

Primljen / Received: 23.1.2018.

Ispravljen / Corrected: 10.5.2018.

Prihvaćen / Accepted: 24.6.2018.

Dostupno online / Available online: 10.7.2021.

Centrifugirani betonski stupovi armirani nemetalnom armaturom

Autori:

Mr.sc. **Igor Džajić**, dipl.ing.građ.

Institut IGH d.d., Hrvatska

igor.dzajic@igh.hr

Autor za korespondenciju

Izv.prof.dr.sc. **Domagoj Damjanović**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

domagoj.damjanovic@grad.unizg.hrDoc.dr.sc. **Goran Puž**, dipl.ing.građ.

Hrvatske ceste d.o.o., Hrvatska

Goran.Puz@hrvatske-ceste.hr

Prethodno priopćenje

Igor Džajić, Domagoj Damjanović, Goran Puž

Centrifugirani betonski stupovi armirani nemetalnom armaturom

U radu se prikazuje ispitivanje stupova namijenjenih elektrodistribuciji, koji se proizvode postupkom centrifugiranja, od betona vrlo visoke tlačne čvrstoće i koji su prednapeti šipkama od polimera armiranog ugljičnim vlaknima (Carbon Fibre Reinforced Polymer - CFRP). Prikazani rezultati ispitivanja stupova savijanjem do sloma upućuju na mogućnost primjene ovog građevnog proizvoda, napose u okolišu u kojemu dolazi do pojačane korozije konvencionalne čelične armature. Dio ispitanih stupova imao je posmičnu armaturu u obliku ovijene mrežice od polimera armiranog staklenim vlaknima (Glass Fibre Reinforced Polymer - GFRP), a dio je uzoraka bio bez posmične armature, ali je betonska matrica ojačana sintetičkim makro vlaknima. Dan je osvrt na dosadašnja ispitivanja sličnih proizvoda, na metode proračuna, kao i naznaka smjernica za daljnja istraživanja.

Ključne riječi:

nemetalna armatura, ugljičnim vlaknima armirani polimer, CFRP, centrifugirani stupovi, prednapinjanje, ispitivanje do sloma, ispitivanje na savijanje

Research Paper

Igor Džajić, Domagoj Damjanović, Goran Puž

Centrifugally-cast concrete poles with non-metallic reinforcement

The article describes the testing of poles for electric power transmission lines, which are made of centrifugally-cast concrete and ultra-high strength concrete, and which are prestressed with Carbon Fibre Reinforced Polymer tendons (CFRP). The presented results of pole ultimate load testing suggest the potential for usage of this construction product, particularly in aggressive environments with high probability of steel corrosion. Part of the tested poles had shear reinforcement in the form of confined Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP) grid, while one share of samples had no shear reinforcement, but the concrete matrix was strengthened with synthetic macro fibres. A review is given on similar product testing, calculation methods, and guidance is provided for further research.

Key words:

non-metallic reinforcement, Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP), centrifugally-cast poles, prestressing, ultimate load testing, bending testing

1. Uvod

Beton armiran čeličnom armaturom je gradivo koje se danas najviše koristi u izgradnji građevinskih konstrukcija [1], kao kombinacija dvaju po mehaničkim karakteristikama različitih materijala, koji zajednički sudjeluju u prijenosu opterećenja. Mnoge građevine od armiranog betona u agresivnim uvjetima okoliša podložne su koroziji armaturnog čelika i posljedičnim oštećenjima koja rezultiraju skupim popravcima i ograničenjima uporabe građevina. Problem trajnosti naglašen je u agresivnim sredinama, pa se u određenim okolnostima umjesto čelične koristi armatura od vlaknima armiranog polimera (eng. *Fibre Reinforced Polymer* – FRP).

Nakon desetljeća ispitivanja i ograničene primjene građevinskih elemenata i proizvoda može se reći da je novi materijal našao svoju tržišnu nišu, no za širu primjenu još nedostaje normirani postupak proračuna (premda određene smjernice postoje već dulje vrijeme) kao i šire praktično iskustvo. Betonski stupovi namijenjeni elektrodistribuciji proizvedeni postupkom centrifugiranja i prednapeti armaturom od vlaknima armiranog polimera svakako su jedan od proizvoda koji imaju praktičnu potvrdu učinkovitosti i ekonomičnosti u određenim situacijama. Ovakvi proizvodi izrađuju se i u Hrvatskoj, te se ugrađuju u elektrodistributivnu mrežu zahvaljujući suradnji motiviranog proizvođača i klijenta koji je suočen s brzim dotrajanjem konvencionalnih stupova u prirodnom okolišu. Prikazano istraživanje nastalo je neposrednom inicijativom proizvođača kao, za naše prilike, rijedak i hvalevrijedan pothvat.

Centrifugirani betonski stupovi armirani nemetalnom armaturom su građevni proizvodi u smislu Zakona [2], što znači da se proizvode u tvornici i stavljaju na tržište radi stalne ugradnje u građevinu, a njihova svojstva imaju učinak na svojstva građevine s obzirom na temeljne zahtjeve. U Hrvatskoj je za centrifugirane betonske stupove preuzeta europska norma proizvoda [3], a na snazi su i interni propisi naručitelja [4-6] za stavljanje proizvoda na tržište, pa se stoga radi o normiranom proizvodu. Dosadašnja istraživanja pokazala su da prednapeti centrifugirani stupovi armirani FRP armaturom za naponsku mrežu mogu biti proizvod konkurentan na tržištu. Međutim, za sada ne postoje normirani računski postupci dimenzioniranja ovakvih elemenata, a baza ispitivanja je skromna. Jedan od važnijih i manje istraženih problema je sidrenje FRP armature. Tema ovog rada daje doprinos na polju eksperimentalnog istraživanja opisanog građevnog proizvoda.

2. Osvrt na razvitak betonskih elemenata s kompozitnom armaturom

Kompozitne FRP šipke proizvode se procesom izvlačenja (eng. *pultrusion*) od vlakana visoke čvrstoće i krutosti impregniranih polimernom smolom. Osim otpornosti na koroziju, prednosti ovih materijala su visoka čvrstoća, dobro ponašanje pod dinamičkim opterećenjem i niska zapreminska težina. Nedostaci su elastično ponašanje do sloma, mala ukupna deformacija,

nehomogenost, pad čvrstoće kabela na mjestu previjanja te popuštanje pod dugotrajnim opterećenjem bliskim čvrstoći [7]. Ovi materijali korišteni su u aeronautičkoj industriji od vremena nakon Drugog svjetskog rata, međutim armatura građevinskih konstrukcija od FRP-a nije smatrana isplativom jer nije bilo komercijalnih proizvoda na raspolaganju sve do 70-ih godina prošlog stoljeća [8]. Do 1990. godine komercijalna uporaba FRP armature najviše se događa u Japanu, na više od sto projekata. Uporaba FRP armature u Europi započinje u Njemačkoj, izgradnjom mosta prednapetog FRP armaturom 1986. godine [9]. Istodobno se događaju iskoraci u Kanadi i SAD-u, nakon što je započela industrijska proizvodnja FRP armature. Razvitak šipki, mreža užadi i kabela od novog materijala pratila su intenzivna znanstvena istraživanja značajki gradiva, proizvoda i konstrukcijskih elemenata od betona armiranog FRP-om. Isprva se novi materijal primjenjivao u građevinama koje su zbog posebnih razloga trebale biti armirane nemetalnom armaturom, npr. u bolnicama s opremom osjetljivom na elektromagnetske pojave, da bi se njihova uporaba proširila na pomorske građevine, uzletno-sletne staze zračnih luka i mostove. Dakle, već u ranoj fazi korištenja prepoznato je svojstvo neprovodljivosti za električnu struju kao prednost FRP armature za određene konstrukcije.

S obzirom na specifična svojstva armature od FRP-a, ona se koristi za armiranje svih vrsta betona od normalne, visoke do ultravisoke čvrstoće. Tlačna čvrstoća betona varira u rasponu od 20-40 MPa za betone normalnih čvrstoća do 80-100 MPa za betone visokih čvrstoća prema još višim vrijednostima od 150 MPa za betone ultravisokih čvrstoća (UHPC). FRP se proizvodi od staklenih (S), aramidnih (A) i ugljičnih (U) vlakana, povezanih epoksidnom smolom, poliestrom ili vinilesterom, uz kalupljenje i prešanje [1]. S inženjerskog motrišta vlakna se razlikuju po mehaničkim značajkama kao što su čvrstoća, krutost, gustoća i promjer vlakna. Glavni nedostatak jest da takvi proizvodi nisu duktilni, tj. nema izrazitog popuštanja materijala tijekom određenog naprezanja, kao kod čelika [1]. S obzirom na njihovu višu cijenu, koriste se u specifičnim tipovima konstrukcija, kod kojih je naglašena važnost značajke trajnosti. Komercijalni kabeli izvana se oblažu kvarcnim pijeskom kako bi se osigurala prionjivost kabela i betona.

Kod većine istraživanja korišteni su CFRP kabelima prednapeti tanki (30 mm najviše) elementi od betona visoke do vrlo visoke čvrstoće (75 do 100 N/mm²). U odnosu na ostale raspoložive proizvode od vlaknima armiranih polimera, kabeli od CFRP-a mogu biti nešto skuplji, ali su otporniji na zamor, iskazuju manje puzanje i manje gubitke uslijed relaksacije (popuštanje) nakon prednapinjanja, te su trajniji u alkalnoj sredini odnosno u betonu [10]. Opće karakteristike šipki, kabela i užadi značajno variraju, budući da ih je moguće prilagoditi različitim namjenama – po tome se ovi proizvodi znatno razlikuju od armaturnog čelika, čije su fizikalne i mehaničke značajke unutar relativno uskih granica. Komercijalni CFRP proizvodi za armiranje betonskih konstrukcija obično imaju uzdužnu vlačnu čvrstoću od 600 do 3500 MPa, modul elastičnosti (uzduž vlakana) 100 do 580 GPa i izduljenje do sloma od 0,5 % do 1,7 % [11].

Iznimno velik broj obavljenih istraživanja obuhvatio je značajne aspekte ponašanja građevnih elemenata prednapetih kabelima od polimera armiranog vlaknima. Međutim, to gradivo nije ušlo u propise za projektiranje, već se koriste smjernice, od kojih su najčešće one Američkog instituta za beton (ACI, American Concrete Institute) [12], premda su prve smjernice izdane u Japanu, a potom i u Kanadi. Europske smjernice izdao je fib [11] i njima su obuhvaćeni principi proračuna za granična stanja sloma i granična stanja u uporabi za betonske elemente armirane nenapetom FRP armaturom. Principi proračuna za granična stanja sloma u smjericama su slični, derivirani iz principa na kojim se temelje propisi za armirani i prednapeti beton. Prikazana usporedba različitih propisa iskazuje velike razlike u preporukama koje se odnose na granična stanja uporabe. Tehničke značajke komercijalnih proizvoda redovito se kalibriraju opsežnim ispitivanjima, laboratorijskim i numeričkim. Za dimenzioniranje znatnog dijela betonskih konstrukcijskih elemenata građevine mjerodavna je nosivost na savijanje ili savijanje s uzdužnom silom. Konvencionalni betonski elementi, armirani ili prednapeti čelikom, propisanim se postupkom projektiraju na otkazivanje duktilnim slomom preko armature. Kod konstrukcijskih elemenata armiranih FRP armaturom, slom preko armature može se opisati krtim, jednako kao i slom preko betona, pa dimenzioniranje često postavlja slom preko betona kao zadano granično stanje. Što se tiče progiba, u sličnim uvjetima elementi armirani FRP proizvodima razvijaju veće progibe od usporedivih konvencionalnih elemenata, što se tumači manjim modulom elastičnosti FRP- armature, ali i popuštanjem veze beton – armatura [13].

Može se reći da je ponašanje FRP (CFRP) kabelima prednapetih elemenata dobro istraženo. Međutim, detalji ovakvih konstrukcija i dalje su predmet istraživanja budući da variranje značajki betona i armature pruža mogućnost razvoja proizvoda poboljšanih svojstava.

3. Ispitivanje armaturnih šipki od polimera armiranog vlaknima

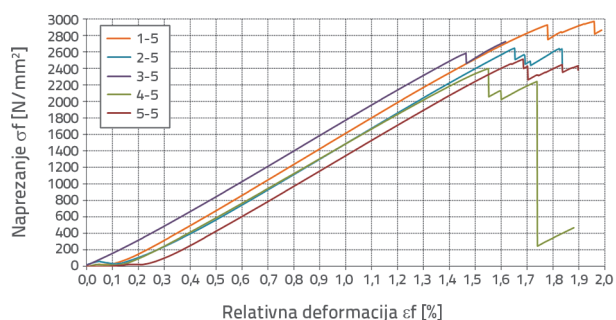
Armaturne šipke od polimera armiranog vlaknima nabavljaju se kao gotov tvornički proizvod, deklariranih značajki, koje variraju od proizvođača do proizvođača. FRP šipke mogu biti projektirane i proizvedene kako bi odgovarale specifičnim

zahtjevima za pojedinačne namjene. Dostupni parametri u projektiranju uključuju odabir sastojaka (vlakna i polimerne matrice), volumen frakcije vlakana i matrice, orijentaciju vlakana te proces proizvodnje.

Za potrebe ispitivanja stupova provedeno je prethodno ispitivanje šipki. Ispitana su vlačna svojstva za pet uzoraka šipki od CFRP-a, odnosno polimera armiranog ugljičnim vlaknima, efektivnog promjera 4,2 mm, odnosno promjera 5,4 mm s oblogom (slika 1.). Rezultati ispitivanja prikazani su na slici 2. i u tablici 1.



Slika 1. Ispitivanje šipke od polimera armiranog vlaknima [4]



Slika 2. Rezultati ispitivanja šipki od polimera armiranog vlaknima

Tablica 1. Ispitana mehanička svojstva armaturnih CFRP šipki

| Uzorak oznake (D = 4,2 mm) | Maksimalno opterećenje [kN] | Vlačna čvrstoća [N/mm ²] | Relativna deformacija pri slomu [%] | E - modul elastičnosti [N/mm ²] |
|-------------------------------|--------------------------------|---|--|--|
| 1-5 | 40,5 | 2926,6 | 1,77 | 185500 |
| 2-5 | 36,6 | 2644,1 | 1,65 | 180400 |
| 3-5 | 35,8 | 2584,9 | 1,46 | 183000 |
| 4-5 | 33,2 | 2397,2 | 1,55 | 177000 |
| 5-5 | 34,8 | 2511,5 | 1,68 | 179300 |

Rezultati ispitivanja pokazali su linearno elastično ponašanje do sloma gdje je prosječna prekidna vlačna čvrstoća CFRP šipki iznosila $f_{sr} = 2612,9$ MPa i srednji modul elastičnosti $E_{sr} = 181,0$ GPa što je u skladu s podacima koje je deklarirao proizvođač.

4. Prethodna ispitivanja stupova

Centrifugirani armiranobetonski stupovi šupljeg kružnog presjeka armirani FRP armaturom istražuju se od 1994., a prvi eksperimentalni primjerci ugrađeni su u prijenosnu mrežu jednog švicarskog distributera električne energije 1998. godine [14, 15]. Takvi stupovi primarno se koriste za prijenosne linije električne mreže, za distribuciju električne energije i kao nosači rasvjetne (slika 3.).



Slika 3. Konvencionalni stup u elektroprijenosnoj mreži

U mnogim slučajevima armiranobetonski stupovi postavljaju se na lokacije koje se mogu karakterizirati agresivnom sredinom, bilo da se radi o tlu ili atmosferskoj izloženosti (slika 4.). Kružni presjek centrifugiranih stupova diktira njihov način proizvodnje, a prednost mu je u ravnoj i glatkoj površini te povoljnom estetskom učinku. Specifični zahtjevi naručitelja ovih konstrukcijskih elemenata čine primjenu nemetalne

(dakle neprovodljive za električnu struju), nekorodirajuće armature vrlo interesantnom. Eksperimentalna proizvodnja stupova s FRP armaturom započinje u trenutku pooštrenja propisa za projektiranje betonskih konstrukcija, kao odgovor na zahtjeve za povećanjem zaštitnog sloja betona, čime su izmjere i masa konvencionalnih stupova postale nepraktične. Od tada su razvijeni različiti tipovi stupova od betona visoke čvrstoće koji su armirani FRP armaturom (najviše se koristi CFRP).



Slika 4. Oštećenja armiranobetonskog stupa u elektroprijenosnoj mreži – karakteristične pukotine u agresivnoj sredini

Budući da su opisani stupovi proizvod prikladan za industrijsku proizvodnju koji je konkurentan na tržištu (osobito ako se kalkulira povećana trajnost i manja masa stupa, bitna za troškove transporta), provedena su značajna ispitivanja. Čvrstoća, progib i otpornost na savijanje centrifugiranih betonskih stupova namijenjenih elektrodistribuciji, prednapetih armaturom od CFRP materijala eksperimentalno i numerički je analizirana u [16]. Ustanovljeno je da prikladno armirani, ovi elementi imaju zadovoljavajuća svojstva na savijanje, uključujući svojstvo duktilnosti. Istraživanje je obuhvatilo utjecaj načina armiranja (uzdužnog i poprečnog) na raspucavanje, progibe i način otkazivanja – sloma stupa.

U radu [17] istražena je otpornost na zamor stupova prednapetih CFRP armaturom, prvotno zbog pojave popuštanja prionjivosti između kabela i betona, te je ustanovljeno da ta pojava neće biti presudna za njihovo dotrajavanje. Rad [18] bavi se vezom – prijanjanjem između kabela za prednapinjanje od CFRP-a i betona, budući da ta značajka (proklizavanje kabela) bitno određuje ponašanje konstrukcijskih elemenata. U radu [19] istražen je sustav sidrenja kabela od CFRP kod prednapinjanja betonskih elemenata, budući da se ti kabeli uvriježeno prednapinju do 40 % prekidne čvrstoće. Povećanjem sile prednapinjanja mogu se dobiti učinkovitiji presjeci, a ta se mogućnost prije svega ostvaruje poboljšanjem kotvi.

5. Proračunski model

Nedostatak prihvaćene formalne norme za projektiranje predstavlja značajnu barijeru širem korištenju betona armiranog šipkama FRP-a. Prvi nacrt propisa objavljen je u Japanu [20], a slijedile su europske preporuke na temelju projekta EUROCRETE project [21], potom kanadski propis [22] i najviše korištene smjernice (preporuke), koje su izdane u SAD od strane udruženja ACI [8]. Više europskih država izdalo je vlastite preporuke za korištenje FRP armature u betonskim konstrukcijama ili za ojačavanje konstrukcija [21].

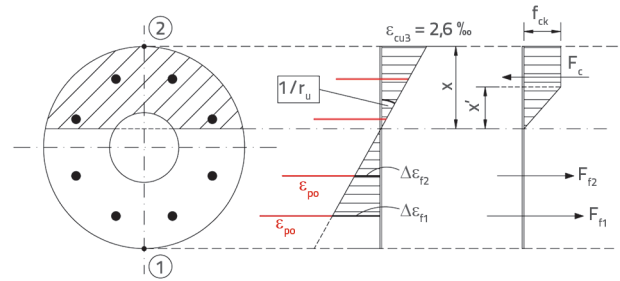
Radna skupina udruženja fib (International Federation for Structural Concrete), nakon dugogodišnjeg rada više stručnjaka, objavila je publikaciju – fib Bulletin 40 koji obrađuje FRP armaturu u betonskim konstrukcijama [11].

Brojni rezultati eksperimentalnih istraživanja pokazali su da se otpornost elementa opterećenog na savijanje može odrediti prema sličnom postupku kojim se dimenzioniraju elementi armirani čeličnom armaturom. Konkretno, može se reći kako je općenito prihvaćeno da se osnovna načela analize savojne otpornosti presjeka konvencionalno armiranih betonskih elemenata odnose i na one koji su armirani FRP-om.

Ako dođe do sloma elementa savijanjem, do otkazivanja dolazi ili drobljenjem betona u tlačnoj zoni ili kidanjem FRP armature u vlačnoj zoni [23]. Publikacija [11] usvaja okvir dan normom HRN EN 1992-1-1 [24] za ocjenu momenta pri slomu presjeka armiranog FRP armaturom. Za slučaj otkazivanja drobljenjem betona u tlačnoj zoni dane su jednadžbe i proračunski dijagrami za određivanje momenta pri slomu. Za slučaj kada se slom savijanjem događa uslijed prekida FRP armature, publikacija nudi iterativni proces za ocjenu momenta sloma.

Dimenzioniranje potrebne FRP armature u centrifugiranim kružnim šupljim stupovima predstavlja kompleksan zadatak. Proračun se temelji na analizi zakrivljenosti poprečnog presjeka. Kako bi se odredila zakrivljenost, potrebno je poznavati položaj neutralne osi, koji se određuje iterativnim postupkom u kojem se za pretpostavljenu relativnu deformaciju betona na tlačnom rubu poprečnog presjeka traži položaj, tj. dubina neutralne osi. Istodobno vrijednosti relativnih deformacija armature u vlaklu moraju odgovarati sili u betonu tako da se zadovolje jednadžbe ravnoteže poprečnog presjeka (slika 5.). Kalibracija proračunskog modela, u konkretnom slučaju centrifugiranog presjeka stupa prednapetog FRP armaturom, bit će predmet nastavka ovog istraživanja. Pojednostavljeni modeli proračuna nisu dali rezultate koji zaslužuju

prikaz u radu, koji je usmjeren na upoznavanje stručne javnosti s vrijednim ispitivanjima izvornoga hrvatskog građevinskog proizvoda.

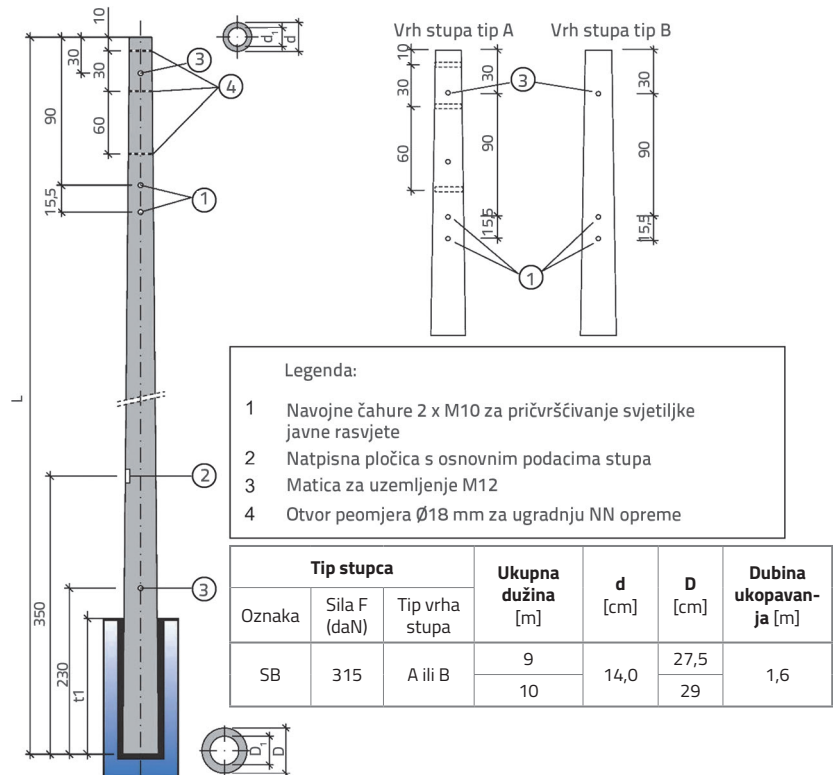


Slika 5. Odnos naprezanje – deformacija u kružnom i šupljem presjeku armiranom prednapetim FRP šipkama

6. Ispitivanje stupova do sloma

6.1. Osnovni zahtjevi

Centrifugirani armiranobetonski stupovi stavljaju se na tržište kao građevni proizvod koji se izrađuje u skladu s preuzetom europskom normom HRN EN 12843:2004, Predgotovljeni betonski proizvodi – Stupovi i motke [3]. Normom su definirani zahtjevi na predgotovljene betonske stupove (motke) načinjene u komadu ili od segmenata, koji mogu biti armirani ili prednapeti, puni ili šuplji, a mogu imati priključak ili uključivati druge elemente (prečke, platforme i slično). Namjena takvih stupova može biti



Slika 6. Geometrija ispitanog stupa oznake SB 315/10

za nosače nadzemnih električnih ili telekomunikacijskih vodova, za nosače napojnih vodova željezničkih vozila, nosače rasvjete i slično.

Kao konstrukcijski elementi od betona, stupovi se provjeravaju na granična stanja prema normama za projektiranje [24, 25]. Također, stupovi moraju zadovoljiti interne propise Hrvatske Elektroprivrede (HEP d.d.) [4-6], prema kojima dodatno moraju za granično stanje nosivosti zadovoljiti globalni faktor sigurnosti: $k_{GSN} \geq 1,8$.

Za konkretno ispitivanje odabrani su najčešće zastupljeni šuplji kružni stupovi u elektrodistributivnoj mreži, shematski prikazani na slici 6. Stupovi su načinjeni od betona vrlo visoke tlačne čvrstoće, C90/105 i armirani šipkama od CFRP-a (Carbon Fibre Reinforced Polymer – ugljičnim vlaknima armirani polimer).

6.2. Uzorci i opis eksperimenta

Ispitivanje stupova provedeno je na poligonu proizvođača, na uzorku od osam stupova jednakih dimenzija, ali s različitim detaljima armature. Svi su stupovi proizvedeni u pogonu – na mjestu ispitivanja. Za kontrolu i usporedbu rezultata jedan od uzoraka armiran je konvencionalno - čeličnom armaturom (B500B) [26]. U tablici 2 prikazani su podaci o armaturi i dodacima betonu ispitivanih stupova. Svi stupovi oznaka od 2/8 do 8/8 bili su jednako armirani sa po osam CFRP šipki. Efektivni promjer šipke iznosi 4,2 mm, a ukupni promjer šipke s matricom i oblogom od kvarcnog pijeska je 5,4 mm. Svi uzorci su centrično prednapeti prije stvrdnjavanja ukupnom silom $P_0 = 110$ kN. U usporedbi s klasičnim prednapinjanjem čeličnim užadima, naprezanje je iznosilo je samo 40 % prekidne čvrstoće šipke, odnosno $\sigma_{p,1} = 1000$ MPa. Relativno malen postotak prednapinjanja ima uporište u nedovoljnom poznavanju ponašanja ove armature u području usidrenja, mogućnostima zahvata šipki i njihova prednapinjanja, bojazni od mogućnosti

proklizavanja armature te nosivosti samoga kalupa koji mora biti sposoban samostalno se oduprijeti ukupnoj sili prednapinjanja i u procesu centrifugiranja rotira zajedno sa sustavom za usidrenje. U literaturi se preporučeno naprezanje u FRP šipkama pri prednapinjanju navodi u granicama od 800 do 1200 MPa [14, 19].

S obzirom na relativno kompliciran način poprečnog armiranja stupova GFRP mrežicom, pretpostavilo se da bi se dodavanjem vlakana u različitim omjerima mogla potpuno izbjeći uporaba poprečne armature i na taj način olakšati armiranje stupova. Zbog svojih svojstava odabrana su vlakna SikaFiber® Force 60. To su poliolefinska sintetička makrovlakna koja se koriste u *in situ* konstrukcijskim betonima za proizvodnju predgotovljenih elemenata u svrhu boljeg raspoređivanja naprezanja i poboljšanja nosivosti. Ta vlakna imaju svojstvo premoštenja pukotina, povećavaju savojnu i posmičnu čvrstoću te poboljšavaju svojstva nosivosti i duktilnosti betona. Vlačna čvrstoća tih makrovlakana iznosi 475 MPa, modul elastičnosti je 7,5 GPa, a duljina 60 mm. Ovdje će se pokazati da je nosivost stupova izrađenih od betona u kojem su se nalazila vlakna bila nešto veća nego kod onih ovijenih GFRP mrežicom, što ohrabruje nastavak istraživanja u ovom smjeru.

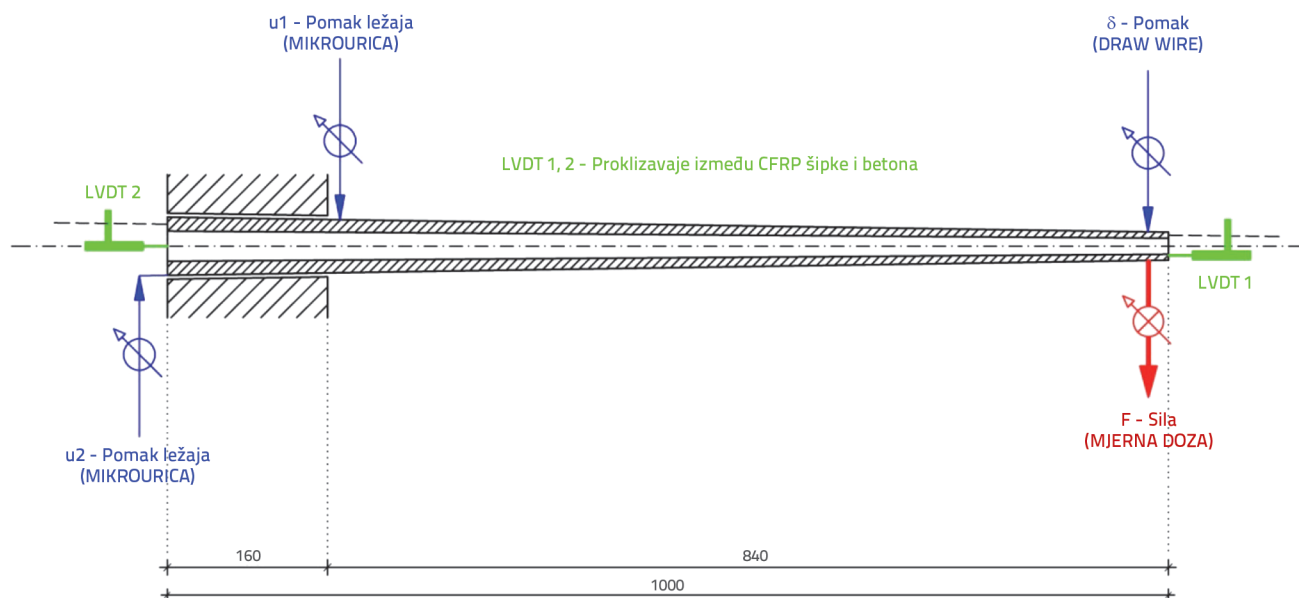
Već je rečeno da je ispitivan stup oznake SB 315/10 jer oko 20 % cjelokupne proizvodnje spomenutog proizvođača otpada na ovaj tip stupa. Radi se o betonskom stupu (SB) čija je nazivna nosivost rezultante vodoravnih sila $F_n = 3,15$ kN (315 daN) i ukupne duljine $L = 10$ m.

Mjerni postav prikazan je shematski na slici 7., a priprema i sam postupak ispitivanja na slikama 8. i 9. Stupovi su ispitivani u horizontalnom položaju. Donji dijelovi uzoraka bili su fiksirani - upeti u betonske sidrene blokove, a na vrhu stupa – kojemu su omogućeni slobodni pomaci - aplicirana je horizontalna sila okomito na uzorak. Ispod vrha stupa su postavljena čelična kolica kako bi se izbjegao utjecaj gravitacije na dobivene rezultate.

Tablica 2. Bitne značajke ispitanih uzoraka stupova i glavni rezultati ispitivanja

| Oznaka uzorka | Značajke uzorka | | | Rezultati ispitivanja | | | |
|---------------------------|--|---------------------------|---|-----------------------|-----------------|------------|----------------------|
| | Uzdužna armatura | Armatura za posmik | Dodatak vlakana betonu | δ_n [mm] | δ_u [mm] | F_u [kN] | $k_{GSN} (F_u/3,15)$ |
| 1/8 (kontrolni uzorak) | Čelične šipke | Spiralna čelična armatura | nema | 194 | 1950 | 13,8 | 4,38 |
| 2/8 | Šipke od CFRP-a (D = 5,4 mm) 8 šipki u poprečnom presjeku | Ovijanje GFRP mrežicom | nema | 84 | 1750 | 10,5 | 3,33 |
| 3/8 | | | | 86 | 1650 | 10,7 | 3,40 |
| 4/8 | | | | 85 | 2200 | 10,8 | 3,43 |
| 5/8 | | nema | sintetička makro vlakna (SikaFiber® Force 60) | 82 | 1900 | 11,3 | 3,59 |
| 6/8 | | | | 102 | 1800 | 11,6 | 3,68 |
| 7/8 | | | | 86 | 2000 | 11,5 | 3,65 |
| 8/8 | | | | 82 | 1900 | 11,6 | 3,68 |

gdje je:
 δ_n – pomak vrha stupa pri nazivnoj sili [mm]; δ_u – pomak vrha stupa pri slomu [mm]; F_u – konačna sila sloma stupa [kN]
 k_{GSN} – postignuti globalni koeficijent sigurnosti za granično stanje nosivosti,



Slika 7. Položaj stupa i mjerna oprema pri ispitivanjima



Slika 8. Testni poligon tvornice T.B.S. sa stupom pripremljenim za ispitivanje i mjernom opremom



Slika 9. Provedba ispitivanja stupova

Ispitivanje je provedeno prema zahtjevima norme [3].

Opterećenje na uzorke nanošeno je u tri faze:

Faza 0: faza stabilizacije. Prije početka mjerenja unosi se opterećenje $F_0 = 0,15 F_n$ i rasterećuje uzorak kako bi se stabilizirao u početnom položaju.

Faza 1: elastična faza.

Korak 1: Unos opterećenja $F_1 = 0,5 F_n$ potom rasterećenje.

Mjeri se progib δ_1 .

Korak 2: Unos opterećenja $F_2 = F_n$ potom rasterećenje.

Mjeri se progib δ_2 .

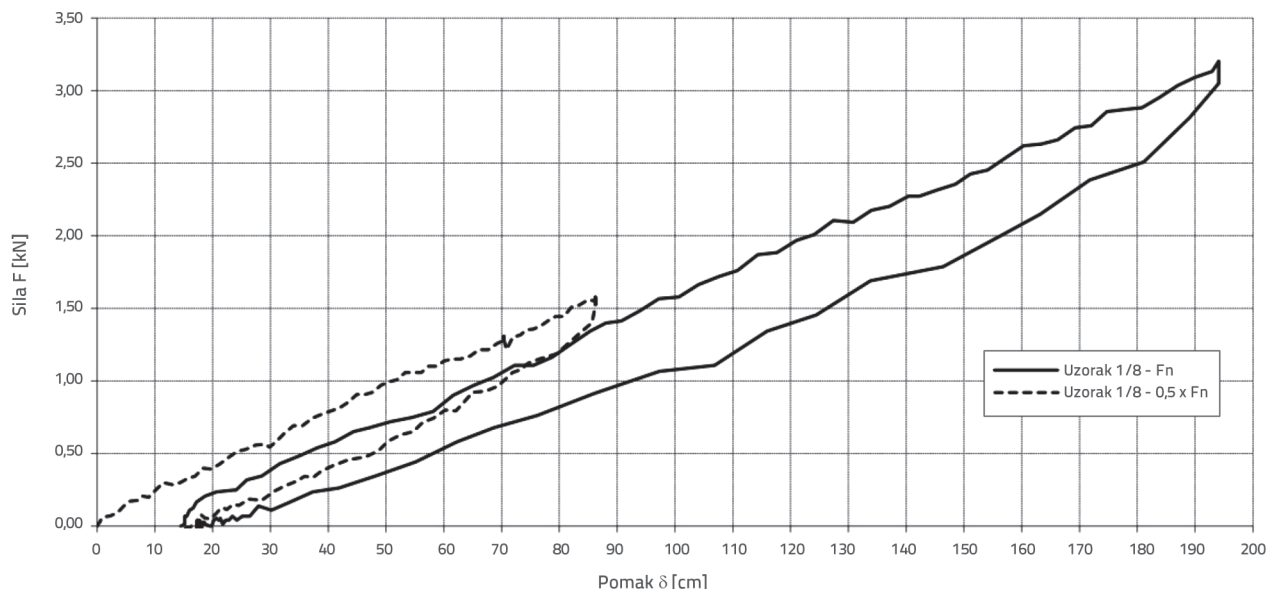
Faza 2: konačna faza. Ispitivanje se nastavlja do sloma kako bi se odredilo F_u (opterećenje pri slomu).

6.3. Rezultati ispitivanja u elastičnoj fazi

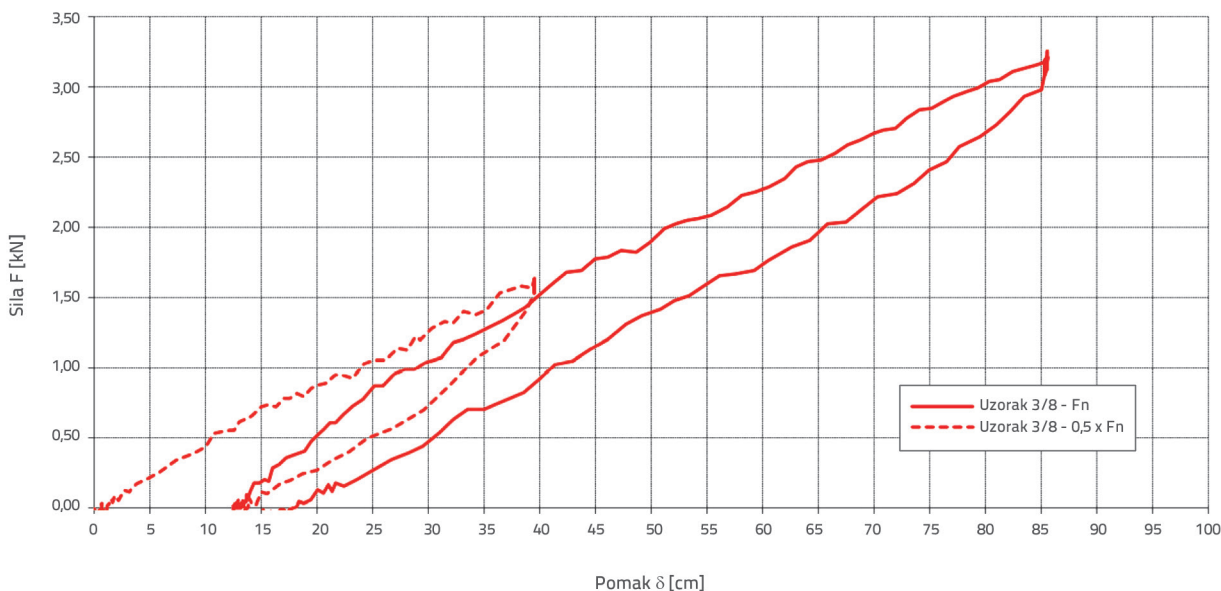
Kontrolni uzorak, stup armiran čeličnom armaturom pokazao je očekivano ponašanje pri ispitivanju u elastičnoj fazi koje se očituje približno linearnim odnosom sile i pomaka (slika 10.).

Na uzorcima kojima su prednapete šipke od CFRP-a glavna armatura, a ovijena mrežica od GFRP-a služi kao armatura za posmik, u elastičnoj fazi za istu su primijenjenu silu ostvareni otprilike dvostruko manji pomaci, karakterističan rezultat prikazan je na slici 11.

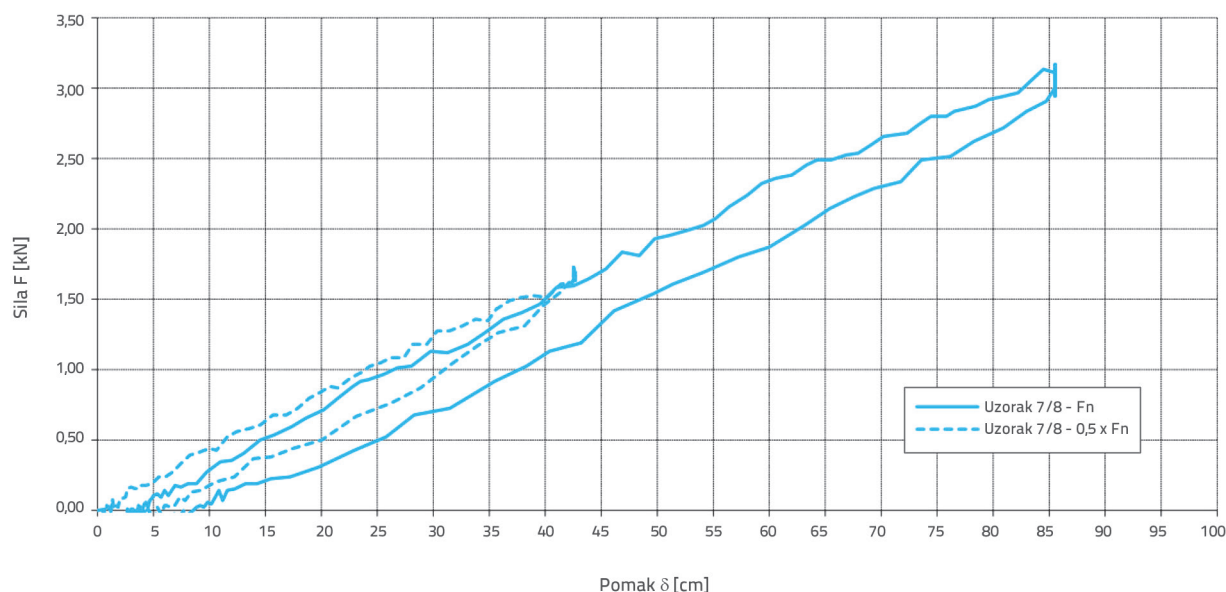
Beton stupova koji su prednapeti CFRP armaturom, ali bez armature za posmik, sadrži dodatak – makrovlakna (SikaFiber®



Slika 10. Odnos sile i pomaka za elastičnu fazu ispitivanja (korak 1 i 2) kontrolnog stupa armiranog čeličnom armaturom



Slika 11. Odnos sile i pomaka za elastičnu fazu ispitivanja (korak 1 i 2) jednog uzorka stupa koji je uzdužno prednapet CFRP armaturom a poprečno ovijen GFRP mrežicom



Slika 12. Odnos sile i pomaka za elastičnu fazu ispitivanja (korak 1 i 2) uzorka stupa koji je uzdužno prednapet CFRP armaturom, bez poprečne armature, ali s dodatkom sintetičkih vlakana u betonu

Force 60). Količina dodanih vlakana u pojedinim uzorcima nije bila stalna, već je varirala od $1,2 \text{ kg/m}^3$ (uzorak 5) do $3,8 \text{ kg/m}^3$ (uzorci 6 i 7). Može se reći da su ostvareni pomaci za ispitivanje u fazi 1 podjednaki za stupove s armaturom i bez armature za posmik (slika 12.) te da je povećanjem količine vlakana u betonu ostvaren nešto manji pomak vrha stupa pri ispitivanju na savijanje dok je nosivost gotovo ostala ista.

Jedan od važnih pokazatelja učinkovitosti građevnih elemenata ovog tipa je proklizavanje između CFRP šipke i betona, koje može dovesti do otkazivanja nosivosti. Proklizavanje je kod ispitivanja u elastičnoj fazi kao i onaj do sloma mjereno na najopterećenijoj CFRP šipki na vlačnoj strani poprečnog presjeka. Dobiveni rezultati mjerenja pomaka šipke za elastičnu fazu na vrhu stupa blizu mjesta unosa sile bili su zanemarivi, odnosno nakon rasterećenja izmjerena vrijednost pomaka šipke vratila se u nulu. Rezultati pomaka armature u fazi ispitivanja do sloma bili su u području od $0,09 \text{ mm}$ do $0,24 \text{ mm}$ pa se može zaključiti da niti na jednom uzorku nije došlo do prokliznuća mjerene šipke u odnosu na beton. Izmjerene vrijednosti zaostalih progiba na slobodnom kraju stupova pojavile su se na svim uzorcima, a najvjerojatnije su posljedica zakretanja upetog ležaja i nemaju utjecaja na interpretaciju rezultata. Na upetom kraju stupa izmjereno prokliznuće u obje faze ispitivanja bilo je jednako nuli.

6.4. Rezultati ispitivanja do sloma

Referentni uzorak stupa koji je bio armiran čeličnom armaturom (oznake 1/8) očekivano se slomio tako što je došlo do popuštanja armature nakon čega dolazi do drobljenja betona. Visoka duktilnost kontrolnog uzorka je ostvarena poznatim

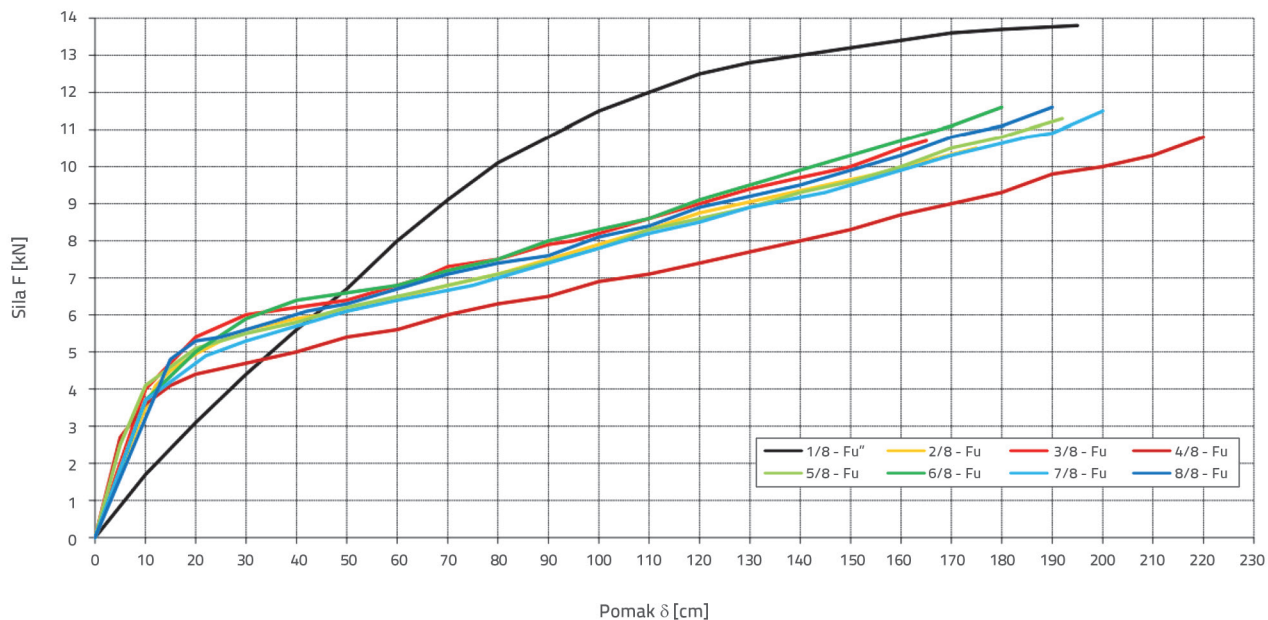
svojevremeno žilavosti čelične armature. Dijagram opterećenje-pomak je linearan do pojave prve pukotine, nakon čega poprima parabolični izgled do sloma.

Uzorci armirani prednapetim šipkama od CFRP-a slomili su se drobljenjem betona tlačne zone, nakon čega je uslijedilo puknuće šipki od CFRP-a (slika 13.). Slom uzorka armiranih CFRP šipkama nastupio je pri silama koje su 15 do 25% manje od sile sloma referentnog uzorka armiranog čeličnom armaturom.



Slika 13. Karakteristični slom uzorka stupa armiranog CFRP šipkama i posmičnom mrežicom

Analiza rezultata linije P- δ uzorka (opterećenje-progib) armiranih prednapetim šipkama od CFRP-a (uzorci 2/8 do 8/8) pokazuje veću krutost u elastičnom području od



Slika 14. Preklopljeni dijagrami opterećenje – progib svih ispitanih uzoraka stupova (dijagram konvencionalno armiranog stupa istaknut je crnom bojom)



Slika 15. Ispitivanje nosivosti – uzorak 7/8 – pomak neposredno prije sloma

uzorka armiranog čeličnom armaturom. Karakteristika ovih dijagrama je bilinearnost koja se očituje u strmijem pravcu u elastičnom području u odnosu na referentni uzorak, ali se nakon pojave prve pukotine nagib pravca smanjuje, što rezultira padom krutosti i u konačnici manjoj vrijednosti sile sloma. Međutim i ovako dobiveni rezultati dvostruko premašuju zahtjeve nosivosti prema internim propisima naručitelja [4, 5].

Usporedba odnosa opterećenje – progib ispitanih uzoraka prilikom ispitivanja nosivosti prikazana je na slici 14. Sila pri slomu prvog – kontrolnog, konvencionalno armiranog uzorka iznosila je 13,8 kN. Sila pri slomu uzorka armiranih CFRP šipkama bila je u rasponu od 10,5 kN do 11,6 kN. Kod svih uzoraka je zabilježena velika deformacija prije sloma, što potvrđuje da stupovi posjeduju značajan rotacijski kapacitet poprečnog presjeka (slika 15.).

7. Zaključak

U području koje norma [3] definira kao elastičnu fazu, odnosno do dosizanja nominalne sile F_{n} , svi ispitani uzorci ponašali su se linearno elastično prilikom ispitivanja na savijanje. Pri tome su stupovi prednapeti CFRP šipkama pokazali veću krutost u tom području od kontrolnog uzorka armiranog konvencionalnom čeličnom armaturom. Pojava pukotina nije zabilježena. U fazi 2, odnosno pri ispitivanju do sloma, uzorci armirani prednapetim CFRP šipkama otkazali su mehanizmom sloma preko betona, što je bilo očekivano. Kod kontrolnog uzorka armiranog čeličnom armaturom slom se manifestirao drobljenjem betona uz prethodno popuštanje armature. Odnos opterećenja i pomaka vrha prednapetog stupa je bilinearan prije i nakon pojave prve pukotine koja se javlja pri opterećenju od približno 4,5 kN.

Iako je CFRP elastičan materijal i nema svojstvo plastične deformacije, svi uzorci armirani šipkama od CFRP-a imali su istu, vrlo visoku, vrijednost deformacije. Razlog tome može se pronaći u duktilnosti postignutoj preko betona visoke čvrstoće i niskom mehaničkom koeficijentu armiranja uslijed kojeg je ostvaren veliki rotacijski kapacitet poprečnog presjeka.

Budući da je kontrola proklizavanja šipki iskazala dobre rezultate, može se reći da su stupovi armirani prednapetim CFRP šipkama zadovoljili zahtjeve koji se na takav proizvod postavljaju tijekom uporabe, odnosno da se mogu koristiti za predviđenu namjenu kao i stupovi armirani konvencionalnom armaturom.

Posmična armatura nije pokazala prednost u odnosu spram korištenja sintetičkih makrovlakana kao dodatka koji popravljaju značajke betona.

Trajnosne značajke novog tipa stupova nisu ispitivane, ali se očekuje da će biti znatno povoljnije u odnosu na konvencionalni proizvod.

Daljnje unaprjeđenje stupova armiranih prednapetim CFRP šipkama može se ostvariti većim stupnjem prednapinjanja, koji bi se mogao postići poboljšanjem učinkovitosti u području usidrenja na mjestu unosa sile. Međutim za to je potrebno provesti dodatna ispitivanja u laboratoriju.

Zahvala

Istraživanje prikazano u ovom radu ostvareno je u suradnji s tvrtkom T.B.S. d.o.o. iz Jastrebarskoga. Ta je tvrtka specijalizirana za projektiranje i proizvodnju centrifugiranih armiranobetonskih stupova šupljeg kružnog poprečnog presjeka te je vodeći proizvođač armiranobetonskih stupova za električnu distributivnu mrežu Hrvatske Elektroprivrede. Posebna zahvala gospodi Ivanu Puharu i Josipu Špoljaru na nesebičnoj pomoći i savjetima tijekom izrade uzoraka kao i kolegama Dragutinu Šporecu, Marku Markoviću, Tomislavu Brozoviću i Mladenu Dijaniću na strpljivosti i kolegijalnosti pri ispitivanju nemalog broja uzoraka.

LITERATURA

- [1] Kišiček, T., Sorić, Z., Rak, M.: Ispitivanje greda i ploča armiranih šipkama od PAV-a, *GRAĐEVINAR*, 59 (2007) 7, pp. 581-595
- [2] Zakon o građevnim proizvodima, „Narodne novine“ broj 76/13., 30/14, 130/17 i 39/19.
- [3] HRN EN 12843:2004: Predgotovljeni betonski proizvodi - Stupovi i motke (EN 12843:2004) Precast concrete products - Masts and poles (EN 12843:2004)
- [4] Interni propis Hrvatske Elektroprivrede: N.020.08: Tipizacija betonskih stupova niskonaponske mreže: HEP, Zagreb, 2008.
- [5] Interni propis Hrvatske Elektroprivrede: N.022.04: Tipizacija betonskih stupova okrugle izvedbe za 20(10) kV vodove s preporukom za projektiranje i primjenu, HEP, Zagreb, 2004.
- [6] Interni propis Hrvatske Elektroprivrede: N.012.02: Tehnički uvjeti za izgradnju TS 10(20/0,4 kV 100/250) kVA – stup, HEP, Zagreb, 2002.
- [7] Tomičić, I., Sorić, Z., Kišiček, T., Galić, J.: Betonske konstrukcije mostova i zgrada armirane šipkama ili kabelima FRP-a: Zbornik radova Objekti na autocestama, HDGK, Plitvička jezera 2002., pp. 219-229
- [8] Guide for the Design and Construction of structural Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI Committee 440, ACI 440.1R-06, American Concrete Institute 2006.
- [9] Meier, U.: Carbon Fiber Reinforced Polymers: Modern Materials in Bridge Engineering, Structural Engineering International, Journal of International Association for Bridge and Structural Engineering, 2 (1992) 1, pp. 7-12
- [10] Ceroni, F., Cosenza, E., Gaetano, M., Pecce, M.: Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members, *Cement Concrete Comp.*, 28 (2006) 10, pp. 857-868.
- [11] FRP Reinforcement in Concrete Structures, International Federation for Structural Concrete – Fib: Task Group 9.3, Lausanne, fib bulletin 40 (2007), pp. 1-147.
- [12] Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons, ACI Committee 440, ACI 440.4R-04, American Concrete Institute 2004.
- [13] Pilakoutas, K., Guadagnini, M., Neocleous, K., Matthys, S.: Design guidelines for FRP reinforced concrete structures, *Structures and Buildings*, Vol. 164, Issue SB4, ICE Publishing, Institution of Civil Engineers, pp. 255-263
- [14] Terrasi, G.P., Bättig, G., Brönnimann, R.: High-strength spun concrete poles prestressed with CFRP, FRPRCS-5, Non-Metallic Reinforcement for Concrete Structures, ISBN 07277-3009-6, University of Cambridge, England 16-18 Jul 2001, Ed. C. Burgoyne, pp. 1103-1112
- [15] Terrasi, G.P.: Mit Kohlenstoffasern vorgespannte Schleuderbetonrohre. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA, Diss. ETH Nr. 12'454, EMPA Bericht 240, 1997
- [16] Shalaby, A.M., Fouad, F.H., Albanese R.: Strength and deflection behaviour of spun concrete poles with CFRP reinforcement, *Precast/Prestressed Concrete Journal*, Chicago, IL: Spring 2011, pp. 55-77
- [17] Roberts, E.E., Lees, J.M., Hault, N.A.: Flexural Fatigue Performance of CFRP Prestressed Concrete, *Advances in Structural Engineering*, 15 (2021) 4, pp. 575- 588
- [18] Toumpanaki, E., Lees, J.M.: Terrasi, G.P.: Bond Durability of Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) Tendons Embedded in High Strength Concrete, *ASCE Journal of Composites for Construction*, 2018
- [19] Terrasi, G.P., Affolter, C., Barbezat, M.: Numerical Optimization of a Compact and Reusable Pretensioning Anchorage System for CFRP Tendons: *Journal of Composites for Construction: American Society of Civil Engineers*, 15 (2011) 2, pp. 126-135

- [20] Japan Society of Civil Engineers, Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials, JSCE, Tokyo, Concrete Engineering Series 23, 1997, pp 1-325.
- [21] Clarke, J.L., O'Regan, D.P., Thirugnanenedran, C.: EUROCRETE Project, Modification of Design Rules to Incorporate Non-Ferrous Reinforcement, EUROCRETE Project, Sir William Halcrow & Partners London, 1996.
- [22] Canadian Standards Association, Canadian Highway Bridge Design Code, Section 16: Fibre Reinforced Structures, CSA, Canada, 1996, pp. 1-25
- [23] Pilakoutas, K., Gaudagnini, M., Neocleous, K., Matthys, S.: The FIB Perspective on FRP Reinforcement in RC: Proceedings FRPRCS-9 Sydney, Australia: 2009.
- [24] HRN EN 1992-1-1: Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija - Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade
- [25] HRN EN 1992-1-1 /NA: Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija - Dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade - Nacionalni dodatak
- [26] Izvještaj o napretku istraživanja centrifugiranih armiranobetonskih stupova šupljeg kružnog presjeka TIP STUPA: SB 315/10, INSTITUT IGH d.d., broj izvještaja: 72520-0917/17, 2017.