

Primljen / Received: 23.1.2019.

Ispravljen / Corrected: 10.5.2018.

Prihvaćen / Accepted: 24.6.2018.

Dostupno online / Available online: 10.3.2020.

# Mehanička svojstva spoja betonskog stupa ovijenog PVC-CFRP-om i AB grede pri osnom opterećenju

## Autori:



Prof. dr. sc. **Feng Yu**, dipl.ing. građ.  
[yufeng2007@126.com](mailto:yufeng2007@126.com)



**Zilong Li**, dipl.ing. građ.  
[708911028@qq.com](mailto:708911028@qq.com)



Doc. dr. sc. **Fang Yuan**, dipl.ing. građ.  
[fyuan86@126.com](mailto:fyuan86@126.com)  
Autor za korespondenciju



**Defeng Zhu**, dipl.ing. građ.  
[760773504@qq.com](mailto:760773504@qq.com)



Dr. sc. **Zhengyi Kong**, dipl.ing. građ.  
[kzy2004@126.com](mailto:kzy2004@126.com)

Tehnološko sveučilište Anhui, Kina  
Fakultet građevinarstva i arhitekture

Prethodno priopćenje

**Feng Yu, Zilong Li, Yuan Fang, Defeng Zhu, Zhengyi Kong**

## Mehanička svojstva spoja betonskog stupa ovijenog PVC-CFRP-om i AB grede pri osnom opterećenju

U radu je prikazano eksperimentalno istraživanje oblika loma, granične čvrstoće, deformacija i krivulja opterećenje-pomak spoja betonskog stupa obavijenog PVC-CFRP-om i AB grede (PCRBj) za slučaj osnog opterećenja. Uzorci spoja betonskog stupa obavijenog PVC-om i AB grede (PRBj) i devet uzoraka PCRBj projektirani su prema načelu slabog stupa i čvrstog spoja. Predložen je pristup numeričke analize za prikladno predviđanje krivulje opterećenje – pomak. Utvrđeno je da se numerički predviđene vrijednosti dobro podudaraju s rezultatima ispitivanja.

### Ključne riječi:

PVC-FRP, udio armature, spoj, prstenasta greda, osno opterećenje, krivulja opterećenje- pomak

Research Paper

**Feng Yu, Zilong Li, Yuan Fang, Defeng Zhu, Zhengyi Kong**

## Mechanical behaviour of PVC-CFRP confined concrete column with RC beam joint subjected to axial load

An experimental investigation on failure mode, ultimate strength, strain variation, and load-displacement curves of PVC-CFRP confined concrete column with reinforced concrete (RC) beam joint (PCRBj) subjected to axial load was conducted in this study. Samples of a PVC confined concrete column with RC beam joint (PRBj) and nine PCRBjs were designed using the principle of weak column and strong joint. A numerical analysis approach for convenient prediction of the load-displacement curve of specimen was proposed. It was established that the estimated values are in good agreement with test data.

### Key words:

PVC-FRP, reinforcement ratio, joint, ring beam, axial load, load-displacement curve

Vorherige Mitteilung

**Feng Yu, Zilong Li, Yuan Fang, Defeng Zhu, Zhengyi Kong**

## Mechanische Eigenschaften der Verbindung der mit PVC-CFK umwickelten Betonsäulen und der Stahlbetonträger bei Achsbelastung

Die Abhandlung präsentiert eine experimentelle Untersuchung der Bruchform, der Grenzfestigkeit, der Verformung und der Last-Verschiebungskurve der Verbindung einer mit PVC-CFK umwickelten Betonsäule und eines Stahlbetonträgers (PCRBj) im Fall einer Achsbelastung. Die Proben der mit PVC umwickelten Betonsäule und des Stahlbetonträgers (PCRBj) und neun Proben des PCRBj wurden gemäß dem Grundsatz einer schwachen Säule und einer festen Verbindung konstruiert. Vorgeschlagen wurde ein numerischer Analyseansatz, um eine Last-Verschiebungskurve angemessen vorherzusagen. Festgestellt wurde, dass die numerisch vorhergesagten Werte gut mit den Testergebnissen übereinstimmen.

### Schlüsselwörter:

PVC-FRP, Bewehrungsanteil, Verbindung, Ringträger, Achsbelastung, Last-Verschiebungskurve

## 1. Uvod

Polimer armiran vlaknima (eng. *Fibre reinforced polymer* - FRP) često se koristi u sanacijskim radovima zbog njegove trajnosti, otpornosti na zamor, prikladne strukture i otpornosti na koroziju. Upotrebom FRP-a već su postignuti vrlo dobri rezultati ojačanja konstrukcija pri sanaciji konstrukcijskih elemenata kao što su zidovi, stupovi, grede i ploče [1-8]. Kod elemenata ojačanih FRP-om uočavaju se poboljšana svojstva nosivosti, duktilnosti i seizmičke otpornosti. U novije se vrijeme predlaže upotreba FRP-a u izvođenju novih Konstrukcijskih elemenata kao što su betonom ispunjene četvrtaste čelične cijevi s FRP ovojem [9], betonske grede ojačane FRP-om [10] te betonski stupovi obavijeni FRP-om [11].

Mirmiran [11] predlaže stupove od FRP cijevi ispunjenih betonom te eksperimentalnim putem istražuje njihovo ponašanje. Rezultati tog istraživanja pokazali su da cijevi od FRP-a daju dodatnu čvrstoću betonskoj jezgri te da se tako znatno povećava granična čvrstoća i duktilnost stupova od FRP cijevi ispunjenih betonom. Međutim, visoka cijena nepovoljno utječe na primjenu FRP cijevi u graditeljstvu. Zato je Saafi [12] predložio stupove obavijene kombiniranim materijalom PVC-CFRP (PFCC) u kojem se na uzlijebljenom dijelu koristi financijski prihvatljivija PVC cijev obavijena CFRP trakama. Iako je kod uzlijebljenih PVC-FRP cijevi ostvareno bitno povećanje granične čvrstoće i duktilnosti betona, problematična je mogućnost ranog otkazivanja PVC cijevi na uzlijebljenom dijelu uslijed koncentracije naprezanja. Kako bi se premostio ovaj nedostatak, Yu [13, 14] predlaže neuzlijebljene PFCC elemente. Granična čvrstoća i duktilnost betona u jezgri znatno je u tom slučaju veća u usporedbi s uzlijebljenim PFCC-om. Jiang [15] i Ma [16] proveli su analizu konačnim elementima kako bi istražili ponašanje PFCC-a pod utjecajem osnog opterećenja. Rezultati su pokazali da na nosivost bitno utječu koeficijent vitkosti i slojevi CFRP traka. Predložena je pojednostavljena formula za predviđanje granične čvrstoće koja se bazira na rezultatima ispitivanja. Fakharifar [17] je analizirao utjecaj vrste i debljine FRP cijevi, stišljive pjene i zone opterećenja na ponašanje PFCC-a. Fakharifar [18] je proveo ispitivanje seizmičke otpornosti PFCC-a te je utvrdio da PFCC ima visoku graničnu čvrstoću i duktilnost. Jiang [19] je cikličkim opterećivanjem analizirao utjecaj koeficijenta osne sile, sloja i vrste FRP-a na kompozitni AB stup kružnog presjeka u FRP-PVC cijevi. Utvrđena su dobra

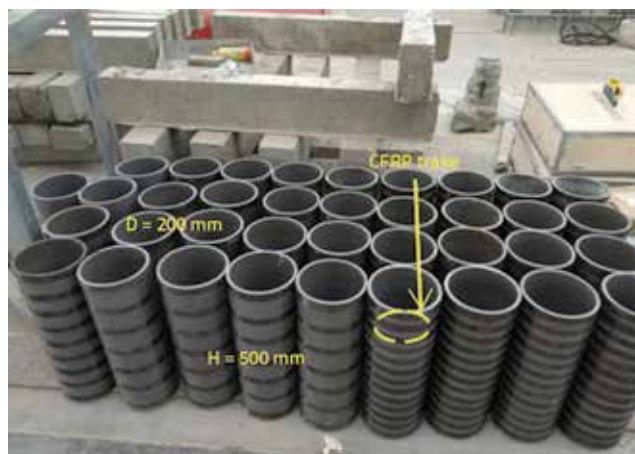
seizmička svojstva PFCC-a isto kao i visoka potrošnja energije. Yu [20, 21] je analizirao utjecaj raznih parametara kao što su razmak CFRP traka, koeficijent posmične zone i koeficijent osne sile na seizmičko ponašanje PFCC-a.

Kao što je navedeno, PFCC je predmet analize brojnih radova. Međutim, nema mnogo istraživanja o mehaničkom ponašanju PCRBJ-a. U ovom se radu analizira utjecaj parametara  $b$ ,  $h$ ,  $\rho$ ,  $\rho_{sv}$  i  $s'_f$  na ponašanje PCRBJ-a za slučaj osnog opterećenja.

## 2. Eksperimentalni program

### 2.1. Pripremanje uzoraka

Uzorci korišteni u ispitivanju, tj. devet uzoraka PCRBJ i jedan uzorak PRBJ, pripremljeni su po načelu slabog stupa i čvrstog spoja. Vanjski promjer ( $D$ ) iznosio je 200 mm, debljina ( $t$ ) 7,8 mm, a visina ( $H$ ) 500 mm. Dva sloja CFRP traka omotana su oko PVC cijevi. Širina CFRP traka iznosila je 20 mm, a debljina 0,22 mm (slika 1.). Tri sloja CFRP traka omotana su na kontaktu spoja i stupa kako bi se izbjeglo prerano popuštanje na kontaktu između stupa i AB grednog spoja. Promjer poprečne armature (vilica) iznosio je 6 mm, a promjer uzdužne armature 10 mm. Koeficijent poprečne armature u dužini 150 mm od spoja iznosio je 1,18 %, a u preostalom dijelu uzorka (350 mm) iznosio je 0,59 %. Koeficijent uzdužne armature iznosio je 2 %. Dodatne pojedinosti prikazane su na slici 2.

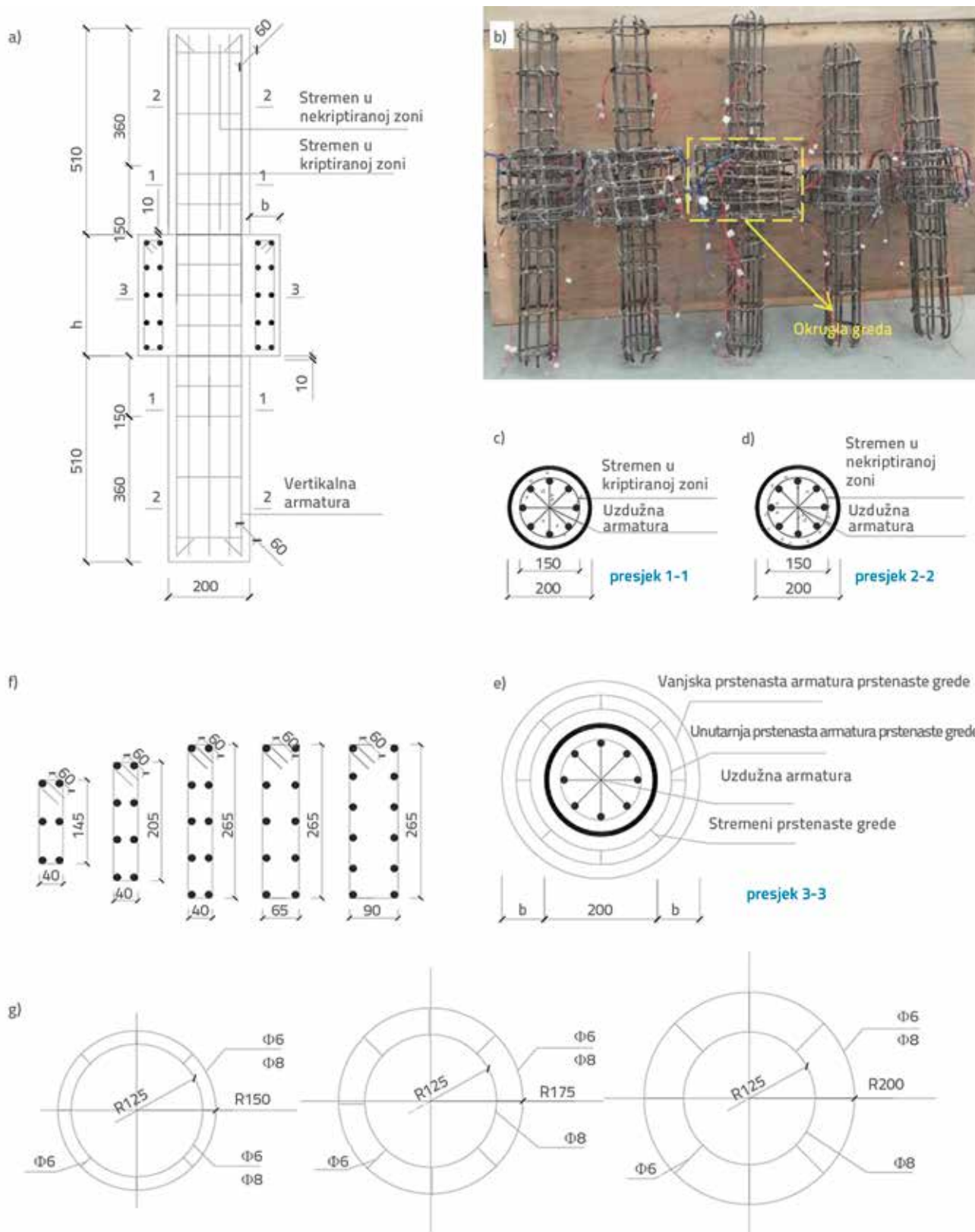


Slika 1. PVC-CFRP cijevi

Tablica 1. Parametri uzoraka

Oznaka uzorka	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
$b \times h$ (mm×mm)	75×300	100×300	125×300	75×180	75×240	75×300	75×300	75×300	75×300	75×300
$\rho$ [%]	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.85	2.25	1.45	1.45	1.45
$\rho_{sv}$ [%]	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	1.70	0.85
$s'_f$ [mm]	60	60	60	60	60	60	60	40	60	-

Napomena:  $b$  - širina;  $h$  - visina prstenaste grede;  $\rho$  - koeficijent uzdužne armature;  $\rho_{sv}$  - koeficijent poprečne armature;  $s'_f$  - razmak CFRP traka.



Slika 2. Detaljni prikaz armature uzoraka: a) Uzdužni presjek; b) Armaturni koševi; c) 1-1; d) 2-2; e) 3-3; f) Poprečna armatura u prstenastoj gredi; g) Armatura prstenaste grede

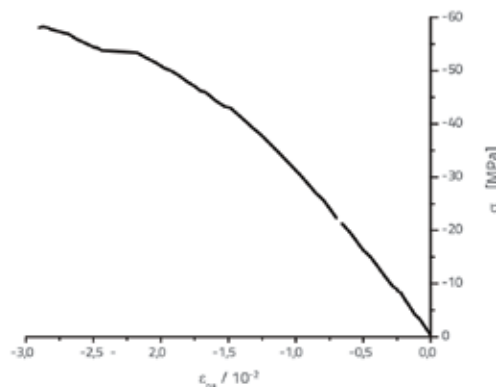
Razmaci u ovijanju CFRP traka iznosili su 40 mm i 60 mm. U ispitivanju je korišteno pet različitih presjeka prstenaste grede: 75 mm x 300 mm, 100 mm x 300 mm, 125 mm x 300 mm, 75 mm x 180 mm i 75 mm x 240 mm. U prstenastim su gredama koeficijenti armiranja iznosili su 1,45 %, 1,855 % i 2,25 %, a koeficijenti poprečne armature 0,85 % i 1,70 %, kako je to prikazano u tablicii 1. Svi elementi svakog podsklopa betonirani su u isto vrijeme (slika 3.).



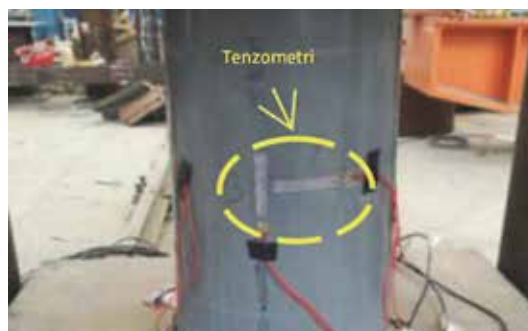
Slika 3. Postupak izrade uzoraka: a) Postavljanje armaturnog koša; b) PRBJ i PCRBJ

## 2.2. Svojstva materijala

U ovom je radu za armaturu korišten čelik klase HPB300 i beton klase C35. Mehanička svojstva čelika određena su prema kineskom propisu "Metalni materijali – Ispitivanje vlačne čvrstoće – Prvi dio: Metoda ispitivanja na sobnoj temperaturi" (GB/T228.1 – 2010) [22], kao što je to prikazano u tablici 2. Krivulja naprezanja-deformacije PVC cijevi definirana je centričnim tlačnim ispitivanjem prema kineskim propisima GB/T 8804.1 - 2003 [23] i GB/T 3354 - 2014 [24] (slika 4.). Izvijanje PVC cijevi prikazano je na slici 5. Vlačna čvrstoća iznosila je 62 MPa za PVC, tj. 3903 MPa za CFRP. Čvrstoća betona procijenjena je na temelju metode ispitivanja definirane u kineskom propisu "Norma za ispitivanje mehaničkih svojstava običnog betona" (GB/T 50081- 2002) [25]. Tlačna čvrstoća iznosila je 24 MPa, a modul elastičnosti  $2,4 \times 10^4$  MPa, tablica 3.



Slika 4. Krivulja naprezanje-deformacije za PVC cijev



Slika 5. Oblik loma PVC cijevi

Tablica 2. Mehanička svojstva armature

Vrsta armature	Granica popuštanja [MPa]	Vlačna čvrstoća [MPa]
Φ6	291	504
Φ8	277	430
Φ10	351	554

Tablica 3. Mehanička svojstva betona

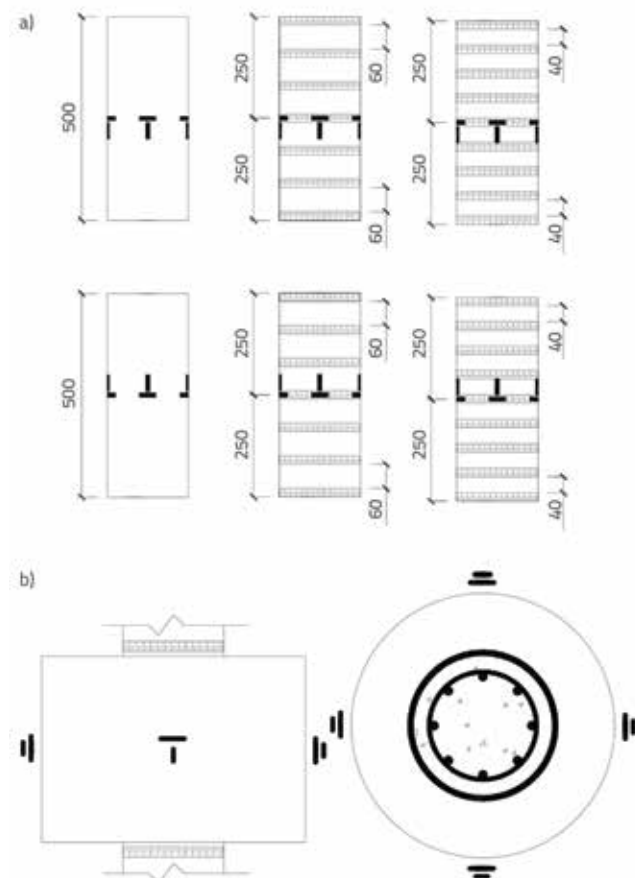
Broj uzorka	Klasa betona	Tlačna čvrstoća kocke [MPa]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Modul elastičnosti [ $10^4$ MPa]	Prosječna tlačna čvrstoća [MPa]
1	C35	36	24	2,4	24
2		36	24		
3		35	23		

## 2.3. Postupak nanošenja opterećenja i raspored uređaja

Ispitivanje je provedeno pomoću elektronske hidraulične tlačne preše sa servouređajem tipa YAW-5000F. Ispitivanje je počelo pet-postotnim predopterećenjem od procijenjene granične čvrstoće kako bi se potvrdila ispravnost svih uređaja. Eksperiment se provodio kontrolom sile i kontrolom pomaka.

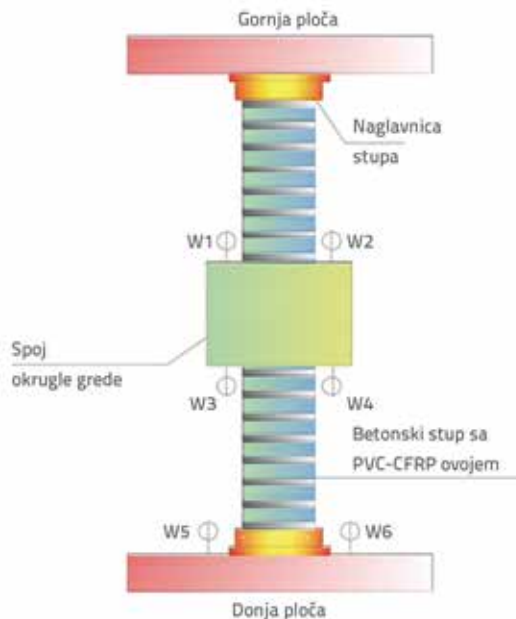


Na početku eksperimenta opterećenje se nanosilo kontrolom sile, brzinom od 50 kN/min, i to u koracima od 1/10 od procijenjene granične čvrstoće uzorka. U svakom koraku opterećenje je održavano na istoj razini u vremenu od dvije minute. Nakon što je centrično tlačno opterećenje doseglo razinu otprilike 90 % od procijenjene granične čvrstoće, daljnji postupak opterećenja provodio se kontrolom pomaka, brzinom od 0,5 mm/min. Postupak ispitivanja završio bi kada bi se opterećenje spustilo na 85 % vrijednosti granične čvrstoće. Četiri tenzometra zalijepljena su po obodu CFRP trake, a druga četiri postavljena su u uzdužnom smjeru PVC cijevi kako bi se pratila obodna i uzdužna deformacija betonskog stupa u PVC-CFRP cijevi, slika 6.



Slika 6. Raspored tenzometara na uzorku: a) na PVC-CFRP cijevima; b) u spojnoj zoni

Uz to je osam tenzometara (pod kutom od  $90^\circ$ ) postavljeno u poprečnom i uzdužnom smjeru u sredinu spojne zone radi mjerenja poprečnih i uzdužnih deformacija u spojnoj zoni. Dva induktivna osjetila za mjerenje pomaka (W5 i W6) postavljena su na dno uzorka radi mjerenja uzdužne deformacije, a dodatna četiri osjetila (W1, W2, W3 i W4) postavljena su na donjoj i gornjoj plohi spojne zone radi mjerenja uzdužne deformacije u spojnoj zoni. Detaljan raspored uređaja prikazan je na slici 7.



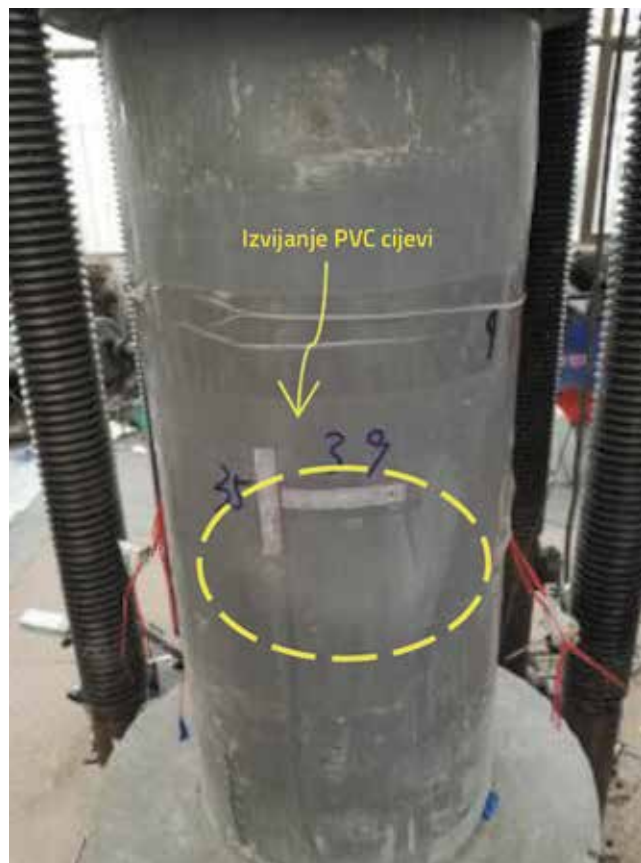
Slika 7. Raspored ispitivanja

### 3. Eksperimentalni rezultati i rasprava

#### 3.1. Oblik loma

##### 3.1.1. Uzorak PRBJ

Na uzorku PRBJ do oštećenja je došlo izvijanjem uzdužne armature i PVC cijevi. Oštećenje uzorka u elastičnoj fazi nije bilo značajno. Deformacija betona napredovala je sporo, a PVC cijev nije bitno utjecala na beton. Kako je opterećenje raslo, na uzorku



Slika 8. Oblik loma PRBJ uzorka

se razvijaju pukotine. Nakon toga je nastupila nagla ekspanzija betona u jezgri, pa se nekoliko malih pukotina pojavilo u zoni spoja, gdje su se zatim te pukotine kontinuirano širile. Osim toga, deformacije PVC cijevi i uzdužne armature ubrzano su rasle. Do popuštanja uzdužne armature došlo je kada je opterećenje poraslo na otprilike 80 % granične čvrstoće uzorka. Na kraju je nastupilo izvijanje PVC cijevi (slika 8.).

### 3.1.2. Uzorak PCRBJ

Do oštećenja uzorka PCRBJ došlo je otvaranjem pukotina na PVC cijevi i pucanjem CFRP traka. Proces popuštanja PCRBJ uzorka odvijao se u tri faze. U elastičnoj fazi, isto kao i kod uzorka PRBJ, deformacija nije bila izražena. Deformacija betona, CFRP traka i uzdužne armature rasla je polako, a PVC cijev nije bitno utjecala na beton. Pri povećanju opterećenja, na uzorku se razvijaju pukotine. Nekoliko malih vertikalnih pukotina otvorilo se u zoni spoja. Raste poprečna deformacija betona, a pukotine u betonu počele su se kontinuirano širiti. Deformacije CFRP trake i PVC cijevi se naglo povećavaju, a uočen je znatan zaštitni utjecaj PVC-CFRP cijevi na stup. Kada se opterećenje povećalo na otprilike 90 % granične čvrstoće, začuo se glasan zvuk koji je označavao lom CFRP traka. Zatim je došlo do pucanja PVC cijevi (slika 9.).



Slika 9. Oblik loma uzorka PCRBJ

## 3.2. Granična čvrstoća

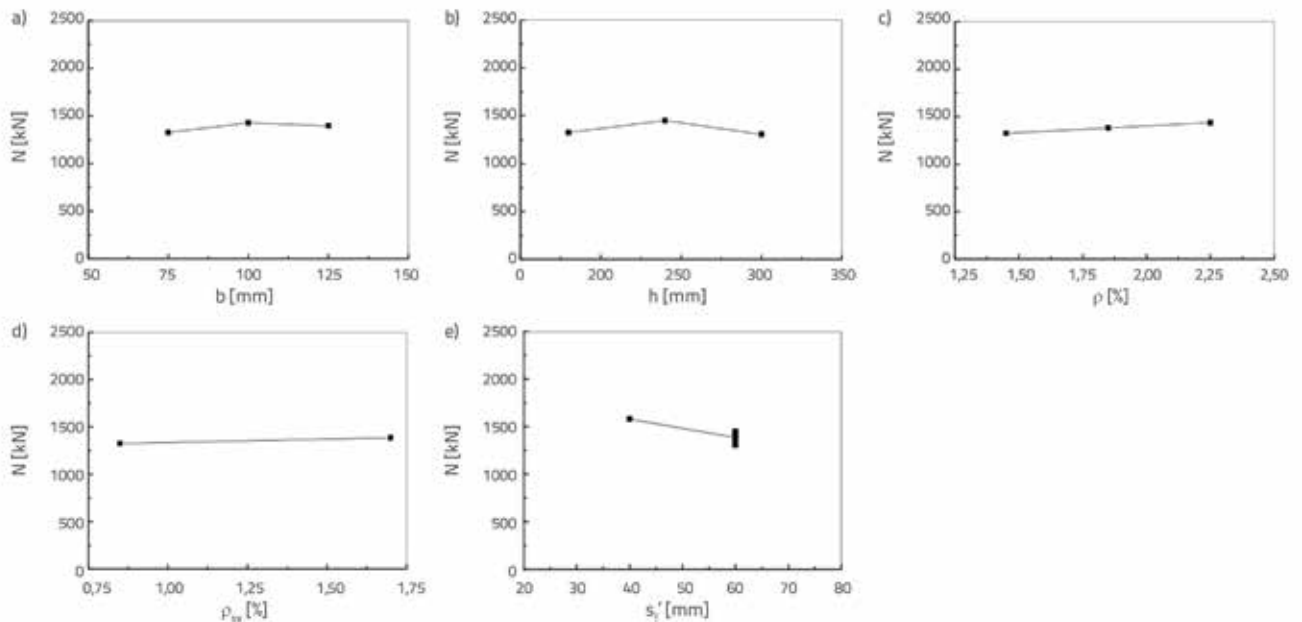
Utjecaj svih analiziranih parametara na graničnu čvrstoću prikazan je na slici 10. Očit je značajan utjecaj vrijednosti  $s_f$  na graničnu čvrstoću uzorka, tj. granična čvrstoća uzorka smanjila se s povećanjem vrijednosti  $s_f$ . To bi se moglo objasniti činjenicom da je kod povećanja vrijednosti  $s_f$  došlo do smanjenja zaštitnog djelovanja CFRP traka na uzorak.

Na primjer, granična čvrstoća uzorka PCRBJ s razmakom traka od 40 mm bila je za 13,8 % viša od granične čvrstoće uzorka s razmakom od 60 mm. S druge strane, nema vidljivog utjecaja vrijednosti  $b$ ,  $h$ ,  $\rho$ ,  $\rho_{sv}$  na graničnu čvrstoću uzorka. Granična čvrstoća uzorka povećala se za 4,1 %, a vrijednost  $\rho$  od 1,45 % povećala se na 1,85 %.

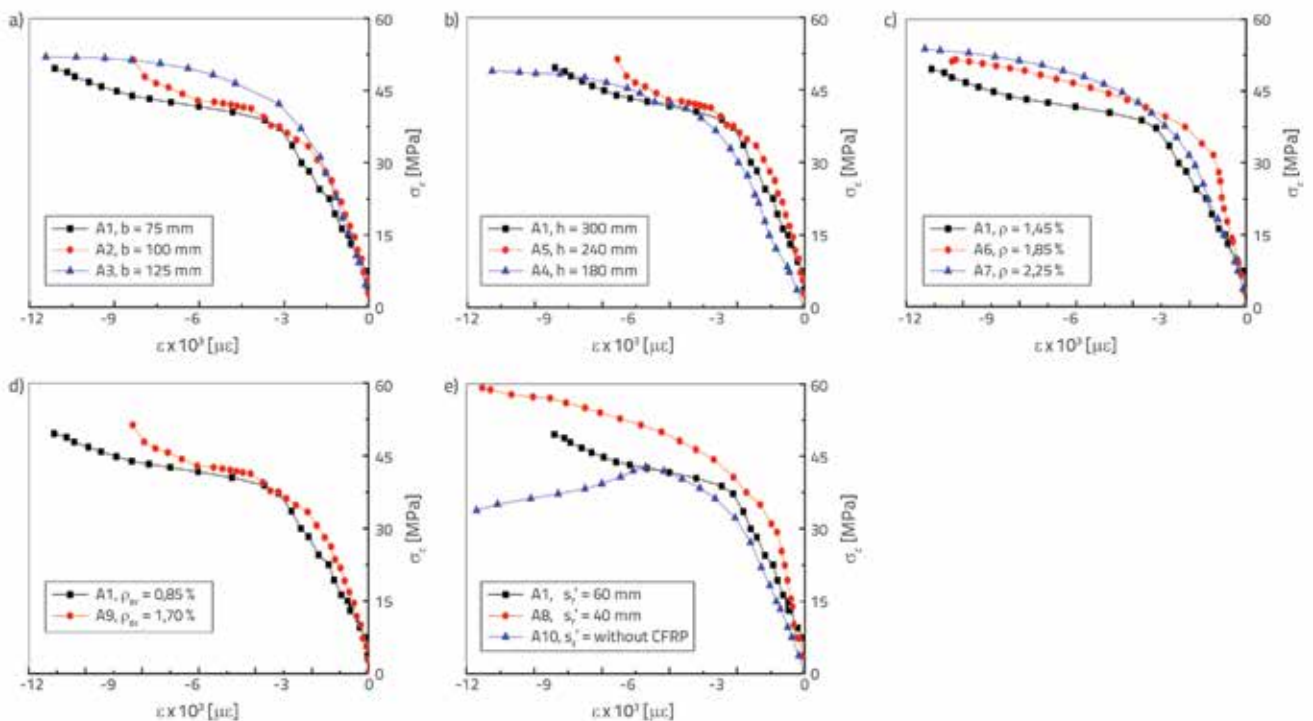
## 3.3. Razvoj deformacije

### 3.3.1. Uzdužna deformacija PVC cijevi

Krivulje naprezanja i deformacije ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) prikazane su na slici 11. Očito je da u elastičnoj fazi s povećanjem naprezanja dolazi do linearnog povećanja uzdužne deformacije PVC cijevi.



Slika 10. Utjecaj različitih parametara na graničnu čvrstoću uzorka PCRBJ: a) širina; b) visina; c) koeficijent armature; d) koeficijent poprečne armature; e) razmak CFRP trake



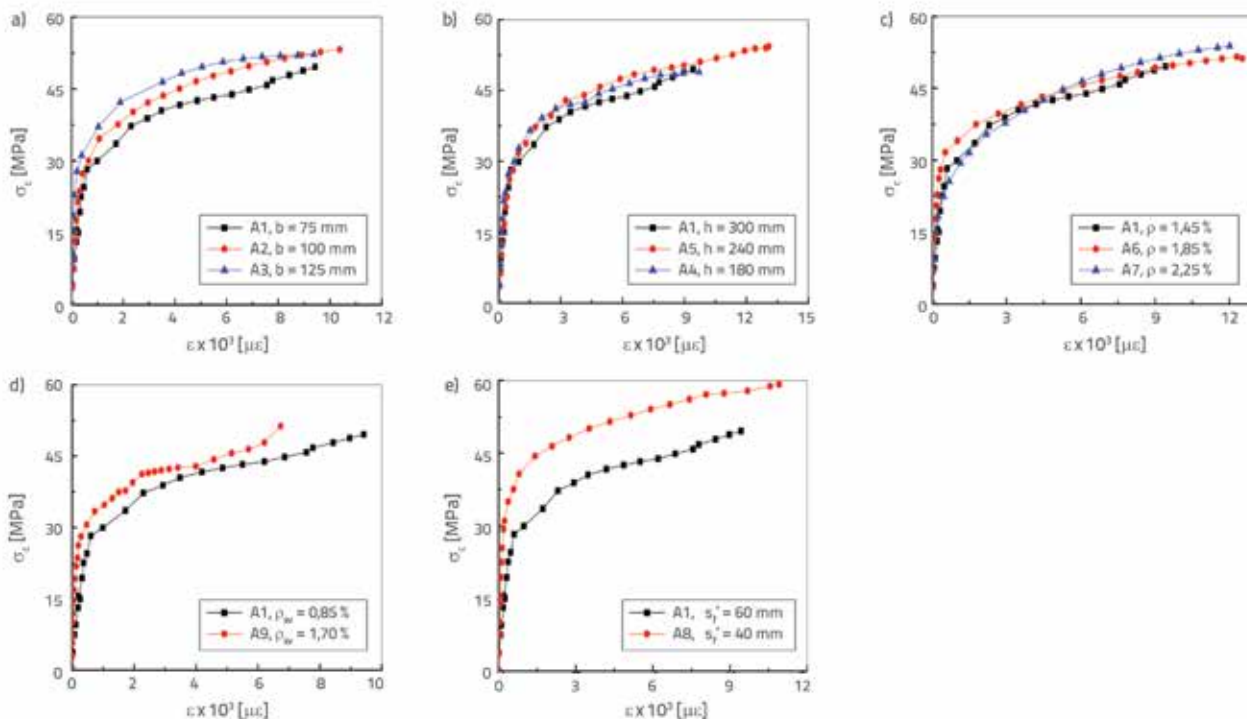
Slika 11. Utjecaj različitih parametara na uzdužnu deformaciju PVC cijevi: a) širina; b) visina; c) udio uzdužne armature; d) udio poprečne armature; e) razmak CFRP traka

S povećanjem opterećenja, uzorak PCRBJ ulazi u fazu pojave pukotina. Očita je poprečna deformacija betona, a nekoliko manjih pukotina pojavilo se u zoni spoja. Uzdužna deformacija PVC cijevi dalje se ponaša nelinearno, s većim prirastom pri manjem porastu naprežanja. Zatim je uzorak PCRBJ ušao u fazu očvršćivanja, što se očituje povećanjem naprežanja PVC

cijevi usporedo s povećanjem deformacije. I, na kraju, uzorak PCRBJ dosegao je graničnu čvrstoću i došlo je do pucanja PVC cijevi.

Osim toga, treba napomenuti da različiti parametri nisu bitno utjecali na uzdužnu deformaciju PVC cijevi u elastičnoj fazi. Granična uzdužna deformacija PVC cijevi smanjila se s



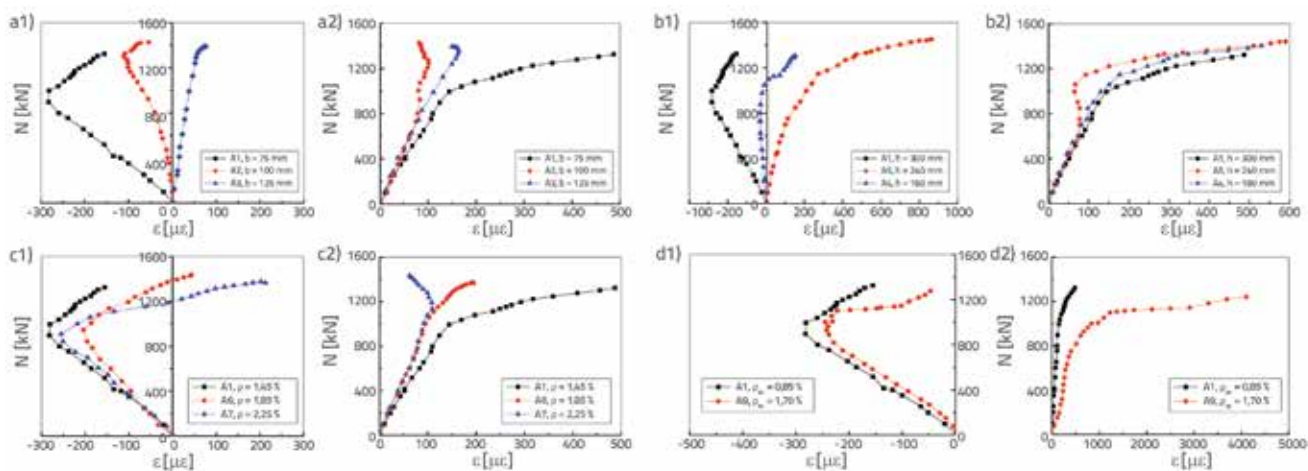


Slika 12. Utjecaj raznih parametara na obodnu deformaciju CFRP traka: a) širina; b) visina; c) udio uzdužne armature; d) udio poprečne armature; e) razmak CFRP traka

povećanjem vrijednosti  $s'_f$  ili  $\rho_{sv}$ . S druge strane, ne uočava se značajan utjecaj vrijednosti  $b$ ,  $h$ ,  $\rho$  na graničnu deformaciju PVC cijevi. Na primjer, granična deformacija PVC cijevi porasla je za 2,1 % kada se vrijednost  $\rho$  povećala s 1,45 % na 2,25 %. U usporedbi s uzorkom PCRBJ, kod uzorka PRBJ nije došlo do očvršćivanja, tj. PVC cijev izvila se ranije, kao što se to vidi na slici 11.e. Stoga se može zaključiti da se uzorak PCRBJ bolje ponaša od uzorka PRBJ.

### 3.3.2. Obodna deformacija CFRP trake

Odnos između vrijednosti  $\sigma$ - $\epsilon$  CFRP traka opisan je na slici 12. Za krivulje naprezanje-deformacije karakteristične su tri faze: elastična faza, faza razvoja pukotina i faza očvršćivanja. U elastičnoj fazi, deformacija CFRP traka povećava se linearno s povećanjem naprezanja. Kod daljnjeg povećanja naprezanja uzorak PCRBJ ulazi u fazu razvoja pukotina, nakon čega



Slika 13. Uzdužna i poprečna deformacija betona: a) utjecaj širine prstenaste grede na deformaciju betona i to na: uzdužnu deformaciju (a1) i poprečnu deformaciju (a2); b) utjecaj visine prstenaste grede na deformaciju betona i to na: uzdužnu deformaciju (b1) i poprečnu deformaciju (b2); c) utjecaj udjela armature u prstenastoj gredi na deformaciju betona i to na: uzdužnu deformaciju (c1) i poprečnu deformaciju (c2); d) utjecaj koeficijenta poprečne armature u prstenastoj gredi na deformaciju betona to na: uzdužnu deformaciju (d1) i poprečnu deformaciju (d2)



je zabilježeno popuštanje uzdužne armature. Nakon toga uzorak PCRBJ ulazi u fazu očvršćivanja i znatno se povećava deformacija CFRP traka. I, na kraju, uzorak PCRBJ dosegao je graničnu čvrstoću te je došlo do pucanja PVC cijevi.

Očito je da su utjecaji svih analiziranih parametara na deformaciju CFRP traka bili slični onima koji su zabilježeni kod PVC-CFRP cijevi, kao što se to može vidjeti na slici 12. Povećanje vrijednosti  $s_f'$  ili  $\rho_{sv}$  dovelo je do smanjenja granične deformacije CFRP traka. Utjecaj vrijednosti  $b$ ,  $h$  i  $\rho$  na CFRP trake nije bio uočljiv.

### 3.3.3. Deformacija betona u zoni spoja

Utjecaj parametara  $b$ ,  $h$ ,  $\rho$  i  $\rho_{sv}$  na uzdužnu i poprečnu deformaciju betona opisan je na slici 13. U početku je deformacija betona u zoni spoja rasla linearno, a uzorak PCRBJ je bio u elastičnoj zoni. Beton u zoni spoja uvijek je bio u vlačnom stanju naprezanja u poprečnom smjeru. S povećanjem vrijednosti  $b$  i smanjenjem vrijednosti  $h$  prstenaste grede, smanjuju se poprečne i uzdužne deformacije betona u zoni spoja, dok je uzdužna deformacija betona u zoni spoja postupno prelazila iz tlaka u vlak, kao što se to vidi na slikama 13.a i 13.b. To se može objasniti činjenicom da u betonu oko zone spoja dolazi do ekstruzije zbog povećanja uzdužne deformacije betona. Rastom vrijednosti  $b$  povećava se efekt ojačanja betona u zoni spoja, te se smanjuje poprečna deformacija betona u zoni spoja. Međutim, povećanje vrijednosti  $h$  nepovoljno je djelovalo na poprečnu i uzdužnu deformaciju betona u zoni spoja. Poprečna deformacija betona u zoni spoja smanjivala se s povećanjem vrijednosti  $\rho$ , a utjecaj vrijednosti  $\rho$  na uzdužnu deformaciju nije bio očit, kao što se to vidi na slici 13.c. To možda proizlazi iz činjenice da povećanje vrijednosti  $\rho$

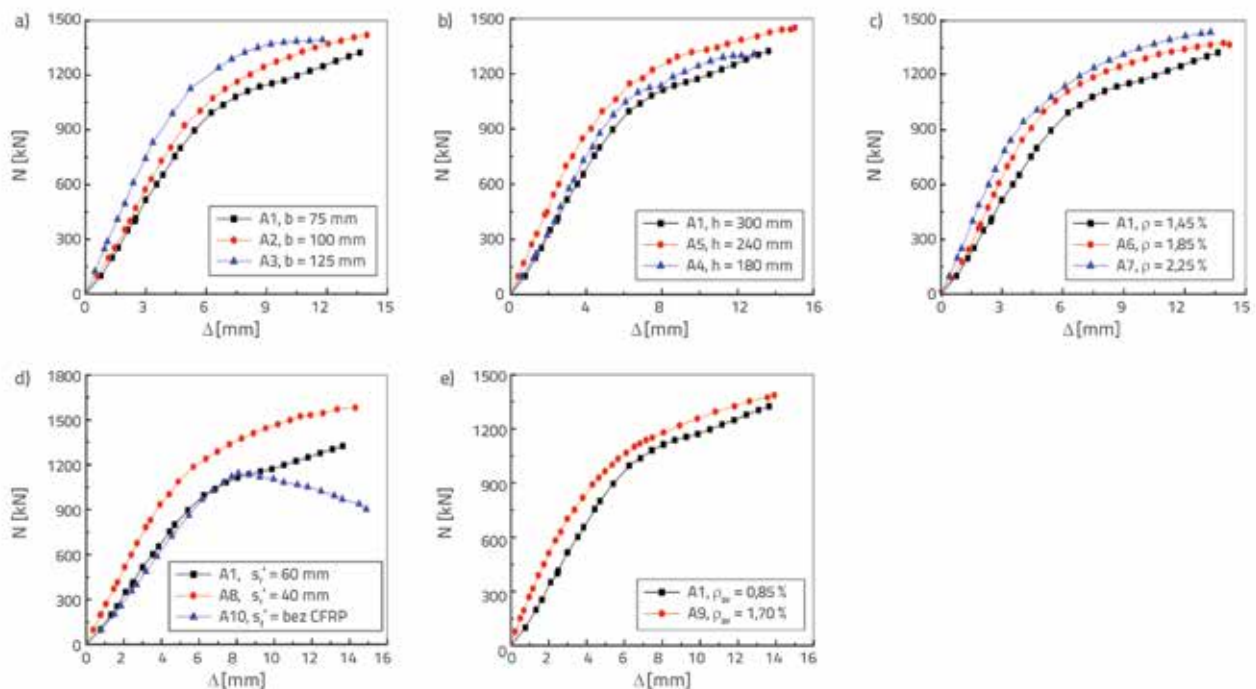
dovodi do povećanja efekta ojačanja betona u jezgri spoja, te do smanjenja poprečne deformacije betona u zoni spoja, što djelotvorno priječi razvoj vertikalnih pukotina u zoni spoja.

S povećanjem vrijednosti  $\rho_{sv}$  smanjivale su se uzdužne deformacije betona u zoni spoja, kao što se to vidi na slici 13.d. Razlog tome je uglavnom povećani efekt ojačanja betona u jezgri spoja, te smanjenje uzdužne deformacije betona u zoni spoja istodobno s povećanjem vrijednosti  $\rho_{sv}$ , što je u velikoj mjeri spriječilo razvoj bočnih pukotina u zoni spoja. Utjecaj vrijednosti  $\rho_{sv}$  na poprečnu deformaciju u zoni spoja nije bio očit.

### 3.4. Krivulja opterećenje-pomak

Slika 14. prikazuje odnos između opterećenja i pomaka uzoraka. Prema tom opisu, krivulje opterećenje-pomak mogu se podijeliti na tri faze (elastična faza, faza razvoja pukotina i faza očvršćivanja). Na početku su krivulje opterećenje-pomak uzoraka PCRBJ bile približno linearne što upućuje na elastično ponašanje uzorka. S povećanjem opterećenja, krivulje opterećenje-pomak počinju odstupati od linearnosti, te uzorci ulaze u fazu razvoja pukotina. S daljnjim povećanjem opterećenja vidljiv je efekt ojačanja PVC-CFRP i uzorci ulaze u fazu učvršćivanja. Na kraju su uzorci dosegli graničnu čvrstoću te je došlo do loma PVC cijevi.

Kao što se vidi na slici 14., pomak uzoraka smanjuje se s povećanjem vrijednosti  $b$ ,  $h$  ili  $s_f'$ . Tome je uglavnom razlog porast efekta ojačanja prstenastom gredom na betonsku jezgru i to istodobno s porastom vrijednosti  $b$  i  $h$ . Osim toga, porast vrijednosti  $s_f'$  dovodi do smanjenja efekta ojačanja PVC cijevi na



Slika 14. Krivulje opterećenje-pomak: a) širina; b) visina; c) udio uzdužne armature; d) udio poprečne armature; e) razmak CFRP traka

betonsku jezgru. Utjecaj vrijednosti  $\rho$  i  $\rho_{sv}$  na pomak uzoraka nije uočljiv. Na primjer, pomak uzoraka pri istom opterećenju smanjio se za 1,4 % pri povećanju vrijednosti  $h$  sa 240 mm na 300 mm.

### 4. Numerička analiza odnosa opterećenja i pomaka

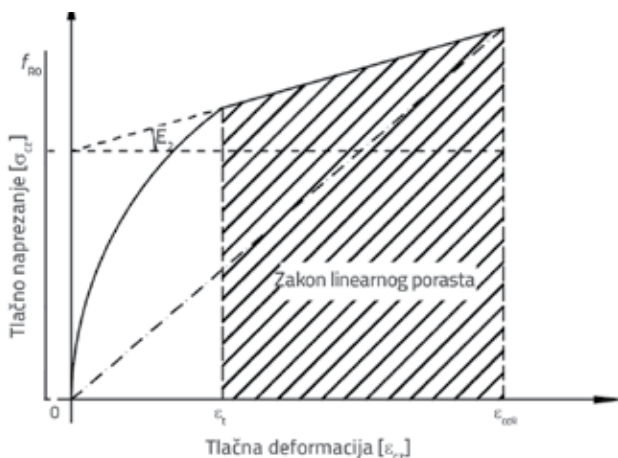
#### 4.1. Modeliranje PFCC

Kao što predlaže Yu [12], model za predviđanje osnovog naprezanja uzorka PFCC opisan je u izrazima (1) i (2), slika 15.

$$\sigma_{cz} = 0,58E_c \varepsilon_{cz} - \frac{(E_c - E_2)^2}{12f_{R0}} \varepsilon_{cz}^2 \quad 0 \leq \varepsilon_{cz} \leq \varepsilon_t \quad (1)$$

$$\sigma_{cz} = f_{R0} + E_2 \varepsilon_{cz} \quad \varepsilon_t \leq \varepsilon_{cz} \leq \varepsilon_{ccR} \quad (2)$$

gdje su  $\sigma_{cz}$ ,  $\varepsilon_{cz}$  osno naprezanje i osna deformacija betonskog stupa obavijenog materijalom PVC-CFRP;  $E_c$  je Youngov modul elastičnosti betona;  $E_2$  je nagib pravca u zoni očvršćivanja;  $f_{R0}$  je sjecište pravca PFCC;  $\varepsilon_t$  je sjecište parabole i linije ojačanog presjeka;  $\varepsilon_{ccR}$  je osna granična deformacija PFCC-a.



Slika 15. Model naprezanja i deformacije PFCC-a

#### 4.2. Modeliranje spoja

Modificirani model za predviđanje odnosa naprezanja i deformacije spoja razvijen je na bazi Manderovog modela i Yuovog modela [26, 27] kako je to prikazano u izrazima (3) do (9) i na slici 16.

$$\sigma_{cj} = \frac{f'_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (3)$$

$$x = \frac{\varepsilon_{cj}}{\varepsilon_{cc}} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{cc0} \left[ 1 + \eta \left( \frac{f'_{cc}}{f_c} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

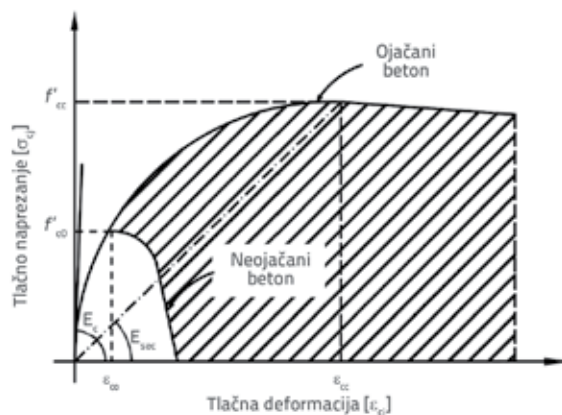
$$f'_{cc} = \beta_h \left( \beta_c \beta_1 f_c + 2\alpha \lambda_{t,1} \frac{d_{cor,1}}{d} f_{c,0} + 2\alpha \lambda_{t,2} \frac{d_{cor,2}}{d} f_{c,1} \right) \quad (6)$$

$$\eta = 8,98043 - 2,24331 (h/d) - 0,18965 (h/d)^2 \quad (7)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{ces}} \quad (8)$$

$$E_{ces} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (9)$$

gdje su  $\sigma_{cj}$  i  $\varepsilon_{cj}$  osno naprezanje i osna deformacija u zoni spoja;  $f'_{cc}$  i  $\varepsilon_{cc}$  su osno vršno naprezanje i deformacija u zoni spoja gdje je  $\varepsilon_{cc}$  osna vršna deformacija neojačanog betona;  $\eta$  je ispravljeni parametar vršne deformacije;  $d$  je unutarnji promjer PVC cijevi;  $r$  je parametar koji kontrolira oblik krivulje naprezanje-deformacija;  $\beta_h$  je koeficijent utjecaja visine za spoj;  $\beta_c$  je koeficijent utjecaja za beton;  $\beta_1$  je faktor poboljšanja za lokalni tlačni beton;  $\alpha$  je koeficijent smanjenja posredne armature koji djeluje na beton;  $f_c$  je tlačna čvrstoća neojačanog betona;  $f_{c,i}$  je tlačna čvrstoća betona nakon djelovanja i-tog kružnog učvršćenja;  $\lambda_{t,i}$  je karakteristična vrijednost za poprečnu armaturu.



Slika 16. Model naprezanje-deformacije spoja

### 4.3. Numerička analiza

#### 4.3.1. Pretpostavke

Kako bi se pojednostavnio proračun, u ovom su istraživanju usvojene sljedeće pretpostavke:

- uzorak je u stanju idealnog osnovog pritiska, bez ekscentričnog opterećenja
- granična čvrstoća uzorka PFCC jednaka je onoj u zoni spoja
- osni pomak uzorka je superpozicija pomaka uzorka PFCC i pomaka zone spoja
- za odnose naprezanja i deformacije PFCC-a i zone spoja, usvojeni su odnosi iskazani u izrazima (1) do (9).

### 4.3.2. Jednadžba ravnoteže

Prema jednadžbi ravnoteže i geometrijskim uvjetima, za ovo se istraživanje mogu odrediti sljedeći izrazi:

$$N = N_z = N_j \quad (10)$$

gdje je

$$N_z = \sigma_{cz} A_c \quad (11)$$

$$N_j = \sigma_{cj} A_c \quad (12)$$

$$\Delta = \Delta_z + \Delta_j \quad (13)$$

pri čemu su  $\Delta_z$  i  $\Delta_j$  dani izrazima (14) i (15):

$$\Delta_z = \varepsilon_{cz} l \quad (14)$$

$$\Delta_j = \varepsilon_{cj} h \quad (15)$$

gdje je  $N$  opterećenje uzorka,  $N_z$  je opterećenje pri graničnoj čvrstoći PFCC-a, a  $N_j$  označava čvrstoću spoja.  $\Delta$  je osni pomak uzorka,  $\Delta_z$  je osni pomak PFCC-a,  $\Delta_j$  je osni pomak spoja.  $l$  je dužina stupa,  $h$  je visina prstenaste grede,  $A_c$  je segmentna površina betona u PVC cijevi.

### 4.3.3. Postupak proračuna

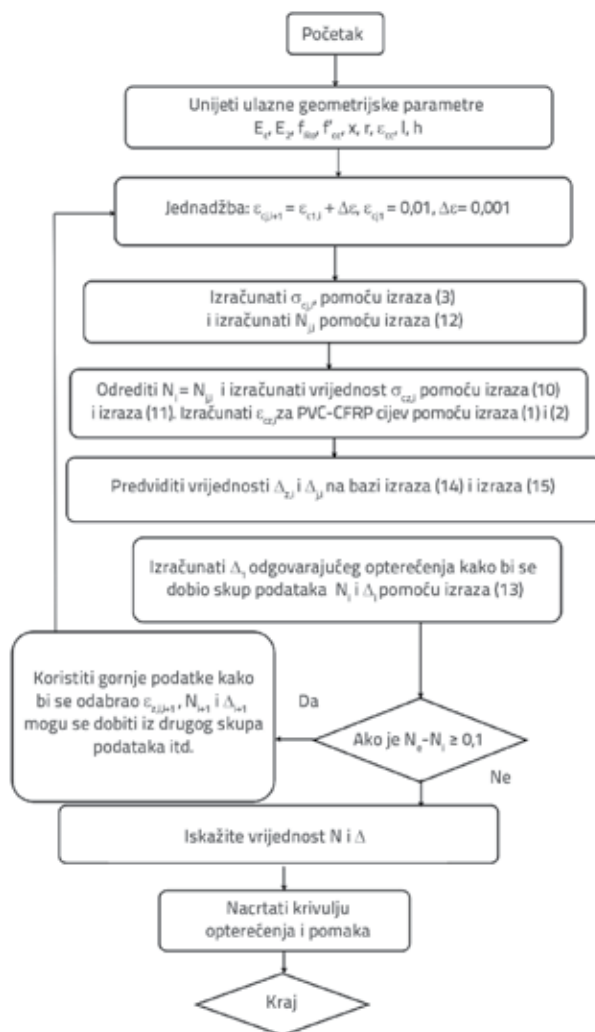
Numerička analiza pomoću programa MATLAB predlaže se za određivanje krivulje opterećenje-pomak za uzorak PCRBJ. U proračunu su usvojeni sljedeći koraci:

1. Unos početne ekvivalentne deformacije  $\varepsilon_{c,i}$  ( $\varepsilon_{c,i} = 0,01$ ) u zoni spoja i procjena opterećenja uzorka,  $N_e$ , prema [28];
2. Određivanje ekvivalentnog osnog naprezanja  $\sigma_{c,i}$  prema izrazima (3) i (4);
3. Određivanje vrijednosti  $N_{j,i}$  prema izrazu (12);
4. Određivanje opterećenja uzorka  $N_i = N_{j,i}$  i izračunavanje vrijednosti  $\sigma_{cz,i}$  na temelju izraza (10) i (11);
5. Određivanje vrijednosti  $\varepsilon_{cz,i}$  prema izrazima (1) i (2);
6. Predviđanje vrijednosti  $\Delta_{z,i}$  i  $\Delta_{j,i}$  prema izrazima (14) i (15);
7. Izračunavanje pomaka uzorka  $\Delta_e$  pomoću izraza (13).

Ako je zadovoljen ravnotežni uvjet  $N_e - N_i \geq 0,1$ , iskazuje se opterećenje  $N_i$  i pomak  $\Delta_i$  te se ponavljaju koraci (2-7); ako to nije slučaj, proračun je završen.

8. Iskazivanje krivulje opterećenje-pomak uzoraka. Detaljnije upute dane su u dijagramu na slici 17.

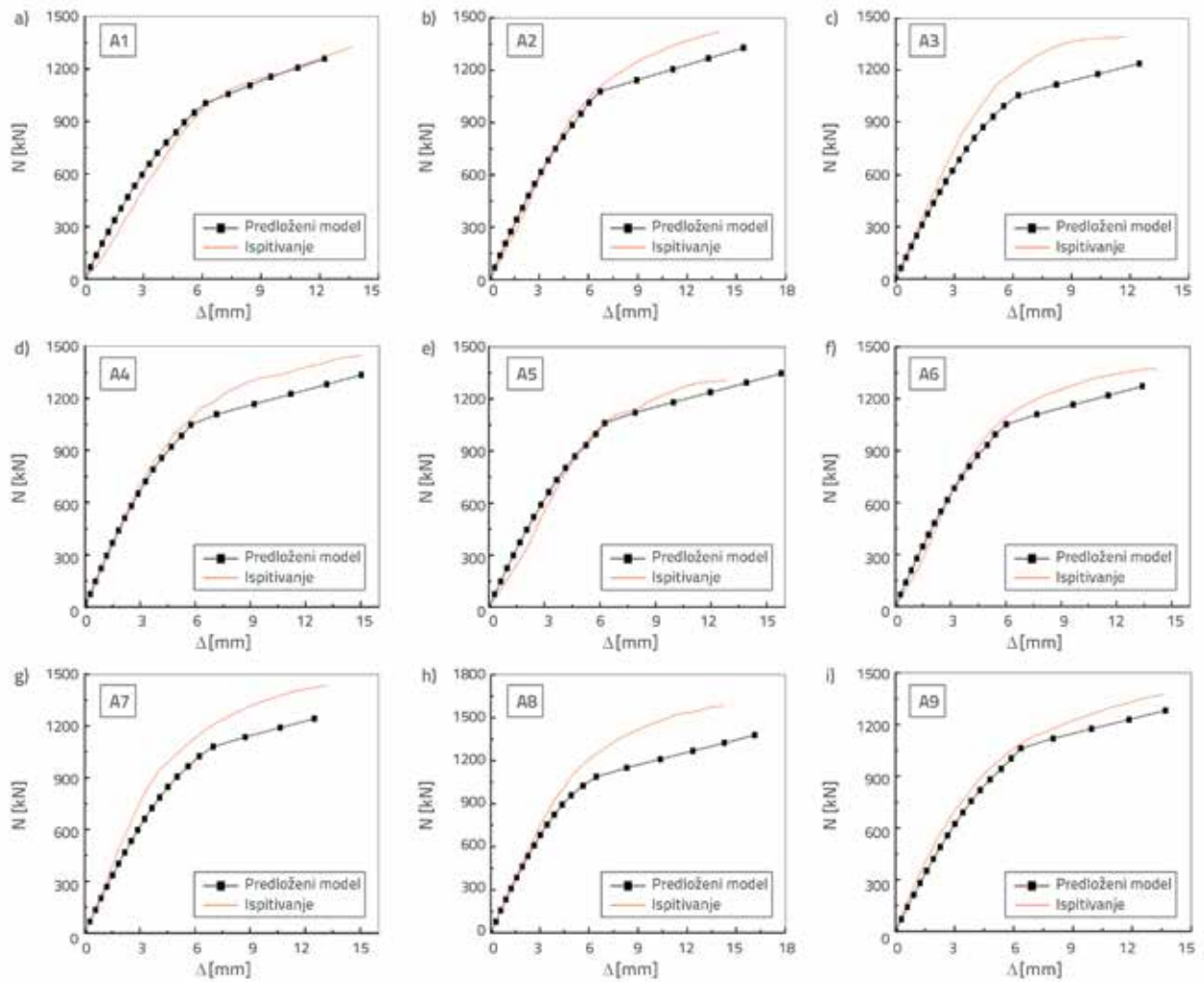
Krivulje opterećenje-pomak izračunane numeričkom analizom i izmjereni eksperimentalni rezultati grafički su prikazani i uspoređeni na slici 18. Rezultati pokazuju da se procijenjene vrijednosti dobro podudaraju s rezultatima ispitivanja, što znači da je pristup utemeljen na numeričkoj analizi dovoljno točan.



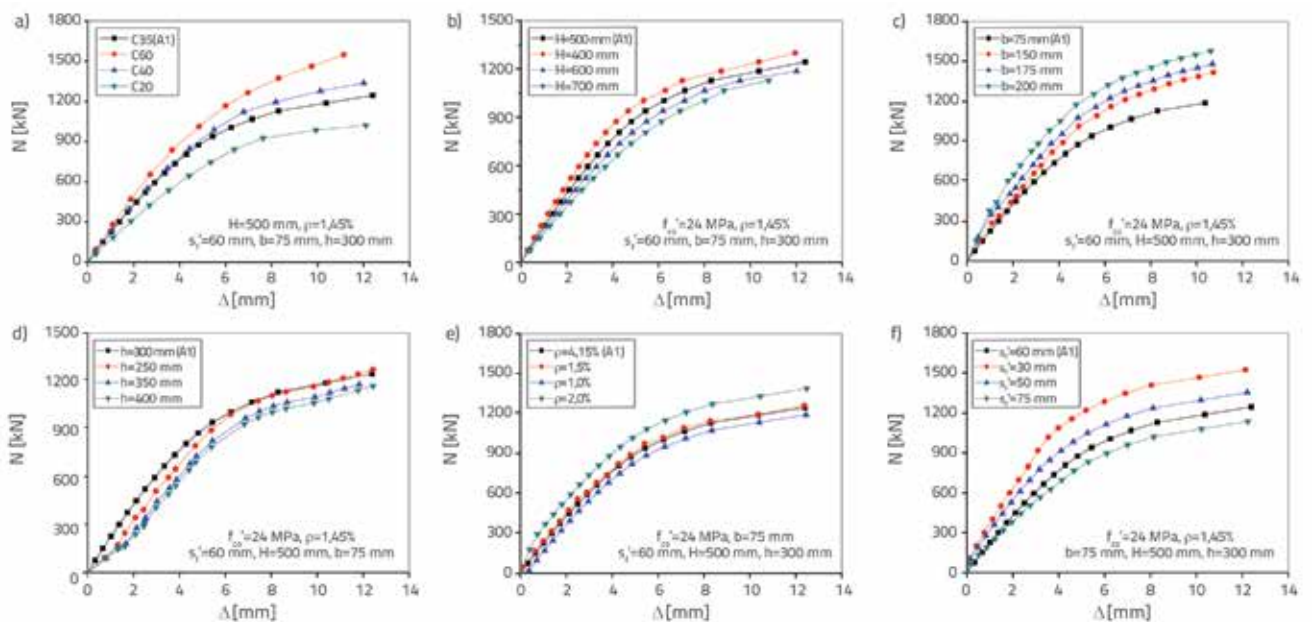
Slika 17. Grafički prikaz predviđanja krivulja opterećenje-pomak

### 4.3.4. Parametarska ispitivanja

Parametarska ispitivanja bazirana na predloženoj numeričkoj analizi provedena su kako bi se utvrdio utjecaj različitih parametara na ponašanje uzoraka. U tom smislu ispitana je klasa betona, visina stupa ( $H$ ), širina, visina i udio armature u prstenastoj gredi, te razmak CFRP traka. Pritom je uzorak A1 korišten kao kontrolni uzorak. Krivulje opterećenje-pomak uzoraka s različitim parametrima prikazane su na slici 19. Utjecaj parametara  $b$ ,  $h$ ,  $\rho$  i razmaka CFRP traka uzoraka PCRBJ definiran tijekom parametarskih ispitivanja bio je vrlo sličan rezultatima eksperimentalnih ispitivanja, što dodatno potvrđuje preciznost usvojenog pristupa baziranog na numeričkoj analizi. Slika 19.a prikazuje utjecaj klase betona, gdje se može vidjeti da je uzorak s većom klasom betona imao i veću graničnu čvrstoću. Tome je najviše razlog činjenica da je za tlačnu čvrstoću uzorka PCRBJ najviše zaslužan beton. Očito je da se povećanjem visine stupa smanjuje granična čvrstoća uzorka, što je i vidljivo na slici 19.b.



Slika 18. Usporedba krivulja opterećenje-pomak procijenjenih numeričkom metodom s odgovarajućim eksperimentalnim krivuljama



Slika 19. Parameterska ispitivanja krivulja opterećenje-pomak: a) Utjecaj klase betona uzorka; b) Utjecaj visine stupa; c) Utjecaj širine stupa; d) Utjecaj visine stupa; e) Utjecaj koeficijenta armature; f) Utjecaj razmaka CFRP traka



#### 4. Zaključak

U ovom su radu provedena centrična tlačna ispitivanja na jednom uzorku PRBJ i devet uzoraka PCRBJ. Provedena je i numerička analiza radi predviđanja krivulja opterećenje-pomak. Izvedeni su sljedeći zaključci:

- Kod PRBJ-a se uočava izvijanje PVC cijevi, dok kod PCRBJ-a dolazi do pucanja PVC cijevi i do loma CFRP traka.
- Granična čvrstoća PCRBJ-a se smanjuje istodobno s povećanjem razmaka CFRP traka. Visina, širina, udio uzdužne i poprečne armature malo utječu na graničnu čvrstoću uzoraka.
- Obodna deformacija CFRP trake i uzdužna deformacija PVC cijevi postupno se povećavaju istodobno s povećanjem razmaka CFRP traka. Ostali analizirani parametri malo utječu na obodnu deformaciju CFRP trake i uzdužnu deformaciju PVC cijevi.
- Poprečne i uzdužne deformacije betona u zoni spoja smanjuju se s povećanjem širine i smanjenjem visine prstenaste grede.

Poprečne deformacije betona u zoni spoja smanjuju se s povećanjem udjela armature. Uzdužne deformacije betona u zoni spoja smanjuju se s povećanjem udjela poprečne armature.

- Postupak numeričke analize za predviđanje odnosa opterećenja i pomaka uzoraka PCRBJ predložen je na temelju Manderovih i Yuovih modela. Rezultati numeričke analize dobro se podudaraju s rezultatima ispitivanja. Poslije toga očekuje se izrada dodatnih parametarskih studija na bazi ovog pristupa numeričkom analizom.

#### Zahvale

Ovo istraživanje provedeno je uz podršku Kineske zaklade za prirodne znanosti (br. 51578001, 51608003, 51878002 i 51008001) i na osnovi Plana istraživanja i razvoja pokrajine Anhui (br. 1704a0802131) te Programa za pomoć nadarenim mladim istraživačima u pokrajini Anhui (br. gxyqZD2016072).

#### LITERATURA

- [1] Jarc Simonič, M., Gostič, S., Bosiljkov, V., Žarnič, R.: Testing and analysis of walls strengthened with FRP, *GRAĐEVINAR*, 66 (2014) 6, pp. 533-548, <https://doi.org/10.14256/JCE.960.2013>
- [2] Dahir, M.K.: Shear strength of FRP reinforced deep beams without web reinforcement, *Composite Structures*, 16 (2017), pp. 223-232. [http://211.70.148.4:8000/rwt/EN\\_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.compstruct.2017.01.039](http://211.70.148.4:8000/rwt/EN_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.compstruct.2017.01.039)
- [3] Zomorodian, M., Yang, G., Belarbi, A., et al.: Behaviour of FRP-strengthened RC elements subjected to pure shear. *Construction & Building Materials*, 170 (2018), pp. 378-391, [http://211.70.148.4:8000/rwt/EN\\_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.004](http://211.70.148.4:8000/rwt/EN_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.004)
- [4] Corradi, M., Speranzini E., Borri, A., et al.: In-plane shear reinforcement of wood beam floors with FRP, *Composites Part B*, 37 (2006) 4-5, pp. 310-319, [http://211.70.148.4:8000/rwt/EN\\_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.compositesb.2005.11.003](http://211.70.148.4:8000/rwt/EN_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.compositesb.2005.11.003)
- [5] Castillo, E.D.R., Griffith, M., Ingham, J.: Seismic behaviour of RC columns flexurally strengthened with FRP sheets and FRP anchors, *Composite Structures*, 203 (2018), pp. 382-395, [http://211.70.148.4:8000/rwt/EN\\_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.compstruct.2018.07.029](http://211.70.148.4:8000/rwt/EN_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.compstruct.2018.07.029)
- [6] Roy, B., Laskar, A.I.: Cyclic Performance of Beam-Column Subassemblies with Construction Joint in Column Retrofitted with GFRP, *Structures*, 14 (2018), pp. 290-300, [http://211.70.148.4:8000/rwt/EN\\_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.istruc.2018.04.002](http://211.70.148.4:8000/rwt/EN_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.istruc.2018.04.002)
- [7] Sevil Yaman, T.: Behaviour of precast concrete beams prestressed with CFRP strands, *GRAĐEVINAR*, 68 (2016) 10, pp. 775-786, <https://doi.org/10.14256/JCE.1624.2016>
- [8] Ali, O., Bigaud, D., Riahi, H.: Seismic performance of reinforced concrete frame structures strengthened with FRP laminates using a reliability-based advanced approach, *Composites Part B*, 139 (2018), pp. 238-248, [http://211.70.148.4:8000/rwt/EN\\_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.compositesb.2017.11.051](http://211.70.148.4:8000/rwt/EN_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.compositesb.2017.11.051)
- [9] Feng, P., Cheng, S., Bai Y., et al.: Mechanical behaviour of concrete-filled square steel tube with FRP-confined concrete core subjected to axial compression, *Composite Structures*, 123 (2015), pp. 312-324, [http://211.70.148.4:8000/rwt/EN\\_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.compstruct.2014.12.053](http://211.70.148.4:8000/rwt/EN_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.compstruct.2014.12.053)
- [10] Le, T.D., Pham, T.M., Hao, H., et al.: Flexural behaviour of precast segmental concrete beams internally prestressed with unbonded CFRP tendons under four-point loading, *Engineering Structures*, 168 (2018), pp. 371-383, [http://211.70.148.4:8000/rwt/EN\\_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.engstruct.2018.04.068](http://211.70.148.4:8000/rwt/EN_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.engstruct.2018.04.068)
- [11] Mirmiran, A., Shahawy, M.: Behaviour of concrete columns confined by fibre composites, *Journal of Structural Engineering*, 123 (1997), pp. 583-590.
- [12] Saafi, M.: Development and behaviour of a new hybrid column in infrastructure systems [D]. Huntsville, Texas: Doctoral Dissertation of the University of Alabama. 2001.
- [13] Yu, F.: Experimental study on reinforced concrete axial compression short columns of PVC-FRP tube, *Journal of Building Structure*, 34 (2013), pp. 129-136. (in Chinese)
- [14] Yu, F.: Experimental study and theoretical analysis of mechanical properties of PVC-FRP confined concrete columns[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology. 2007.

- [15] Jiang, S.F., Ma, S.L., Wu, Z.Q.: Experimental study and theoretical analysis on slender concrete-filled CFRP-PVC tubular columns, *Construction & Building Materials*, 53 (2014), pp. 475-487, [http://211.70.148.4:8000/rwt/EN\\_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.089](http://211.70.148.4:8000/rwt/EN_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.089)
- [16] Ma, S.L., Jiang, S.F.: Experimental study on bearing capacity of CFRP-PVC tube concrete axial compression column, *Journal of Civil Engineering*, 47 (2014), pp. 99-106. (in Chinese)
- [17] Fakharifar, M., Chen, G.: Compressive behaviour of FRP-confined concrete-filled PVC tubular columns, *Composite Structures*, 141 (2016), pp.91-109, [http://211.70.148.4:8000/rwt/EN\\_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.compstruct.2016.01.004](http://211.70.148.4:8000/rwt/EN_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.compstruct.2016.01.004)
- [18] Fakharifar, M., Chen, G.: FRP-confined concrete filled PVC tubes: A new design concept for ductile column construction in seismic regions, *Construction & Building Materials*, 130 (2017), pp. 1-10, [http://211.70.148.4:8000/rwt/EN\\_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.056](http://211.70.148.4:8000/rwt/EN_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.056)
- [19] Jiang, S.F., Wu, Z.L., Wu, Z.Q.: Experimental study on hysteretic behaviour of circular section reinforced concrete composite columns with FRP-PVC pipe, *Journal of Building Structure*, 35 (2014), pp. 111-118. (in Chinese)
- [20] Yu, F., Xu, G.S., Cheng, A.C.: Analysis of shear capacity of reinforced concrete columns with PVC-CFRP tube under low cycle repeated loading, *Journal of Building Structure*, 37 (2016), pp. 106 -112. (in Chinese)
- [21] Yu, F., Xu, G.S., Niu, D.T., Cheng, A.C., Wu, P., Kong, Z.Y.: Experimental study on PVC-CFRP confined concrete columns under low cyclic loading, *Construction & Building Materials*, 177 (2018), pp. 287- 302, [http://211.70.148.4:8000/rwt/EN\\_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.111](http://211.70.148.4:8000/rwt/EN_ELSEVIER/https/MSYXTLUQPJUB/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.111)
- [22] GB/T 228.1 - 2010, *Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature.*: Standards Press of China, Beijing, China, 2010.
- [23] GB/T 8804.1 - 2003, *Thermoplastic pipes - Determination of tensile properties.*: Standards Press of China, Beijing, China, 2003.
- [24] GB/T 3354 - 2014, *Test method for tensile properties of orientational fibre reinforced polymer matrix materials.*: Architecture & Building Press, Beijing, China, 2014.
- [25] GB/T 50081- 2002, *Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete.*: Architecture & Building Press, Beijing, China, 2002.
- [26] Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R.: Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of Structural Engineering - ASCE*, 114 (1988), pp. 1804 -1826.
- [27] Yu, F., Zhang, N.N., Niu, D.T., Kong, Z.Y., Zhu, D.F., Wang, S.L., Fang, Y.: Strain analysis of PVC-CFRP confined concrete column with ring beam joint under axial compression *Composite Structures*, 224 (2019), 111012, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111012>
- [28] Yu, F., Li, D.A., Niu, D.T., Zhu, D.F., Zhang, N.N., Kong, Z.Y., Fang, Y.: A model for ultimate bearing capacity of PVC-CFRP confined concrete column with reinforced concrete beam joint under axial compression, *Construction & Building Materials*, 214 (2019), pp. 668-676, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.131>