

Primljen / Received: 3.4.2022.

Ispravljen / Corrected: 5.9.2022.

Prihvaćen / Accepted: 26.12.2022.

Dostupno online / Available online: 10.2.2023.

Ponašanje armiranobetonskih kvadratnih stupova od mikroarmiranih cementnih kompozita

Autori:



Mohsen Dayyani, kandidat za doktorat Islamsko sveučilište Azad, Teheran, Iran
Središnji teheranski ogranak
Odjel za građevinarstvo
dayyanimohsen@gmail.com



Izv.prof.dr.sc. **Alireza Mortezaei**, dipl.ing.građ.
Islamsko sveučilište Azad, Semnan, Iran
Semnanska grana
Odjel za građevinarstvo
a.mortezaei@semnaniau.ac.ir
Autor za korespondenciju



Doc.dr.sc. **Mohammad Sadegh Rohanimanesh**
Islamsko sveučilište Azad, Teheran, Iran
Središnji teheranski ogranak
Odjel za građevinarstvo
m.s.rohanimanesh@iauctb.ac.ir



Doc.dr.sc. **Jafar Asgari Marnani**
Islamsko sveučilište Azad, Teheran, Iran
Fakultet za građevinarstvo i zemljišne resurse
Odjel za građevinarstvo
j_asgari@iauctb.ac.ir

Prethodno priopćenje

Mohsen Dayyani, Alireza Mortezaei, Mohammad Sadegh Rohanimanesh, Jafar Asgari Marnani

Ponašanje armiranobetonskih kvadratnih stupova od mikroarmiranih cementnih kompozita

Ovaj rad istražuje učinke geometrijskih omjera i udjela vlakana na slom betonskih stupova od mikroarmiranih cementnih kompozita visokih performansi (eng. *engineered cementitious composite* – ECC). Kada su podvrgnuti cikličnom opterećenju, ti stupovi mogu otkazati zbog očvršćivanja uzdužne armature ili stvaranja dominantnih pukotina. U ovom je istraživanju ispitano 11 ECC stupova, s udjelom vlakana između 0–1,5 % i omjerom duljine stupa i visine presjeka (geometrijski omjer) od 3 do 7, te jedan standardni armiranobetonski stup. Rezultati su pokazali da su i geometrijski omjer i udio vlakana značajno utjecali na uočene mehanizme sloma. Nadalje, ECC stup je demonstrirao kapacitet kumulativne disipacije energije koji je bio približno 100 % veći nego kod konvencionalnog betonskog stupa.

Ključne riječi:

projektirani cementni kompozit, kvadratni stup, udio vlakana, geometrijski omjer, mehanizam sloma

Research Paper

Mohsen Dayyani, Alireza Mortezaei, Mohammad Sadegh Rohanimanesh, Jafar Asgari Marnani

Performance of reinforced engineered cementitious composite square columns

This paper investigates the effects of aspect ratio and fibre fraction on the failure of engineered cementitious composite (ECC) concrete columns. When subjected to cyclic load, these columns may fail due to the strain-hardening of longitudinal bars or the formation of dominant cracks. In this experiment, 11 ECC columns with fibre fractions between 0–1.5 % and aspect ratios from 3–7, as well as a single reinforced concrete column, were tested. The results showed that both aspect ratio and fibre fraction significantly impacted the failure paths observed. Additionally, the ECC columns exhibited a cumulative energy dissipation capacity approximately 100 % higher than that of the conventional concrete column.

Key words:

engineered cementitious composite, square column, fibre fraction, aspect ratio, failure path

1. Uvod

Mikroarmirani cementni kompoziti visokih performansi (engl. *engineered cementitious composite* - ECC) je vrsta betona ojačanog vlaknima (engl. *fiber reinforced concrete* - FRC) koji sadrži disperzijska vlakna u cementnoj matrici i pokazuje deformacijsko očvršćivanje. FRC također pokazuju vlačno omekšavanje pri opterećenju [1, 2]. ECC su duktilni, a njihov kapacitet vlačne deformacije obično prelazi 2 % [3, 4]. Neke istaknute karakteristike armiranih ECC-ova čine ih prikladnijima za upotrebu u konstrukcijskim elementima od uporabe konvencionalnih betona [5]. Istraživači prepoznaju dva mehanizma sloma: jedan uključuje lokalizaciju pukotina, a drugi nastaje očvršćivanjem uzdužne armature [6]. Ovaj je rad prikazao učinak udjela vlakana (0-1,5 %) i geometrijskog omjera (3-7) na mehanizam sloma. Prednosti ECC-a u smislu sigurnosti, održivosti, stabilnosti i ekonomičnosti potakle su njihovu upotrebu u infrastrukturi i građevinskoj industriji, a inženjere su potaknule da istraže najistaknutiju karakteristiku nosivih elemenata, točnije njihovu duktilnost, svojstvo koje pokazuju ECC elementi pri primjeni velikog opterećenja. Dakle, ECC elementi poboljšavaju funkcionalnost konstrukcije [7]. Parra-Montesinos i drugi [8] proučavali su hibridne spojeve grede i stupa koji su pokazali neelastično ponašanje. Ovi spojevi sastojali su se od čelične grede i armiranobetonskog (AB) stupa, uz primijenjeno seizmičko opterećenje. Nadalje, primijetili su da je zamjena konvencionalnog betona ECC-om bez poprečne armature stvorila najveću učinkovitost prijanjanja. Fischer i Li [9] ispitali su čelične/ECC i FRP/ECC grede i stupove u samocentrirajućem okviru i u standardnom okviru.

Pregled literature prethodnih istraživanja sugerira da je provedeno samo nekoliko ispitivanja o seizmičkom ponašanju nosivih ECC elementima i mehanizmima sloma ECC kvadratnih stupova. Većina ispitivanja na ovu temu uglavnom su se fokusirala na ECC kao pomoćni materijal za pojačanje ili sanaciju svih ili dijela betonskih ili zidanih konstrukcijskih komponenti. Nosivost ECC uzorka ovisi o premošćujućim vlaknima. Ako se premošćujuća vlakna potpuno izvuku ili puknu (ili oboje), uzorak gubi sposobnost nosivosti. Ako je sposobnost premošćivanja veća od nosivosti preostalog čelika, pukotine će biti lokalizirane [10-12]. ECC savojni elementi mogu otkazati na dva različita načina pod opterećenjem [13]: prvi se događa kada se formira jedna ili više dominantnih pukotina, a drugi kada uzdužna armatura doživi očvršćivanje. Prvi mehanizam ne može nadoknaditi nosivost očvršćivanjem uzdužne armature, a drugi povećava nosivost jer se uzdužna armatura postupno očvršćuje [14-16]. Ova dva mehanizma sloma istražuju se na temelju različitih udjela vlakana (0-1,5 %) i geometrijskih omjera (3-7). Prethodna ispitivanja ograničila su udio vlakana na 2 %;

međutim, ovaj rad ispituje učinak šireg raspona udjela vlakana i geometrijskih omjera na mehanizam sloma.

2. Eksperimentalne metode

2.1. Materijali

Istraživači su koristili ECC u različitim vrstama konstrukcija, uključujući zgrade i mostove [14]. U laboratoriju je izvedena mješavina i provedeno ispitivanje uzoraka, kao što je prikazano u tablici 1. i na slici 1. ECC betonska matrica sastojala se od vlakana polivinilnog alkohola (PVA), čija su svojstva prikazana u tablici 2. (duljina = 8 mm, volumni udio = 0-1,5 %), a matrica je izrađena od cementa tipa II i letećeg pepela klase F prema EN450 i BS3892, te od #50 silikatnog pijeska.

Tablica 2. Specifikacije vlakana polivinilnog alkohola

Naziv vlakna	RCS15
Proizvođač	Nycon
Materijal	PVA
Konfiguracija	Usitnjeno vlakno natopljeno smolom
Boja	Bijela ili žućkastobijela
Relativna gustoća	1,3
Duljina	1/3" (8 mm)
Vlačna čvrstoća	210 ksi (1400 MPa)
Savojna čvrstoća	4200 ksi (30 GPa)
Upijanje vode	<1 % po težini
Otpornost na lužine	Izvrсна
Betonska površina	Glatka
Otpornost na koroziju	Izvrсна

Ova matrica je također uključivala dodatak za modifikaciju viskoznosti (engl. *viscosity modifying admixture* - VMA) i dodatak za redukciju vode visokog raspona (engl. *high range water-reducing* - HRWR). Prema ASTM C494, tlačna čvrstoća konvencionalnog betona bila je slična tlačnoj čvrstoći ECC mješavine. Veličina krupnih agregata konvencionalnog betona ograničena je na 9,5 mm. Svojstva armaturnog čelika prikazana su u tablici 3. U ovom je ispitivanju šest uzoraka izvedeno za provjeru tlačne čvrstoće i drugih parametara povezanih s ECC-om, uključujući korištenje pet različitih udjela vlakana (0 do 1,5 %) i jednog uzorka konvencionalnog betona. Naposljetku, 12 uzoraka (šest prizmi za savijanje i šest cilindara za brazilsku metodu cijepanja) ispitano je prema standardima ASTM. Nekoliko betonskih ECC kocaka (100 x

Tablica 1. Sastav mješavine ispitnih uzoraka prema omjeru težine cementa [17]

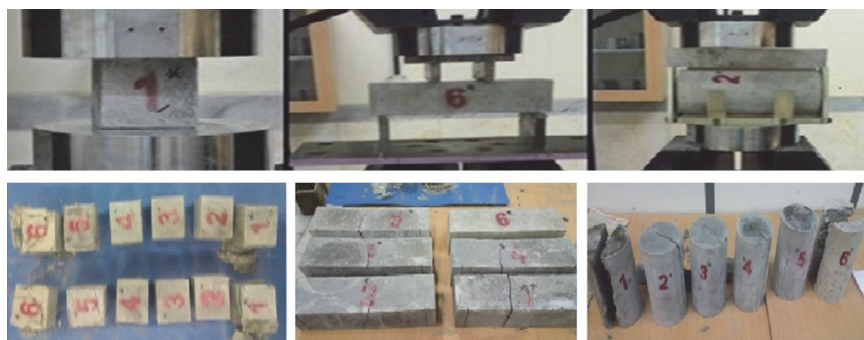
Matrica	Cement	Leteći pepeo	Krupni agregat	Sitni agregat	Voda	VMA (% težine cementa)	HRWR (% težine cementa)	PVA (% volumena)
ECC	1,0	1,2	0	0,8	0,63	0,12	0,5	0-1,5
Beton	1,0	0	1,14	1,05	0,40	0	0	0

Tablica 3. Svojstva armaturnog čelika

Promjer [mm]	Površina [mm ²]	Granica popuštanja [MPa]	Čvrstoća [MPa]
10	78,5	475	510
12	113,04	463	542
16	200,96	419	495
18	254,34	465	541
20	314	406	471

Tablica 4. Specifikacije uzorka naprezanja/deformacije

Provedena ispitivanja	Sila [N]	Produljenje [mm]	Naprezanje [MPa]	Istezanje [%]	
Savijanje	Vršna	18148,5	4,4682	0,51	4,4682
	Slomna	2550,6	9,0255	0,0729	9,0255
Cijepanje	Vršna	438825,9	9,187	9,6234	5,9212
	Slomna	410327,8	9,2939	8,9984	6,035
Tlak	Vršna	333834,3	2,5774	33,3834	2,5774
	Slomna	226341,2	3,0565	22,6341	3,0565



Slika 1. Laboratorijski uzorci

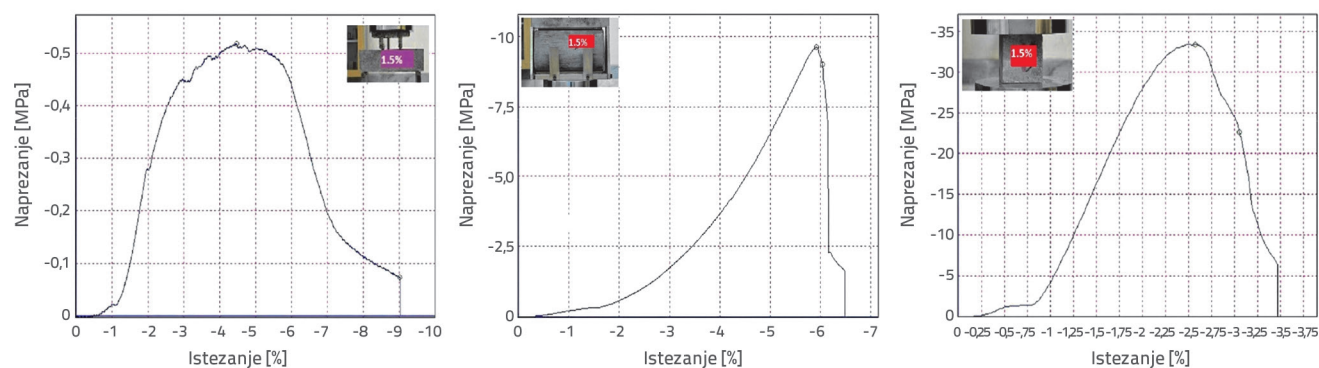
100 x 100 mm) pripremljeno je za tlačno ispitivanje. Procijenjene tlačne čvrstoće betona i ECC-a uspoređene su ispitivanjem ECC-a i betona tijekom nekoliko različitih dana (28 ± 2 dana odnosno 56 ± 2 dana), što je omogućilo da se uzorci armiranog betona njeguju

dulje nego ECC uzorci. Njihova tlačna čvrstoća bila je 34,50 MPa. Slika 2. i tablica 4. predstavljaju krivulju deformacije na savijanje te brazilsku i tlačnu čvrstoću za uzorke s 1,5 % udjela vlakana.

Prema različitim člancima i standardima [18], ECC u vlaknu najčešće pokazuje očvršćivanje, što ih čini prikladnima za analizu konstrukcije. Svojstva armaturnog čelika korištenog u ovom radu prikazana su u tablici 3.

2.2. Uzorci i postavke ispitivanja

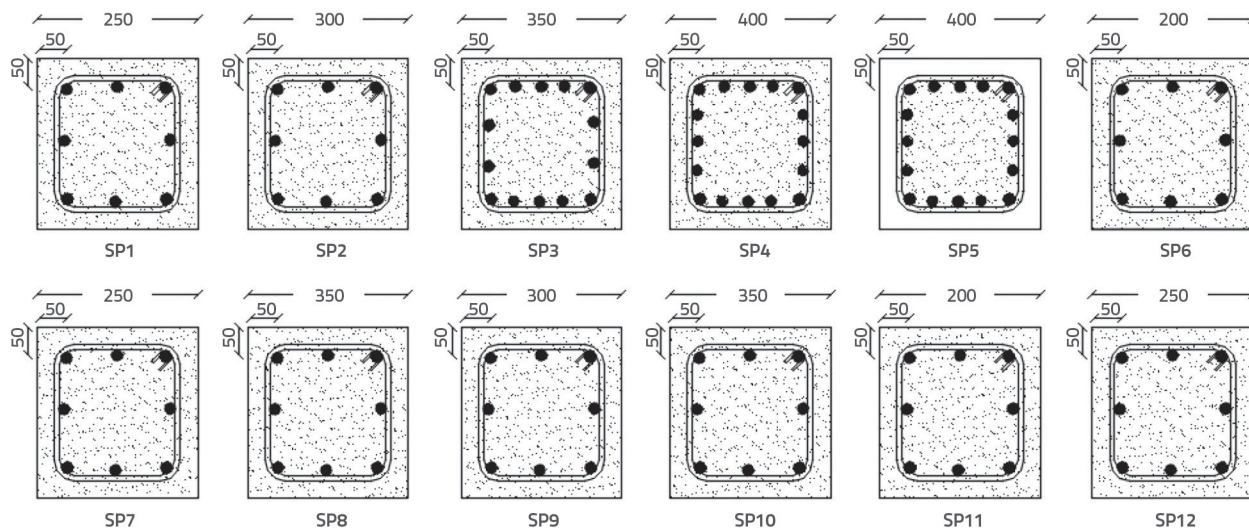
Ispitano je nekoliko uzoraka stupova kako bi se istražio utjecaj udjela vlakana na mehanizam sloma AB i ECC kvadratnih stupova.



Slika 2. Dijagrami napreznosti-deformacije

Tablica 5. Geometrija i armatura uzoraka stupova

Uzorak	Materijal	Presjek [mm x mm]	Visina [mm]	Omjer dimenzija	Koeficijent armiranja [%]	Vlakna [%]	Uzdužna armatura	Poprečna armatura
SP1	ECC	250 x 250	750	3	1	0	8Φ10	5Φ10
SP2	ECC	300 x 300	900	3	1	0	8Φ12	5Φ10
SP3	ECC	350 x 350	1050	3	1,3	0,3	14Φ12	6Φ10
SP4	ECC	400 x 400	1200	3	1,15	0,3	16Φ12	6Φ10
SP5	AB	400 x 400	1200	3	1,15	0,0	16Φ12	6Φ10
SP6	ECC	200 x 200	1000	5	1,57	0,6	8Φ10	7Φ10
SP7	ECC	250 x 250	1250	5	1,96	0,6	8Φ12	8Φ10
SP8	ECC	350 x 350	1750	5	1,65	0,6	8Φ18	10Φ10
SP9	ECC	300 x 300	1800	6	1,77	1,0	8Φ16	10Φ10
SP10	ECC	350 x 350	2100	6	2,3	1,5	8Φ20	10Φ10
SP11	ECC	200 x 200	1400	7	1,57	1,0	8Φ10	10Φ10
SP12	ECC	250 x 250	1750	7	2,56	1,5	8Φ16	10Φ10

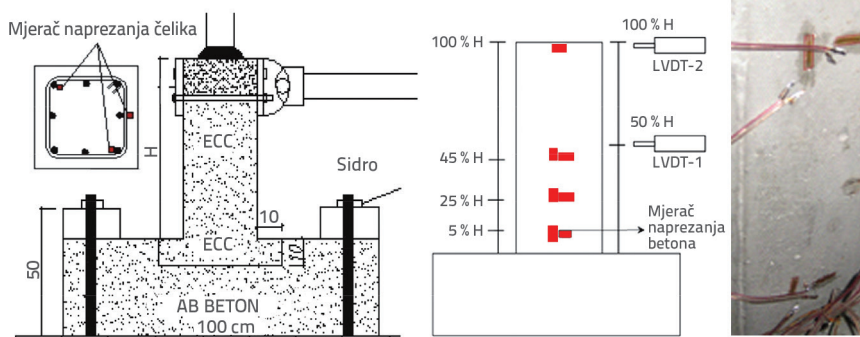


Slika 3. Raspored armature u stupovima

Kao što je prikazano na slici 4., ECC materijal korišten je za izvedbu spojnog dijela stupa s temeljnom gredom kako bi se

sprječilo slabljenje spoja stupa i temeljne grede. Pojednosti o uzorcima i rasporedu armature prikazane su u tablici

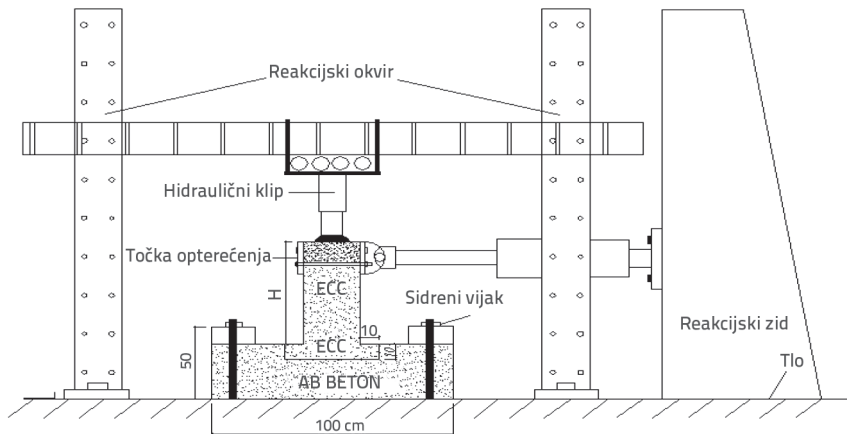
5., odnosno na slici 3. Dvanaest armiranobetonskih uzoraka njegovano je pomoću vlage sedam dana, a zatim su ostavljeni na sobnoj temperaturi te je njihova njega nastavljena do provođenja ispitivanja. Uzdužna i poprečne šipke sa šest odnosno tri induktivna osjetila postavljene su na beton na 0,15 H, 0,20 H i 0,45 H iznad spoja stupa s temeljem, kao što je prikazano na slici 4. Osim toga, ugrađeno je i sedam induktivnih osjetila na armaturu.



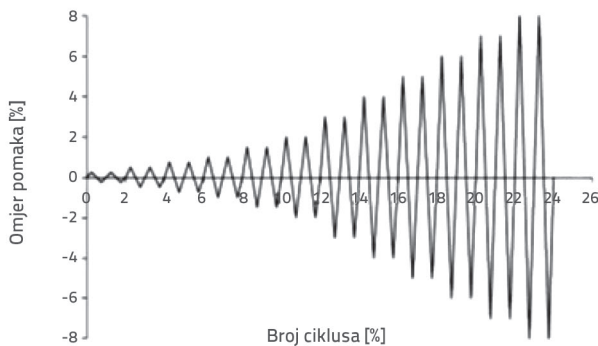
Slika 4. Postupak izrade uzorka stupa

2.3. Ispitna oprema i postupak opterećenja

Kao što je prikazano na slici 5., donji dio svakog uzorka fiksiran je na bazu kako bi se stvorili uvjeti opterećenja koji bi rezultirali savajnom deformacijom u svim uzorcima, što je pomoglo u istraživanju utjecaja ECC materijala na očekivano područje plastičnog zgloba.



Slika 5. Ispitna postavka uzoraka



Slika 6. Protokol kontroliran pomakom [19]

Prije primjene horizontalnog opterećenja, na vrh uzorka stupa uneseno je konstantno tlačno opterećenje od 20 % nominalnog tlačnog kapaciteta stupa pomoću hidraulične preše. Između hidraulične preše i reakcijske čelične grede postavljena je remenica s valjcima kako bi se smanjilo trenje između hidraulične preše i reakcijskog čeličnog okvira. Reakcijski zid opremljen aktuatorom od 250 kN služio je za primjenu bočnih opterećenja. Ovaj je proces proveden sljedeći unaprijed definiranu sekvencu opterećenja kontrolom pomaka, s ručno primijenjenim opterećenjem na vrhuncu svakog ciklusa prema protokolu opterećenja prikazanom na slici 6. [19].

3. Eksperimentalni rezultati

3.1. Petlja histereze

Uzorci pukotina 12 stupova prikazani su na slici 7. Mehanizmi sloma (očvršćivanje armature i lokalizirane pukotine) označeni su s "X" odnosno "O", kao što je vidljivo na slici 8. Uzorci SP1, SP2, SP3 i SP5 otkazali su stvaranjem lokalizacije pukotina i dominantnih pukotina. Osim toga, na uzorku SP1 uočeno je raspucavanje, odlamanje zaštitnog sloja i naglo otkazivanje zbog nedostatka vlakana. Histerezni odgovor stupa SP5 pokazuje priklještenje (engl. *pinching*) i manju krutost pri ponovnom opterećenju u usporedbi sa stupom SP4 i drugim ECC uzorcima. Nadalje, većina pukotina u SP4 nastala je u uzdužnim šipkama došlo do očvršćivanja i popuštanja. Raspršena vlakna u SP4 eliminirala su priklještenje histereze, čime su, u odnosu na SP5, značajno poboljšana nosivost i krutost elementa. U ovom istraživanju uočene su sljedeća

dva mehanizma sloma. Rezultati pokazuju da su SP1, SP2, SP3 i SP5 otkazali zbog lokalizacije pukotina (također su primijećeni raspucavanje i odlamanje zaštitnog sloja); preostali su uzorci otkazali nakon postupnog očvršćivanja armature, što se obično primjećuje u uzorcima vlaknastog betona [20-22]. Budući da su im nedostajala premošćujuća vlakna te je došlo do odlamanja zaštitnog sloja betona koji prekriva uzdužne šipke, u uzorcima SP1, SP2, SP3 i SP5 došlo je do izvijanja armature uz velike uzdužne pukotine i ozbiljno raspucavanje zbog proklizavanja. Kao što je prikazano na slici 9., usporedba između petlje histereze i očvršćivanja uzdužnih šipki u SP4 i SP5 otkriva da SP4 ima veću



Slika 7. Obrasci pukotina na uzorcima nakon sloma

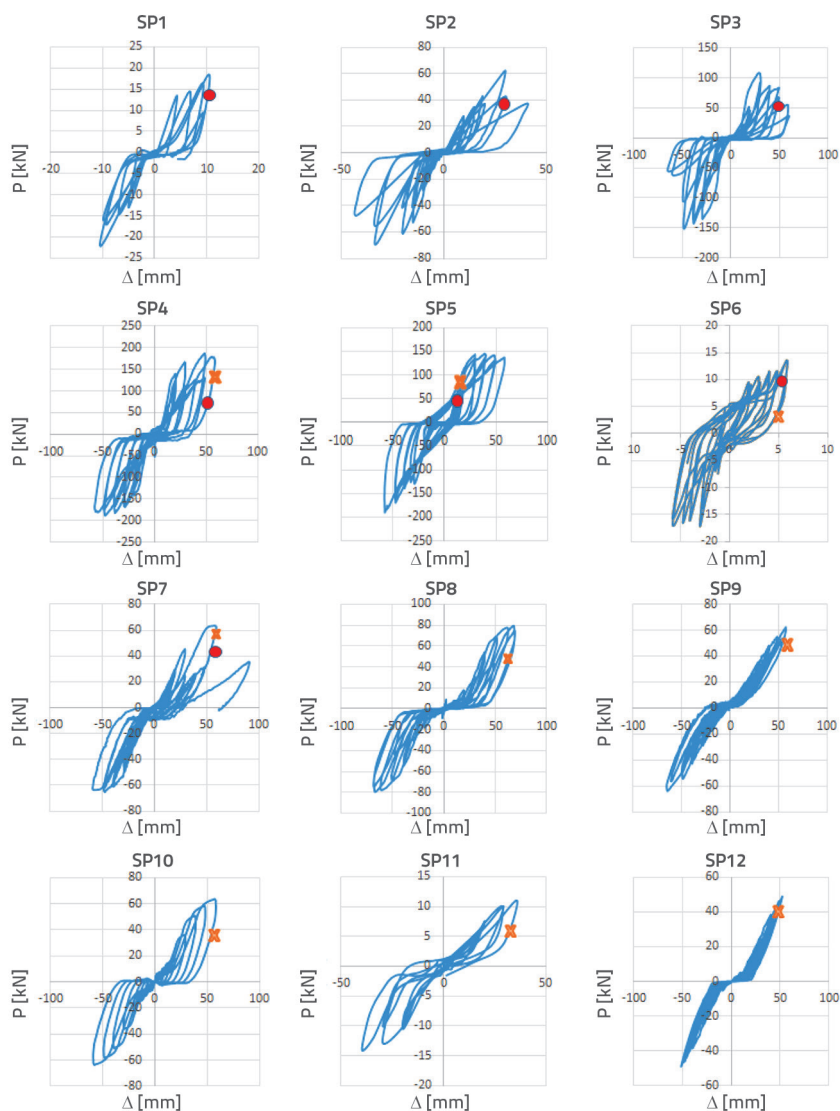
stabilnu krivulju opterećenja u usporedbi sa SP5. Slika također pokazuje da SP4 apsorbira više energije od SP5 zbog svoje sposobnosti da eliminiira priklještenje. Dvije različite putanje sloma jasno su uočene u SP4 (očvršćivanje armature) i SP5 (lokalizacija pukotine).

Kapaciteti opterećenja SP4, SP6 i SP7 neznatno su se povećali nakon lokalizacije mikropukotina, ali ubrzo nakon toga došlo je do očvršćivanja čelika prije nego što su izgubili sposobnost premošćivanja vlakana i, prema tome, sposobnost nosivosti. Ovi su uvjeti u konačnici doveli do sloma čelika. ECC je zdrobljen, uzrokujući pucanje uzdužne armature i početak sloma stupova SP8, SP9, SP10, SP11 i SP12. Pomaci sloma od 4,8 % uočeni su za konvencionalne stupove. S nižim udjelom vlakana i geometrijskim omjerom, ECC stupovi pokazali su manji kapacitet pomaka u usporedbi s konvencionalnim stupovima.

Kada je SP5 dosegao svoje maksimalno opterećenje od 150 kN (s odgovarajućim pomakom od 4,8 %), beton je zdrobljen i

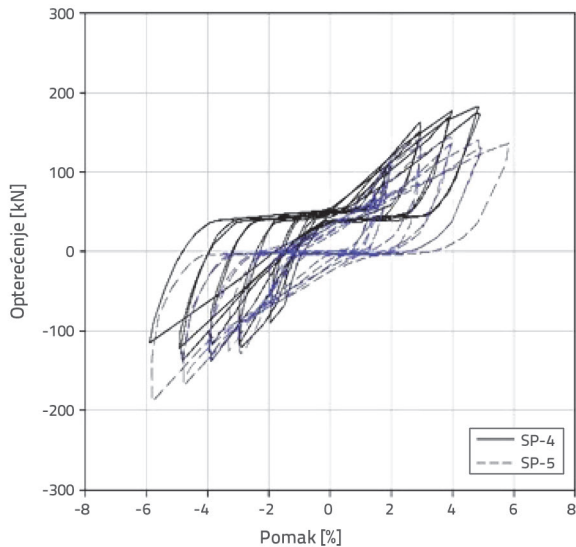
izgubio je nosivost. Nasuprot tome, kapacitet opterećenja SP4 se povećavao sve dok se vlakna nisu počela izvlačiti ili pucati. U isto se vrijeme zbog premošćivanja vlakana formirala dominantna pukotina. Vršno opterećenje stupa SP4 je 30 % veće od onog kod konvencionalnog uzorka. Nadalje, u SP4 je došlo do očvršćivanja armature nakon lokalizacije pukotine i sloma premošćivanja vlakana. Prednost sloma uslijed očvršćivanja u odnosu na lokalizaciju pukotine je u tome što široke pukotine upozoravaju na nadolazeći iznenadni slom. Uzorak pukotina u SP4 je gušći i pokriva više od 80 % visine uzorka, dok je krajnji integritet nosivosti elementa zadržan. Nasuprot tome, lokalizirana pukotina u SP5 protezala se od baze stupa do 35 % visine presjeka. Povećanje geometrijskog omjera i udjela vlakana u ECC stupovima povećava kapacitet pomaka, što je potvrđeno prethodnim istraživanjem armiranih ECC elemenata [23].

Rezultati pokazuju da kada se udio vlakana u armiranim uzorcima povećao s 0,3 % na 1,5 %, mehanizam sloma se promijenio od lokalizirane pukotine do postupnog očvršćivanja, što je rezultiralo povećanjem kapaciteta pomaka za 79,2 % jer je smanjenje kapaciteta opterećenja uzrokovano gubitkom sposobnosti premošćivanja vlakana nakon lokalizacije pukotine nadoknađeno sposobnošću očvršćivanja čelika. Povećanja vršne nosivosti uzorka (13 do 15 za SP5 i 18 do 20 za SP4) nastala su zbog razlika u vlaknu i tlaku ECC i konvencionalnih stupova (slika 9.). Histerezni odgovor armiranog betona (SP5) pokazuje priklještenje i manju krutost pri ponovnom opterećenju, a u konačnici dolazi do sloma zbog gnječenja betona uz pojavu pukotina (slika 10.), što je u skladu s prethodnim istraživanjima koja pokazuju visoku toleranciju oštećenja ECC-a [24]. U usporedbi sa SP5, SP4 zadržava veću količinu preostale krutosti, ima veći krajnji pomak i pokazuje bolju otpornost na raspucavanje i odlamanje zaštitnog sloja. Nadalje, način sloma se mijenja od lokalizacije pukotine do očvršćivanja naprezanjem pri povećanju geometrijskog omjera i udjela vlakana. U uzorcima SP1, SP2, SP3 i SP5 uočen je posmični slom zbog lokalizacije pukotine i uzdužnih šipki koje ostaju u elastičnoj fazi. Kod SP4, SP6, SP7, SP8, SP9 i SP11, očvršćivanje uzdužnih šipki značajno se povećava, a mehanizam sloma se mijenja iz posmičnog u savojni. Naposljetku, povećanjem geometrijskog omjera i udjela vlakana u SP10 i SP12, sitne se pukotine šire po uzorcima i opaža se



Slika 8. Histerezne krivulje ispitnih uzoraka

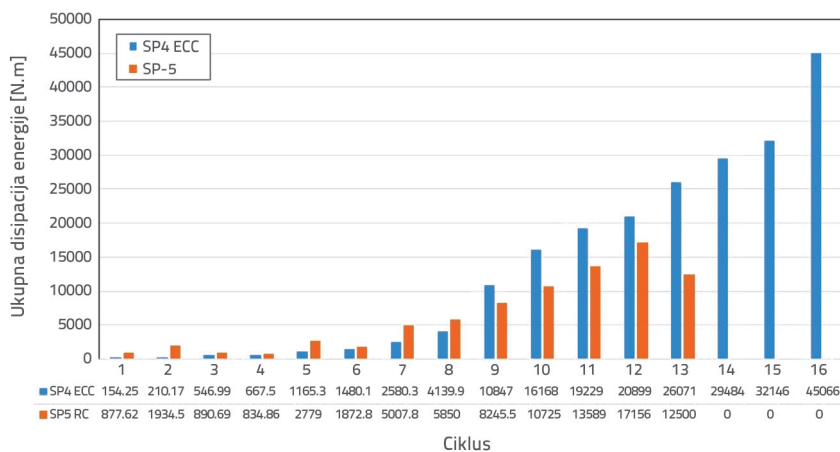
savojni slom. Stoga, kada se mehanizam sloma promijeni od lokalizacije pukotine do očvršćivanja povećanjem udjela vlakana i geometrijskog omjera, dolazi do posmičnog sloma stupa, kombiniranog posmično-savojnog i na kraju savojnog sloma.



Slika 9. Histerezna krivulja za stupove SP4 (ECC) i SP5 (AB)



Slika 10. Mehanizmi sloma stupova SP4 (ECC) i SP5 (AB)



Slika 11. Kapacitet kumulativne disipacije energije ispitnog uzorka

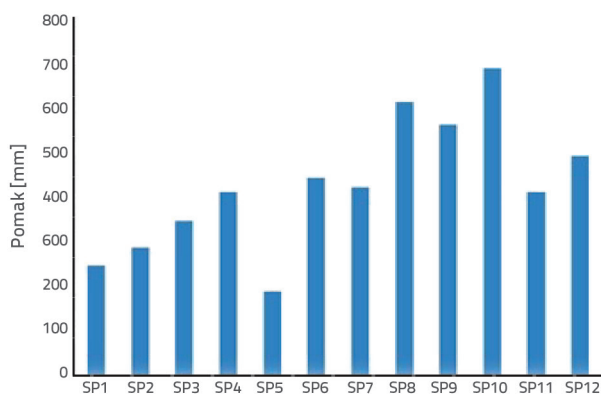
3.2. Disipacija energije

Slika 11. prikazuje kapacitet kumulativne disipacije energije u svakom ciklusu opterećenja prema ASCE41-13 [25]. Taj je kapacitet za neke uzorke mjereno do kraja ispitivanja. U većini ECC uzoraka, kapacitet kumulativne disipacije energije značajno se povećao s povećanjem ciklusa opterećenja nakon što je dostignuta maksimalna čvrstoća. Kapacitet kumulativne disipacije energije za SP4 bio je približno 100 % veći od kapaciteta za SP5, što pokazuje da uporaba vlakana pomaže u povećanju premošćivanja ondje gdje se kumulativna energija rasipa ponavljanjem ciklusa opterećenja. Induktivno osjetilo koje se nalazi na poprečnoj armaturi, ostaje u elastičnom statusu, što upućuje na ispravnu izvedbu ECC uzoraka i pokazuje da poprečna armatura nije značajno utjecala na disipaciju energije ECC uzorka.

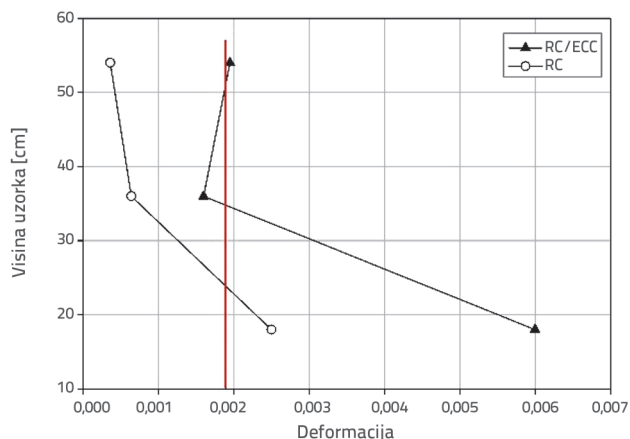
3.3. Plastični zglob

Tijekom jakih potresa ponašanje je betonskih elemenata nelinearno, a to nelinearno ponašanje, posebno u AB stupovima, prepoznato je kao područje popuštanja. U području popuštanja

može doći do uzdužnog popuštanja čelika, stvaranja pukotina u betonu i odlamanja zaštitnog sloja [26, 27]. Park i Paulay [28] istaknuli su da se ukupni pomak stupa može karakterizirati njegovom zakrivljenošću i visinom, kao i duljinom područja popuštanja. U različitim uzorcima, naprezanje u čeličnoj armaturi različito se akumuliralo i lokaliziralo. Slika 12. prikazuje pomake zabilježene na početku popuštanja i lokalizacijom pukotina na uzorcima. U usporedbi s konvencionalnim betonskim uzorcima, ojačani ECC uzorci pokazali su više sitnih pukotina i plastičnih deformacija, što je dovelo do razlika u normaliziranoj disipiranoj energiji po ciklusu uzoraka. Duljina plastičnog zgloba prikazana u tablici 6. temelji se na podacima s induktivnih osjetila, koji se uzimaju u obzir pri praćenju naprezanja uzdužnih šipki i betonske površine uzorka. Podaci su pokazali da se duljina plastičnog zgloba mijenja s jedan na dva povećanjem geometrijskog omjera i postotka vlakana. Slika 13. prikazuje različite duljine plastičnih zona u SP4 i SP5. Raspodjela mikropukotina bila je veća u SP12, SP11, SP10 i SP9 nego u SP7, SP6 i SP4.



Slika 12. Pomak na početku popuštanja uzdužne armature



Slika 13. Duljina plastičnog zgloba u SP4 (ECC) i SP5 (AB)

Tablica 6. Duljina plastičnog zgloba

Geometrijski omjer	Udio vlakana	Duljina plastičnog zgloba
3	0-0,3 %	1,0 D*
5	0,6 %	1,5 D*
7	1-1,5 %	2 D*

D* predstavlja dimenziju poprečnog presjeka stupa

4. Zaključci

U ovom je radu ispitano 12 uzoraka kvadratnih stupova (jedan izrađen od konvencionalnog betona i 11 stupova izrađenih od ECC-a s različitim udjelima vlakana i geometrijskim omjerima) kako bi se istražili učinci korištenja ECC-a na seizmički odgovor stupova. Rezultati ovog istraživanja sažeti su u nastavku:

- Način sloma se promijenio od lokalizacije pukotine do očvršćivanja armature povećanjem geometrijskog omjera i udjela vlakana.

LITERATURA

- [1] Yang, E., Li, V.C.: Numerical study on steady-state cracking of composites. *Composites Science and Technology*, 67 (2007) 2, pp. 151–156.
- [2] Ranade, R., Li, V.C., Stults, M.D., Rushing, T.S., Roth, J., Heard, W.F.: Micromechanics of high-strength, high-ductility concrete. *ACI Materials Journal*, 110 (2013) 4, pp. 375–384.
- [3] Lu, C., Leung, C.K.Y.: Theoretical evaluation of fiber orientation and its effects on mechanical properties in engineered cementitious composites (ECC) with various thicknesses. *Cement and Concrete Research*, 95 (2017), pp. 240–246.
- [4] Li, V.C., Wang, Y., Backer, S.: Effect of inclining angle, bundling and surface treatment on synthetic fibre pull-out from a cement matrix. *Composites*, 21 (1990) 2, pp. 132–140.
- [5] Ismail, M.K., Abdelaleem, B.H., Hassan, A.A.A.: Effect of fiber type on the behavior of cementitious composite beam-column joints under reversed cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 186 (2018), pp. 969–77.
- [6] Shao, Y., Billington, S.L.: Predicting the two predominant flexural failure paths of longitudinally reinforced high-performance fiber-reinforced cementitious composite structural members. *Engineering Structures*, 199 (2019), pp. 109581.
- [7] Fukuyama, H., Matsuzaki, Y., Sato, Y., Iso, M., Suwada, H.: Structural Performance of Engineered cementitious composite elements, composite and hybrid structures, 6th ASCCS International Conference on Steel-Concrete Composite Structures, pp. 969–976, 2000.
- [8] Parra-Montesinos, G., Wight, J.K.: Seismic response of exterior RC column-to-steel beam connections. *Journal of Structural Engineering* 126 (2000), pp. 1113–1121.
- [9] Fischer, G., Li, V.C.: Intrinsic response control of moment-resisting frames utilizing advanced composite materials and structural elements. *ACI Structural Journal*, 100 (2003) 2, pp. 166–176.

- [10] Kang, S.-B., Tan, K.H., Zhou, X.-H., Yang, B.: Influence of reinforcement ratio on tension stiffening of 506 reinforced engineered cementitious composites. *Engineering Structures*, 141 (2017), pp. 251-62.
- [11] Moreno, D.M., Trono, W., Jen, G., Ostertag, C., Billington S.L.: Tension stiffening in reinforced high performance fiber reinforced cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, 50 (2014), pp. 36-46.
- [12] Fischer, G., Li, V.C.: Influence of matrix ductility on tension-stiffening behavior of steel reinforced engineered cementitious composites (ECC). *ACI Structural Journal*, 99 (2002), pp. 104-11.
- [13] Shao, Y., Billington, S.L.: Predicting the two predominant flexural failure paths of longitudinally reinforced high-performance fiber-reinforced cementitious composite structural members. *Engineering Structures*, 199 (2019), pp. 109581.
- [14] Bandelt, M.J., Billington, S.L.: Impact of reinforcement ratio and loading type on the deformation capacity of high-performance fiber-reinforced cementitious composites reinforced with mild steel. *Journal of Structural Engineering* 142 (2016), pp. 14.
- [15] Fischer, G., Li, V.C.: Effect of matrix ductility on deformation behavior of steel-reinforced ECC flexural members under reversed cyclic loading conditions. *ACI Structural Journal*, 99 (2002), pp. 781-90.
- [16] Frank, T.E., Lepech, M.D., Billington, S.L.: Experimental testing of reinforced concrete and reinforced ECC flexural members subjected to various cyclic deformation histories. *Materials and Structures*, 50 (2017), pp. 232.
- [17] Lepech, M.D., Li, V.C.: Application of ECC for bridge deck link slabs. *RILEM J. Mater. Struct.* 42(9), 1185-1195 (2009)
- [18] JSCE.: Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks (HPFRCC), Japan, 2008.
- [19] ACI 374.2R-13: American Concrete Institute. Guide for testing reinforced concrete structural elements under slowly applied simulated seismic loads, 2013.
- [20] Moreno, D.M., Trono, W., Jen, G., Ostertag, C., Billington, S.L.: Tension stiffening in reinforced high performance fiber reinforced cement-based composites. *Cement and Concrete Composites*, 50 (2014), pp. 36-46.
- [21] Yoo, D.Y., Yoon, Y.S.: Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers. *Engineering Structures*, 102 (2015), pp. 409-23.
- [22] Ding, Y., Yu, K.Q., Yu, J.T., Xu, S.L.: Structural behaviors of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) beams subjected to bending-experimental study. *Construction and Building Materials*, 177 (2018), pp. 102-15.
- [23] Bandelt, M.J., Billington, S.L.: impact of reinforcement ratio and loading type on the deformation capacity of high-performance fiber-reinforced cementitious composites reinforced with mild steel. *Journal of Structural Engineering*, 142 (2016), pp. 14.
- [24] Kanda, T., Watanabe, S., Li, V.C.: Application of Pseudo strain hardening cementitious composites to shear resistant structural elements. *FRAMCOS-3* (1998), pp. 1477-1490.
- [25] ASCE standard ASCE/SEI 41-13 : American Society of Civil Engineers : seismic evaluation and retrofit of existing buildings.
- [26] Mortezaei, A.: Plastic hinge length of RC columns under the combined effect of near-aft vertical and horizontal ground motions. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 58 (2014) 3, pp. 243-53.
- [27] Mortezaei, A.: Plastic hinge length of RC columns considering soil-structure interaction, *Earthquakes and Structures*, 5 (2013) 6, pp. 679-702
- [28] Park, R., Paulay, T.: Reinforced concrete structures. John Wiley & Sons, 1975.