

Primljen / Received: 15.3.2026.

Ispravljen / Corrected: 14.5.2026.

Prihvaćen / Accepted: 22.5.2026.

Dostupno online / Available online: 10.8.2026.

Ponašanje i nosivost AB stupova ojačanih UHPC ovojnicom: uloga spojnih elemenata na sučelju i prediktivni model

Autori:



¹Izv.prof.dr.sc. **Julin Wang**, dipl.ing.građ.
wangjl_tj@163.com



¹Izv.prof.dr.sc. **Xianhui Li**, dipl.ing.građ.
zhanghs0520@163.com
Autor za korespondenciju



¹Mr.sc. **Wei Liu**, dipl.ing.građ.
liuwei@sxgkd.edu.cn



²Mr.sc. **Huanchao Qin**, dipl.ing.građ.
qinhuanchao@sxgkd.edu.cn



¹Mr.sc. **Jing Dong**, dipl.ing.građ.
dongjing@sxgkd.edu.cn

¹ Sveučilište za inženjerske znanosti i tehnologiju Shanxi, Kina
Fakultet arhitektonskog inženjerstva

² Sveučilište za inženjerske znanosti i tehnologiju Shanxi, Kina
Odjel za eksperimentalnu i praktičnu nastavu

Prethodno priopćenje

Julin Wang, Xianhui Li, Wei Liu, Huanchao Qin, Jing Dong

Ponašanje i nosivost AB stupova ojačanih UHPC ovojnicom: uloga spojnih elemenata na sučelju i prediktivni model

Beton ultra velikih svojstava (UHPC) sve se češće primjenjuje kao osnovni materijal za ojačanje armiranobetonskih (AB) stupova zbog svoje iznimno velike čvrstoće, izvrsne duktilnosti, trajnosti i vrlo male propusnosti. Međutim, još uvijek nisu dovoljno razjašnjena dva ključna pitanja: (1) jesu li spojni elementi na sučelju između UHPC-a i postojećeg betona neophodni za osiguranje monolitnog djelovanja te (2) kako razviti pojednostavljeni, ali dovoljno točan model za predviđanje nosivosti ojačanih stupova. Radi odgovora na navedena pitanja provedeno je ispitivanje osam AB stupova u dvije faze. U prvoj fazi ispitano je pet stupova radi analize njihovih mehanizama sloma. U drugoj su fazi tri uzorka korištena za validaciju numeričkog modela za predviđanje nosivosti. Rezultati pokazuju da je na sučelju UHPC-a i betona potrebno osigurati dovoljan broj čeličnih spojnih elemenata kako bi se spriječio relativni pomak između UHPC sloja i izvornog betona, koji bi u suprotnome mogao dovesti do prijevremenoga konstrukcijskog sloma. Nadalje, predloženi model pokazao je visoku razinu točnosti u procjeni nosivosti AB stupova ojačanih UHPC-om.

Ključne riječi:

UHPC, ojačani AB stupovi, prediktivni model, nosivost, spojnice na sučelju

Research Paper

Julin Wang, Xianhui Li, Wei Liu, Huanchao Qin, Jing Dong

Behaviour and bearing capacity of RC columns strengthened with UHPC jackets: the role of interfacial connectors and a predictive model

Ultra-high-performance concrete (UHPC) is increasingly used as a primary material for strengthening reinforced concrete (RC) columns owing to its ultra-high strength, excellent ductility, durability, and low permeability. However, two key issues remain unaddressed: (1) whether connectors are necessary at the UHPC-to-concrete interface to ensure monolithic behaviour, and (2) the development of a simplified yet accurate model for predicting the bearing capacity of strengthened columns. To address these questions, eight RC columns were tested in two stages. In the first stage, five columns were tested to analyse their failure modes. In the second stage, three specimens validated the numerical model for bearing capacity prediction. Results indicate sufficient steel connectors are required at the UHPC-concrete interface to prevent relative displacement between the UHPC layer and the original concrete, which could otherwise lead to premature structural failure. Moreover, the proposed model demonstrated high accuracy in estimating the bearing capacity of UHPC-strengthened RC columns.

Key words:

UHPC, strengthened RC columns, predictive model, bearing capacity, interfacial connections

1. Uvod

1.1. Posmična čvrstoća sučelja beton-beton

Za ostvarenje kvazimonolitnog ponašanja kompozitnih elemenata potrebno je da sučelje između betona različite starosti posjeduje dovoljnu sposobnost prijenosa posmičnih sila. Posmična čvrstoća takvih sučelja određena je kombinacijom adhezije, trenja, međusobnog uklještenja agregata i djelovanja moždanika (engl. *dowel effect*) [1, 2, 36–38]. Od šezdesetih godina 20. stoljeća provedena su brojna istraživanja diljem svijeta radi karakterizacije posmičnog ponašanja betonskih sučelja te uspostave pouzdanih projektantskih i izvedbenih smjernica.

Randl [3] klasificirao je relativni pomak između starog i novog betona kao krhki ili duktilni. Omar [4] ispitao je osam AB stupova ojačanih samozbijajućim betonom bez međuslojne armature te utvrdio da je slom uzrokovan relativnim proklizavanjem između sloja za ojačanje i izvornog stupa. Slično tome Gomes i sur. [5] ispitali su šest stupova ojačanih kompozitima od ugljičnih vlakana u vlačnoj zoni te samozbijajućim betonom u tlačnoj zoni. Njihovi rezultati naglasili su nužnost primjene spojnica na sučelju radi sprječavanja prijevremenog sloma uzrokovanog relativnim pomacima. Naknadna istraživanja Sahba [6] i Nascimenta [7] potvrdila su da dovoljan broj čeličnih spojnica između sloja za ojačanje i izvornog stupa učinkovito sprječava oštećenja uzrokovana proklizavanjem na sučelju.

U odsutnosti vlačnih naprezanja okomitih na sučelje, sidrena duljina od 6d (gdje je d promjer spojnice) u betonu, bilo da je izveden na licu mjesta bilo ekvivalentan, dovoljna je za potpuno aktiviranje posmične otpornosti spojnice [8].

1.2. Stupovi ojačani UHPC-om

AB stupovi podložni su koroziji armature uzrokovanj karbonizacijom ili nedovoljnim zbijanjem betona, što može znatno smanjiti njihovu nosivost te zahtijevati hitno ojačanje. Tradicionalne metode sanacije i ojačanja poput lijepljenja čeličnih ploča, klasičnog oblaganja betonom i omatanja polimerima ojačanim vlaknima (eng. *fiber-reinforced polymer* – FRP) široko su primjenjivane, ali imaju određene nedostatke. Čelične ploče podložne su koroziji [9], FRP materijali imaju slabu otpornost pri povišenim temperaturama i visoku cijenu [10], dok betonske ovojnice znatno povećavaju vlastitu težinu postojeće konstrukcije [11, 12].

Nasuprot tome, UHPC pruža iznimno povoljnu kombinaciju svojstava, uključujući vrlo visoku tlačnu i vlačnu čvrstoću, izvrsnu duktilnost, otpornost na požar, izvanrednu obradivost, malu propusnost i visok omjer čvrstoće i mase [13–17]. Zbog navedenih svojstava UHPC je posebno prikladan za ojačanje AB elemenata. Brojna eksperimentalna istraživanja [18–22] pokazala su da vanjske UHPC ovojnice mogu znatno povećati nosivost i duktilnost AB stupova. Dadvar i sur. [23] predložili su model za predviđanje odnosa naprezanje–deformacija kod AB stupova ojačanih UHPC ovojnicama. Lampropoulos i sur. [24] proveli su numeričke analize

radi procjene utjecaja ključnih parametara kao što su debljina ovojnice i skupljanje betona te usporedili učinkovitost UHPC ovojnice s konvencionalnim betonskim ovojnicama.

1.3. Ciljevi rada

Potreba za čeličnim spojnicama i njihov minimalan broj

Učinkovit prijenos posmičnih sila preko sučelja UHPC-beton ključan je za postizanje kvazimonolitnog ponašanja AB stupova ojačanih UHPC ovojnicama te važan projektantski zahtjev. Međutim, ugradnja spojnica u postojeće betonske površine vremenski je zahtjevna i tehnički složena.

Zato se ovim eksperimentalnim istraživanjem nastoji odgovoriti na sljedeća pitanja: jesu li spojnice na sučelju neophodne ili se mogu izostaviti? Ako su potrebne, koji je njihov minimalan broj za osiguranje zadovoljavajućeg ponašanja konstrukcije?

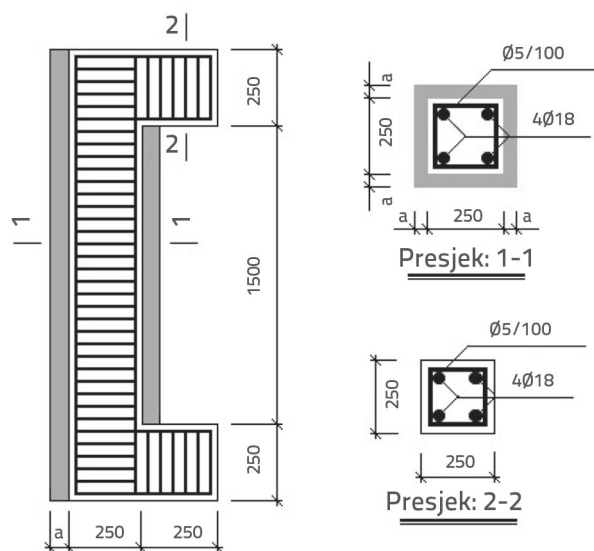
Prediktivni model nosivosti AB stupova ojačanih UHPC ovojnicama

Iako je UHPC opsežno istraživao i uspješno primjenjivan kao materijal za sanaciju konstrukcijskih elemenata, relativno malo istraživanja posvećeno je numeričkom modeliranju AB stupova ojačanih UHPC ovojnicama. Kako bi se popunila navedena istraživačka praznina, u radu predlaže se pojednostavljeni model za predviđanje nosivosti ojačanih stupova. Točnost i pouzdanost modela potvrđene su usporedbom s eksperimentalnim rezultatima.

2. Eksperimentalni program

2.1. Karakteristike uzoraka i plan ispitivanja

U ovome istraživanju ispitano je osam uzoraka stupova, čije su geometrijske karakteristike prikazane na slici 1. Uzorci su izrađeni u dvije faze: pet u prvoj i tri u drugoj fazi.



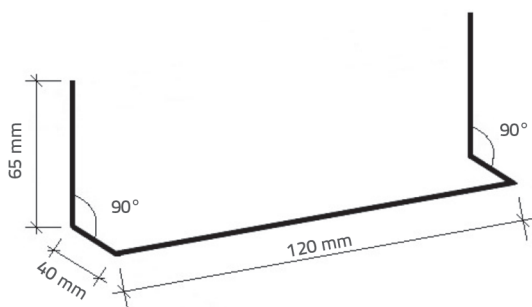
Slika 1. Geometrija i raspored armature uzoraka (siva područja označavaju UHPC ovojnicu, a bijelo područje izvorni AB stup; parametar "a" označava debljinu UHPC ovojnice; jedinice: mm)

Tablica 1. Svojstva ispitnih stupova

Stupovi	Dimenzije prije ojačanja [mm]	Debljina UHPC ovojnice: a [mm]	Razmak između spojnica [mm]
Prva faza	C1	250 × 250	-
	C2	250 × 250	15
	C3	250 × 250	15
	C4	250 × 250	15
	C5	250 × 250	15
Druga faza	C6	250 × 250	25
	C7	250 × 250	40
	C8	250 × 250	50

U prvoj fazi jedan neojačani uzorak služio je kao referentni, dok su preostala četiri ojačana UHPC ovojnicom debljine 15 mm. Budući da je položaj primjene opterećenja ostao nepromijenjen, dok je UHPC ovojnica povećala dimenzije poprečnog presjeka, stvarna ekscentričnost u odnosu na težište ojačanog presjeka postala je manja od početne ekscentričnosti od 125 mm. Radi ispitivanja utjecaja čeličnih spojnica na ostvarivanje kvazimonolitnog ponašanja između UHPC ovojnice i izvornog stupa, tri od četiri ojačana uzorka (C3, C4 i C5) opremljena su različitim količinama spojnica (razmaci 400 mm, 300 mm i 200 mm), dok uzorak C2 nije imao spojnice.

U drugoj fazi ispitana su dodatna tri uzorka radi procjene nosivosti ojačanih stupova s različitim debljinama ovojnice. Debljine UHPC ovojnice iznosile su 25 mm, 40 mm i 50 mm, uz jedinstveni razmak spojnica od 200 mm. Prije nanošenja UHPC sloja površina AB stupa ohrapavljena je pjeskarenjem. Čelične spojnice izrađene su od istog materijala kao i vilice stupa te imaju promjer 5,0 mm. Njihov oblik i dimenzije prikazani su na slici 2.



Slika 2. Oblik i dimenzije spojnica

Radi pričvršćenja spojnica za postojeću armaturu, na vlačnoj i tlačnoj strani stupa izrađeni su utori kojima su otkrivene

vilice. Time je osigurano zadržavanje spojnica u predviđenome položaju tijekom ugradnje UHPC-a, a kako je to prikazano na slici 3. Pojednosti o ispitnim uzorcima prikazane su u tablici 1.



Slika 3. Postavljanje spojnica

2.2. Materijalna svojstva

Kako bi se odredila stvarna tlačna čvrstoća betona AB stupova, iz iste mješavine izrađene su tri standardne kocke dimenzija 150 × 150 × 150 mm te su nakon 28 dana njege ispitane pod istim uvjetima kao i stupovi. Prosječna tlačna čvrstoća triju kocaka iznosila je 32,0 MPa. Mehanička svojstva armature prikazana su u tablici 2. Sastav mješavine i mehanička svojstva UHPC-a prikazani su u tablicama 3. i 4. U eksperimentima korištena su čelična vlakna s kukastim krajevima vlačne čvrstoće 1350 MPa (granica popuštanja 1100 MPa), duljine 13 mm i promjera 0,20 mm.

Tablica 2. Mehanička svojstva armaturnih šipki

Vrste čelika	Promjer [mm]	Granica popuštanja [MPa]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Modul elastičnosti [MPa]
HRB400	5	470,3	650,1	$2,0 \times 10^5$
HRB500	18	544,2	730,2	$2,0 \times 10^5$

Napomena: HRB400 i HRB500 označavaju toplo valjane rebraste šipke s karakterističnim vrijednostima granice popuštanja od 400 MPa i 500 MPa.

Tablica 3. Sastav UHPC mješavine po kubnome metru [m³]

Sastojci	Cement	Voda	Silicijev dioksid	Kvarcni pijesak	Superplastifikator	Čelična vlakna
Količina [kg]	900	165	216	1004	42	160

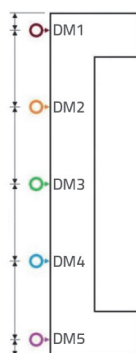
Tablica 4. Mehanička svojstva UHPC-a

Tlačna čvrstoća [MPa]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Granična vlačna deformacija	Granična tlačna deformacija
149,5	17,4	0,0125	0,0038

2.3. Raspored mjernih mjesta

2.3.1. Horizontalni progib

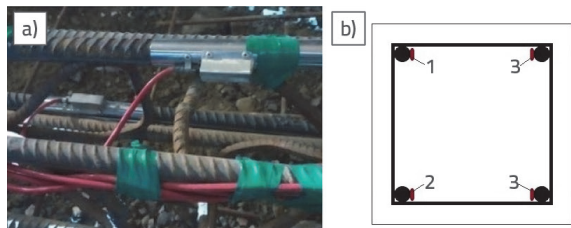
Za mjerenje horizontalnih pomaka uzoraka postavljeno je pet mjeraca pomaka vertikalno raspoređenih na vlačnoj strani stupa, od vrha prema dnu, a kako je to prikazano na slici 4. Mjerači pomaka (eng. *deflection meter* - DM) imaju točnost mjerenja od 0,01 mm te mjerni opseg od 0 do 60 mm.



Slika 4. Shematski prikaz rasporeda mjeraca pomaka

2.3.2. Deformacije uzdužne armature

Radi praćenja deformacija uzdužne armature u uzorcima, na sredinu visine stupova postavljene su mjerne trake za deformacije. Mjerne trake pričvršćene su za unutarnje površine uzdužnih armaturnih šipki, kako je to prikazano na slici 5.

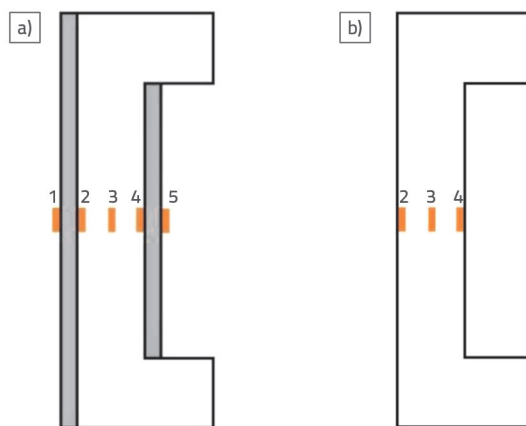


Slika 5. a) Fotografija mjernih traka za deformacije; b) Položaj mjernih traka za deformacije

2.3.3. Mjerenje deformacija betona i UHPC-a

Kako bi se tijekom ispitivanja odredila raspodjela deformacija po presjeku uzoraka, na polovicu visine ojačanih stupova

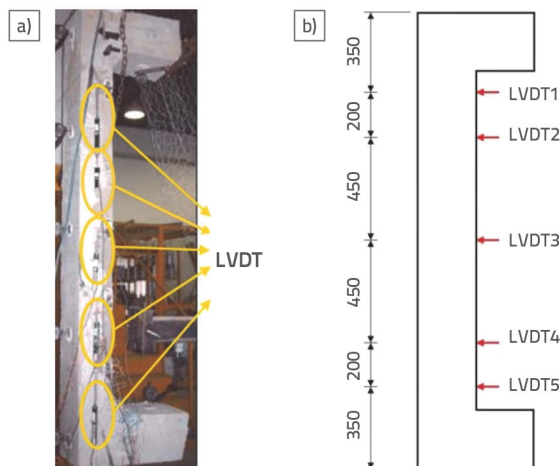
(C2 – C8) postavljeno je pet mjernih traka za deformacije na strani paralelnoj ravnini savijanja, dok su na neojačani uzorak C1 postavljene tri mjerne trake (slika 6.). Podaci o deformacijama prikupljeni su pomoću statičkog sustava za akviziciju deformacija LD8174-1G14.



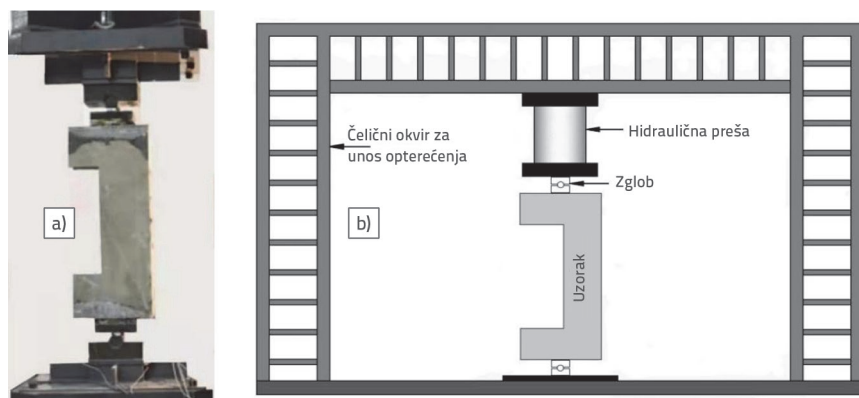
Slika 6. Položaj mjernih traka za deformacije: a) ojačani stupovi; b) neojačani stup

2.3.4. Relativni pomak između UHPC ovojnice i AB stupa

Na svaki ojačani stup postavljeno je pet linearnih diferencijalnih pretvornika pomaka (LVDT) za mjerenje relativnog pomaka između UHPC ovojnice i izvornog AB stupa.



Slika 7. LVDT senzori: a) fotografija; b) položaji mjernih mjesta



Slika 8. Sustav opterećivanja: a) fotografija ispitivanja; b) shematski prikaz uređaja za opterećivanje

Svaki LVDT bio je pričvršćen za površinu UHPC ovojnice pomoću magnetskog postolja ili manjeg nosača. Vrh mjerne sonde LVDT-a bio je u laganome kontaktu s malom čeličnom pločicom zalijepljenom za površinu izvornog AB stupa. Na taj je način LVDT mjerio pomak izvornog stupa u odnosu na UHPC ovojnicu. Položaji LVDT senzora prikazani su na slici 7.

2.4. Uređaj za opterećivanje

Ispitivanja su provedena u laboratoriju Sveučilišta za inženjerske znanosti i tehnologiju Shanxi. Za primjenu opterećenja korištena je servohidraulična preša kapaciteta 500 tona, vertikalno postavljena između gornjega i donjega kraja uzoraka. Gornji kraj uzorka bio je zglobno povezan s hidrauličnom prešom, dok je donji kraj bio zglobno povezan s čeličnom temeljnom pločom debljine 15 mm, kako je to prikazano na slici 8.

U skladu s ispitnim postupkom propisanim normom [25], opterećenje je nanošeno metodom kontrole sile. Svi stupovi najprije su opterećivani u koracima od 10 kN do pojave prve pukotine. Tijekom te faze brzina opterećivanja održavana je na približno 2 kN/min. Nakon toga opterećenje se povećavalo u koracima od 20 kN. Da bi se osigurala stabilnost uzorka te spriječilo njegovo pomicanje ili prevrtanje prije početka glavnog ispitivanja, prethodno je primijenjeno predopterećenje od 5 kN.

3. Eksperimentalni rezultati i analiza

3.1. Eksperimentalna opažanja

Uzorak C1

Uzorak C1 predstavljao je referentni neojačani stup s ekscentricitetom $e = 125$ mm i dimenzijama poprečnog presjeka 250×250 mm. Tijekom početne faze opterećivanja uzorak se ponašao elastično. Pri opterećenju od 135 kN pojavila se prva poprečna pukotina na vlačnoj strani stupa, na području sredine visine. Duljina pukotine iznosila je približno 100 mm, a širina 0,02 mm. Povećanjem opterećenja na 275 kN razvilo se šest poprečnih pukotina ravnomjerno raspoređenih duž vlačne

strane stupa, koje su se postupno širile prema tlačnoj strani. Pri graničnome opterećenju od 560 kN došlo je do popuštanja uzdužne armature u vlačnoj zoni. Istodobno je u tlačnoj zoni došlo do drobljenja betona praćenog izvijanjem prema van i otpadanjem zaštitnog sloja betona, što je dovelo do sloma uzorka.

Uzorak C2

Uzorak C2 bio je ojačani stup poprečnog presjeka 280×280 mm s UHPC ovojnicom debljine 15 mm, ispitivan pri ekscentricitetu $e = 125$ mm. Na sučelju između postojećeg betona i UHPC-a nisu bile ugrađene spojnice. Tijekom početnog

opterećivanja C2 pokazivao je elastično ponašanje slično uzorku C1. Pri opterećenju od 410 kN pojavile su se pukotine na vlačnoj strani izvornog stupa. Istodobno su se na vlačnoj strani UHPC sloja pojavile sitne i gusto raspoređene vertikalne pukotine. Pri povećanju opterećenja na 710 kN došlo je do iznenadnoga lokalnog odvajanja između tlačno opterećenog UHPC sloja i izvornog betona, uz lagani zvučni efekt nalik pucanju. Nakon toga, pri opterećenju od 730 kN, armatura u vlačnoj zoni dosegla je granicu popuštanja, nakon čega je ispitivanje prekinuto.

Uzorak C3

Kod uzorka C3 u sučelje beton-UHPC ugrađene su čelične posmične spojnice s razmakom od 400 mm unutar svakog reda. Svi ostali uvjeti bili su jednaki onima za uzorak C2. U početnoj fazi opterećivanja uzorak se ponašao elastično. Kada je opterećenje doseglo 500 kN, na vlačnoj strani UHPC sloja u sredini visine razvile su se vertikalne pukotine. Daljnjim povećanjem opterećenja početne su se pukotine brzo širile u uzdužnome smjeru stupa. Pri opterećenju od 830 kN došlo je do lokalnog odvajanja UHPC sloja na tlačnoj strani od postojećega betonskog stupa.

Uzorak C4

Kod uzorka C4 čelične posmične spojnice bile su postavljene na razmaku od 300 mm unutar svakog reda na sučelju beton-UHPC, dok su svi ostali uvjeti bili istovjetni uzorku C3. Ponašanje uzorka bilo je slično ponašanju uzorka C3 sve do opterećenja od 890 kN, kada je došlo do relativnog pomaka između UHPC sloja i betona u tlačnoj zoni.

Uzorak C5

Kod uzorka C5 čelične spojnice bile su raspoređene na razmaku od 200 mm po redu. Svi ostali uvjeti bili su jednaki onima za uzorak C4. U početnoj fazi opterećivanja uzorak je pokazivao elastično ponašanje. Pri opterećenju od 690 kN na vlačnoj strani UHPC sloja pojavilo se nekoliko mikropukotina. Pri opterećenju od 960 kN došlo je do lokalnog otpadanja betona u tlačnoj zoni izvornog stupa, popraćenog karakterističnim zvukom krhkog loma. Daljnjim povećanjem opterećenja na 1020 kN došlo je do

izvlačenja i loma pojedinih vlakana unutar tlačne zone UHPC sloja, uz lagani zvuk pucanja i pojavu brojnih gustih uzdužnih pukotina cijepanja. Nakon toga opterećivanje je prekinuto.

Uzorci C6, C7 i C8

Uzorci C6, C7 i C8 pripadaju drugoj fazi eksperimentalnog programa. Po završetku ispitivanja prve faze, ti su uzorci izrađeni, njegovani i potom ispitani. Debljine UHPC sloja iznosile su: C6: 25 mm, C7: 40 mm i C8: 50 mm. Svi ostali uvjeti bili su jednaki onima za uzorak C5. Slom uzoraka C6, C7 i C8 nastupio je pri opterećenjima od 1100 kN za C6, 1350 kN za C7, 1590 kN za C8. Slom je karakteriziralo drobljenje betona i UHPC-a u tlačnoj zoni. Tijekom ispitivanja nije uočen nikakav relativni pomak između UHPC sloja i izvornog stupa.

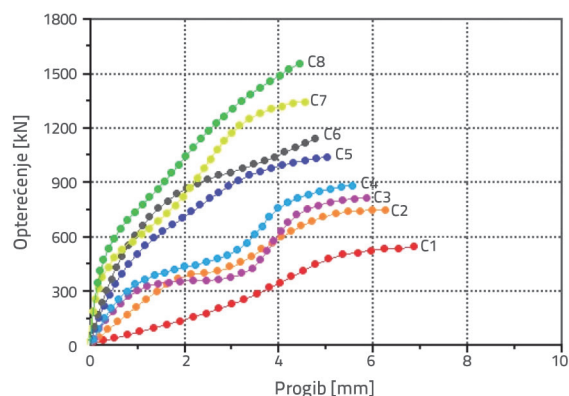
3.2. Horizontalni pomaci uzoraka

Krivulje bočnog progiba u sredini visine svih uzoraka prikazane su na slici 9. Iz rezultata je vidljivo da se tijekom početne faze opterećivanja brzina porasta progiba smanjivala kod svih uzoraka C1-C8. Pri vršnome opterećenju uzorak C8 pokazao je najmanji progib (4,4 mm), dok je uzorak C1 imao najveći progib. Progibi uzoraka C2 – C7 postupno su se smanjivali između tih graničnih vrijednosti. Takvo ponašanje ponajprije je posljedica dvaju čimbenika: UHPC posjeduje znatno veći modul elastičnosti i tlačnu čvrstoću od običnog betona. Povećanjem debljine UHPC sloja povećava se površina poprečnog presjeka, čime se povećava krutost stupa, smanjuju progibi te povećava nosivost.

Dovoljan broj spojnika ključan je za učinkovit prijenos sila na sučelju UHPC-beton, čime se omogućuje zajedničko djelovanje UHPC sloja i postojećega armiranobetonskog stupa. Takvo kompozitno djelovanje dodatno povećava nosivost, krutost i duktilnost ojačanih stupova.

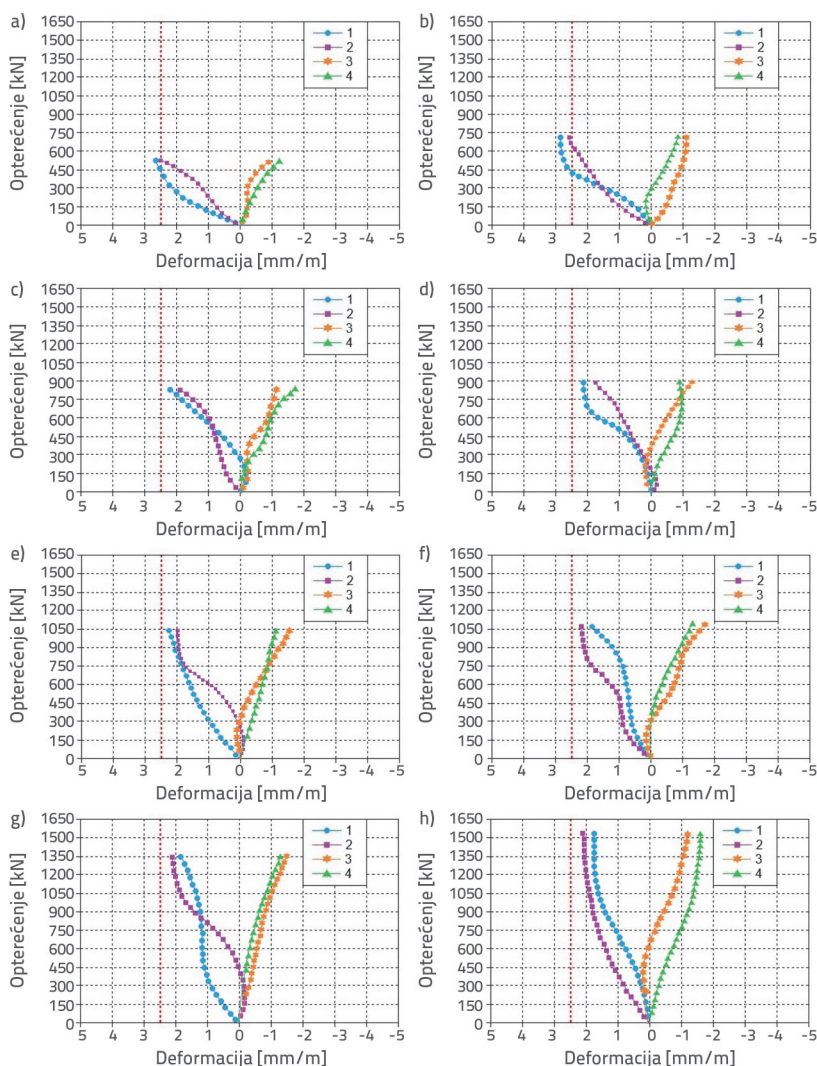
3.3. Deformacije uzdužne armature

Kod svakog uzorka mjerne trake za deformacije bile su postavljene na unutarnjim stranama armaturnih šipki. Deformacije vlačne armature mjerene su pomoću mjernih mjesta 1 i 2, dok su tlačne deformacije praćene pomoću mjernih mjesta 3 i 4. Crvena isprekidana

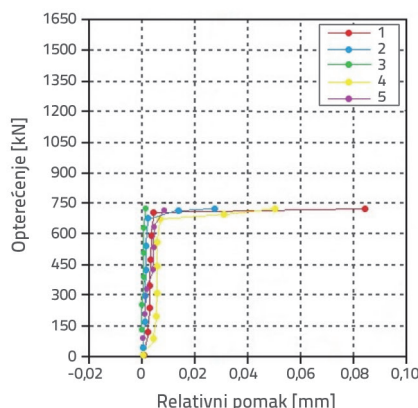


Slika 9. Usporedba krivulja opterećenje-progib ispitanih uzoraka

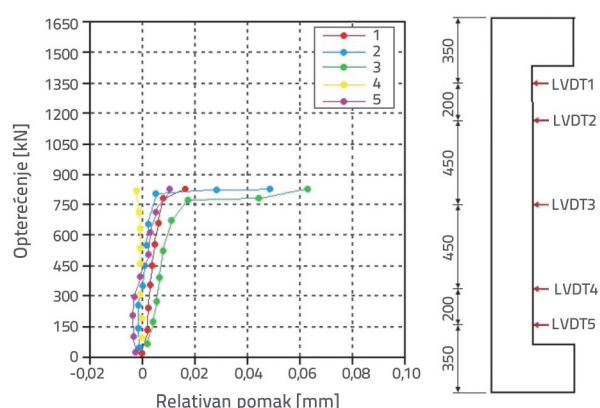
linija označava deformaciju pri granici popuštanja uzdužne armature (2,45 mm/m). Na slici 10. prikazan je odnos opterećenja i deformacije uzdužne armature za sve ispitane uzorke.



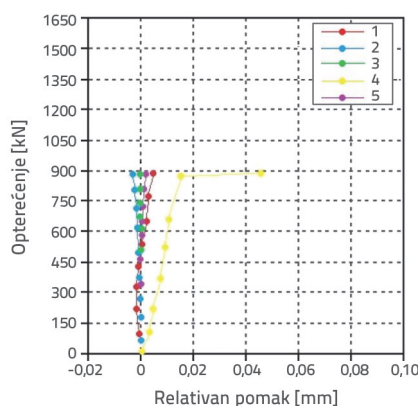
Slika 10. Krivulje opterećenje-deformacija uzdužne armature: a) C1; b) C2; c) C3; d) C4; e) C5; f) C6; g) C7; h) C8



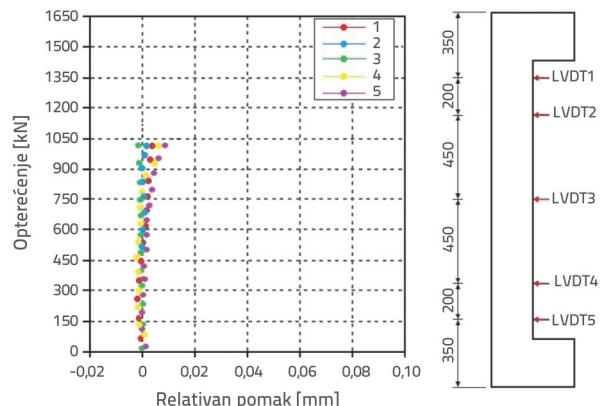
Slika 11. Relativni pomaci uzorka C2



Slika 12. Relativni pomaci uzorka C3



Slika 13. Relativni pomaci uzorka C4



Slika 14. Relativni pomaci uzorka C5

3.4. Rezultati mjerenja LVDT senzorima

Na slikama od 11. do 14. prikazani su relativni pomaci između UHPC ovojnice i betona za uzorke C2, C3, C4 i C5. Ključna opažanja mogu se sažeti kako slijedi:

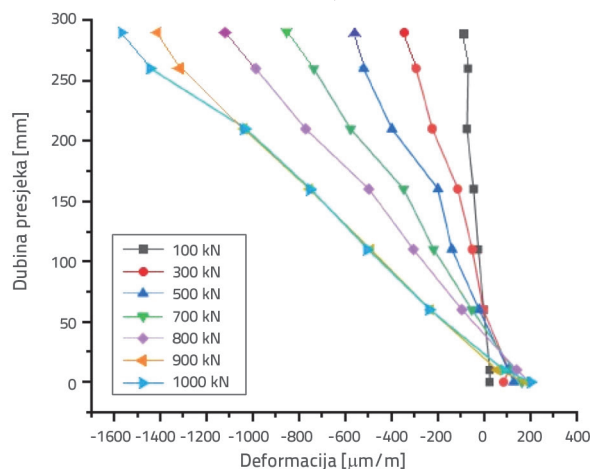
- Kod uzorka C2 najveći relativni pomak iznosio je 0,086 mm na mjerne mjestu 1.
- Kod uzorka C3 najveći relativni pomak iznosio je 0,064 mm na mjerne mjestu 3.
- Kod uzorka C4 najveći relativni pomak iznosio je 0,047 mm na mjerne mjestu 4.
- Kod uzorka C5 izmjeren je zanemariv pomak od samo 0,007 mm, što praktično upućuje na izostanak pomaka na sučelju.

Dobiveni rezultati pokazuju da su uzorci C2 (bez spojnica) te C3 i C4 (s nedovoljnim brojem spojnica) pokazali znatno proklizavanje na sučelju UHPC-beton. Takvi pomaci na sučelju kritično narušavaju iskoristivost mehaničkih svojstava UHPC-a.

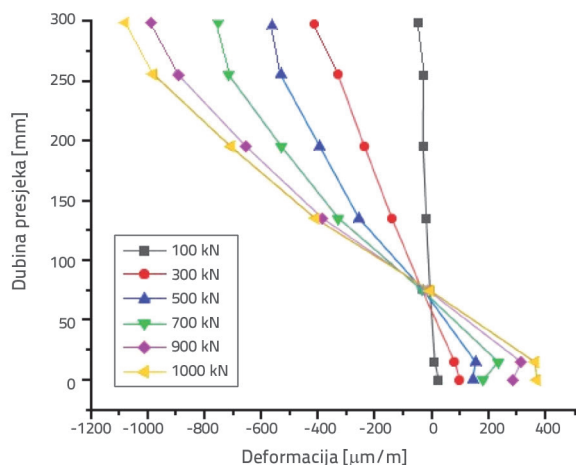
3.5. Deformacije UHPC-a i betona

Radi provjere valjanosti pretpostavke ravnih presjeka kod ekscentrično tlačanih stupova ojačanih UHPC-om, na sredini visine stupova, na strani paralelnoj ravnini savijanja, postavljeno je od tri do šest mjernih traka za deformacije. Na slikama 15. i 16.

prikazane su raspodjele deformacija po presjeku u sredini visine uzoraka C5 i C6. Rezultati pokazuju da pri manjim opterećenjima vrijedi pretpostavka ravnih presjeka. Povećanjem opterećenja raspodjela deformacija postupno odstupa od strogo linearnog oblika, ali i dalje ostaje približno linearna. To pokazuje da ekscentrično tlačeni stupovi ojačani UHPC-om, uz dovoljan broj spojnica na sučelju UHPC-beton, zadovoljavaju pretpostavku ravnih presjeka. Taj zaključak čini teorijsku osnovu za naknadne numeričke analize takvih konstrukcijskih elemenata.



Slika 15. Deformacije betona/UHPC-a u srednjem presjeku uzorka C5



Slika 16. Deformacije betona/UHPC-a u srednjemu presjeku uzorka C6

3.6. Detaljna analiza mehanizama sloma

3.6.1. Lokalno odvajanje UHPC ovojnice

Mjerenja provedena LVDT senzorima (slike 11. – 14.) pružila su kvantitativne dokaze o gubitku prionjivosti na sučelju. Kod uzorka C2, bez spojnica, najveći relativni pomak iznosio je 0,086 mm na mjernome mjestu 1, što upućuje na znatno proklizavanje između UHPC ovojnice i izvornog betona. To je proklizavanje započelo u području sredine visine na vlačnoj strani te se brzo širilo duž sučelja, što je dovelo do prijevremenog lokalnog odvajanja ovojnice na tlačnoj strani pri opterećenju od 710 kN. Kod uzoraka C3 i C4, s razmacima spojnica od 400 mm odnosno 300 mm, najveći relativni pomaci iznosili su 0,064 mm i 0,047 mm. Iako su te vrijednosti manje nego kod uzorka C2, i dalje upućuju na nedovoljnu sposobnost prijenosa posmičnih sila preko sučelja. Kod oba uzorka lokalno odvajanje također se pojavilo na tlačnoj strani, pri opterećenjima od 830 kN za C3 i 890 kN za C4, ali je početak odvajanja bio odgođen u odnosu na uzorak C2.

Nasuprot tome, uzorak C5, s razmakom spojnica od 200 mm, pokazao je najveći relativni pomak od samo 0,007 mm, što se može smatrati zanemarivim te upućuje na kvazimonoitno ponašanje. Tijekom opterećivanja nije uočeno vidljivo odvajanje na sučelju. Ti rezultati pokazuju da je razmak spojnica od 200 mm dovoljan za sprječavanje lokalnog odvajanja i osiguranje punoga kompozitnog djelovanja.

3.6.2. Utjecaj ekscentriciteta

Svi uzorci ispitani su pri istome nominalnom ekscentricitetu od 125 mm, definiranome kao udaljenost između točke primjene opterećenja i težišta poprečnog presjeka izvornoga armiranobetonskog stupa dimenzija 250 × 250 mm. Međutim, nakon izvedbe UHPC ovojnice dimenzije poprečnog presjeka povećale su se (naprimjer, na 280 × 280 mm kod uzoraka C2

– C5, a još više kod uzoraka C6 – C8), dok je položaj djelovanja opterećenja ostao nepromijenjen. Posljedično se smanjio ekscentricitet u odnosu na težište ojačanog presjeka. Kod simetrično izvedene UHPC ovojnice (jednake debljine sa svih strana) nije došlo do pomaka težišta presjeka. Međutim, povećanje otpornog momenta i momenta inercije rezultiralo je smanjenjem momenta savijanja po jedinici deformacije. Još važnije, smanjenje stvarnog ekscentriciteta dovelo je do povećanja nosivosti na centrični tlak pri istoj čvrstoći materijala. Taj učinak djelomično objašnjava postupni porast sila sloma od uzorka C5 (1020 kN) do uzorka C8 (1590 kN), čak i u slučajevima kada je debljina UHPC ovojnice bila veća od one potrebne za osiguranje optimalnog djelovanja spojnica.

3.6.3. Mehaničko tumačenje kompozitnog djelovanja

Podaci dobiveni mjerenjem deformacija u presjecima na sredini visine stupova (slike 15. i 16. za uzorke C5 i C6) potvrđuju da pri uporabnim opterećenjima približno vrijedi pretpostavka ravnih presjeka. Time je opravdana primjena analize temeljene na presjeku. Stupanj kompozitnog djelovanja presudno ovisi o broju spojnica ugrađenih u sučelje. Kada spojnice nisu bile ugrađene (uzorak C2) ili ih nije bilo dovoljno (uzorci C3 i C4), UHPC ovojnice i izvorni stup nisu mogli ostvariti punu kompatibilnost deformacija. Posljedično se UHPC ovojnice ponašala kao neovisni vanjski sloj koji je preuzimao tlačna naprezanja tek nakon pojave znatnoga međusobnog proklizavanja. U takvim je uvjetima posmična sila na sučelju primarno prenošena trenjem i slabim adhezijskim vezama, koje se ne mogu smatrati dovoljno pouzdanim mehanizmima prijenosa sila. Nakon što je iscrpljena lokalna prionjivost, dolazilo je do naglog odvajanja na tlačnoj strani presjeka, gdje tlačna naprezanja uzrokuju pojavu posmičnog toka duž sučelja. Takvo se odvajanje vrlo brzo širilo jer nedostatak dovoljnog broja spojnica nije omogućavao mehanizam zaustavljanja širenja pukotine.

Nasuprot tome, kod uzoraka C5 – C8, s razmakom spojnica od 200 mm, čelične spojnice djelovale su kao moždaničice te su izravno pnosile posmične sile preko sučelja između UHPC-a i postojećeg betona. Osim toga spojnice ostvaruju učinak stezanja (engl. *clamping action*), čime dodatno povećavaju otpornost na posmik ostvarenu trenjem na sučelju. Eksperimentalno utvrđeni stupanj armiranja spojevima bio je dovoljan da posmična otpornost sučelja premaši maksimalni posmični tok uzrokovan primijenjenim opterećenjem. U takvim uvjetima UHPC ovojnice i izvorni armiranobetonski stup ponašali su se kao jedinstven, monolitni konstrukcijski element te se ojačani stup mogao proračunavati primjenom konvencionalne teorije armiranog betona uz usvajanje kompozitnog presjeka.

Nadalje, vlačna čvrstoća UHPC-a (17,4 MPa, tablica 4.) doprinosi otpornosti presjeka na momente savijanja, osobito u vlačnoj zoni. Kod uzoraka C5 – C8 nije došlo do proklizavanja na sučelju, zbog čega je UHPC sloj u vlačnoj zoni ostao neoštećen te je aktivno sudjelovao u učinku ukrućenja između pukotina (engl. *tension stiffening*). Time je odgođeno dostizanje granice popuštanja

uzdužne armature. Ta je pojava jasno vidljiva na dijagramima opterećenje–deformacija vlačne armature (slika 10., uzorci C5 – C8), gdje su zabilježene veće sile pri pojavi tečenja armature u usporedbi s uzorcima koji nisu imali dovoljan broj spojnica.

4. Odgovor na istraživačko pitanje potrebitosti ugradnje spojnica

Eksperimentalni rezultati pokazali su da je ojačanje ekscentrično tlačanih AB stupova vanjski ugrađenim UHPC slojem, pri čemu se prijenos sila oslanja isključivo na prionjivost na sučelju bez ugradnje spojnica, nepouzđano i neučinkovito. U takvim uvjetima odvajanje na sučelju neizbježno se pojavljuje kao dominantni mehanizam sloma. Time se znatno narušava učinkovitost UHPC-a te može doći do iznenadnoga i katastrofalnoga krhkog sloma konstrukcije. Nadalje, nedovoljan broj spojnica ozbiljno umanjuje učinkovitost ojačanja UHPC-om. Posljedično, ojačani stupovi doživljavaju prijevremeni krhki slom, pretežno obilježen odvajanjem na sučelju, čime se ne iskorištavaju u cijelosti visoka čvrstoća i superiorna mehanička svojstva UHPC-a.

Eksperimentalnim istraživanjem također je utvrđeno da je, unutar raspona ispitanih parametara, za postizanje kvazimonolitnog ponašanja bio potreban razmak spojnica od 200 mm. Taj je rezultat u skladu s nalazima eksperimentalnih istraživanja koje su proveli Nascimento i sur. [7, 26, 27, 28].

5. Prediktivni model

U ovome poglavlju prikazan je proračunski model za određivanje nosivosti armiranobetonskih stupova ojačanih UHPC ovojnicama.

5.1. Osnovne pretpostavke

Radi pojednostavljenja formulacije i analize modela usvajaju se sljedeće pretpostavke:

- Ravni presjeci ostaju ravni i nakon deformiranja uslijed savijanja kod stupova ojačanih UHPC-om. (Valjanost ove pretpostavke potvrđena je u 3. poglavlju.)
- Vlačna čvrstoća običnog betona zanemaruje se.
- Pretpostavlja se potpuno prijanjanje između armature i običnog betona te između armature i UHPC-a.
- Vlačna sila u presjeku preuzima se zajedničkim djelovanjem armature i UHPC-a.

5.2. Konstitutivni modeli materijala

5.2.1. Beton

U ovome radu usvojen je odnos naprezanje–deformacija za beton predložen u radu [29], prikazan na slici 17., a dan izrazom (1):

$$\sigma = \begin{cases} E_c \varepsilon \frac{f_c / (E_c \varepsilon_0 - f_c)}{f_c / (E_c \varepsilon_0 - f_c) + (\varepsilon / \varepsilon_0)^{E_c \varepsilon_0 / (E_c \varepsilon_0 - f_c)}} & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0 \\ \frac{\varepsilon f_c}{\alpha_c (\varepsilon - \varepsilon_0)^2 / \varepsilon_0 + \varepsilon} & \varepsilon_0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (1)$$

gdje su:

E_c – modul elastičnosti betona

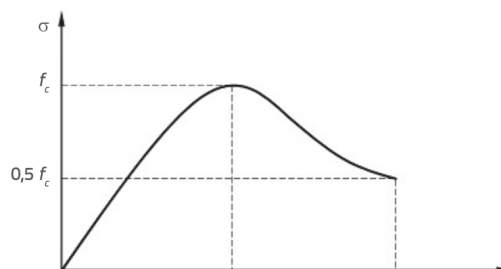
f_c – tlačna čvrstoća betona

ε_0 – deformacija koja odgovara vršnome naprezanju f_c

ε_{cu} – granična tlačna deformacija koja odgovara naprezanju 0,5 f_c na silaznome dijelu dijagrama naprezanje–deformacija

α_c – parametar koji definira silazni dio dijagrama tlačnog naprezanja i deformacije.

Vrijednosti parametra α_c ovise o tlačnoj čvrstoći betona f_c te su dane u tablici 5.

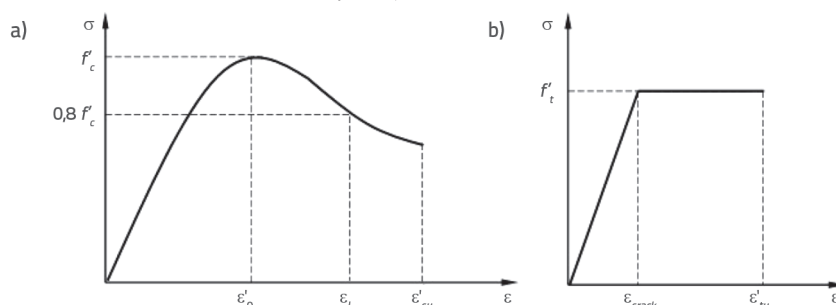


Slika 17. Dijagram tlačnog naprezanja i deformacije betona

5.2.2. UHPC

1. Odnos tlačnog naprezanja i deformacije

Odnos tlačnog naprezanja i deformacije za UHPC, prikazan na slici 18.a, opisan je izrazom (2) [30]:



Slika 18. Dijagram naprezanja i deformacije UHPC-a: a) tlak; b) vlak

Tablica 5. Vrijednosti parametra α_c

f_c [N/mm ²]	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
α_c	0,74	1,06	1,36	1,65	1,94	2,21	2,48	2,74	3,00	3,25	3,50	3,75	3,99

$$\sigma = \begin{cases} E_c \varepsilon \frac{f_c / (E_c \varepsilon_0 - f_c)}{f_c / (E_c \varepsilon_0 - f_c) + (\varepsilon / \varepsilon_0)^{E_{c0} / (E_c \varepsilon_0 - f_c)}} & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0 \\ \frac{\varepsilon f_c}{\alpha_c (\varepsilon - \varepsilon_0)^2 / \varepsilon_0 + \varepsilon} & \varepsilon_0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (2)$$

gdje su:

- f'_c – tlačna čvrstoća UHPC-a
- $E_{initial}$ – početni modul elastičnosti UHPC-a
- $E_0 = f'_c / \varepsilon'_0$ – sekantni modul elastičnosti pri vršnome naprezanju f'_c
- ε'_0 – deformacija pri vršnome naprezanju f'_c
- ε'_{cu} – granična tlačna deformacija.

Vrijednost granične tlačne deformacije uzima se: 0,0035 za volumenski udio vlakana od 1,0 %, 0,0040 za volumenske udjele vlakana između 1 % i 3 % [31]. ε_L predstavlja deformaciju koja odgovara naprezanju $0,8 f'_c$ na silaznome dijelu dijagrama tlačnog naprezanja i deformacije, a određuje se izrazom (3) [32]:

$$\varepsilon_L = \varepsilon'_0 \left[0.125 \frac{E_{initial}}{E_0} + 0.8 + \sqrt{\left(0.125 \frac{E_{initial}}{E_0} + 0.8 \right)^2 - 0.8} \right] \quad (3)$$

2. Odnos vlačnog naprezanja i deformacije

Radi pojednostavljenja predloženog modela, vlačno ponašanje UHPC-a modelirano je prema radu [33], kako je to prikazano na slici 18.b.

$$\sigma = \begin{cases} f'_t \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{crack}} & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{crack} \\ f'_t & \varepsilon_{crack} < \varepsilon \leq \varepsilon'_{tu} \end{cases} \quad (4)$$

gdje ε_{crack} označava vlačnu deformaciju pri nastanku prve pukotine, a ε'_{tu} graničnu vlačnu deformaciju. Prema [33], uzima se $0,01H$, gdje je H ukupna visina poprečnog presjeka stupa. Vlačna čvrstoća UHPC-a f'_t određuje se izrazom (5) [34]:

$$f'_t = \eta_0 \eta_l \tau_f V_f \frac{l_f}{d_f} \quad (5)$$

gdje su:

- η – efektivni koeficijent orijentacije čeličnih vlakana (0,35 – 0,50) [34]
- η_l – koeficijent učinkovitosti duljine vlakana
- V_f – volumenski udio vlakana
- l_f – duljina vlakana
- d_f – promjer vlakana
- τ – kruto-plastična čvrstoća prionjivosti vlakana, određena eksperimentalno.

5.2.3. Armaturni čelik

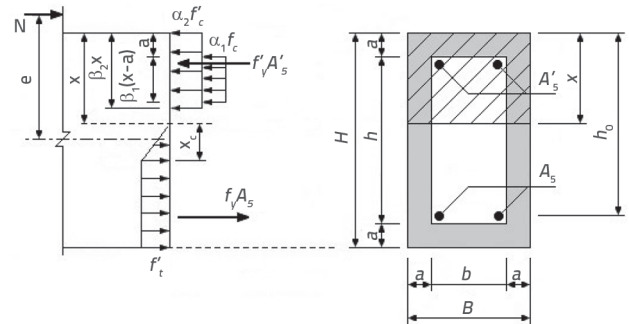
Odnos naprezanja i deformacije armature modeliran je idealiziranim elastoplastičnim modelom:

$$\sigma = \begin{cases} \varepsilon E_s & \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ f_y & \varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_{su} \end{cases} \quad (6)$$

gdje su E_s modul elastičnosti čelika, f_y granica popuštanja armature u vlaklu, ε_y deformacija pri granici popuštanja, f_y i ε_{su} granična deformacija armature.

5.3. Ekvivalentni pravokutni blok naprezanja

Kod elemenata opterećenih kombinacijom savijanja i tlačne sile raspodjela tlačnih naprezanja u betonu ili UHPC-u može se pojednostavljeno prikazati pomoću ekvivalentnoga pravokutnog bloka naprezanja, a kako je to prikazano na slici 19. [29, 35]. Na slici su označeni sljedeći parametri: B – ukupna širina ojačanog presjeka, H – ukupna visina ojačanog presjeka, h_0 – statička visina presjeka, odnosno udaljenost od tlačnog ruba do težišta vlačne armature, x – visina tlačne zone, x_c – udaljenost od prve pukotine do neutralne osi, a – debljina UHPC ovojnice, A_s – površina poprečnog presjeka vlačne armature, A'_s – površina poprečnog presjeka tlačne armature, e – ekscentricitet opterećenja, N – ekscentrično djelujuća tlačna sila, f_c – tlačna čvrstoća betona pri jednoosnom tlaku, f_v – granica popuštanja vlačne armature, f'_v – granica popuštanja tlačne armature, f'_c – tlačna čvrstoća UHPC-a i f'_t – vlačna čvrstoća UHPC-a.



Slika 19. Raspodjela naprezanja stupova ojačanih UHPC-om

Koeficijenti α_1 , α_2 , β_1 i β_2 definiraju geometriju ekvivalentnoga pravokutnog bloka naprezanja te se određuju prema izrazima navedenima u literaturi [29, 35]:

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1.0 & f_c \leq 23.1 \text{ MPa} \\ 0.94 + \frac{0.06(35.9 - f_c)}{12.8} & 23.1 \text{ MPa} < f_c < 35.9 \text{ MPa} \\ 0.94 & f_c = 35.9 \text{ MPa} \end{cases} \quad (7)$$

$$\alpha_2 = \begin{cases} 0.85 & f'_c \leq 69 \text{ MPa} \\ 0.85 - 0.0029(f'_c - 69) \geq 0.75 & f'_c > 69 \text{ MPa} \end{cases} \quad (8)$$

$$\beta_1 = \begin{cases} 0.80 & f_c \leq 23.1 \text{ MPa} \\ 0.74 + \frac{0.06(35.9 - f_c)}{12.8} & 23.1 \text{ MPa} < f_c < 35.9 \text{ MPa} \\ 0.74 & f_c = 35.9 \text{ MPa} \end{cases} \quad (9)$$

$$\beta_2 = \begin{cases} 0.85 & f'_c \leq 28 \text{ MPa} \\ 0.85 - 0.007252(f'_c - 28) \geq 0.65 & f'_c > 28 \text{ MPa} \end{cases} \quad (10)$$

5.4. Nosivost armiranog stupa

Prema slici 19., nosivost armiranog stupa treba biti u skladu sa sljedećim izrazima:

$$N \leq \alpha_1 \beta_1 f'_c (x - a) b + \alpha_2 f'_c a (B + 2(\beta_2 x - a)) + f'_y A'_s - f'_y A_s - f'_t (x_c + 2(H - x - x_c - a) + B) \quad (11)$$

$$N e \leq \alpha_1 \beta_1 f'_c (x - a) b \left(x - a - \frac{\beta_1 x}{2} \right) + \alpha_2 f'_c a B \left(x - \frac{a}{2} \right) + 2 \alpha_2 f'_c a (\beta_2 x - a) \left(x - \frac{\beta_2 (x + a)}{2} \right) + f'_y A'_s (h_0 + x - H) + f'_y A_s (h_0 - x) + \frac{2}{3} f'_t a x_c^2 + f'_t a (H - x - x_c - a) (H - x + x_c - a) + f'_t a B \left(H - x - \frac{x}{2} \right) \quad (12)$$

Izrazi (11) i (12) rješavaju se istodobno za zadani poprečni presjek i poznata svojstva materijala. Budući da visina neutralne osi x nije unaprijed poznata, primijenjen je iterativni postupak proračuna:

- Pretpostavi se početna vrijednost visine neutralne osi x (u pravilu između 0 i H).
- Na temelju pretpostavke ravnih presjeka izračunaju se deformacije svih materijala u presjeku.
- Iz odgovarajućih konstitutivnih zakona materijala (poglavlje 5.2.) odrede se pripadajuća naprezanja.
- Izračunaju se rezultantne unutarnjih sila u betonu, UHPC-u te armaturi u vlačnoj i tlačnoj zoni.
- Provjeri se zadovoljenje uvjeta ravnoteže: suma horizontalnih sila mora biti jednaka nuli (izraz (11)); mora biti zadovoljena ravnoteža momenata oko težišta presjeka (izraz (12)).
- Vrijednost visine neutralne osi x korigira se te se postupak ponavlja sve dok uvjeti ravnoteže ne budu zadovoljeni unutar unaprijed zadane tolerancije.
- Pripadajuća vrijednost sile N predstavlja predviđenu graničnu nosivost presjeka.

5.5. Usporedba proračunskih i eksperimentalnih rezultata

Radi provjere točnosti predloženih izraza za određivanje nosivosti armiranobetonskih stupova, proračunski dobivene vrijednosti uspoređene su s eksperimentalnim rezultatima, kako je to prikazano u tablici 6. Rezultati prikazani u tablici pokazuju dobro podudaranje između proračunski određenih i eksperimentalno izmjerenih vrijednosti nosivosti, čime se potvrđuje točnost i primjenjivost predloženog modela za procjenu nosivosti AB stupova ojačanih UHPC ovojnicama.

6. Zaključak

U ovome radu istraženi su monolitno ponašanje i granična nosivost armiranobetonskih (AB) stupova ojačanih UHPC ovojnicama. Na temelju ispitivanja osam uzoraka stupova te naknadno provedene analitičke analize mogu se izvesti sljedeći ključni zaključci:

Ključna uloga posmičnih spojnica: Eksperimentalni rezultati nedvojbeno pokazuju da ostvarenje učinkovitoga kompozitnog djelovanja i monolitnog ponašanja između postojećega armiranobetonskog stupa i vanjske UHPC ovojnice presudno ovisi o ugradnji dovoljnog broja posmičnih spojnica na sučelju. Kod uzoraka bez spojnica došlo je do prijevremenog sloma obilježenog znatnim gubitkom prionjivosti na sučelju i raslojavanjem UHPC ovojnice, čime su ozbiljno ograničeni iskorištenje superiornih mehaničkih svojstava UHPC-a i njegova učinkovitost kao materijala za ojačanje. Taj rezultat jasno potvrđuje da posmične spojnice nisu opcionalni element sustava ojačanja, već neophodan preduvjet za osiguranje prijenosa sila preko sučelja i potpuno iskorištenje potencijala AB stupova ojačanih UHPC-om.

Validirani analitički model za određivanje nosivosti: U radu predložen je racionalan analitički model za predviđanje granične tlačne nosivosti armiranobetonskih stupova ojačanih vanjskim UHPC ovojnicama sa spojnim elementima na sučelju. Model eksplicitno uzima u obzir doprinose izvorne armiranobetonske jezgre i UHPC ovojnice, uključujući učinke povećanog omeđenja i kompozitnog djelovanja koji se ostvaruju zahvaljujući ugrađenim spojnica. Točnost predloženog modela temeljito je provjerena usporedbom s eksperimentalnim rezultatima. Proračunski određene sile sloma pokazale su vrlo dobro podudaranje s

Tablica 6. Usporedba predviđenih i eksperimentalnih vrijednosti

Uzorci	a [mm]	N_u^c [kN]	N_u^t [kN]	N_u^c / N_u^t
C5	15	1090,4	1020	1,069
C6	25	1087,9	1100	0,989
C7	40	1455,3	1350	1,078
C8	50	1760,1	1590	1,107
Napomena: a = debljina UHPC ovojnice; N_u^c = predviđeno krajnje opterećenje; N_u^t = eksperimentalno krajnje opterećenje				

eksperimentalno izmjerenim vrijednostima. Tako visoka razina podudarnosti potvrđuje pouzdanost predloženog modela i njegovu prikladnost za praktičnu primjenu pri projektiranju.

Učinkovitost metode ojačanja: Vanjske UHPC ovojnice, uz pravilno projektirane i izvedene posmične spojnice, pokazale su se vrlo učinkovitom metodom za znatno povećanje nosivosti armiranobetonskih stupova. Ispitani uzorci sa spojnica ostvarili su znatno povećanje nosivosti u odnosu na referentni neojačani stup, čime je potvrđena učinkovitost UHPC-a kao materijala za ojačanje postojećih armiranobetonskih konstrukcija.

Zahvala

Autori izražavaju iskrenu zahvalnost dr. Tang Shougaou sa Sveučilišta Tongji te prof. Hou Xinluu sa Tehnološkog sveučilišta u Taiyuanu na njihovoj neprocjenjivoj potpori, stručnim savjetima i ohrabrenju tijekom provedbe ovog istraživanja. Autori također zahvaljuju tvrtkama *ZHONG CHENG Concrete Inc.* i *JUCHANG Reinforcement Materials* na donaciji materijala korištenih u eksperimentalnome dijelu istraživanja.

LITERATURA

- [1] Santos, P., Jùlio, E., Silva, V.: Correlation between concrete to concrete bond strength and the roughness of the substrate surface, *Construction and Building Materials*, 21 (2007) 8, pp. 1688-1695, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.044>
- [2] Zanotti, C., Borges, P.H.R., Bhutta, A., et al.: Bond strength between concrete substrate and meta kaolingeo polymer repair mortar: effect of curing regime and PVA fiber reinforcement, *Cement & Concrete Composites*, 80 (2017), pp. 307-316, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.12.014>
- [3] Randl, N.: Design recommendations for interface shear transfer in fib Model Code 2010. *Structural Concrete*, 14 (2013) 3, pp. 230-241.
- [4] OMAR MYM.: Análise Experimental de Pilares de Concreto Armado Reforçados com Concreto Auto-Adensável (CAA). Dissertação (Mestrado), UFG, Goiânia, Goiás, 2006.
- [5] Gomes, R.B., Borges, L.L.J., Sahb, K.F.P., Nascimento, P.P.: Reforço de Pilares com Concreto Auto-Adensável e Fibra de Carbono, 49th Congresso Brasileiro do Concreto. Anais. 2007.
- [6] Sahb, K.F.P.: Análise Experimental de Pilares de Concreto Armado Submetidos à Flexo-Compressão, Reforçados com Concreto Auto-Adensável e Chumbadores, 224f. Dissertação (Mestrado) UFG, Goiânia, Goiás, 2008.
- [7] Nascimento, P.P.: Análise experimental de pilares de concretoarmado submetidos à flexo-compressão, Reforçados com concreto auto- adensável econectores, Dissertacao (Mestrado), UFG, Goiania, Goias, 2009.
- [8] Masse, M.B., Bruhwiler, E.: Composite model for predicting the punching resistance of R-UHPFRC-RC composite slabs, *Engineering Structure*, 117 (2016), pp. 603-616, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.03.017>
- [9] Liu, J., Driver, R.G., Lubell, A.S.: Experimental study on short concrete columns with external steel collars, *ACI Structural Journal*, 108 (2011) 3, pp. 360-369, <https://doi.org/10.14359/51682352>
- [10] Wu, Y.F., Liu, T., Oehlers, D.J.: Fundamental principles that govern retrofitting of reinforced concrete columns by steel and FRP jacketing, *Advances in Structural Engineering*, 9 (2006) 4, pp. 507-533, <https://doi.org/10.1260/136943306778812769>
- [11] Minafó, G.: A practical approach for the strength evaluation of RC columns reinforced with RC jackets, *Engineering Structure*, 85 (2015), pp. 162-169, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.12.025>
- [12] Alhadid, M.M.A., Youssef, M.A.: Analysis of reinforced concrete beams strengthened using concrete jackets, *Engineering Structure*, 132 (2017), pp. 172-187, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.014>
- [13] FDLarrard, T.S.: Optimization of Ultra-High-Perforance Concrete by the Use of a Packing Model, *Cement and Concrete Research*, 24 (1994) 6, pp. 997-1009, [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90022-1)
- [14] Shafieifar, M., Farzad, M., Azizinamini, A.: Experimental and Numerical Study on Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC), *Construction and Building Materials*, 156 (2017), pp. 402-411, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.170>
- [15] Wille, K., Naaman, A.E., Parra-Montesinos, G.J.: Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150MPa (22 ksi): A Simpler Way, *ACI Material Journal*, 108 (2011) 1, pp. 34-46, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.145>
- [16] Martinola, G., Meda, A., Plizzari, G.A., Rinaldi, Z.: Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites*, 32 (2010) 9, pp. 731-739, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.001>
- [17] Al-Osta, M.A., Isa, M.N., Baluch, M.H., Rahman, M.K.: Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 134 (2017), pp. 279-296, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.094>
- [18] Beschi, C., Meda, A., Riva, P.: Column and joint retrofitting with high performance fiber reinforced concrete jacketing, *Journal of Earthquake Engineering*, 15 (2011) 7, pp. 989-1014, <https://doi.org/10.1080/13632469.2011.552167>
- [19] Meda, A., Mostosi, S., Rinaldi, Z., Riva, P.: Corroded RC columns repair and strengthening with high performance fiber reinforced concrete jacket, *Materials and Structures*, 49 (2016), pp. 1967-1978, <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0627-1>
- [20] Elsayed, M.B., Taye, B.A., Elmaaty, M.A., Aldahshoory, Y.: Behaviour of RC columns strengthened with Ultra-High Performance Fiber Reinforced concrete (UHPFRC) under eccentric loading, *Journal of Building Engineering*, 47 (2022), pp. 103857, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103857>
- [21] Paschalis, S.A., Lampropoulos, A.P.: Investigation of key parameters affecting the use of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) as strengthening material, *Structures*, 62 (2024), pp. 106257, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106257>

- [22] Aoude, H., Dagenais, F.P., Burrell, R.P., Saatcioglu, M.: Behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete columns under blast loading, *International Journal of Impact Engineering*, 80 (2015), pp. 185-202, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.02.006>
- [23] Dadvar, S.A., Mostofinejad, D., Bahmani, H.: Strengthening of RC columns by ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) jacketing, *Construction and Building Materials*, 235 (2020), pp. 117485, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117485>
- [24] Lampropoulos, A., Paschalis, S., Tsioulou, O., Dritsos, S.: Numerical Investigation of Reinforced Concrete (RC) Columns Strengthened with Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC) Jackets, *Materials*, 17 (2024) 14, pp. 3380, <https://doi.org/10.3390/ma17143380>
- [25] JGJ/T 101-2015: Specification for Seismic Test of Buildings, China Architecture and Building Press, Beijing, China, 2015.
- [26] Vintzeleou, E., Tassios, T.: Mathematical models for dowel action under monotonic and cyclic conditions, *Magazine of Concrete Research*, 38 (1986) 134, pp. 13-22, <https://doi.org/10.1680/MACR.1986.38.134.12>
- [27] Randl, N., Wicke, M.: Schubübertragung zwischen Alt- und Neubeton. *Beton- und Stahlbetonbau*, 95 (2000) 8, pp. 461-473.
- [28] Randl, N., Münger, F., Wicke, M.: Verstärkung von Brücken tragwerken durch Aufbeton. *Bauingenieur*, 4 (2005), pp. 207-214.
- [29] GB 50010-2010: Code for design of concrete structures, China Architecture and Building Press, Beijing, China, 2010.
- [30] Lu, Z.H., Zhao, Y.G., Asce, M.: Empirical stress strain model for unconfined high strength concrete under uniaxial compression, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, pp. 1181-1186, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000095](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000095)
- [31] Hassoun, M.N., Sahebjam, K.: Plastic hinge in two-span reinforced concrete beams containing steel fibers, *Canadian Society for Civil Engineering*, pp. 119-139, 1985.
- [32] Mohammed, A.S., Tamer, M.E., Bothaina, O.: Analysis of RC columns strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete jackets under eccentric loading, *Engineering Structures*, 220 (2020), pp. 111016, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111016>
- [33] Xu, M.X., Liang, X.W., Wang, P., Wang, Z.Y.: Theoretical investigation on normal section flexural capacity of UHPC beams, *Engineering Mechanics*, 36 (2019) 8, pp. 70-78, <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2018.06.0307>
- [34] Abrishambaf, A., Pimentel, M., Nunes, S.: Influence of fibre orientation on the tensile behavior of ultra-high performance fibre reinforced cementitious composites, *Cement & Concrete Research*, 97 (2017): 28-40, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.007>
- [35] Mertol, H.C., Rizkalla, S., Zia, P., Mirmiran, A.: Characteristics of compressive stress distribution in high-strength concrete, *ACI Structural Journal*, 105 (2008) 5, pp. 626-633, <https://doi.org/10.14359/19946>
- [36] Guri, Z., Ristic, J., Ristic, D.: Nonlinear response of RC column models under real earthquakes and axial loads, *GRAĐEVINAR*, 76 (2024) 10, pp. 919-930, <https://doi.org/https://doi.org/10.14256/JCE.3947.2024>
- [37] Peker, O., Altan, M.F.: Software development for retrofitting columns with FRP composites: A case study, *GRAĐEVINAR*, 76 (2024) 2, pp. 139-148, <https://doi.org/10.14256/JCE.3738.2023>
- [38] Nechevska-Cvetanovska, G., Roshi, A., Bojadjeva, J., Bojadjev, J., Trajcevski, Z.: Quasi-static tests on RC building columns strengthened with CFRP, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 8, pp. 805-818, <https://doi.org/10.14256/JCE.3087.2020>