

Primljen / Received: 1.4.2025.

Ispravljen / Corrected: 15.7.2025.

Prihvaćen / Accepted: 18.8.2025.

Dostupno online / Available online: 10.2.2026.

Mehanička svojstva spojeva greda-stup od betona visokih uporabnih svojstava armiranog vlaknima (UHPFRC) s poprečnom armaturom visoke čvrstoće

Autor:

Prof.dr.sc. **Julin Wang**, dipl.ing.grad.Sveučilište inženjerskih znanosti i tehnologije
Shanxi, Kina

Fakultet arhitektonskog inženjerstva

wangjl_tj@163.com

Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

Julin Wang

Mehanička svojstva spojeva greda-stup od betona visokih uporabnih svojstava armiranog vlaknima (UHPFRC) s poprečnom armaturom visoke čvrstoće

Spojevi armiranobetonskih greda i stupova skloni su oštećenjima uslijed jakih potresa. Zamjena običnog betona betonom vrlo visokih uporabnih svojstava armiranog vlaknima (UHPFRC), koji ima izvanredna mehanička svojstva, može poboljšati otpornost ovih spojeva na potrese. Međutim, UHPFRC spojevi s poprečnom armaturom uobičajene čvrstoće ne smanjuju količinu poprečne armature, što može uzrokovati poteškoće pri izvedbi. Predmet su ovog istraživanja UHPFRC spojevi greda-stup ojačani poprečnom armaturom velike čvrstoće, pri čemu se njihova mehanička svojstva pri kombiniranom aksijalnom i cikličkom bočnom opterećenju procjenjuju eksperimentalnim ispitivanjima. Izrađena su i ispitana četiri uzorka spoja grede i stupa. Jezgra spoja jednog uzorka bila je izrađena od običnog betona, a preostala su tri uzorka imala jezgru izrađenu od UHPFRC-a. Ispitni parametri obuhvaćali su vrste primijenjenih materijala, granicu popuštanja te koeficijent armiranja poprečnom armaturom. Rezultati ispitivanja pokazali su da poprečna armatura visoke čvrstoće djelotvorno ograničava posmična naprezanja, povećava duktilnost i sposobnost raspršivanja energije spojeva te omogućuje smanjenje poprečne armature bez umanjjenja seizmičke otpornosti.

Ključne riječi:

spojevi greda-stup; beton visoke čvrstoće armiran vlaknima; poprečna armatura visoke čvrstoće; mehanička svojstva; cikličko opterećenje

Research Paper

Julin Wang

Mechanical properties of UHPFRC beam-column joints with high-strength stirrups

Reinforced concrete beam-column joints are prone to damage during severe earthquakes. Substituting normal concrete with ultra-high-performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC), which has outstanding mechanical properties, can improve the earthquake resistance capacity of these joints. However, UHPFRC joints with ordinary-strength stirrups do not reduce the amount of transverse reinforcement, causing construction difficulties. This study investigates UHPFRC beam-column joints with high-strength stirrups and evaluates their mechanical properties under combined axial and cyclic lateral loads via a detailed experimental program. Four beam-column joint specimens were fabricated and tested. The joint core of one specimen was made of ordinary concrete and that of the other three was made of UHPFRC. The test parameters included the types of materials used, yield strength, and volumetric ratio of the stirrups. The experimental results demonstrated that high-strength stirrups restrained the shear deformation, effectively improved the ductility and energy dissipation of the joints, and reduced the amount of transverse reinforcement while maintaining the same seismic capacity.

Key words:

beam-column joints, ultra-high performance fibre-reinforced concrete, high-strength stirrups, mechanical properties, cyclic loading

1. Uvod

Posmični slom spojeva greda-stup prepoznat je kao jedan od glavnih uzroka urušavanja okvirnih konstrukcija uslijed jakih potresa [1-10], stoga je poboljšanje ponašanja spojeva greda-stup uslijed potresa privuklo značajnu pozornost građevinskih inženjera.

Tiwar i sur. [11] uveli su dijagonalne prečke u spojeve greda-stup kako bi poboljšali njihovo seizmičko ponašanje. Tang i sur. [12] predložili su inovativni spoj greda-stup od betona lokalno poboljšan ljuskama od betona vrlo visokih uporabnih svojstava (engl. *ultra high performance concrete* - UHPC) te su ispitali uzorke u prirodnoj veličini radi analize seizmičkog ponašanja novog tipa spojeva. Rezultati ispitivanja pokazali su da se betonski spojevi greda-stup s UHPC ljuskama zadovoljavajuće ponašaju pri izmjeničnim niskocikličkim opterećenjima. Wang i sur. [13] proveli su kvazistatička ispitivanja na devet različitih UHPFRC spojeva greda-stup kako bi istražili njihovo seizmičko ponašanje i posmičnu nosivost. Sarmiento i sur. [14] izradili su i ispitali uzorke spojeva greda-stup pod cikličkim bočnim opterećenjem te zaključili da UHPFRC postižu 157 % veću sposobnost raspršivanja energije u odnosu na standardne betonske spojeve. Annadurai i Ravichandran [15] pokazali su da UHPFRC spojevi greda-stup imaju vrlo veliku sposobnost posmične duktilnosti. Prema Tsonosu i sur. [16], HPFRC spojevi greda-stup pokazuju zadovoljavajuću duktilnost. Abolfazl i sur. [17] dokazali su ispitivanjem da primjena UHPFRC-a u spojevima greda-stup povećava njihovu nosivost. Dehong i sur. [18] izvijestili su da UHPFRC spojevi greda-stup pokazuju izvrsna seizmička svojstva.

Dosadašnja istraživanja potvrđuju da primjena UHPFRC-a umjesto običnog betona u spojevima greda-stup značajno unaprjeđuje njihovu nosivost te deformacijsku sposobnost. Međutim, za povećanje posmične otpornosti potrebno je u području spojeva ugraditi veću količinu poprečne armature, što može uzrokovati poteškoće pri izvedbi. Predloženo je nekoliko pristupa za rješavanje ovog problema. Razvijen je novi predgotovljeni UHPFRC spoj greda-stup, kojim se smanjuje potreba za poprečnom armaturom u području spoja te pojednostavljuje proces izvedbe [19-22]. Shi i sur. [23, 24] nastojali su spriječiti koncentraciju armature te smanjiti količinu poprečne armature u UHPFRC spojevima optimalnom

uporabom čeličnih vlakana. U radu je [25] provedena analitička i eksperimentalna analiza ponašanja spojeva greda-stup pri cikličkom opterećenju; rezultati su pokazali da je potreba za poprečnom armaturom u spojevima s čeličnim vlaknima manja od zahtjeva prema Eurokodu. Abdo i sur. [26] utvrdili su da prisutnost poprečne armature u UHPFRC spoju greda-stup ima zanemariv utjecaj na njegova svojstva. Gupta i sur. [27] proveli su niz ispitivanja te zaključili da čelična vlakna učinkovito poboljšavaju posmičnu nosivost spojeva, uz povećanje duktilnosti i otpornosti na oštećenja, pri čemu nije potrebna gusta ugradnja poprečne armature u području plastičnog zgloba spoja.

Iako se značajan broj istraživanja bavio ulogom čeličnih vlakana, vrlo je malo radova usmjereno na UHPFRC spojeve greda-stup s poprečnom armaturom velike čvrstoće. Slijedom navedenog, u ovom su istraživanju eksperimentalno analizirana mehanička svojstva UHPFRC spojeva greda-stup s poprečnom armaturom velike čvrstoće.

2. Eksperimentalno istraživanje

2.1. Pojedivosti o uzorcima

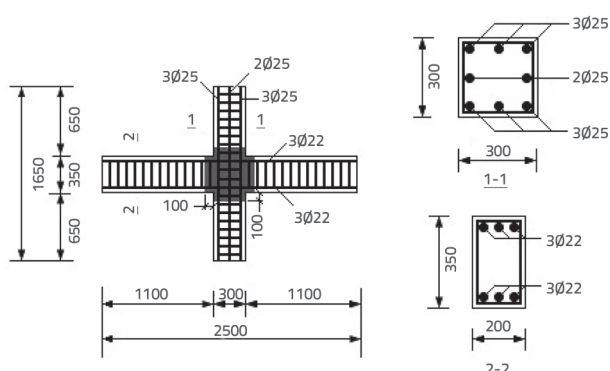
Kako bi se istražila mehanička svojstva UHPFRC spojeva greda-stup s poprečnom armaturom velike čvrstoće, projektirana su i izrađena četiri uzorka spojeva. Od toga je jedan uzorak izrađen od običnog betona, a preostala tri izrađena su od UHPFRC-a. Uzorci su označeni prema vrsti materijala u jezgri spoja i rednom broju uzorka. Na primjer, oznaka "RC1" odnosi se na uzorak izrađen od armiranog betona, a oznaka "UHPFRC2" odnosi se na drugi uzorak izrađen od UHPFRC-a.

Svi su uzorci imali jednaku geometriju i uzdužnu armaturu, kako je prikazano na slici 1. i u tablici 1. Količina uzdužne armature u gredama i stupovima određena je u skladu s normom za projektiranje betonskih konstrukcija (GB 50010-2010) [28]. Krajevi stupova i greda predstavljali su točke nultog momenta, odnosno mjesta na kojima je moment savijanja jednak nuli te mijenja predznak. Ispitne varijable obuhvaćale su vrste primijenjenih materijala, granicu popuštanja poprečne armature te koeficijent armiranja poprečne armature u jezgri spoja. U jezgri spoja uzoraka UHPFRC2 i UHPFRC3 primijenjena je poprečna armatura velike čvrstoće, a u jezgri spoja uzoraka RC1

Tablica 1. Raspored armature uzoraka

Uzorak	Uzdužne šipke		Spona			
	Grede	Stupovi	Grede [mm]	Stupovi [mm]	Jezgre spoja [mm]	Količina armature u jezgrama spoja [%]
RC1	6Φ22	8Φ25	Φ8/90	Φ8/80	Φ8/120	0,92
UHPFRC1	6Φ22	8Φ25	Φ8/90	Φ8/80	Φ8/120	0,92
UHPFRC2	6Φ22	8Φ25	Φ8/90	Φ8/80	Φ5/100	0,92
UHPFRC3	6Φ22	8Φ25	Φ8/90	Φ8/80	Φ5/85	1,09

i UHPFRC1 ugrađena je poprečna armatura uobičajene čvrstoće. Tlačna čvrstoća betona ispitivanog na kockama iznosila je 49,1 MPa.

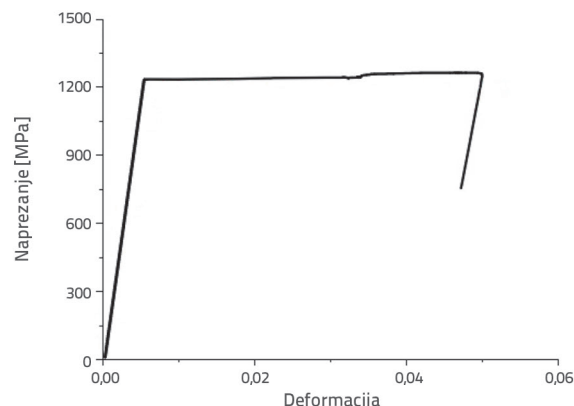


Slika 1. Dimenzije uzoraka i pojedinosti o armaturi (jedinica: mm)

2.2. Materijali

UHPFRC se sastojao od običnog portland cementa, vode, kvarcnog pijeska, silikatne prašine, superplastifikatora te čeličnih vlakana (duljine 13 mm, promjera 0,2 mm i granice razvlačenja 1100 MPa). Omjeri sastojaka i svojstva materijala UHPFRC-a prikazani su u tablicama 2. i 3.

Za uzdužno armiranje greda i stupova primijenjene su čelične šipke s navojem klase HRB400. Jezgre spojeva uzoraka RC1 i UHPFRC1 bile su armirane poprečnom armaturom uobičajene čvrstoće razreda HRB335, a jezgre spojeva uzoraka UHPFRC2 i UHPFRC3 imale su poprečnu armaturu velike čvrstoće. Svojstva materijala čeličnih šipki navedena su u tablici 4., a krivulja naprezanja i opterećenja poprečne armature visoke čvrstoće prikazana je na slici 2.



Slika 2. Odnos naprezanja i deformacije poprečne armature visoke čvrstoće

2.3. Eksperimentalni postav i postupak opterećenja

Eksperimentalni postav prikazan je na slikama 3.a i 3.b. Pseudostatička ispitivanja provedena su s pomoću sustava za ispitivanje materijala (MTS). Sustav se sastojao od hidrauličkog cilindra nosivosti 2200 kN postavljenog okomito na vrh stupa radi stvaranja stalnog tlačnog opterećenja, a elektrohidraulični pulsator na kraju stupa generirao je cikličko bočno opterećenje. Donji kraj stupa bio je pričvršćen na čvrstu podlogu čeličnom zglobovom. Lijevi i desni kraj grede bili su oslonjeni na čelične valjke, pri čemu je s pomoću čelične šipke omogućena rotacija na jednom kraju te slobodno horizontalno pomicanje na drugom. Na početku eksperimenta na vrh stupa primijenjeno je stalno vertikalno opterećenje, a zatim je pulsator postavljen na reakcijski zid uvodio izmjenično cikličko horizontalno opterećenje. Za primjenu horizontalnog opterećenja primijenjen je kombinirani način upravljanja opterećenjem i pomakom. Za

Tablica 2. Sastav mješavine UHPFRC-a za 1 m³

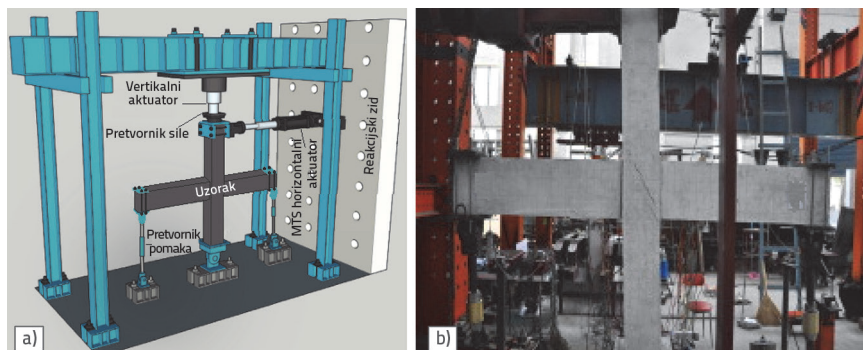
Sastojci	Cement	Voda	Silicijska prašina	Kvarcni pijesak	Superplastifikator	Čelična vlakna
Masa [kg]	900	165	216	1004	42	160

Tablica 3. Svojstva materijala UHPFRC-a

Tlačna čvrstoća [MPa]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Krajnje vlačno naprezanje	Krajnje tlačno naprezanje
109,5	7,4	0,0125	0,0038

Tablica 4. Mehanička svojstva čeličnih šipki

Vrsta	Promjer [mm]	Granica razvlačenja [MPa]	Postotak izduženja [%]	Modul elastičnosti [MPa]
HRB335	8,0	409	26,0	$1,69 \times 10^5$
HRB400	22	448	37,1	$1,86 \times 10^5$
	25	448	37,1	$1,86 \times 10^5$
Poprečna armatura visoke čvrstoće	5,0	1238	10,2	$2,19 \times 10^5$

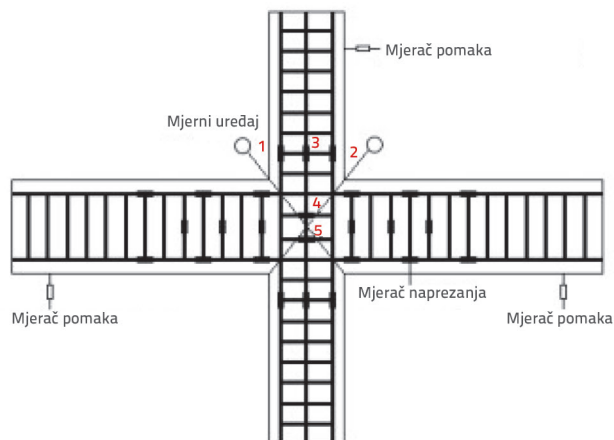


Slika 3. Eksperimentalni postav: a) shematski prikaz; b) fotografija eksperimenta

kontrolu opterećenja amplituda opterećenja povećavana je za 10 kN po ciklusu sve dok uzorci nisu popustili. Nakon toga primijenjen je režim upravljanja pomakom, pri čemu je porast pomaka iznosio 0,15 puta pomak pri popuštanju, a za svaku razinu pomaka izvedena su po dva ciklusa. Opterećenje je prekinuto kada su uzorci bili znatno oštećeni ili kada je njihova nosivost pala na 85 % od najvećeg postignutog opterećenja.

2.4. Raspored mjernih točaka

Raspored mjernih točaka primijenjenih u ispitivanju prikazan je na slici 4.



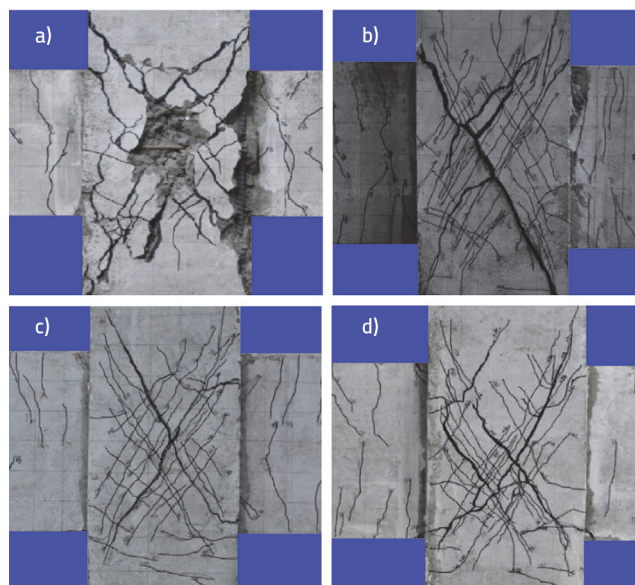
Slika 4. Raspored mjernih uređaja

Dva križna indikatora bila su postavljena na jezgri spoja za mjerenje smičnih naprezanja. Dvadeset i šest mjernih

3. Rezultati i rasprava

3.1. Uočena ponašanja tijekom ispitivanja

Načini loma svih četiriju uzoraka pri izmjeničnom cikličkom opterećivanju bili su slični te je kod svakog uzorka zabilježeno četverostupanjsko ponašanje: faza pojave pukotina, faza popuštanja, faza dostizanja najveće nosivosti te faza sloma. Slika 5. prikazuje oblike loma svih četiriju uzoraka, a u tablici 5. navedeni su opterećenja i pomaci zabilježeni tijekom razvoja pukotina.



Slika 5. Načini loma uzoraka: a) RC1; b) UHPFRC1; c) UHPFRC2; d) UHPFRC3

Tablica 5. Opterećenja i pomaci tijekom razvoja pukotina

Stupovi	Pojava prve pukotine		Pojava križne kose pukotine u obliku slova X		Popuštanje	
	Pomak [mm]	Opterećenje [kN]	Pomak [mm]	Opterećenje [kN]	Pomak [mm]	Opterećenje [kN]
RC1	4	20	17	110	21	188
UHPFRC1	3	50	11	151	46	290
UHPFRC2	5	53	9	154	39	296
UHPFRC3	4	49	8	153	45	289

Uzorak RC1 bio je izveden od običnog betona, poprečnom armaturom u jezgri spoja uobičajene čvrstoće. Pri opterećenju od 20 kN prva se pukotina pojavila na vlačnoj strani grede, približno 114 mm od ruba spoja. S daljnjim porastom opterećenja, dodatne pukotine razvile su se s obje strane početne pukotine. Pri opterećenju od 110 kN pojavile su se kose pukotine širine oko 0,1 mm u blizini dijagonalne zone jezgre spoja. Povećanjem opterećenja na 160 kN križno položene kose pukotine u obliku slova X postale su dominantne, a njihova se širina povećala na 0,5 mm. Nakon dostizanja granice popuštanje uzorci su dalje opterećivani u režimu upravljanja pomakom. Pri relativnom pomaku od 5,6 % nosivost je smanjena na 85 % vršnog opterećenja te je ispitivanje zaustavljeno. Konačni mehanizam loma (slika 5. (a)) upućuje na to da je uzorak RC1 otkazao uslijed posmičnog sloma u jezgri spoja.

Uzorak UHPFRC1 izveden je od UHPFRC-a te je u području jezgre spoja armiran sponama uobičajene čvrstoće. Pri opterećenju od 50 kN, u gredi su se pojavile višestruke pukotine blizu rubova spoja. Prva kosa pukotina pojavila se u jezgri spoja pri opterećenju od 150 kN. Povećanjem razine opterećenja došlo je do širenja kose pukotine te formiranja paralelnih pukotina u njezinoj blizini. Kao što je prikazano na slici 5. (b), na površini jezgre spoja nije došlo do odlamanja betona. Slom uzorka UHPFRC1 pripisuje se posmičnom slomu jezgre spoja te popuštanju uzdužne armature grede.

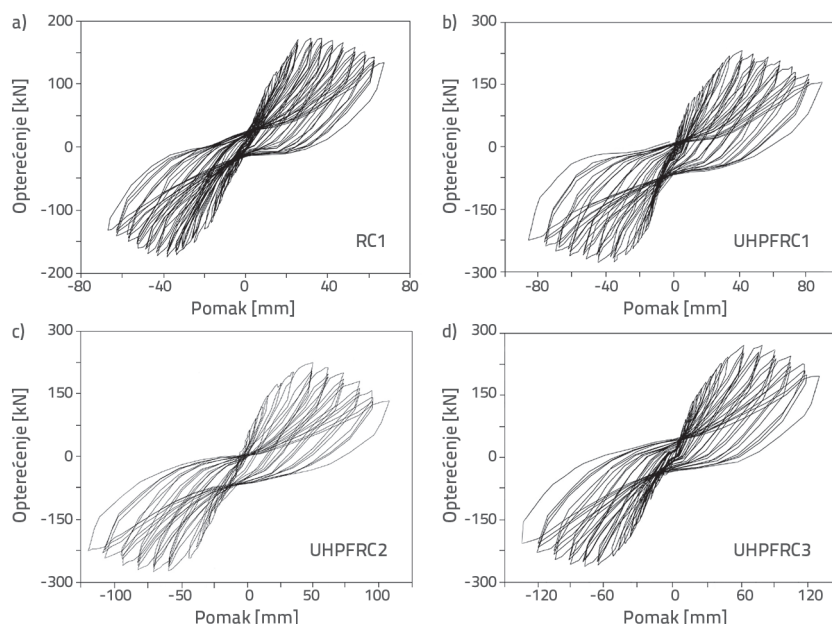
Uzorci UHPFRC2 i UHPFRC3 izvedeni su od UHPFRC-a s poprečnom armaturom velike čvrstoće u jezgri spoja, a razlikovali su se jedino u količini poprečne armature u tom području. Eksperimentalno ponašanje uzoraka UHPFRC2 i UHPFRC3 bilo je slično ponašanju uzorka UHPFRC1. Iz slike 5. (c) i 5. (d) razvidno je da su uzroci loma bili isti kao kod uzorka UHPFRC1.

3.2. Histerezo ponašanje

3.2.1. Histerezan odnos bočnog opterećenja i pomaka

Slika 6. prikazuje histerezne petlje horizontalnog opterećenja i odgovarajućeg pomaka na vrhu stupa. Kao što je vidljivo na slici, sva četiri uzorka pokazuju slične karakteristike. U početnoj fazi opterećivanja histerezne su petlje uske. S porastom opterećenja povećava se površina unutar histereznih petlji. Nakon popuštanja uzoraka, histerezne petlje poprime prepoznatljiv oblik obrnutog slova S.

Usporedbom histereznih krivulja uzoraka RC1 i UHPFRC1 na slici 6. može se uočiti da su nosivost i horizontalni pomak

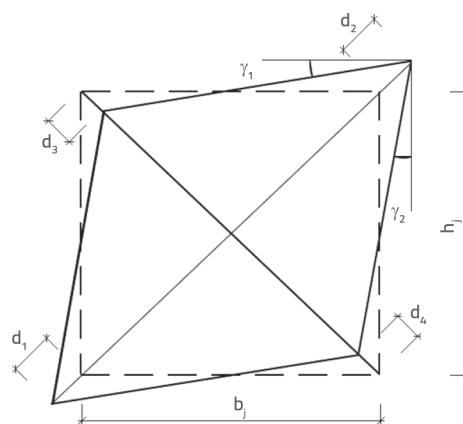


Slika 6. Histerezne krivulje opterećenja i pomaka

uzorka UHPFRC1 veći za 28,6 % odnosno 30,8 % u odnosu na RC1. To se pripisuje povećanoj posmičnoj čvrstoći i poboljšanoj deformacijskoj sposobnosti spojeva zahvaljujući UHPFRC-u [29, 30]. Horizontalni je pomak uzorka UHPFRC2 1,29 puta odnosno 0,815 puta veći od pomaka UHPFRC1 i UHPFRC3 te postoji mala razlika između nosivosti triju uzoraka (kao što je prikazano na slici 6.b, 6.c i 6.), što ukazuje na to da poprečna armatura velike čvrstoće i povećanje njihova volumnog omjera mogu poboljšati deformacijsku sposobnost, a njihov je utjecaj na nosivost spojeva zanemariv.

3.2.2. Histerezne krivulje posmičnog naprezanja u odnosu na kut posmika

Kutovi posmika u jezgri spojeva kako je prikazano na slici 7., izračunati su primjenom izraza (1), prema [31].



Slika 7. Kut smicanja jezgre spoja

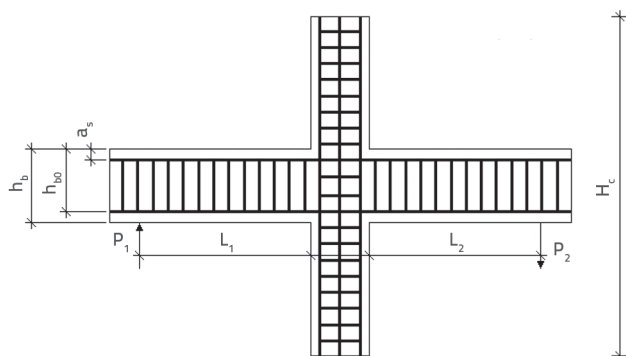
$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 = \frac{\sqrt{h_j^2 + b_j^2}}{2h_j b_j} (d_1 + d_2 + d_3 + d_4) \quad (1)$$

pri čemu γ označava kut posmika jezgre spoja, h_j i b_j označavaju visinu i širinu jezgre spoja, a $(d_1 + d_2)$ i $(d_3 + d_4)$ označavaju promjene duljina dviju dijagonala.

Posmična sila V u jezgri spoja kako je prikazano na slici 8. izražava se sljedećim izrazom (2), prema [32].

$$V = \frac{P_1 L_1 + P_2 L_2}{h_{b0} - a_s} \left(1 - \frac{h_{b0} - a_s}{H_c - h_b} \right) \quad (2)$$

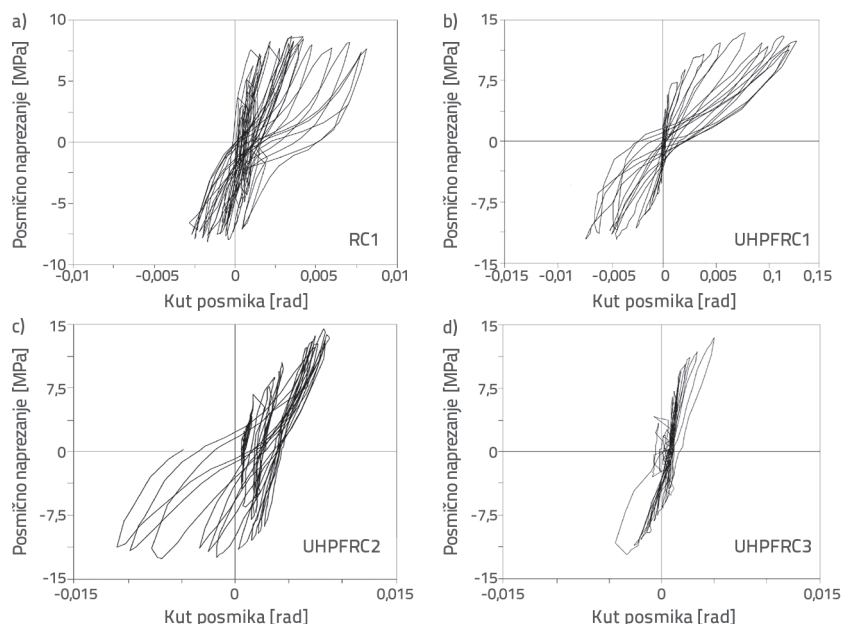
pri čemu P_1 i P_2 predstavljaju sile koje djeluju na krajevima grede; L_1 (ili L_2) predstavlja udaljenost od točke djelovanja sile P_1 (ili P_2) do ruba stupa; H_c označava razmak između dviju točaka nultog momenta; h_b je visina grede; a_s je udaljenost između težišta uzdužne tlačne armature i bliže strane poprečnog presjeka grede; h_{b0} je udaljenost između težišta uzdužne vlačne armature i dalje strane presjeka grede.



Slika 8. Izračun posmične sile u jezgri spoja

Slika 9. prikazuje histerezne krivulje odnosa posmičnog naprezanja i kuta posmika u jezgri spoja. Iz slike je vidljivo da su vrijednosti posmičnog naprezanja uzoraka UHPFRC1, UHPFRC2 i UHPFRC3 međusobno usporedive, a u prosjeku su 49,3 % veće od onih kod uzorka RC1. To upućuje na to da UHPFRC značajno povećava posmičnu nosivost spojeva, a utjecaj je primjene poprečne armature velike čvrstoće i povećanja njihova volumnog omjera na posmičnu nosivost zanemariv.

Kut smicanja uzorka UHPFRC1 povećan je za 66,67 % u odnosu na RC1 (slike 9.a i 9.b), a kod UHPFRC2 i UHPFRC3 bio je manji za 40 % odnosno 60 % u odnosu na UHPFRC1 (slike 9.b, 9.c) i 9.d). Rezultati pokazuju da se povećanjem volumnog omjera poprečne armature može poboljšati duktilnost UHPFRC spojeva,



Slika 9. Histerezne krivulje posmičnog naprezanja i kuta posmika

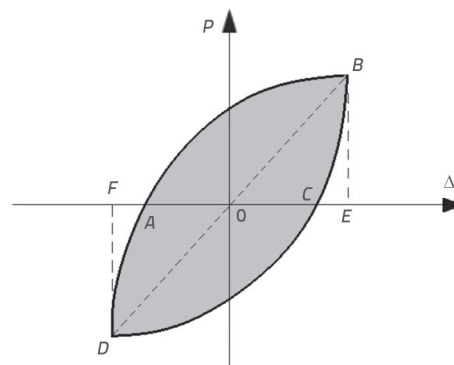
a primjena poprečne armature velike čvrstoće učinkovito ograničava smična naprezanja u području spoja.

3.3. Raspršivanje energije

Sposobnost raspršivanja energije konstrukcije ili elementa može se kvantificirati ekvivalentnim viskoznim koeficijentom prigušenja h_e [33], veća vrijednost h_e znači bolju sposobnost raspršivanja energije. Taj se koeficijent računa prema sljedećem izrazu (3), prikazanom na slici 10.

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{ABCD}}{S_{OBE} + S_{ODF}} \quad (3)$$

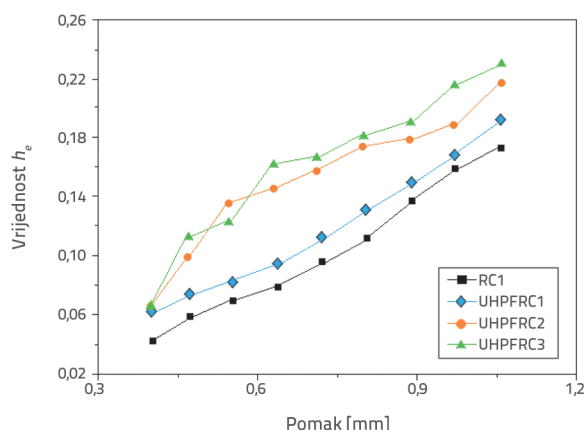
gdje je S_{ABCD} površina omeđena histereznom petljom, a S_{OBE} i S_{ODF} su površine trokuta OBE i ODF .



Slika 10. Izračun ekvivalentnog omjera viskoznog prigušenja h_e

Slika 11. prikazuje ekvivalentni omjer viskoznog prigušenja za svaki uzorak, pri čemu vodoravna os prikazuje omjer pomaka

i graničnog pomaka. Iz slike je vidljivo da su pri graničnom pomaku vrijednosti h_e za RC1, UHPFRC1, UHPFRC2 i UHPFRC3 redom 0,165; 0,192; 0,217 i 0,234. Navedeno upućuje na to da UHPFRC, poprečna armatura velike čvrstoće te povećan volumni omjer poprečne armature poboljšavaju sposobnost raspršivanja energije u spojevima, odnosno da UHPFRC spojevi greda-stup s poprečnom armaturom velike čvrstoće imaju bolje seizmičko ponašanje.



Slika 11. Usporedba vrijednosti h_e

Tablica 6. Relativna deformacija šipki

Stupovi	Mjerne trake	Pojava kosih poprečnih pukotina u obliku slova X		Popuštanje	
		Relativna deformacija [mm/m]	Opterećenje [kN]	Relativna deformacija [mm/m]	Opterećenje [kN]
RC1	1	1,12	110	1,67	188
	2	0,97		1,72	
	3	1,15		1,59	
	4	2,12		2,43	
	5	2,24		2,53	
UHPFRC1	1	1,14	151	1,49	290
	2	1,12		1,56	
	3	0,87		1,50	
	4	2,25		4,27	
	5	1,99		4,28	
UHPFRC2	1	0,95	154	1,53	296
	2	0,89		1,58	
	3	0,85		1,60	
	4	1,97		4,10	
	5	2,17		4,15	
UHPFRC3	1	0,99	153	1,55	289
	2	1,12		1,49	
	3	1,14		1,61	
	4	2,10		3,99	
	5	1,96		3,87	

3.4. Relativna deformacija šipki

Na temelju podataka iz tablice 4. može se utvrditi da je za šipke uobičajene čvrstoće promjera 22 i 25 mm rastezanje pri popuštanju 2,41 mm/m, a za šipke velike čvrstoće promjera 5 mm ta je vrijednost 5,65 mm/m. Tablica 6. prikazuje relativne deformacije uzdužne i poprečne armature u području jezgre u trenutku pojave kosih pukotina te pri popuštanju spoja.

Pri manjim razinama opterećenja beton odnosno UHPFRC u području jezgre bio je u elastičnom stanju te je glavninu vlačnih naprezanja preuzimao beton. U toj su fazi relativne deformacije poprečne armature bilo vrlo malo (gotovo zanemarive), odnosno slične manjem vlačnom rastezanju. Kada su glavna vlačna naprezanja u jezgri premašila vlačnu čvrstoću betona ili UHPFRC-a, pojavile su se kose pukotine duž traga glavnih tlačnih naprezanja (pod kutom od približno 45°), pri čemu je relativna deformacija spona u području pukotina naglo porasla. Na mjestu pukotine beton odnosno UHPFRC više ne sudjeluje u preuzimanju opterećenja, pa posmičnu silu mora preuzeti poprečna armatura koja presijeca pukotinu, pri čemu se oblikuje rešetkasti mehanizam. Nakon što je poprečna armatura dostigla granicu popuštanja, došlo je do značajne pojavnosti plastičnih deformacija. Pri ponavljanim opterećenjima odnos relativna deformacija i opterećenja u poprečnoj armaturi poprimao je oblik histerezne petlje.

U području jezgre uzdužna armatura stupa bila je izložena aksijalnom tlaku i malom momentu savijanja uzrokovanom prijenosom posmične sile preko spoja, pa je njezina relativna deformacija u pravilu bila manja od relativna deformacije poprečne armature u jezgri.

4. Zaključak

Mehanička svojstva UHPFRC spojeva greda-stup s poprečnom armaturom visoke čvrstoće analizirana su kvazistatičkim ispitivanjima. Eksperimentalni rezultati pokazuju da UHPFRC, u kombinaciji s poprečnom armaturom visoke čvrstoće, djelotvorno poboljšava seizmičko ponašanje spojeva greda-stup te predstavlja kvalitetnu zamjenu za obični beton. Glavni su zaključci sljedeći:

- Do loma spojnih jezgri četiriju uzoraka došlo je zbog posmika.
- Primjena UHPFRC-a značajno povećava nosivost spojeva te ujedno poboljšava njihovu duktilnost.

- Poprečna armatura velike čvrstoće i povećanje njihova volumnog omjera imaju vrlo mali utjecaj na nosivost spojeva, ali poboljšavaju duktilnost te učinkovito ograničavaju posmična naprezanja u području jezgre.
- UHPFRC spojevi greda-stup s poprečnom armaturom velike čvrstoće pokazali su bolju sposobnost raspršivanja energije i veću otpornost na potrese.
- Pri istoj razini potresnog djelovanja primjena UHPFRC-a u kombinaciji s poprečnom armaturom velike čvrstoće može smanjiti količinu poprečne armature u spoju za oko 50 % u odnosu na klasične spojeve greda-stup, čime se uvelike otklanjaju poteškoće pri izvedbi uzrokovane pretjeranom armaturom u području spoja.

Zahvala

Autori zahvaljuju dr. Tangu Shougaou sa Sveučilišta Tongji te prof. Hou Xinluu sa Sveučilišta za tehnologiju u Taiyuanu na njihovoj iznimnoj podršci i ohrabrenju.

LITERATURA

- [1] El-Amoury, T., Ghobarab, A.J.E.S.: Seismic rehabilitation of beam-column joint using GFRP sheets, *Engineering Structures*, 2002, 24 (2002) 11, pp. 1397-1407, [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00081-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00081-0).
- [2] Pauletta, M., Di Luca, D., Russo, G.: Exterior beam column joints-shear strength model and design formula, *Engineering Structures*, 94 (2015), pp. 70-81, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.040>.
- [3] Esmaeel, E., Barros, J.A., Sena-Cruz, J., Fasan, L., et al.: Retrofitting of interior RC beam-column joints using CFRP strengthened SHCC: Cast-in-place solution, *Composite Structures*, 122 (2015), pp. 456-467, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.012>.
- [4] Barbhuiya, S., Choudhury, A.M.: A study of the size effect of RC beam-column connections under cyclic loading, *Engineering Structures*, 95 (2015), pp. 1-7, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.052>.
- [5] Chidambaram, R.S., Agarwal, P.: Seismic behaviour of hybrid fibre-reinforced cementitious composite beam-column joints, *Materials & Design*, 86 (2015), pp. 771-781, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.164>.
- [6] Masi, A., Santarsiero, G., Lignola, G.P., Verderame, G.M.: Study of the seismic behaviour of external RC beam-column joints through experimental tests and numerical simulations, *Engineering Structures*, 52 (2013), pp. 207-219, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.02.023>.
- [7] Hadi, M.N., Tran, T. M.: Retrofitting nonseismically detailed exterior beam-column joints using concrete covers together with a CFRP jacket, *Construction and Building Materials*, 63 (2014), pp.161-173, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.019>.
- [8] Marimuthu, S., Sivasankara Pillai, G.: Experimental investigation of exterior reinforced concrete beam - column joints strengthened with hybrid FRP laminates, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 4, pp. 365-379, <https://doi.org/10.14256/JCE.2765.2019>.
- [9] Pekgokgoz, R.K., Avcil, F.: Effect of steel fibres on reinforced concrete beam-column joints under reversed cyclic loading, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 12, pp. 1185-1194, <https://doi.org/10.14256/JCE.3092.2020>.
- [10] Cosgun, T., Cosgun, C., Kanishka, A., Mangir, A., Sayin, B., Murat Turk, A.: Seismic load tests on exterior beam-column connections of existing RC structures, *GRAĐEVINAR*, 71 (2019) 12, pp. 1129-1141, <https://doi.org/10.14256/JCE.2524.2018>.
- [11] Tiwary, A.K., Singh, S., Chohan, J.S., Kumar, R., Sharma, S., Chattopadhyaya, S., Abed, F., Strepinac, M.: Behaviour of RC beam-column joints strengthened with modified reinforcement techniques, *Sustainability*, 14 (2022) 3, Paper 1918, <https://doi.org/10.3390/su14031918>.
- [12] Tang, L., Tian, W.H., Guan, D., Chen, Z.: Experimental study of emulative precast concrete beam-to-column connections locally reinforced by U-shaped UHPC shells, *Materials*, 15 (2022) 12, pp. 4066, <https://doi.org/10.3390/ma15124066>.
- [13] Wang, D., Ju, Y., Zheng, W., Shen, H.: Seismic behaviour and shear bearing capacity of ultra-high-performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC) beam-column joints, *Applied Sciences*, 8 (2018), Paper 810, <https://doi.org/10.3390/app8050810>.
- [14] Sarmiento, P.A., Torres, B., Ruiz, D.M., Alvarado, Y.A., Gasch, I., Machuca, A.F.: Cyclic behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete beam-column joint, *Structural Concrete*, 20 (2019) 1, pp. 348-360, <https://doi.org/10.1002/suco.201800025>.

- [15] Annadurai, A. Ravichandran, A.: Seismic behaviour of beam-column joint using hybrid fibre-reinforced high-strength concrete, *Iranian Journal of Science and technology*, 42 (2018)3, pp. 275-286, <https://doi.org/10.1007/S40996-018-0100-9>.
- [16] Tsonos, A.D., Kalogeropoulos, G., Iakovidis, P., Bezas, M.Z., Koumtzis, M.: Seismic performance of RC beam-column joints designed according to older and modern codes: An attempt to reduce conventional reinforcement using steel fibre-reinforced concrete, *Fibers*, 9 (2021) 7, Paper 45, <https://doi.org/10.3390/fib9070045>.
- [17] Nouri, A., Saghafi, M.H., Golafshar, A.: Evaluation of beam-column joints made of HPFRCC composites to reduce transverse reinforcement, *Engineering Structures*, 201 (2019), Paper 109826, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109826>.
- [18] Wang, D., Zhao, J., Ju, Y., Shen, H., Li, X.: Behaviour of beam-column joints with high-performance fibre-reinforced concrete under cyclic loading, *Structures*, 44 (2022), pp. 171-185, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.07.090>.
- [19] Zhang, Z.Y., Ding, R., Nie, X., Fan, J.S.: Seismic performance of a novel interior precast concrete beam-column joint using ultra-high-performance concrete, *Engineering Structures*, 222 (2020), Paper 111145, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111145>.
- [20] Ma, F., Deng, M., Ma, Y., Lü, H., Yang, Y., Sun, H.: Experimental study on interior precast concrete beam-column connections with lap-spliced steel bars in field-cast RPC, *Engineering Structures*, 228 (2021), Paper 111481.
- [21] Xue, W., Hu, X., Song, J.: Experimental study on seismic behaviour of precast concrete beam-column joints using UHPC-based connections, *Structures*, 34 (2021), pp. 4867-4881.
- [22] Xiong, X.Y., Xie, Y.F., Yao, G.F., Liu, J., Yan, L.Z., He, L.: Experimental study on seismic performance of precast pre-tensioned pre-stressed concrete beam-column interior joints using UHPC for connection, *Materials*, 15 (2022), Paper 5791, <https://doi.org/10.3390/ma15165791>.
- [23] Shi, K., Zhang, M.Y., Tao Zhang, T., Li, P.F., Zhu, J.P., Li, L.: Seismic Performance of Steel Fiber Reinforced High-Strength Concrete Beam Column Joints, *Materials*, 14 (2021) 12, Paper 3235, <https://doi.org/10.3390/ma14123235>.
- [24] Shi, K., Zhu, J.P., Li, P.F., Zhang, M.Y., Xue, R., Zhang, T.: Numerical Simulation on Seismic Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beam-Column Joints, *Materials*, 14 (2021) 17, Paper 4883, <https://doi.org/10.3390/ma14174883>.
- [25] Tsonos, A.D., Kalogeropoulos, G., Iakovidis, P., Bezas, M.Z., Koumtzis, M.: Seismic performance of RC beam-column joints designed according to older and modern codes: An attempt to reduce conventional reinforcement using steel fibre reinforced concrete, *Fibers*, 9 (2021), Paper 45, <https://doi.org/10.3390/fib9070045>.
- [26] Abdo, A., Mohamed, H.A., Ryad, T., Ahmed, S.: Impact of using UHPFRC in beam-column joints with different transverse reinforcement patterns, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 64 (2023), pp. 11-30, <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.64.02>.
- [27] Gupta, C., Rajendran, S.C., Danie Roy, A.: Shear resistance behaviour of exterior beam-column joint with steel fibre reinforced concrete, *Advances in Structural Mechanics and Applications*, 19 (2022), pp. 321-335.
- [28] GB 50010-2010, Code for design of concrete structure: China Architecture and Building Press, Beijing, China, 2010.
- [29] Abbas, A.A., Mohsin, S.M.S., Cotsovos, D.M.: Seismic response of steel fibre reinforced concrete beam-column joints, *Engineering Structures*, 59 (2014) 2, pp. 261-283, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.10.046>.
- [30] Said, S.H., Razak, H.A.: Structural behaviour of RC engineered cementitious composite (ECC) exterior beam-column joints under reversed cyclic loading, *Construction and Build Materials*, 107 (2016) 1, pp. 226-234, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.001>.
- [31] Dang, C.T., Dinh, N.H.: Experimental study on structural performance of RC exterior beam-column joints retrofitted by steel jacketing and haunch element under cyclic loading simulating earthquake excitation, *Advances in Civil Engineering*, (2017), pp. 1-11, <https://doi.org/10.1155/2017/9263460>.
- [32] GB 50011-2010: Code for Seismic Design of Buildings, China Building Industry Press: Beijing, China, 2010.
- [33] Hwang, S.J., Lee, H.J.: Analytical model for predicting shear strengths of interior reinforced concrete beam-column joints for seismic resistance, *ACI Structural Journal*, 96 (2000), pp. 846-857.