

Primljen / Received: 4.7.2025.

Ispravljen / Corrected: 1.10.2025.

Prihvaćen / Accepted: 16.10.2025.

Dostupno online / Available online: 10.3.2026.

Eksperimentalno ispitivanje zajedničkog djelovanja armature visoke čvrstoće i UHPC-a pri različitim parametrima

Autori:

Dr.sc. **Shaofeng He**, dipl.ing.građ.

Tehničko sveučilište Hebei, Kina

Građevinski fakultet

Tehnološko sveučilište u Pekingu, Kina

Ključni laboratorij za urbanu sigurnost i inženjerstvo katastrofa

hshaofeng@hebeu.edu.cn

Autor za korespondenciju

Mr.sc. **Linlin Tian**, dipl.ing.građ.

CCCC Second Harbor Engineering Company Ltd.,

Wuhan, Kina

1059783771@qq.com**Meng Li**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Šangaju, Kina

Fakultet za mehaniku i inženjerske znanosti

li2211325308@126.com

Prethodno priopćenje

Shaofeng He, Linlin Tian, Meng Li

Eksperimentalno ispitivanje zajedničkog djelovanja armature visoke čvrstoće i UHPC-a pri različitim parametrima

Razvoj betona vrlo visokih uporabnih svojstava (eng. *Ultra-High Performance Concrete* - UHPC) potaknuo je opsežna istraživanja njegove pripreme i procjene ponašanja. Međutim, ograničen broj istraživanja bavio se usklađenim djelovanjem UHPC-a u kombinaciji s armaturom visoke čvrstoće u nosivim konstrukcijama, osobito s gledišta ponašanja materijala. U ovome istraživanju ispitivan je odnos između mehaničkih svojstava materijala i seizmičkog ponašanja ispitnih uzoraka pod različitim parametrima, provođenjem cikličkih ispitivanja na pet armiranih UHPC stupova različitih konfiguracija. Rezultati su pokazali da je armaturom visoke čvrstoće moguće učinkovito oviti UHPC te povećati nosivost UHPC stupova. Nadalje, ugradnja CFRP traka ili povećanje bočnog pritiska ovijanja smanjili su bočno širenje UHPC-a u središnjoj zoni i koncentraciju lokalnih plastičnih oštećenja. UHPC i uzdužna armatura pokazali su učinkovito zajedničko djelovanje s porastom bezdimenzijske tlačne sile.

Ključne riječi:

UHPC, armatura visoke čvrstoće, usklađeno djelovanje, seizmičko ponašanje, zajedničko djelovanje

Research Paper

Shaofeng He, Linlin Tian, Meng Li

Experimental investigation of the coordinated working performance of high-strength reinforcement and UHPC under varying parameters

The development of ultrahigh-performance concrete (UHPC) has prompted extensive research into the preparation and evaluation of UHPC performance. However, limited studies have explored the coordinated working performance of UHPC in conjunction with high-strength rebars within structural systems, particularly from a material-level perspective. This study investigated the relationship between the material mechanical properties and seismic performance of specimens under varying parameters by conducting cyclic tests on five reinforced UHPC columns with different configurations. The results demonstrated that high-strength rebars effectively constrains UHPC and enhances the bearing capacity of UHPC columns. In addition, incorporating a CFRP sheet or increasing the lateral confinement strength mitigated the expansion of UHPC in the core area and the concentration of local plastic damage. The UHPC and longitudinal reinforcement exhibited effective cooperative performance as the axial compression ratio increased.

Key words:

UHPC, high-strength reinforcement, coordinated working, seismic behaviour, coordinated work

1. Uvod

Beton vrlo visokih uporabnih svojstava (UHPC) zadovoljava stroge zahtjeve čvrstoće i duktilnosti suvremenih betonskih konstrukcija. Osim toga njegova iznimna mehanička svojstva i trajnost znatno produljuju vijek trajanja konstrukcijskih elemenata. Zahvaljujući dodatku vlakana, UHPC pokazuje pseudoduktilno ponašanje pri vlačnome opterećenju, pri čemu dolazi do stvaranja višestrukih pukotina umjesto jedne dominantne pukotine [1]. Mehanizam zaustavljanja pukotina induciran vlaknima utječe na način loma UHPC uzoraka, rezultirajući znatnim povećanjem sile pri pojavi prve pukotine i granične nosivosti [2-4]. Dosadašnja istraživanja pokazala su da UHPC može u cijelosti ili djelomično zamijeniti konvencionalnu armaturu u armiranim UHPC elementima [5-7], čime se poboljšavaju otpornost na udar, nosivost na posmik i savijanje te seizmička otpornost armiranih UHPC (R-UHPC) elemenata [8-17]. Lin i sur. [18] uočili su da se s povećanjem čvrstoće betona smanjuju krutost i nosivost ispitnih uzoraka. Dodatno, čelična armatura u armiranobetonskim uzorcima pucala je pod cikličkim opterećenjem [19]. Zato su širenje R-UHPC elemenata i zajedničko djelovanje UHPC-a i čelične armature područja koja zahtijevaju daljnja istraživanja.

Poboljšanje seizmičkog ponašanja pojedinih konstrukcijskih elemenata i cjelokupne konstrukcije može se postići optimiziranjem korištenih materijala. Armatura visoke čvrstoće učinkovito je rješenje za poboljšanje seizmičkog ponašanja UHPC elemenata, jer mijenja način loma te povećava nosivost i duktilnost [20-23]. He i sur. [24, 25] ispitali su pet R-UHPC stupova pod cikličkim opterećenjem te utvrdili da armatura visoke čvrstoće povećava duktilnost, poboljšava sposobnost povrata pomaka R-UHPC stupova i pokazuje dobru kompatibilnost s UHPC-om. Bayrak i sur. [26], Ousalem i sur. [27] te Rautenber i sur. [28] istraživali su grede od betona visoke čvrstoće armirane čelikom visoke čvrstoće te utvrdili da se širenje pukotina i degradacija posmične nosivosti odgađaju, čime se postiže povoljno seizmičko ponašanje.

Uz eksperimentalna istraživanja metoda konačnih elemenata primijenjena je za analizu ponašanja UHPC elemenata. Yin i sur. [29] predviđali su ponašanje R-UHPC elemenata pri statičkome savijanju koristeći implicitni pristup u programu LS-DYNA i konstitutivni model betona temeljen na plastičnosti. Mao i sur. [30] kalibrirali su parametre modela betona i simulirali ponašanje R-UHPC elemenata izloženih opterećenju eksplozijom. Singh i sur. [31] validirali su ponašanje R-UHPC greda primjenom modificiranog modela plastičnog oštećenja betona. Aeimi i sur. [32] primijenili su metodu konačnih elemenata za procjenu seizmičkog ponašanja UHPC stupa te pokazali da vlačna čvrstoća UHPC-a znatno utječe na ponašanje modela nakon dostizanja vršne nosivosti.

Međutim, ograničen je broj istraživanja koja se bave zajedničkim djelovanjem UHPC-a i armature visoke čvrstoće, osobito s gledišta ponašanja materijala unutar konstrukcijskih sustava. Zato je u ovome radu analiziran odnos između mehaničkog ponašanja materijala i seizmičkog ponašanja ispitnih uzoraka pod različitim parametrima, provođenjem cikličkih ispitivanja na pet armiranih UHPC stupova različitih konfiguracija.

2. Eksperimentalni program

2.1. Eksperimentalni materijali

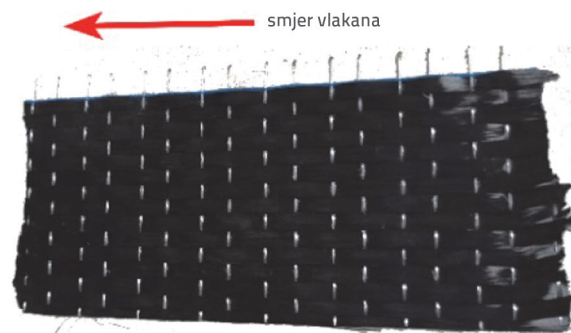
1) Beton vrlo visokih uporabnih svojstava

Sirovine korištene za pripremu UHPC-a uključivale su portlandski superfini cement P-II52.5R, silicijsku prašinu, leteći pepeo, mineralni dodatak, kvarcni pijesak, čelična vlakna i vodu. Sastavi mješavina prikazani su u tablici 1. Ispitni uzorci kocaka duljine brida 150 mm njegovani su pod istim uvjetima kao i ispitni stupovi, nakon čega su ispitani. Prosječna tlačna čvrstoća f_c iznosila je 122,5 MPa, a prosječna vlačna čvrstoća f_t 5,93 MPa.

U tablici 1. podaci za cement, silicijsku prašinu, leteći pepeo i mineralni dodatak prikazani su kao maseni omjeri. Zbroj vezivnih materijala (cement, silicijska prašina i leteći pepeo) postavljen je na vrijednost 1,0. Podaci za čelična vlakna izraženi su kao volumni udio, odnosno kao postotak volumena čeličnih vlakana u ukupnome volumenu betona.

2) Polimer armiran ugljičnim vlaknima (CFRP)

Jednosmjerno pletena CFRP traka, prikazana na slici 1., imala je vlačnu čvrstoću od 3602 MPa i modul elastičnosti od $2,33 \times 10^5$ MPa. CFRP traka bila je zalijepljena na površinu uzorka uranjanjem u ljepilo, čime je formiran CFRP omotač oko uzorka. Prionjivost između CFRP trake i betona iznosila je 3,5 MPa.



Slika 1. CFRP traka

Tablica 1. Sastav i maseni omjeri mješavine UHPC-a

Superfini cement	Silicijska prašina	Leteći pepeo	Mineralni prah	Voda	Kvarcni pijesak	Volumenski udio čeličnih vlakana [%]
0,6	0,1	0,1	0,2	0,17	1,2	2,0

Tablica 2. Mehanička svojstva armature

Simbol	Promjer [mm]	Maksimalno istezanje	Granica popuštanja [MPa]	Maksimalna čvrstoća [MPa]	Deformacija pri maksimalnome opterećenju	Omjer vlačne čvrstoće i granice popuštanja
N10	10	13 %	437	638	0,14	1,46
N16	16	17 %	436	599	0,16	1,37
H10	10	15 %	606	765	0,13	1,26
H16	16	18 %	551	712	0,17	1,29

Tablica 3. Projektirani parametri ispitnih stupova

Oznaka uzorka	Uzdužna armatura	Koeficijent armiranja ρ_s	Spone	Koeficijent armiranja sponama ρ_{sv}	Bezdimenzijska tlačna sila n	Debljina CFRP trake [mm]
NC80	10N16	3,22 %	N10/80	1,57 %	0,20	-
PNC80	10N16	3,22 %	N10/80	1,57 %	0,20	0,334
HC80	10H16	3,22 %	H10/80	1,57 %	0,20	-
HC100	10H16	3,22 %	H10/100	1,26 %	0,20	-
HC80h	10H16	3,22 %	H10/80	1,57 %	0,25	-

Napomena: H - oznaka za s armaturu visoke čvrstoće, N - oznaka za armaturu normalne čvrstoće, P - oznaka za polimer armiran ugljičnim vlaknima (CFRP), C - stup, Broj u simbolu uzorka - razmak spona, h - veća bezdimenzijska tlačna sila
 ρ_s - omjer površine poprečnog presjeka uzdužne armature i površine poprečnog presjeka stupa,
 ρ_{sv} - omjer površine poprečnog presjeka spona unutar svakog intervala spona i odgovarajuće površine betona.

3) Armatura

U ispitivanju korištene su dvije vrste armature različitih čvrstoća: armatura normalne čvrstoće razreda HRB400 i armatura visoke čvrstoće razreda HRB500. Uzdužna armatura i spona u UHPC stupu armiranome armaturom normalne čvrstoće bili su promjera $\varnothing 16$ i $\varnothing 10$, dok su u UHPC stupu armiranome armaturom visoke čvrstoće korišteni promjeri $\varnothing 16$ i $\varnothing 10$.

Za svaku skupinu armature izdvojena su tri standardna uzorka za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala. Izmjereni modul elastičnosti i granica popuštanja armature iznosili su 200 GPa, odnosno 0,002 u pogledu deformacije pri popuštanju. Mehanička svojstva armature prikazana su u tablici 2.

2.2. Projektiranje ispitnih uzoraka

Kako bi se ispitao utjecaj različitih metoda ovijanja na UHPC elemente, primijenjene su tri vrste ovijanja: armatura normalne čvrstoće, armatura visoke čvrstoće i CFRP trake. Radi analize utjecaja intenziteta ovijanja projektirani su ispitni uzorci s

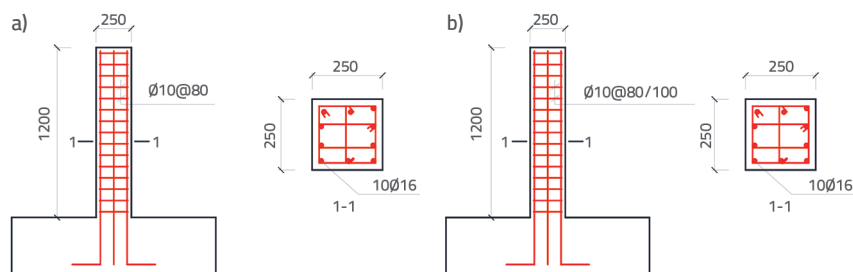
različitim razmacima spona za usporedbu. Nadalje, kako bi se ispitalo ponašanje UHPC-a pri visokoj bezdimenzijskoj tlačnoj sili i njezin utjecaj na ovijanje armaturom visoke čvrstoće, projektirani su uzorci s različitom bezdimenzijskom tlačnom silom za komparativnu analizu. U skladu s time, u ovome istraživanju izrađen je jedan kratki UHPC stup armiran armaturom normalne čvrstoće, jedan UHPC stup armiran armaturom normalne čvrstoće ovijen CFRP tkaninom te tri UHPC stupa armirana armaturom visoke čvrstoće. Dimenzije poprečnog presjeka stupova iznosile su 250×250 mm, posmični raspon (omjer momenta savijanja i poprečne sile) bio je 4,0, a zaštitni sloj betona iznosio je 25 mm. Detaljni projektni parametri ispitnih uzoraka navedeni su u tablici 3. i prikazani na slici 2.

Ovijanje CFRP-om izvedeno je jednosmjernim spiralnim namatanjem CFRP tkanine s vlaknima orijentiranim u poprečnome smjeru. CFRP traka zalijepljena je za površinu uzorka te između pojedinih slojeva impregnacijskom smolom, koja je sušena na zraku, čime je formirana CFRP cijev.

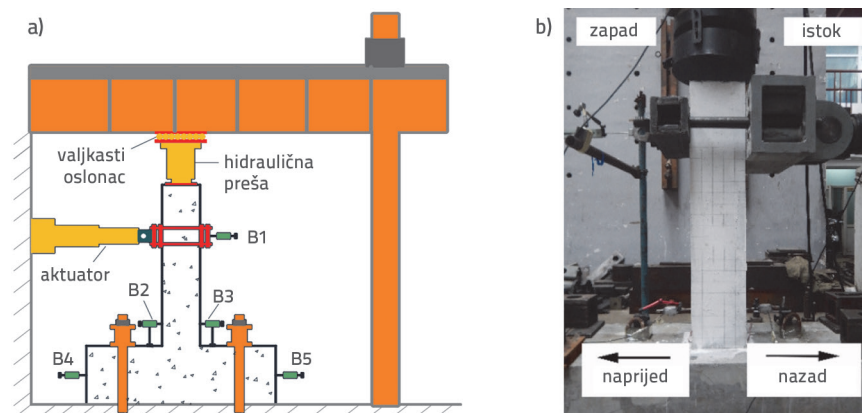
2.3. Ispitni postav, mjerenje i protokol opterećenja

2.3.1. Ispitni postav

Na ispitne uzorke primijenjeno je horizontalno cikličko opterećenje. Uzdužna sila djelovala je vertikalno na vrh stupa, dok je podnožje stupa bilo učvršćeno za podlogu pomoću sidrenih vijaka. Ispitni postav prikazan je na slici 3.



Slika 2. Detalji uzorka armature: a) uzorci NC80 i PNC80; b) uzorci HC80, HC100 i HC80h

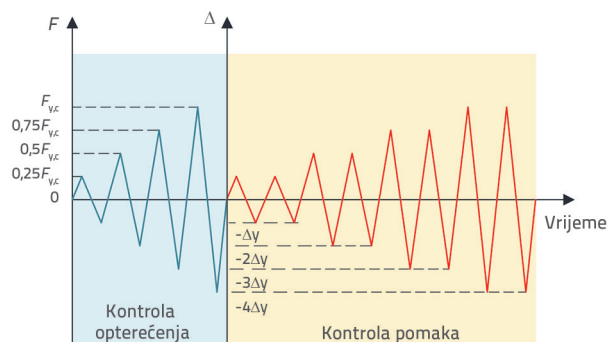


Slika 3. Oprema za ispitivanje: a) dijagram opterećenja; b) postavka ispitivanja

su dostignute granice popuštanja uzorka, pukotine u betonu gotovo su se prestale razvijati. U toj fazi primjena opterećenja kontrolom pomaka omogućila je ubrzano smanjenje vršne nosivosti. Pomaci u pojedinim koracima iznosili su Δy , $2\Delta y$, $3\Delta y$ i dalje (pri čemu je Δy pomak pri popuštanju uzorka). Svaka razina pomaka ponovljena je dva puta, a horizontalno opterećenje zadržavano je pet minuta nakon svake razine opterećenja. Ispitivanje je prekinuto kada je horizontalna sila pala na 85 % maksimalne sile, što je smatrano lomom uzorka.

2.3.2. Protokol opterećenja

Prije početka ispitivanja na vrh uzorka primijenjeno je uzdužno opterećenje koje je odgovaralo bezdimenzijskoj tlačnoj sili od 0,2. Kod odabranih uzoraka to je uzdužno opterećenje održavano konstantnim tijekom cijelog ispitivanja.



Slika 4. Protokol opterećenja

Protokol opterećenja prikazan je na slici 4. Prije formalnog opterećivanja provedeno je predopterećenje, pri čemu je predopterećenje iznosilo 25 % procijenjenog opterećenja pri pojavi prvih pukotina. Nakon toga provedene su provjere kako bi se osiguralo da je uređaj za opterećenje u potpunome kontaktu s uzorkom te da mjerni instrumenti ispravno funkcioniraju. Tijekom formalnog opterećivanja primijenjena je kombinirana metoda kontrole sila i pomaka. Prije dostizanja granice popuštanja uzorka, kada je primijenjena kontrola opterećenja silom, rast deformacija bio je spor, što je omogućilo detaljnije praćenje razvoja deformacija betona i armature. Opterećenje je primjenjivano u razinama od 25 %, 50 %, 75 % i 100 % procijenjenog opterećenja popuštanja, s jednim ciklusom opterećenja na svakoj razini. Nakon što

2.3.3. Mjerenja

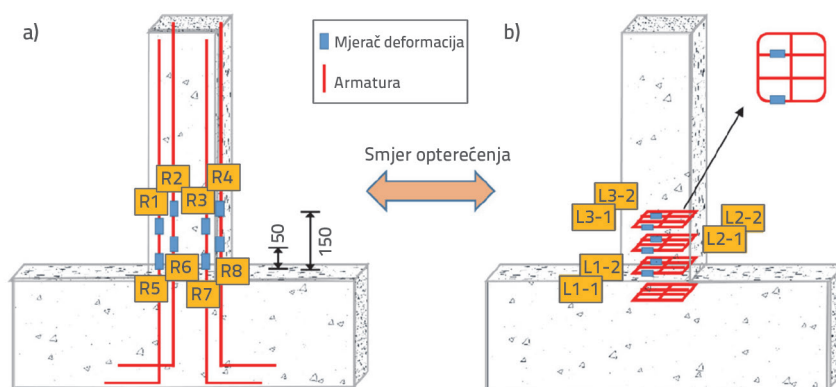
1) Pomaci

Na slici 3.a prikazan je raspored pet mjerila pomaka (B1-B5) korištenih tijekom ispitivanja. Mjerač B1 bio je postavljen na mjestu primjene opterećenja radi mjerenja nametnutog pomaka, dok su mjeraci B2 i B3 bili smješteni 150 mm iznad temelja stupa kako bi se odredio kut zaokreta stupa. Mjeraci B4 i B5 bili su postavljeni u središtu temelja radi mjerenja horizontalnog klizanja tijekom ispitivanja.

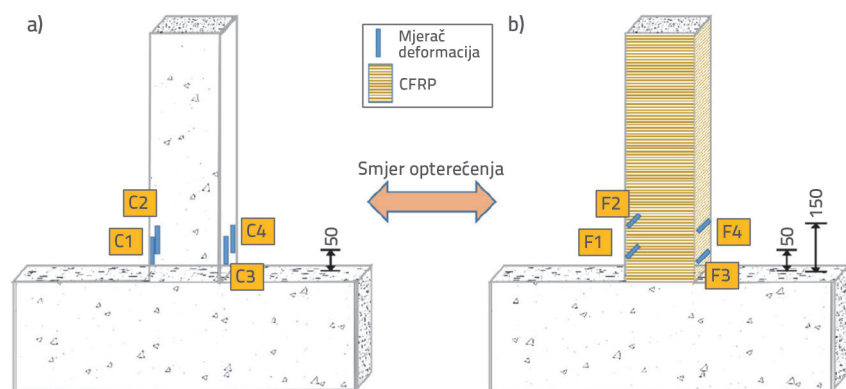
2) Deformacije armature

Uređaji za mjerenje deformacija uzdužne armature R1-R8 postavljeni su na četiri kutne šipke stupova. Na svaku kutnu šipku ugrađena su po dva mjeraca deformacija, smještena 50 mm i 150 mm iznad gornje površine temelja, kako je to prikazano na slici 5.a.

Mjeraci deformacija spona raspoređeni su u tri sloja. Prva spona iznad gornje površine temelja činio je prvi sloj, dok su druga i treća spona činile drugi i treći sloj. Mjeraci deformacija prvog sloja spona označeni su kao L1-1 i L1-2, drugog kao L2-1 i L2-2, a trećeg kao L3-1 i L3-2. Raspored mjeraca deformacija spona prikazan je na slici 5.b.



Slika 5. Položaji mjeraca deformacija armature (jedinica: mm): a) uzdužni mjeraci deformacija čelične armature; b) mjeraci deformacija spona



Slika 6. Položaji UHPC/CFRP mjerača deformacija: a) stup bez CFRP pojačanja; b) stup s CFRP pojačanjem

3) Deformacije UHPC-a/CFRP-a

Četiri mjerača deformacija betona (C1-C4) postavljena su u vertikalnome smjeru, 50 mm iznad gornje površine temelja, radi praćenja pojave i razvoja pukotina u betonu, a kako je to prikazano na slici 6.a Kod uzorka PNC80, koji je bio ovijen CFRP trakom, izravno mjerenje deformacija UHPC-a nije bilo moguće. Zato su deformacije CFRP-a mjerene na visinama od 50 mm i 150 mm iznad gornje površine temelja. Na slici 6.b prikazane

su lokacije mjerača deformacija CFRP-a (F1-F4), koje ujedno odražavaju radno stanje UHPC-a prije pojave odvajanja (odljepljivanja) CFRP omotača.

4) Ostala mjerenja

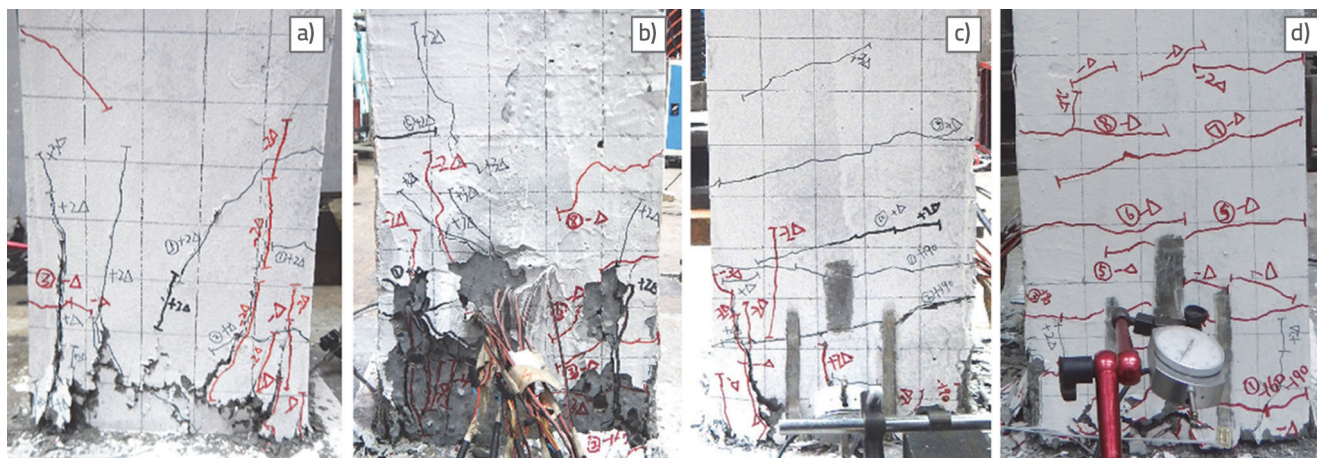
Horizontalne sile mjerene su pomoću senzora pričvršćenog na aktuator. Sva mjerenja sile, pomaka i deformacija prikupljana su pomoću sustava za prikupljanje podataka, čime je osigurana jednoznačna vremenska i podatkovna povezanost mjernih veličina. Tijekom ispitivanja vlačne i tlačne pukotine koje su se pojavile u svakoj fazi opterećenja označavane su na uzorcima, a njihove duljine i maksimalne širine sustavno su bilježene.

3. Eksperimentalni rezultati

Ako nije drugačije navedeno, podaci i usporedbe prikazani u rezultatima i analizi predstavljaju prosječne vrijednosti za smjerove opterećenja unaprijed i unatrag, kako bi se vjernije prikazalo stvarno ponašanje konstrukcije.

Tablica 4. Karakteristično opterećenje i pomak R-UHPC stupova

Uzorak	Pojava vidljivih pukotina		Popuštanje uzdužne armature	Doseg vršnog naprezanja uzdužne armature	
	Opterećenje [kN]	Pukotina	Opterećenje [kN]	Opterećenje [kN]	Pomak [mm]
NC80	160	zapadna i sjeverna strana, poprečne pukotine	220	245,87	10,72
PNC80	-	-	250	250,78	15,72
HC80	200	istočna i sjeverna strana, poprečne pukotine	220	239,67	10,14
HC100	175	istočna strana, poprečne pukotine	220	219,46	13,33
HC80h	150	istočna i zapadna strana, poprečne pukotine	180	247,94	10,21



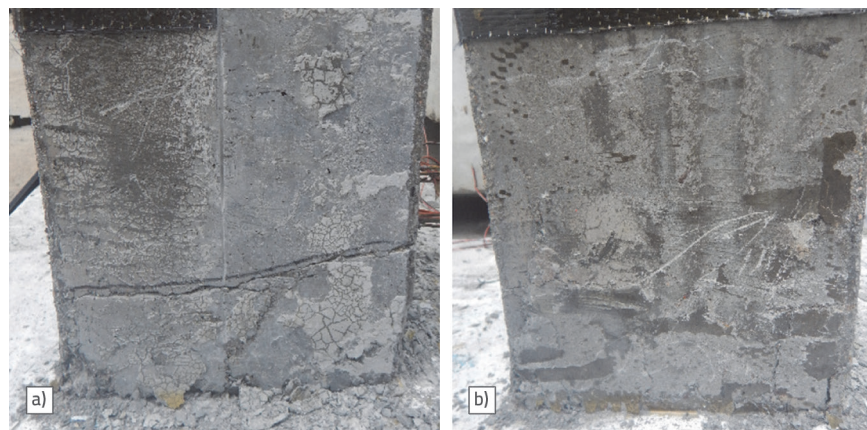
Slika 7. Način sloma uzorka NC80: a) jug (sprijeda); b) sjever (straga); c) istok; d) zapad

3.1. Pojave tijekom ispitivanja

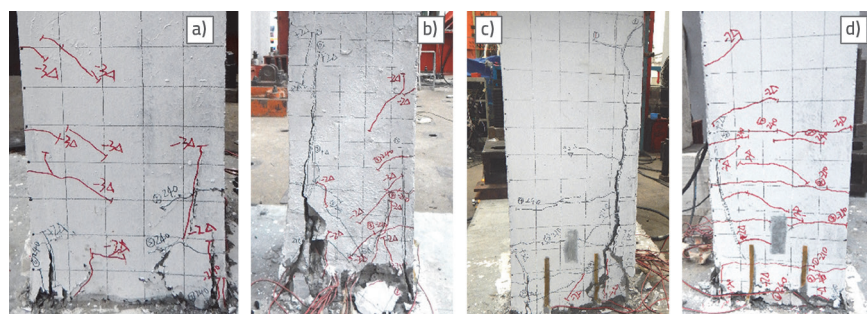
Svi ispitni uzorci otkazali su savijanjem i posmikom. Proces loma može se podijeliti u tri karakteristične faze: elastičnu deformaciju, elastoplastičnu deformaciju i fazu degradacije nosivosti. U elastičnoj fazi, od početka opterećenja do pojave prve

pukotine, odnos sila–pomak ostao je približno linearan, a uzorci nisu pokazivali zaostale deformacije. U elastoplastičnoj fazi nove su se pukotine kontinuirano formirale i stabilno razvijale, dok su se horizontalne pukotine pri dnu stupa širile kroz presjek. Uzdužna je armatura popustila (dostigla granicu popuštanja), a opterećenje se postupno povećavalo s porastom pomaka.

Nakon rasterećenja uzorci su pokazivali zaostale deformacije. Tijekom faze degradacije nosivosti uzdužna armatura dostigla je maksimalna naprezanja, a nosivost se smanjivala s daljnjim povećanjem pomaka. Horizontalne pukotine pri dnu stupa razvile su se u glavne pukotine, dok se na površini uzoraka gotovo nisu pojavljivale nove pukotine. Karakteristična opterećenja i pomaci pojedinih uzoraka prikazani su u tablici 4. Histerezne krivulje armiranih UHPC stupova prikazane su na slici 10.



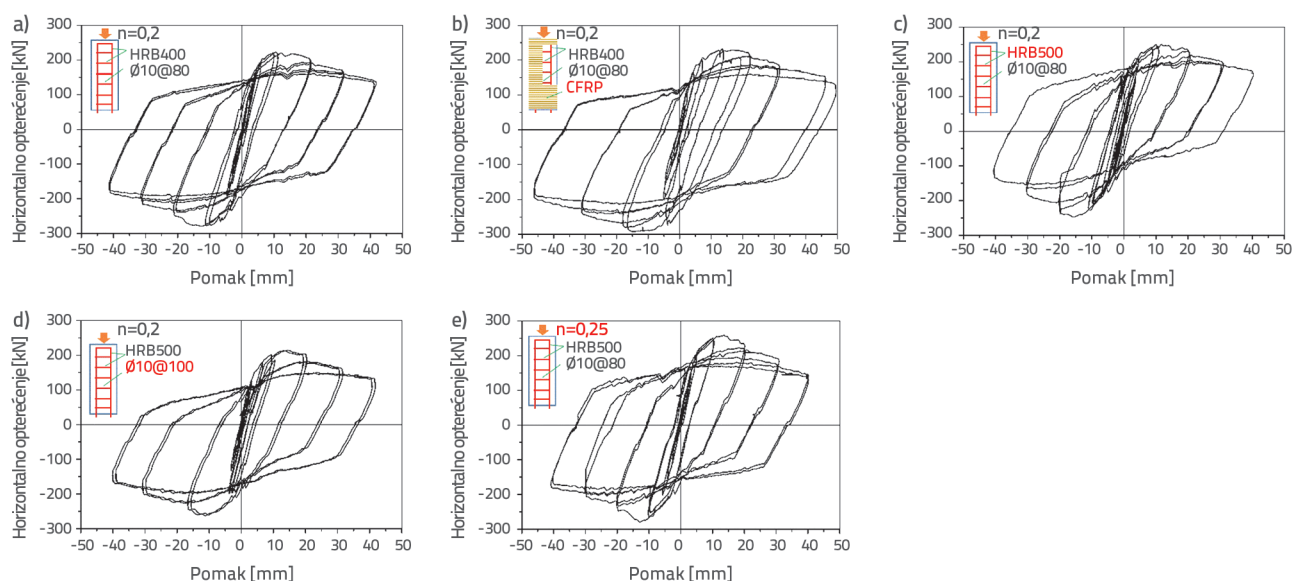
Slika 8. Način sloma uzorka PNC80: a) istok; b) jug



Slika 9. Način sloma uzorka HC80: a) jug (sprijeda); b) sjever (straga); c) istok; d) zapad

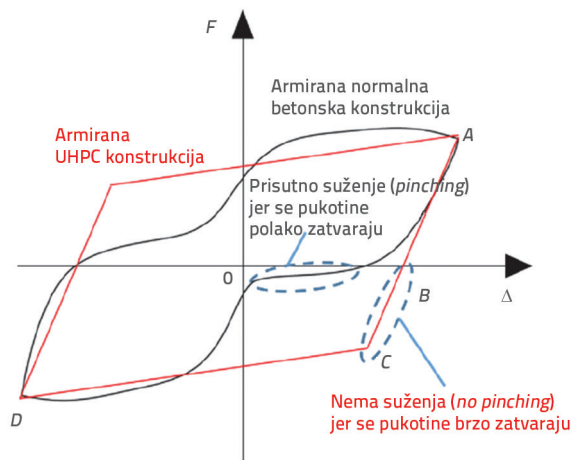
3.2. Obilježja histereznih krivulja armiranih UHPC stupova

Sa slike 10. vidljivo je da su prije popuštanja uzdužne armature krivulje sila–pomak ispitnih uzoraka dosljedno pokazivale linearno elastično ponašanje, bez pojave plastičnih deformacija. Nakon što je dostignuta granica popuštanja, plastične deformacije uzoraka povećavale su se, a histerezna petlja armiranih UHPC stupova postala je puna, poprimivši idealan zatvoren dijamanтни



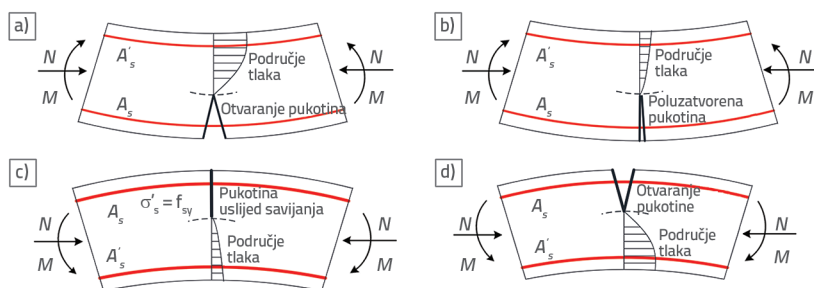
Slika 10. Histerezne petlje ojačanih UHPC stupova: a) uzorak NC80; b) uzorak PNC80; c) uzorak HC80; d) uzorak HC100; e) uzorak HC80h

oblik bez izraženog učinka suženja (*pinching*). Na slici 11. prikazana je shematska usporedba oblika histereznih krivulja običnih armiranobetonskih stupova i armiranih UHPC stupova.

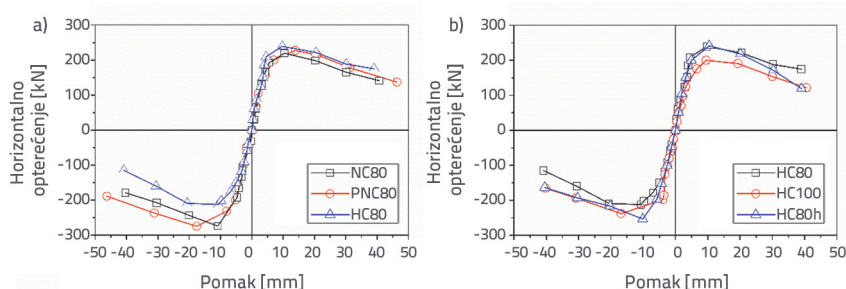


Slika 11. Usporedba oblika histereznih krivulja

Analiza sila u karakterističnim točkama histereznih krivulja prikazana je na slici 12. Kada su uzorci dosegli maksimalno opterećenje ($+F_{max}$, točka A), uzdužna armatura (A_s) u vlačnoj zoni dostigla je granicu popuštanja, što je rezultiralo znatnim plastičnim deformacijama i maksimalnom širinom otvaranja pukotina. Pri rasterećenju do nulte sile ($F = 0$, točka B) uzorci su pokazali zaostale deformacije, što upućuje na to da savojna pukotina u tome trenutku nije bila



Slika 12. Analiza naprezanja karakterističnih točaka histereznih krivulja: a) točka A: $+F_{max}$; b) točka B: $F = 0$; c) točka C: $F < 0$; d) točka D: $-F_{max}$ HC100 i HC80h



Slika 13. Anvelope armiranih dugih UHPC stupova: a) uzorci NC80, PNC80 i HC80; b) uzorci HC80, HC100 i HC80h

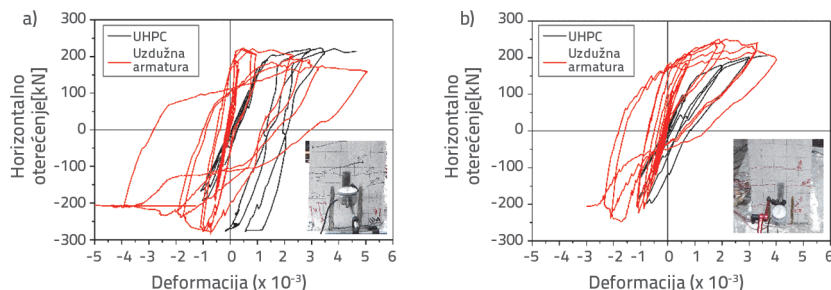
u cijelosti zatvorena, a donja uzdužna šipka (A_s) ostala je izdužena unatoč djelovanju uzdužnoga tlačnog opterećenja. Pri primjeni obrnutog opterećenja ($F < 0$, faza BC) gornji UHPC i uzdužna armatura (A'_s) prešli su iz tlačnog u vlačno stanje. Pukotine u donjoj zoni UHPC-a brzo su se zatvorile, tlačna naprezanja preuzeta su od armature (A'_s), a krivulja nije pokazivala učinak suženja. Tijekom daljnjega obrnutog opterećivanja ($F < 0$, faza CD), u gornjoj uzdužnoj armaturi (A_s) došlo je do tečenja i razvoja pukotina u UHPC-u, krutost uzoraka smanjila se, a pomaci znatno su se povećali. Kada je širina pukotina u gornjem UHPC-u dosegla maksimalnu vrijednost, akumulacija oštećenja dostigla je kritičnu razinu te su uzorci postigli obrnuto maksimalno opterećenje ($-F_{max}$, točka D). Anvelope za svaki ispitni uzorak prikazane su na slici 13.

Histerezne krivulje uzoraka PNC80 i NC80, koji su bili ograničeni CFRP omotačem, pokazale su slične opće oblike. Međutim, uzorak PNC80 pokazao je veće karakteristične pomake, zbog čega je njegova ukupna disipacija energije bila veća u odnosu na uzorak NC80. Slike 10.b i 13.a upućuju na to da CFRP omotač može usporiti degradaciju nosivosti armiranog UHPC-a te poboljšati duktilnost ispitnih uzoraka.

Sa slike 10.c vidljivo je da je nosivost uzorka HC80 tijekom obrnutog opterećenja bila manja u odnosu na uzorak NC80, što se pripisuje utjecaju nedostataka uzorka. Međutim, pri opterećenju u pozitivnome smjeru uzorak HC80 pokazao je veću nosivost zbog povećane čvrstoće uzdužne armature i spona. U usporedbi s uzorkom NC80, uzorak HC80 pokazao

je manju zaostalu deformaciju pri rasterećenju, što upućuje na veću sposobnost povrata deformacija UHPC stupova armiranih armaturom visoke čvrstoće.

U usporedbi s uzorkom HC80, nosivost uzorka HC100 smanjila se pri manjemu omjeru armiranja, a zaostale deformacije nakon rasterećenja bile su izraženije, što upućuje na to da su UHPC stupovi s manjom količinom armature podložni većoj akumulaciji plastičnih deformacija. Anvelopa pri opterećenju u pozitivnome smjeru, prikazana na slici 13.b, upućuje na to da je brzina degradacije nosivosti uzorka HC100 usporediva s onom uzorka HC80. Nadalje, slika 10.e pokazuje da je u usporedbi s uzorkom HC80 nosivost uzorka HC80h, koji je bio izložen većoj bezdimenzijskoj tlačnoj sili, povećana, dok su se zaostale deformacije nakon rasterećenja sukladno povećale. Degradacija nosivosti u kasnijim fazama ispitivanja također je bila izraženija.



Slika 14. Krivulje horizontalnih deformacija i opterećenja UHPC-a i uzdužne armature na istoj površini: a) uzorak NC80; b) uzorak HC80

4. Zajedničko djelovanje armature visoke čvrstoće i UHPC-a pri lomu savijanjem i posmikom

4.1. Utjecaj različitih čvrstoća armature

Deformacije UHPC-a i uzdužnih šipki na istoj fasadi uzoraka NC80 i HC80 mjerene su radi procjene zajedničkog rada armature normalne i visoke čvrstoće u kombinaciji s UHPC-om, što je prikazano na slici 14.

Rezultati pokazuju da je razvoj deformacija UHPC-a i uzdužne armature u početnoj fazi opterećenja bio sličan za oba uzorka, pri čemu su materijali ostali u linearnoj elastičnoj fazi. Kako su uzorci prolazili kroz plastične deformacije, tako su se brzine rasta deformacija materijala u NC80 i HC80 razlikovale. Povećanja deformacija u uzdužnoj armaturi i UHPC-u u uzorku NC80 bila su znatno veća nego u HC80 pri istome povećanju opterećenja. Zato su UHPC uzorci armirani šipkama visoke čvrstoće pokazali veću otpornost na rapucavanje u srednjoj i kasnoj fazi ispitivanja. Nadalje, zajedničko djelovanje armature visoke čvrstoće i UHPC-a bilo je superiornije u odnosu na kombinaciju s armaturom normalne čvrstoće.

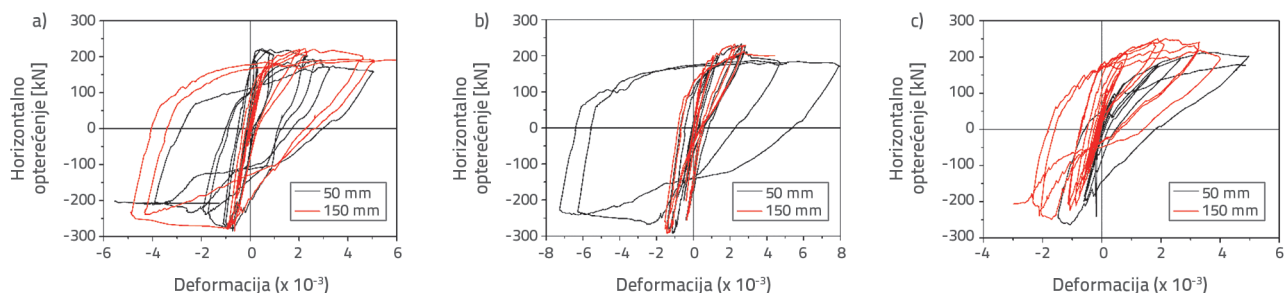
4.2. Utjecaj različitih oblika ovijanja

Kada dubina pukotine nije prelazila debljinu zaštitnog sloja UHPC betona, deformacija uzdužne armature kontinuirano je rasla, dok je deformacija spona UHPC-a u središnjoj jezgri rasla samo

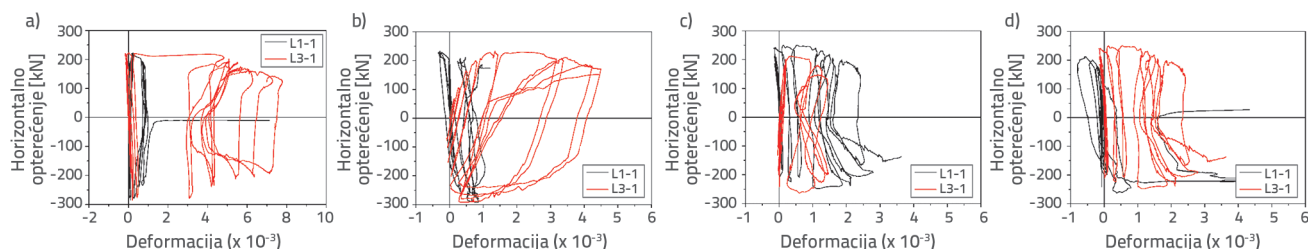
marginalno. Kako je dubina pukotine prelazila debljinu zaštitnog sloja, tako se pukotina širila u jezgri, što je znatno povećalo deformaciju uzdužne armature (ponekad do točke prekida rada mjernog uređaja), a spona su počele pokazivati plastične deformacije. Zato analiza deformacija uzdužne armature i spona pruža vrijedne informacije o procesima pucanja ili deformacija širenja UHPC-a unutar zaštitnog sloja i središnjeg dijela presjeka.

Usporedba deformacija uzdužne armature uzoraka NC80, PNC80 i HC80 na različitim visinama stupa prikazana je na slici 15. za tri različita oblika ovijanja: armatura normalne čvrstoće, CFRP tkanina i armatura visoke čvrstoće. Ta usporedba pokazuje da je povećanje deformacije uzdužne armature u uzorku HC80 niže nego u NC80, što upućuje na to da konfiguracija šipki visoke čvrstoće učinkovitije prenosi naprezanja s obje strane pukotine, čime se usporava razvoj pukotina u UHPC-u. U usporedbi s uzorcima NC80 i PNC80, deformacija uzdužne armature u uzorku HC80 na visini stupa od 50 mm znatno je porasla u kasnoj fazi ispitivanja, dok je deformacija na visini od 150 mm rasla samo marginalno. To se pripisuje koncentraciji primarnih plastičnih deformacija uzorka na rubu CFRP tkanine pri bazi stupa, dok je razvoj pukotina u CFRP omotaču na drugim pozicijama bio učinkovito ograničen. Deformacije spona uzoraka NC80, PNC80 i HC80 na različitim visinama stupa (50 i 210 mm), pod tri uvjeta ovijanja (armatura normalne čvrstoće, CFRP tkanina i armatura visoke čvrstoće) prikazane su na slici 16.

Na slici 16.a pokazano je da je deformacija spona u uzorku NC80 znatno porasla na visinama stupa od 50 i 210 mm tijekom kasnih faza ispitivanja, što upućuje na neadekvatan učinak ovijanja UHPC-a unutar jezgre. Uvođenjem CFRP tkanine amplituda deformacija spona u uzorku PNC80 pri dnu stupa (visina 50 mm) znatno je smanjena, a spona su pokazale određenu sposobnost povrata deformacija. Na visini stupa od 210 mm deformacija spona u PNC80 smanjila se samo marginalno, dok je CFRP tkanina učinkovito ograničila širenje UHPC-a u središnjoj jezgri. Povećanjem razreda čvrstoće armature u uzorku HC80 porast



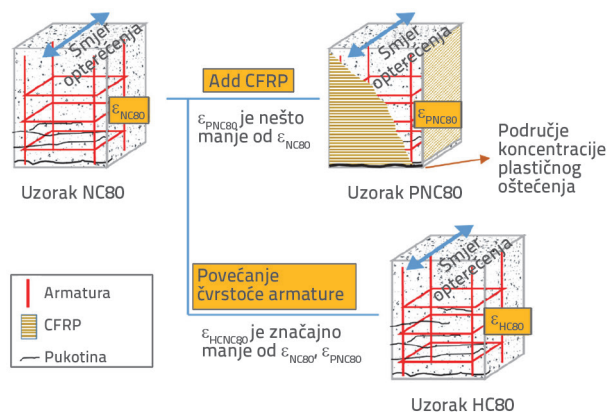
Slika 15. Usporedba deformacija uzdužne armature pod različitim visinama stupova: a) uzorak NC80; b) uzorak PNC80; c) uzorak HC80



Slika 16. Usporedba deformacija spona na različitim visinama stupova: a) uzorak NC80; b) uzorak PNC80; c) uzorak HC80; d) uzorak HC100

deformacije spona na visinama 50 i 210 mm bio je smanjen, što potvrđuje da je armatura visoke čvrstoće pružila učinkovitije ovijanje UHPC-a u jezgri.

Utjecaji CFRP trake i stupnja čvrstoće armature na mehanizam rada armiranih UHPC stupova pri savijanju i posmiku prikazani su na slici 17. Simboli ε_{NC80} , ε_{PNC80} i ε_{HC80} predstavljaju naprezanja spona uzoraka NC80, PNC80 i HC80. Ugradnja CFRP trake može neznatno ograničiti širenje UHPC-a u jezgri, no dovodi do koncentracije plastičnih oštećenja na rubu CFRP trake. Povećanje stupnja čvrstoće armature učinkovitije prenosi naprezanje preko presjeka, čime se ograničavaju širenje i deformacija UHPC-a u jezgri i sprječava koncentracija lokalnih plastičnih oštećenja.



Slika 17. Utjecaj različitih oblika ovijanja na radni mehanizam

4.3. Utjecaj različitih intenziteta bočnog pritiska ovijanjem

Maksimalni bočni pritisak ovijanja σ_1 ovisan o slomu spona definiran je kao u izrazu (1):

$$\sigma_1 = \frac{A_{sv}}{sb_{cor}} f_{yv} \quad (1)$$

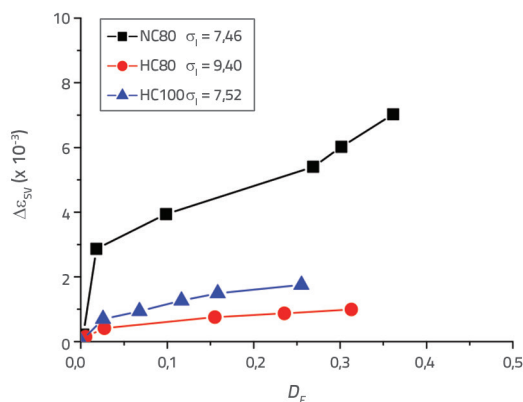
gdje je f_{yv} izmjerena granica popuštanja spona, a A_{sv} zbroj površina presjeka svake rezne plohe spona u smjeru opterećenja. Ako reznost spona u dva glavna smjera presjeka nije jednaka, koristi se manja vrijednost A_{sv} , s je razmak spona duž elementa, a b_{cor} širina vanjske spona UHPC jezgre u smjeru opterećenja.

Spone uzoraka NC80, HC80 i HC100 različitih čvrstoća i s različitim razmakom pružale su različitu razinu bočnog ovijanja UHPC-a u jezgri. Na temelju izraza (1) izračunate vrijednosti pritiska ovijanja σ_1 iznosile su redom 7,46, 9,40 i 7,52 MPa. Razvoj deformacija spona u uzorcima NC80, HC80 i HC100 odgovarao je primijenjenome horizontalnom opterećenju, kao što je to prikazano na slikama 16.a, 16.b i 16.d. Nadalje, širenje UHPC-a u jezgri pri dnu stupa bilo je veće nego u gornjemu dijelu, a amplituda širenja smanjivala se s povećanjem σ_1 . Povećanje deformacije spona $\Delta\varepsilon_{sv}$ i amplituda degradacije nosivosti D_F definirani su izrazima (2) i (3) kako bi se kvantificirala ekspanzija UHPC-a u jezgri pri različitim intenzitetima ovijanja nakon dostizanja vršne nosivosti:

$$\Delta\varepsilon_{sv} = \varepsilon_{sv} - \varepsilon_{sv,p} \quad (2)$$

$$D_F = (F_p - F)/F_p \quad (3)$$

gdje su ε_{sv} i $\varepsilon_{sv,p}$ deformacije spona u stvarnome trenutku i pri vršnoj nosivosti, a F i F_p stvarno i vršno opterećenje uzorka. Zbog kvara pojedinih mjernih uređaja tijekom ispitivanja podaci su preuzeti samo s mjernog mjesta L3-1. Povećanje deformacije spona nakon vršne nosivosti pod različitim amplitudama degradacije prikazano je na slici 18. Smanjenjem horizontalnog opterećenja naprezanja u sponama nastavila su rasti, što upućuje na daljnje širenje UHPC-a u jezgri. Nagib krivulje pokazuje da se brzina širenja UHPC-a u jezgri smanjuje s povećanjem σ_1 .

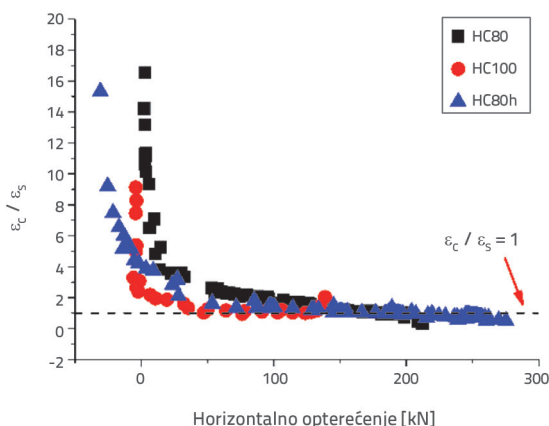


Slika 18. Prirast deformacije spona pod različitim smanjenjima horizontalnih opterećenja

4.4. Utjecaj velikoga tlačnog opterećenja

Pri visokim razinama bezdimenzijske tlačne sile poprečne pukotine u UHPC stupu su u početku ispitivanja suzbijene, dok je formiranje vertikalnih mikropukotina potaknuto. To ponašanje olakšava djelomično odvajanje (*debonding*) između uzdužne armature i UHPC-a. Zato je stupanj odvajanja uzdužnih šipki procijenjen usporedbom deformacija uzdužnih šipki i UHPC-a na istoj visini sljedećom procedurom:

- mjerenje deformacija uzdužne armature i UHPC-a na istoj visini
- prilagodba deformacije UHPC-a visini presjeka uzdužne armature jer mjerni uređaji betona i armature nisu postavljeni na istoj visini (slike 5.a i 6.a)
- izračun omjera deformacija UHPC-a i uzdužne armature (ϵ_c / ϵ_s) te crtanje dijagrama horizontalna sila - ϵ_c / ϵ_s diagram kao na slici 19.



Slika 19. Odnos između horizontalnog opterećenja i ϵ_c / ϵ_s

Ako između UHPC-a i armature ne dolazi do klizanja, materijali djeluju potpuno spregnuto, pa je $\epsilon_c / \epsilon_s = 1$. Na slici 19. prikazano je da UHPC dominantno preuzima savojnu otpornost uzorka, dok je deformacija uzdužne armature minimalna, što rezultira višim ϵ_c / ϵ_s . Kako se razvijaju mikropukotine, tako doprinos uzdužne armature savojnoj otpornosti raste, a ϵ_c / ϵ_s postupno se približava 1.

Usporedbom uzoraka HC80 i HC80h vidi se da je ϵ_c / ϵ_s relativno stabilan pri povećanju bezdimenzijske uzdužne sile, što upućuje na učinkovito koordinirano djelovanje UHPC-a i uzdužne armature pri visokim uzdužnim opterećenjima. Suprotno tome, u uzorku HC100 se sa smanjenjem razmaka spona omjer ϵ_c / ϵ_s povećava u kasnijim fazama opterećenja, što upućuje na to da deformacija UHPC-a raste brže od deformacije armature, odražavajući blagi pad spregnutog djelovanja materijala.

5. Zaključak

U okviru predstavljenog istraživanja analiziran je odnos između mehaničkog ponašanja materijala i seizmičke izvedbe uzoraka pri različitim parametrima provođenjem cikličkih ispitivanja na pet armiranih UHPC stupova različitih konfiguracija. Glavni zaključci su sljedeći:

- Proces loma armiranih UHPC stupova može se podijeliti u tri faze: kvazielastična deformacija, elastoplastična deformacija i degradacija nosivosti. UHPC tijekom cijelog procesa nije otkazao, a histerezna petlja bila je potpuna, pokazujući relativno idealan zatvoreni dijamantni oblik bez znatnog učinka suženja (*pinching*).
- Armatura visoke čvrstoće osigurala je učinkovito ovijanje UHPC-a, povećavajući nosivost stupova. U usporedbi sa stupovima armiranim armaturom normalne čvrstoće, stupovi s armaturom visoke čvrstoće pokazali su manju zaostalu deformaciju tijekom opterećenja, što upućuje na bolju sposobnost povrata deformacija. Uzorci s armaturom visoke čvrstoće također su pokazali veću otpornost na raspucavanje u srednjoj i kasnoj fazi ispitivanja, a njihovo koordinirano djelovanje s UHPC-om bilo je superiornije u odnosu na uzorke s armaturom normalne čvrstoće.
- Pri lomu savijanjem i posmikom dodavanje CFRP tkanine ograničilo je širenje UHPC-a u jezgri, no istodobno je došlo do koncentracije plastičnih oštećenja na rubovima CFRP tkanine. Povećanje razreda čvrstoće armature poboljšava prijenos naprezanja preko presjeka, kontrolira širenje i deformaciju UHPC-a u jezgri te sprječava lokalizirana plastična oštećenja.
- Utjecaj različitih intenziteta bočnog pritiska ovijanja na UHPC u jezgri kvantitativno je ocijenjen definiranjem maksimalnoga bočnog pritiska ovijanja σ_r . Kako je opterećenje degradiralo, tako se naprezanje u sponama povećavalo, što je upućivalo na kontinuirano širenje UHPC-a u jezgri, no brzina širenja smanjivala se s povećanjem σ_r .
- Povećanjem bezdimenzijske tlačne sile omjer deformacija UHPC-a i uzdužne armature, ϵ_c / ϵ_s , ostao je relativno konstantan, što upućuje na učinkovito koordinirano djelovanje UHPC-a i uzdužne armature. Kada je smanjen razmak spona, ϵ_c / ϵ_s povećao se u kasnoj fazi opterećenja, što pokazuje da deformacija UHPC-a raste brže od deformacije uzdužne armature, čime se blago smanjuje njihovo spregnuto djelovanje.

Zahvala

Ovaj rad podržalo je Tehničko sveučilište Hebei (Grant br. SJ2401002115).

LITERATURA

- [1] Leung, C.K.Y.: Design criteria for pseudo-ductile fiber-reinforced composites, *Journal of Engineering Mechanics*, 122 (1996), pp. 10-18.
- [2] Mansur, M.A., Ong, K.C.G., Paramasivam, P.: Shear strength of fibrous concrete beams without stirrups, *Journal of Structural Engineering*, 112 (1986), pp. 2066-2079.
- [3] Narayanan, R., Darwish, I.Y.S.: Use of the steel fibers as shear reinforcement, *ACI Structural Journal*, 84 (1987), pp. 216-227.
- [4] Wang, Q., Bao, X., Yang, J., Xu, G., Zhang, M.: Investigation of ultrahigh-performance concrete fracture characteristics with different steel fiber fractions based on acoustic emission, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35 (2023) 12, pp. 04023437.
- [5] Li, L.Z., Yang, B., Yu, K.Q., Yu, J.T., Lu, Z.D.: Reinforced high-strength engineered cementitious composite (ECC) columns under eccentric compression: Experimental and theoretical model, *Engineering Structures*, 198 (2019), pp. 109541.
- [6] Qudah, S., Maalej, M.: Application of engineered cementitious composites (ECC) in interior beam-column connections for enhanced seismic resistance, *Engineering Structures*, 69 (2014), pp. 235-245.
- [7] Xu, L., Pan, J.L., Chen, J.H.: Mechanical behavior of ECC and ECC/RC composite columns under reversed cyclic loading, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29 (2017), pp. 04017097.
- [8] Li, B., Lam, E.S., Wu, B., Wang, Y.Y.: Experimental investigation on reinforced concrete interior beam-column joints rehabilitated by ferrocement jackets, *Engineering Structures*, 56 (2013), pp. 897-909.
- [9] Abbas, A.A., Mohsin, S.M.S., Cotsovos, D.M.: Seismic response of steel fibre reinforced concrete beam-column joints, *Engineering Structures*, 59 (2014), pp. 261-283.
- [10] Aviram, A., Stojadinovic, B., Parra-Montesinos, G.J.: High-performance fiber-reinforced concrete bridge columns under bidirectional cyclic loading, *ACI Structural Journal*, 111 (2014) 2, pp. 303-312.
- [11] Hu, R., Fang, Z., Benmokrane, B., Fang, W.: Cyclic behaviour of UHPC columns with hybrid CFRP/Steel reinforcement bars, *Engineering Structures*, 238 (2021), pp. 112245.
- [12] Nadir, W., Kadhim, M.A., Jawdhari, A., Fam, A., Majdi, A.: RC beams strengthened in shear with FRP-Reinforced UHPC overlay: An experimental and numerical study, *Structures*, 53 (2023), pp. 693-715.
- [13] Wei, J., Li, J., Liu, Z., Wu, C., Liu, J.: Behaviour of hybrid polypropylene and steel fibre reinforced ultra-high performance concrete beams against single and repeated impact loading, *Structures*, 55 (2023), pp. 324-337.
- [14] Chen, D., El-Hacha, R.: Flexural behaviour of hybrid FRP-UHPC girders under static loading, *Proceedings of 8th International Conference on Short and Medium Span Bridge* Niagara Falls, Canada, 2010.
- [15] Zhu, J., Guo, X., Kang, J., Duan, M., Wang, Y.: Experimental investigation of flexural behavior of steel-UHPC composite beam with waffle-slab system, *Journal of Bridge Engineering*, 26 (2021) 4, Paper 04021011.
- [16] Fu, T., Wang, K., Zhu, Z., et al.: Seismic performance of prefabricated square hollow section piers strengthened by jacketing using UHPC and high-strength steel, *Structures*, 47 (2023), pp. 449-465.
- [17] Fang, S.: Bearing capacity of UHPC-filled circular steel tube short column under axial compression, *GRAĐEVINAR*, 77 (2025) 7, pp. 687-697, <https://doi.org/10.14256/JCE.4173.2024>
- [18] Lin, H.B., Wang, Q.F.: Seismic behavior on HRB400 high-strength reinforced concrete columns, *Journal Building Structures*, S1 (2018), pp. 36-41, (in Chinese)
- [19] Hung, C.C., Yen, W.M., Yu, K.H.: Vulnerability and improvement of reinforced ECC flexural members under displacement reversals: Experimental investigation and computational analysis, *Construction and Building Materials*, 107 (2017), pp. 287-298.
- [20] Hassan, T.K., Seliem, H.M., Dwairi, H., Rizkalla, S.H., Zia, P.: Shear behavior of large concrete beams reinforced with high-strength steel, *ACI Structural Journal*, 105 (2008) 2, pp. 173-179, <https://doi.org/10.14359/19732>
- [21] Yan, C., Jia, J., Zhang, J.: Seismic behavior of steel reinforced ultra-high strength concrete column and reinforced concrete beam connection, *Transactions of Tianjin University*, 16 (2010) 4, pp. 309-316.
- [22] Wang, T.C., Liu, X., Zhao, H.L.: Seismic performance of cross-shaped columns with 500 MPa grade reinforcing steel bars, *Tehnicki Vjesnik*, 22 (2015) 3, pp. 629-636.
- [23] Wang, T., Liu, X., Zhao, H.: Experimental research on seismic behavior of +-shaped columns reinforced with high-strength steel bars under cyclic loading, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19 (2015) 4, pp. 982-993.
- [24] He, S.F., Deng, Z.C.: Seismic behaviour of ultra-high performance concrete short columns confined with high-strength reinforcement, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23 (2019), pp. 5183-5193, <https://doi.org/10.1007/s12205-019-0915-3>
- [25] He, S.F., Deng, Z.C., Yao, J.S.: Seismic behavior of ultra-high performance concrete long columns reinforced with high-strength steel, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 32 (2020), pp. 101740.
- [26] Bayrak, O., Sheikh, S.A.: Confinement reinforcement design considerations for ductile HSC columns, *Journal of Structural Engineering*, 124 (1998) 9, pp. 999-1010.
- [27] Ousaleem, H., Takatsu, H., Ishikawa, Y., Kimura, H.: Use of high-strength bars for the seismic performance of high-strength concrete columns, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 7 (2009) 1, pp. 123-134.
- [28] Rautenberg, J.M., Pujol, S., Tavallali, H., Lepage, A.: Drift capacity of concrete columns reinforced with high-strength steel, *ACI Structural Journal*, 110 (2013) 2, pp. 307.
- [29] Yin, H., Shirai, K., Teo, W.: Finite element modelling to predict the flexural behavior of ultra-high performance concrete members, *Engineering Structures*, 183 (2019), pp. 741-755.
- [30] Mao, L., Barnett, S., Begg, D., Schleyer, G., Wight, G.: Numerical simulation of ultra-high performance fibre reinforced concrete panel subjected to blast loading, *International Journal of Impact Engineering*, 64 (2015), pp. 91-100.
- [31] Singh, M., Sheikh, A.H., Mohamed Ali, M.S., Visintin, P., Griffith, M.C.: Experimental and numerical study of the flexural behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials*, 138 (2017), pp. 12-25.
- [32] Naeimi, N., Moustafa, M.A.: Numerical modeling and design sensitivity of structural and seismic behavior of UHPC bridge piers, *Engineering Structures*, 219 (2020), pp. 110792.