1	2,6	2,5
M7	38,1	25,4	16,4	3,4	2,7
M8	35,0	22,0	20,6	2,9	2,9
M9	33,9	20,0	14,3	2,7	2,5
M10	33,4	18,9	14,7	2,5	2,3
M11	33,6	17,2	12,9	2,3	1,9
M12	37,7	24,0	14,5	1,2	2,6



Slika 3. Ispitivanje žilavosti savijanjem na uzorcima dimenzija 150 x 150 x 600 mm u preši s konstantnim prirastom pomaka

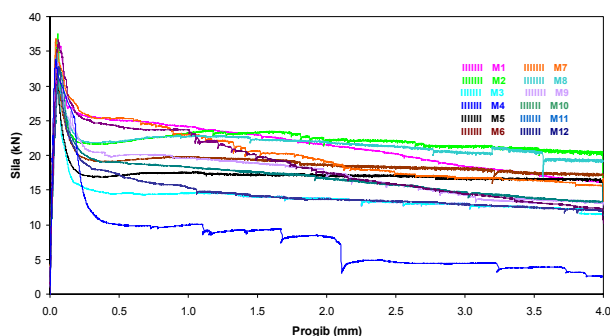
Svrstavši vrijednosti prikazane u tablici 4. prema kriterijima danim u tablici 5. može se vidjeti da mikroarmirani betoni s 30 kg/m^3 različitih čeličnih vlakana posjeduju bitno drukčije ponašanje pri opterećenju na savijanje.

Tablica 5. Podjela mikroarmiranog betona u razrede s obzirom na rezultate dobivene ispitivanjem žilavosti savijanjem [7]

Razredi nosivosti	Najmanje vrijednosti za srednje ekvivalentne vlačne čvrstoće pri savijanju (N/mm^2)		Razredi uporabljivosti
	f_{eqmu}	f_{eqms}	
Posebni razred T	5,00	5,00	Posebni razredi TG
T5	3,50	3,75	TG5
T4	2,75	3,10	TG4
T3	2,50	2,40	TG3
T2	1,25	1,70	TG2
T1	0,50	0,75	TG1

Ekvivalentne čvrstoće pri savijanju variraju u granicama od T1 do T4 za dokaz nosivosti te od TG1 do TG4 za dokaz uporabljivosti. To upućuje na zaključak da nisu sva čelična vlakna u istoj količini jednako učinkovita s obzirom na ponašanje mikroarmiranog betona pri opterećenju na savijanje.

Treba istaknuti da je takav oblik svrstavanja rezultata dobivenih ispitivanjem žilavosti mikroarmiranog betona u razrede vrlo koristan u praktičnoj primjeni. Time se dobiva vrlo praktično rješenje u kojem projektant konstrukcije ili materijala ne treba u projektu nužno specificirati vrstu i količinu čeličnih vlakana, već može samo zadati razrede mikroarmiranog betona.



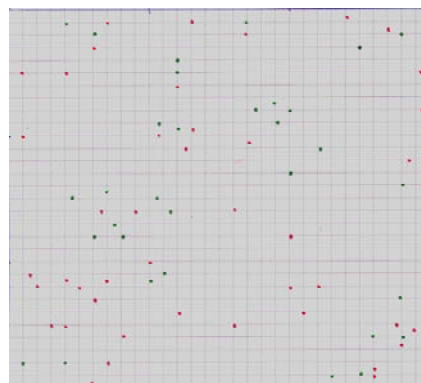
Slika 4. Srednje vrijednosti dijagrama žilavosti za pojedinu mješavinu

3.4 Koeficijent orijentacije vlakana

Nakon ispitivanja žilavosti uzorci su slomljeni na dva dijela (slika 5.) i za svaki je dio iscrtan položaj pojedinih vlakana u poprečnom presjeku (slika 6.). Koeficijent orijentacije vlakana η_ϕ predstavlja orijentaciju vlakana u poprečnom presjeku uzorka mikroarmiranog betona i znatno utječe na ponašanje pri opterećenju na savijanje. Ovaj koeficijent može poprimiti vrijednosti između 0 i 1. U slučaju $\eta_\phi = 1$ vlakno je orijentirano okomito na smjer djelovanja opterećenja na savijanje, a u slučaju $\eta_\phi = 0$ vlakno je orijentirano u smjeru djelovanja opterećenja na savijanje.



Slika 5. Slomljeni uzorak nakon ispitivanja žilavosti (lijevo) i raspodjela čeličnih vlakana u poprečnom presjeku uzorka (desno)



Slika 6. Primjer distribucije vlakana u poprečnom presjeku uzorka dimenzija 150 x 150mm, različita su vlakna označena drukčijim bojama

Tablica 6. Pojedinačne (η_{φ_i}) i srednje ($\eta_{\varphi_{sr}}$) vrijednosti koeficijenta orijentacije vlakana

Mješavina	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
η_{φ_i}	0,36	0,44	0,36	0,22	0,79	0,66	0,64	0,71	0,78	0,70	0,24	0,83
	0,39	0,44	0,38	0,21	0,65	0,62	0,79	0,69	0,84	0,80	0,60	0,89
	0,40	0,41	0,48	0,28	0,77	0,75	0,64	0,61	0,86	0,80	0,48	0,94
	0,48	0,41	0,50	0,28	0,67	0,80	0,60	0,61	0,87	0,69	0,93	0,91
$\eta_{\varphi_{sr}}$	0,41	0,42	0,43	0,25	0,72	0,71	0,67	0,66	0,84	0,75	0,56	0,89

Ako se eksperimentalno određuje broj vlakana u poprečnom presjeku uzorka na mjestu sloma, tada se koeficijent orijentacije vlakana proračuna prema [9, 10]:

$$\eta_{\varphi} = \frac{M \cdot 25 \cdot \pi \cdot d_f^2}{v_f \cdot A_p} \quad (4)$$

gdje je

M - broj vlakana u poprečnom presjeku uzorka

d_f - promjer vlakana (mm)

v_f - obujamski udio istovrsnih vlakana

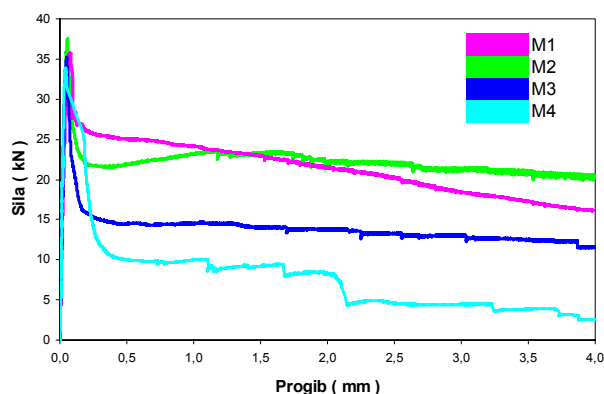
A_p - ploština poprečnog presjeka uzorka (mm²).

U tablici 6. prikazane su pojedinačne i srednje vrijednosti koeficijenta orijentacije vlakana.

4 Analiza rezultata ispitivanja

4.1 Najpovoljnija mješavina mikroarmiranog betona

Na slici 7. prikazane su srednje krivulje žilavosti mješavina mikroarmiranog betona sa samo jednom vrstom čeličnih vlakana. Na temelju analize rezultata ispitivanja žilavosti savijanjem između mješavina sa jednom vrstom čeličnih vlakana (M1, M2, M3 i M4) može se reći da se najbolje ponaša mješavina M1 s obzirom na dokaz uporabljivosti mikroarmiranog betona i mješavina M2 za



Slika 7. Srednje vrijednosti krivulja dobivene ispitivanjem žilavosti za mješavine M1, M2, M3 i M4

dokaz nosivosti. Usporedbom krivulja žilavosti između ovih mješavina vidljivo je da M1 ima bolje ponašanje pri manjim, a M2 pri većim progibima. Takav je rezultat posljedica utjecaja duljine čeličnih vlakana jer su dulja čelična vlakna učinkovitija pri većim progibima.

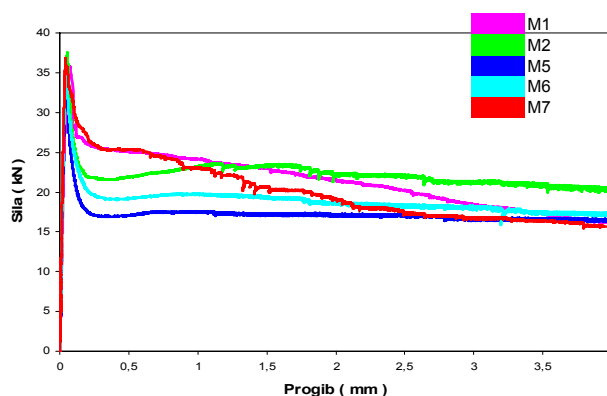
Usporedba rezultata ispitivanja žilavosti za sve mješavine prikazana u tablici 4. i na slici 4. pokazuje da najbolje ponašanje s obzirom na dokaz uporabljivosti mikroarmiranog betona posjeduje mješavina s hibridnim čeličnim vlaknima M7. Ona u svom sastavu ima 50 % čeličnih vlakana sa zakrivljenim krajevima duljine 30 mm i 60 mm.

Najbolje ponašanje s obzirom na dokaz nosivosti mikroarmiranog betona ima mješavina M2 koja u svom sastavu ima čelična vlakna sa zakrivljenim krajevima duljine 60 mm.

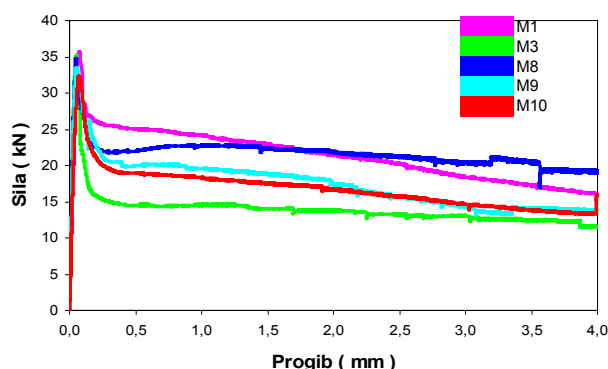
Uzimajući u obzir svojstva mikroarmiranog betona bitna za dokaz i nosivosti i uporabljivosti može se reći da među razmatranim mješavinama s 30 kg/m³ čeličnih vlakana najbolji rezultat pri opterećenju na savijanje pokazuje mješavina M7.

4.2 Utjecaj hibridnih čeličnih vlakana na svojstva očvrstnulo mikroarmiranog betona

Ispitivanjima je utvrđeno da postoji sinergijski efekt hibridnih čeličnih vlakana na ponašanje mikroarmiranog betona pri opterećenju na savijanje u očvrstnulom stanju.



Slika 8. Srednje vrijednosti krivulja dobivene ispitivanjem žilavosti za mješavine M1, M2, M5, M6 i M7



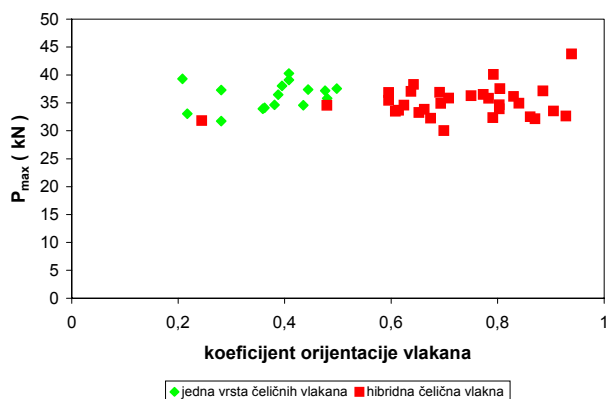
Slika 9. Srednje vrijednosti krivulja dobivene ispitivanjem žilavosti za mješavine M1, M3, M8, M9 i M10

Pod sinergijskim se efektom podrazumijeva da se uporabom čeličnih vlakana različite duljine, a u istoj količini, dobivaju bolja svojstva nego uporabom samo jedne vrste čeličnih vlakana. Ovaj je efekt posljedica činjenice da su kraća vlakna učinkovitija pri manjim progibima, a dulja vlakna su učinkovitija pri većim progibima. Kod najpovoljnije mješavine M7 za ponašanje pri opterećenju na savijanje u očvrslom stanju sinergijski je efekt najviše izražen.

Usporedba krivulja žilavosti između mješavina s jednom i više vrsta čeličnih vlakana vidi se na slikama 8. i 9.

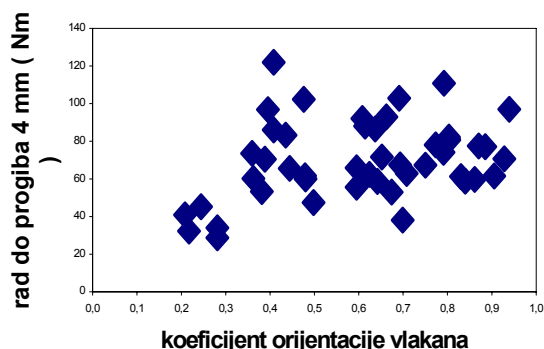
4.3 Utjecaj orijentacije vlakana na svojstva očvrsluloga mikroarmiranog betona pri opterećenju na savijanje

Analizom koeficijenta orijentacije čeličnih vlakana koji su prikazani u tablici 6. i na slici 10. dobiva se da kod jedne vrste čeličnih vlakana koeficijent varira od 0,21 do 0,50, a kod hibridnih čeličnih vlakana on je u granicama od 0,24 do 0,93. Srednja vrijednost koeficijenta orijentacije vlakana za mješavine s jednom vrstom vlakana iznosi 0,38, a za mješavine s hibridnim vlaknima 0,72. Ovaj rezultat upućuje na zaključak da hibridna čel-

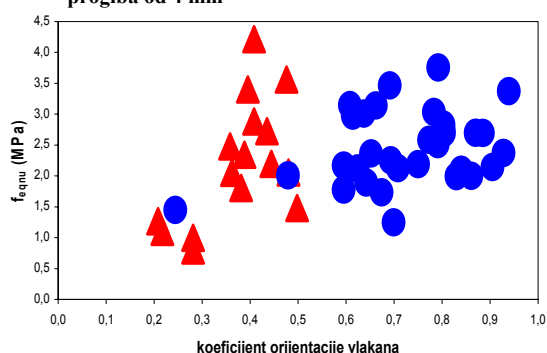


Slika 10. Odnos koeficijenta orijentacije vlakana i sile P_{max}

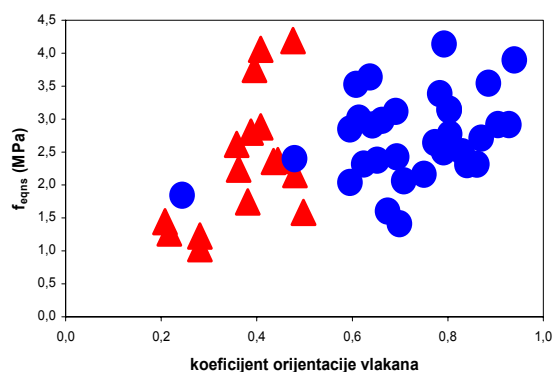
ična vlakna u betonskim mješavinama imaju znatno bolju orijentaciju od jedne vrste čeličnih vlakana.



Slika 11. Odnos koeficijenta orijentacije vlakana i rada do progiba od 4 mm



Slika 12. Utjecaj koeficijenta orijentacije vlakana na ekvivalentnu vlačnu čvrstoću savijanjem za dokaz nosivosti



Slika 13. Utjecaj koeficijenta orijentacije vlakana na ekvivalentnu vlačnu čvrstoću savijanjem za dokaz uporabljivosti

Analiza odnosa koeficijenta orijentacije vlakana i rada do progiba od 4 mm (slika 11.) pokazuje da se boljom orijentacijom čeličnih vlakana poboljšava i ponašanje pri opterećenju na savijanje. Slični rezultati dobivaju se i usporedbom koeficijenta orijentacije vlakana s radom pri različitim progibima [11].

Slike 12. i 13. prikazuju utjecaj koeficijenta orijentacije vlakana na vrijednosti ekvivalentnih čvrstoća pri savijanju za dokaz uporabljivosti i nosivosti. Uočava se da s povećanjem vrijednosti koeficijenta orijentacije vlakana

rastu i vrijednosti ekvivalentne čvrstoće pri savijanju za dokaz nosivosti i za dokaz uporabljivosti. Takvi rezultati posljedica su činjenice da povećanje vrijednosti koeficijenta orijentacije vlakana utječe na povećanje rada do određenog progiba (tj. ploštine ispod krivulje opterećenje-progib) te na povećanje nosivosti pri određenom progibu.

Iz prethodnog se može zaključiti da koeficijent orijentacije vlakana u mikroarmiranom betonu utječe bitno na ekvivalentnu čvrstoću pri savijanju za dokaz nosivosti i uporabljivosti konstrukcijskih elemenata od mikroarmiranog betona.

5 Zaključak

Eksperimentalni je rad proveden na 12 mješavina mikroarmiranog betona s 30 kg/m³ različitih čeličnih vlakana. Ova je količina vlakana odabrana zato što se upravo ta količina najčešće rabi u praktičnoj primjeni. Rezultatiprovedenog istraživanja korisni su za praktičnu primjenu pri izvedbi industrijskih podnih ploča i betonskih kolnika.

LITERATURA

- [1] Johnston C.D.: *Fiber-reinforced cements and concretes*, Gordon and Breach Science Publishers, Singapore, 2001
- [2] ACI Committee 544: *State-of-the Art Report on Fiber Reinforced Concrete*, ACI Manual of Concrete Practice 2001, ACI 544.1R-96, USA
- [3] Banthia N., Yan C., Bindiganavile V.: *Development and application of high performance hybrid fiber reinforced concrete*, Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium: Fibre-reinforced concrete (BEFIB 2000), Lyon, France, 2000, 471-480
- [4] Bjegović D., Skazlić M., Pičulin S.: *Properties of High-Performance Hybrid Fibre-Reinforced Concrete*, Proceedings of the Second International Symposium Fibre Concrete & High Performance Concrete 2003 (FC&HPC 2003), Frydlant n.O., Czech Republic, 2003, 39-48
- [5] Skazlić M.: *Hibridni mikroarmirani betoni visokih uporabnih svojstava*, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2003
- [6] Skazlić M., Bjegović D., Mrakovčić S.: *Mikroarmirani betoni visokih uporabnih svojstava*, Građevinar, Vol. 56, broj 2, 2004, 69-78
- [7] *Richtlinie Faserbeton*, Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2002
- [8] RILEM TC 162-TDF Workshop: *Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete: Background and Experiences*, RILEM Proceedings PRO 31, RILEM Publications S.A.R.L., Bochum, Germany, 2003
- [9] Romualdi J.P., Mandel J.A.: *Tensile Strength of Steel Fibre Reinforced Concrete: Correlation with Some Measures of Fiber Spacing*, ACI Materials Journal, Vol. 61, No. 6, 1964, 657-670
- [10] Hilsdorf H.K., Brameshuber W., Kottas R.: *Weiterentwicklung und Optimierung der Materialeigenschaften faserbewehrten Betons und Spritzbetons als Stabilisierungselemente der Felssicherung*, Schlußbericht zum Forschungsvorhaben, IfMB, Universität Karlsruhe
- [11] Šomoši D.: *Utjecaj hibridnih čeličnih vlakana na svojstva očvrslulog mikroarmiranog betona*, diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2007

ZAHVALA

Prikazani su rezultati proizašli iz znanstvenog projekta (Suvremene metode ispitivanja građevinskih materijala, broj projekta 082-0822161-2996, voditelj projekta doc. dr. sc. Marijan Skazlić), provedenog uz potporu Ministarstvu znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske. Autori se zahvaljuju na potpori.