

Primljen / Received: 20.3.2017.

Ispravljen / Corrected: 10.10.2018.

Prihvaćen / Accepted: 15.11.2018.

Dostupno online / Available online: 10.7.2020.

Usporedba ovijanja betona normalne i visoke čvrstoće GFRP-om i CFRP-om

Autori:



Mr.sc. **Muhammad Rameez Sohail**
rameez.sohail@uettaxila.edu.pk

Autor za korespondenciju



Dr.sc. **Wasim Khaliq**, dipl.ing.građ.



Doc.dr.sc. **Naveed Ahmad**, dipl.ing.građ.
naveed.ahmad@uettaxila.edu.pk



Mr.sc. **Muhammad Usman Rashid**, dipl.ing.građ.
usman.rashid@uettaxila.edu.pk



Mr.sc. **Rana Waqas**, dipl.ing.građ.
rana.waqas@uettaxila.edu.pk



Mr.sc. **Usman Muhammad**, dipl.ing.građ.
usman.m@uettaxila.edu.pk

Taxila Sveučilište za inženjerstvo i tehnologiju
Pakistan

Izvorni znanstveni rad

Muhammad Rameez Sohail, Wasim Khaliq, Naveed Ahmad, Muhammad Usman Rashid, Rana Waqas, Usman Muhammad

Usporedba ovijanja betona normalne i visoke čvrstoće GFRP-om i CFRP-om

Provedeno je eksperimentalno i analitičko istraživanje kako bi se utvrdilo povećanje čvrstoće i duktilnosti betonskih uzoraka ovijenih GFRP-om i CFRP-om od betona normalne čvrstoće i betona visoke čvrstoće. Podaci ispitivanja uspoređeni su s teorijskim predviđanjima iz triju sjevernoameričkih smjernica za izvedbu i europskih smjernica za FRP. Rezultati ispitivanja pokazuju kako je učinkovitost i GFRP-a i CFRP-a izraženija u betonu normalne čvrstoće u usporedbi s betonom visoke čvrstoće.

Ključne riječi:

ovijanje betona, ugljična vlakna, staklena vlakna, uzdužna deformacija, volumetrijska deformacija, apsorpcija energije

Original scientific paper

Muhammad Rameez Sohail, Wasim Khaliq, Naveed Ahmad, Muhammad Usman Rashid, Rana Waqas, Usman Muhammad

Comparison of GFRP and CFRP confinement of normal and high strength concrete

An experimental and analytical study was conducted to quantify the increase in strength and ductility of GFRP and CFRP confined concrete cylinders made of normal strength concrete and high strength concrete. The test data are also compared with theoretical predictions from three North American and European FRP design guidelines. The test results show that the effectiveness of both GFRP and CFRP is more pronounced in normal strength concrete compared to high strength concrete.

Key words:

confinement of concrete, carbon fibres, glass fibres, longitudinal strain, volumetric strain, energy absorption

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Muhammad Rameez Sohail, Wasim Khaliq, Naveed Ahmad, Muhammad Usman Rashid, Rana Waqas, Usman Muhammad

Vergleich von normalen und hochfesten Betonhüllen mit GFK und CFK

Durchgeführt wurde eine experimentelle und analytische Untersuchung, um die Erhöhung der Festigkeit und Duktilität von GFK und CFK beschichteten Betonproben aus normalfestem Beton und hochfestem Beton festzustellen. Die Untersuchungsdaten wurden auch mit den theoretischen Vorhersagen aus den drei nordamerikanischen Richtlinien für die Ausführung und der europäischen FRP-Richtlinien verglichen. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die Wirksamkeit sowohl von GFK also auch von CFK bei normalfestem Beton im Vergleich zu hochfestem Beton ausgeprägter ist.

Schlüsselwörter:

Betonhülle, Kohlefaser, Glasfaser, Längsverformung, Volumenverformung, Energieabsorption

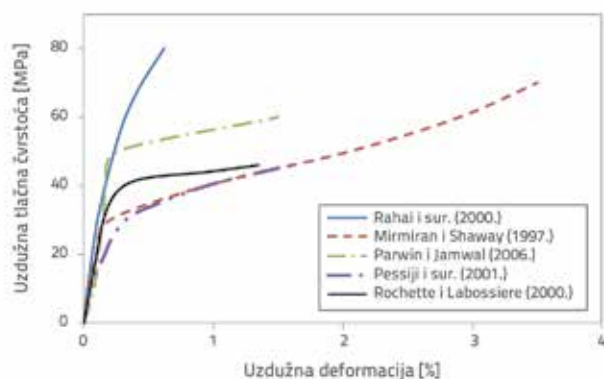
1. Uvod

Građevine u uporabi izložene su povećanim uporabnim opterećenjima i teškim okolišnim uvjetima. Sanacija i dogradnja postojećih građevina tradicionalno se izvode čeličnim ili armiranobetonskim oblogama. Ali, relativno noviji materijali poput polimera armiranih vlaknima, dobivaju na popularnosti zbog svojih superiornih svojstava u odnosu na klasične materijale. Konstrukcijski elementi pojačani tim materijalima imaju visok omjer čvrstoće i težine, visoku otpornost na koroziju, duži rok trajanja i poboljšanu duktilnost. Armiranobetonski (AB) stupovi kritični su elementi u konstrukciji na koje djeluju vertikalna i bočna opterećenja i stoga su podložniji otkazivanju tijekom potresa [1]. Stoga ih je potrebno seizmički pojačati, što je naglašeno urušavanjem i oštećenjem nekolicine AB građevina tijekom potresa. Tijekom potresa, dobra disipacija energije osigurana je kvalitetnim ovijanjem betona, što rezultira povećanjem sigurnosti konstrukcije. Požar na konstrukciji je druga opasnost koja rezultira pogoršanjem čvrstoće betona [2] što se može pojačati s vlaknima armiranim polimerima (eng. *Fiber Reinforced Polymer* - FRP). I beton normalne čvrstoće (eng. *Normal Strength Concrete* - NSC) i beton visoke čvrstoće (eng. *High Strength Concrete* - HSC) imaju različita ponašanja u uvjetima požara [3], pa treba pažljivo odabrati odgovarajući sustav pojačanja (naknadne ugradnje) kako bi se ispunili zahtjevi za čvrstoćom u takvim konstrukcijama. To se može postići odabirom odgovarajućeg FRP-a za ovijanje požarom oštećenih betonskih konstrukcijskih elemenata.

Vanjsko omatanje betonskih konstrukcija korištenjem FRP kompozita osigurava značajnu količinu bočnog ovijanja, što dovodi do povećane uzdužne čvrstoće i apsorpcije energije kao što je navedeno u literaturi [4-7]. Istraživači su koristili nekoliko parametara poput čvrstoće neovijenog betona, oblika uzoraka, prisutnosti unutarnje armature, vrste FRP-a, orijentacije vlakana FRP omota i broja omatajućih slojeva FRP-a [8-13].

Na slici 1. prikazan je odnos naprezanje - relativna deformacija uzoraka betona ovijenih FRP-om iz različitih prije spomenutih istraživanja. Može se vidjeti da je odgovor uzoraka koje su predstavili Rahai i suradnici [8] značajno krući u odnosu na druge, a to se može pripisati betonu visoke čvrstoće (45 MPa) ovijenim ugljičnim vlaknima armirani polimer (eng. *Carbon Fiber Reinforced Polymer* - CFRP). Pessiki i suradnici [11] koristili su cilindrične uzorke visine 610 mm i promjera 152 mm s unutarnjom armaturom i ovojem od FRP-a, s vlaknima orijentiranim u smjeru od 45 ° u odnosu na smjer oboda, što povećava duktilnost u uzorcima. Takvo se ponašanje gotovo podudara s kvadratnim uzorcima bez armature koje su testirali Rochette i Labossiere [12], a koji su omotani s ugljičnim vlaknima usmjerenim 15° u odnosu na smjer oboda. To pokazuje da ponašanje betona ovijenog FRP-om ovisi o prisutnosti unutarnje armature kao i o obliku uzorka. Ovijanje kružnih betonskih uzoraka visokih 305 mm i promjera 152,5 mm, koje su ispitali Parwin i Jamwal [10], pokazuju prilično različit odgovor u odnosu na Mirmirana i Shahawaya [5], a što se pripisuje broju slojeva korištenih za ovijanje i o njihovoj orijentaciji, kao i vrsta materijala za ovijanje. Može se vidjeti da manja debljina

ovijanja staklenim vlaknima armiranog polimera (eng. *Glass Fiber Reinforced Polymer* - GFRP), a što su ispitali Parwin i Jamwal [10], uzrokuje krući odgovor u usporedbi s vrlo duktilnim odgovorom kod 6, 10 i 14 slojeva GFRP-a koji koriste Mirmiran i Shahaway.



Slika 1. Odnos naprezanje – relativna deformacija različitih ovijenih uzoraka

Razlika u odgovoru betona ovijenog FRP-om može se pripisati čvrstoći neovijenog betona, unutarnjoj armaturi, orijentaciji FRP traka, vrsti FRP-a koji se koristi za ovijanje i obliku uzorka. S takvom varijacijom parametara koji utječu na ponašanje ovijenog betona otežano je točno predviđanje odgovora. Nadalje, postoji potreba za vrednovanjem predviđanja u različitim projektnim modelima, normama za projektiranje koji su pod značajnim utjecajem niza prije spomenutih promjenjivih parametara. Stoga je poželjno prepoznati i kvantificirati učinkovitije i predvidljivije ovijanje proučavanjem odnosa naprezanje – relativna deformacija dva tipa FRP sustava, CFRP i GRRP.

2. Program i postupak ispitivanja uzoraka

Kako bi se proučio usporedni odgovor naprezanje – relativna deformacija uzoraka ovijenih GFRP-om i CFRP-om, proveden je sveobuhvatni program ispitivanja za tri serije betona različite čvrstoće. Podaci dobiveni ispitivanjima upotrijebljeni su za usporedbu karakteristika ovijanja s dvije vrste FRP-a. Nadalje, podaci su korišteni za proučavanje i vrednovanje predviđanja za ovijanja dobivenih različitim normama i smjernicama.

2.1. Sastav smjese i ispitni uzorci

Izrađeno je ukupno 27 cilindričnih uzoraka, veličine 150 mm × 300 mm, u tri serije, od betona normalne, srednje i visoke čvrstoće. Sastav mješavina tih serija betona prikazan je u tablici 1. Uzorci su njegovani metodom potapanja u spremnik s vodom tijekom 28 dana. Primijenjena je metoda ovijanja mokrim FRP-om.

Od 27 uzoraka, devet je ovijeno polimerom Sikawrap Hex 230C koji je armiran ugljičnim vlaknima, a devet uzoraka s dva ovoja staklenim vlaknima armiranim polimerom Sikawrap Hex 106G s ljepljivom epoksidnom smolom Sikadur 330, koja ima vlačnu

čvrstoću od 33,8 MPa i istezljivost od 1,2 %. Čvrstoća i fizikalna svojstva tih materijala prikazani su u tablici 2. Preklapanje je držano na 10 cm u skladu sa zahtjevima sustava kako bi se izbjeglo lokalizirano otkazivanje veze na preklapu.

Tablica 1. Sastavi betonskih mješavina

Sastojci	Seriya 1	Seriya 2	Seriya 3
Cement [kg/m ³]	475	572	1071
Pijesak [kg/m ³]	617	550	535
Agregat [kg/m ³]	1236	1144	1060
Vodocementni omjer	0,4	0,4	0,35
BASF 850 [kg/m ³]	0,171	-	-
SiO ₂ [kg/m ³]	-	1,38	2,21
FOSPAK 430R [kg/m ³]	-	0,345	0,552
Tlačna čvrstoća nakon 28 dana [MPa]	29,7	42,48	64,67

Tablica 2. Svojstva Sikawrap Hex 230C i Sikawrap Hex 106G s epoksidnom smolom Sikadur 330

Svojstvo	Sikawrap Hex 230C	Sikawrap Hex 106G
Vlačna čvrstoća [MPa]	715	244
Vlačno izduženje [%]	1,09	1,43
Vlačni modul elastičnosti [MPa]	59896	16215
Debljina sloja [mm]	0,381	0,33

2.2. Uređaj za ispitivanje i postupak ispitivanja

Za uzdužno tlačno ispitivanje uzoraka korišten je univerzalni stroj, nosivosti 2000 kN. Za prikaz i snimanje deformacija upotrijebljen je uređaj Micro-Measurements P3 proizvođača Vishay Precision Group. Ovaj sustav može snimati relativne deformacije pomoću linearnih ekstenziometara s četiri ulazna kanala. Za mjerenje relativnih deformacija korišteni su Vishay Micro-Measurements C2A-Series 062LW mjerači s otporom od 350 oma. Mjerači su pričvršćeni na uzorke u vodoravnom, vertikalnom i dijagonalnom (45°) rasporedu kako bi se izmjerila

uzdužna i poprečna relativna deformacija. Mjerači deformacija s brojčanikom su korišteni u svakom trećem ispitivanju kako bi se provjerila točnost mjerenja linearnih mjerača. Razmještaj postavljene opreme za ispitivanje prikazan je na slici 2.

3. Rezultati ispitivanja i rasprava

Ispitivanja su provedena na neovijenim i ovijenim betonskim uzorcima gdje je mjerena tlačna čvrstoća ovijenog uzorka, granična nosivost s usporedbom uzdužnih, obodnih te volumetrijskih relativnih deformacija. Volumetrijska relativna deformacija (ε_v) može se izmjeriti zbrajanjem uzdužne relativne deformacije (ε_l) i dvostruke vrijednosti obodne relativne deformacije (ε_o).

$$\varepsilon_v = \varepsilon_l + 2\varepsilon_o$$

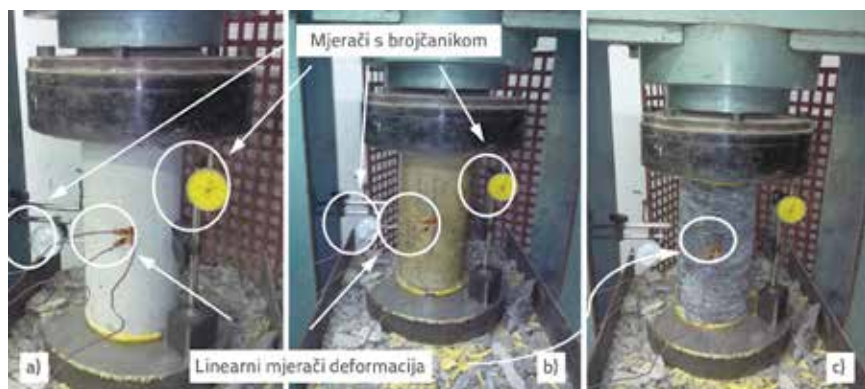
Usporedba se provodi između ovijene i neovijene čvrstoće i povećanja uzdužne nosivosti. Tijekom pokusa uzeta su u obzir i analizirana vizualna zapažanja o ponašanju tih uzoraka.

3.1. Uzdužna tlačna čvrstoća

Ispitivanja uzdužne tlačne čvrstoće provedena su kako bi se utvrdio učinak ovijanja FRP-om za beton normalne, srednje i visoke čvrstoće.

Tablica 3. Podaci iz ispitivanja uzdužne tlačne čvrstoće

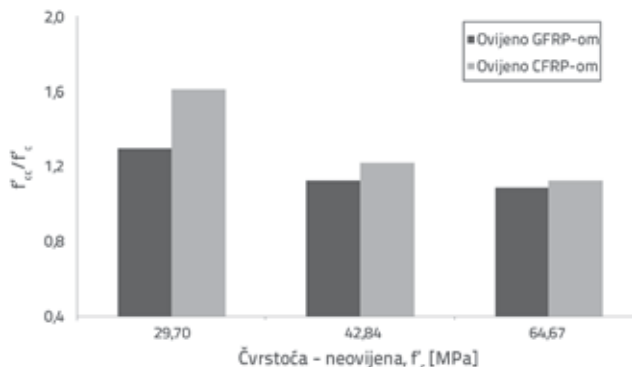
Seriya	Tlačna čvrstoća uzoraka [MPa]		
	Kontrolni	Ovijen s GFRP	Ovijen s CFRP
Seriya 1 (30 MPa)	29,79	38,13	47,37
	30,27	39,09	49,02
	29,03	38,13	46,82
Seriya 2 (42 MPa)	43,02	47,85	52,47
	42,54	47,92	52,75
	42,95	48,19	51,44
Seriya 3 (64 MPa)	64,88	68,87	74,46
	64,40	71,07	71,88
	64,74	70,67	70,84



Slika 2. Razmještaj postavljene opreme za mjerenje relativnih deformacija: a) Kontrolni uzorak; b) GFRP ovoji; c) CFRP ovoji

Maksimalna čvrstoća, relativna deformacija i krutost izmjereni su pomoću tih ispitivanja na uzorcima neovijenog betona (kontrolni uzorci) te na uzorcima betona ovijenim GFRP-om i CFRP-om. Tablica 3. prikazuje uzdužnu tlačnu čvrstoću kontrolnih uzoraka i uzoraka ovijenih FRP-om. Rezultati pokazuju da uzorci betona ovijeni CFRP-om pokazuju veći porast uzdužne tlačne čvrstoće u usporedbi s uzorcima ovijenim GFRP-om, kao što je prikazano na slici 3. Međutim, povećanje čvrstoće ovijanjem opada s porastom

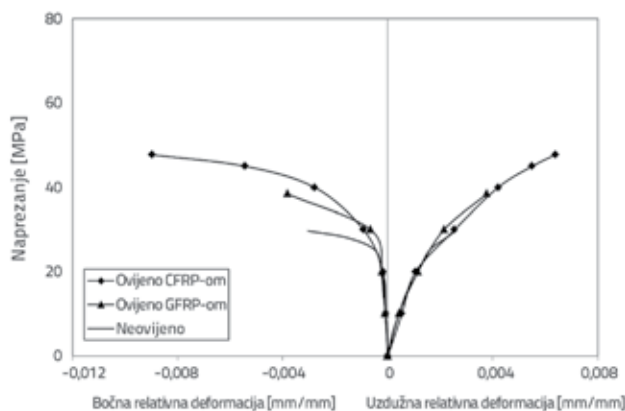
čvrstoće neovijenog betona. To pokazuje da čvrstoća ovijenog betona ovisi o materijalu korištenom za ovijanje kao i o čvrstoći neovijenog betona. Utjecaj neovijenog betona na ovijanje također je zabilježio Pessiki sa suradnicima [11] u svojem istraživanju betona ovijenog FRP-om.



Slika 3. Uzorci ovijeni GFRP-om i CFRP-om uspoređeni s kontrolnim uzorcima

3.2. Odnos naprezanje – relativna deformacija

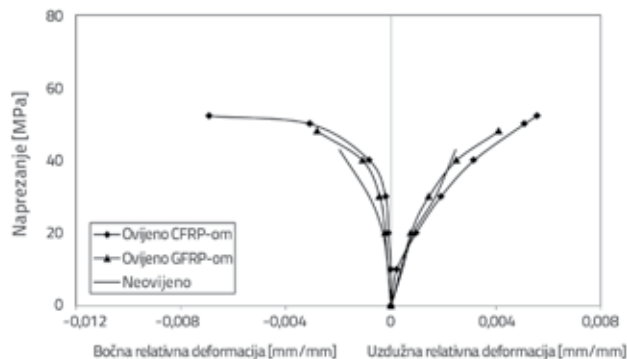
Provedena tlačna ispitivanja korištena su i na betonu ovijenom s FRP-om za proučavanje odnosa naprezanje – relativna deformacija. Odnos naprezanje – relativna deformacija uzoraka ovijenih GFRP-om i CFRP-om uspoređen je i s prethodnim istraživanjima. Usporedba odnosa naprezanje – relativna deformacija uzoraka ovijenih GFRP-om i CFRP-om prikazana je na slikama. 4., 5. i 6.



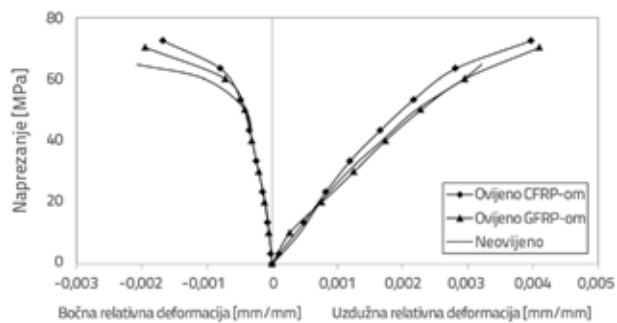
Slika 4. Odnos naprezanje–relativna deformacija ovijenog i neovijenog betona čvrstoće 30 MPa

Beton čvrstoće 30 MPa pokazuje duktilno ponašanje u usporedbi s drugim vrstama betona s nižim vrijednostima naprezanja i većim vrijednostima relativne deformacije. Za uzorke betona čvrstoće 42 MPa, uzorci ovijeni CFRP-om pokazuju veća poboljšanja čvrstoće i duktilnosti u usporedbi s uzorcima ovijenim GFRP-om. Suprotno tome, beton čvrstoće 64 MPa pokazuje kruće ponašanje s većim vrijednostima naprezanja i

manjom odgovarajućom relativnom deformacijom u uzdužnom i u obodnom smjeru. Točka bifurkacije može se vidjeti pri relativnoj uzdužnoj relativnoj deformaciji od 0,002 u odnosu naprezanje – relativna deformacija za sve uzorke. To je mjesto gdje ovijajući sloj FRP-a počinje sudjelovati u preuzimanju opterećenja. Uzorci ovijeni CFRP-om pokazuju veća poboljšanja ovijenosti i čvrstoće u usporedbi s uzorcima ovijenim GFRP-om. Uzorci ovijeni CFRP-om apsorbiraju više energije i pokazuju kontrakciju pri većem opterećenju.

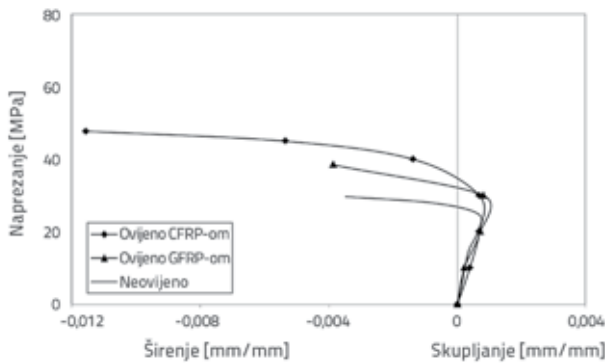


Slika 5. Odnos naprezanje-deformacija ovijenog i neovijenog betona čvrstoće 42 MPa

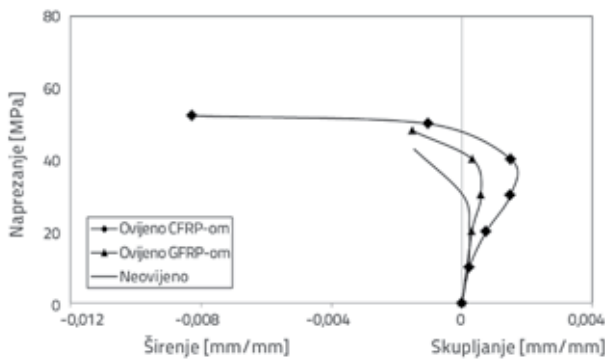


Slika 6. Odnos naprezanje–relativna deformacija ovijenog i neovijenog betona čvrstoće 64 MPa

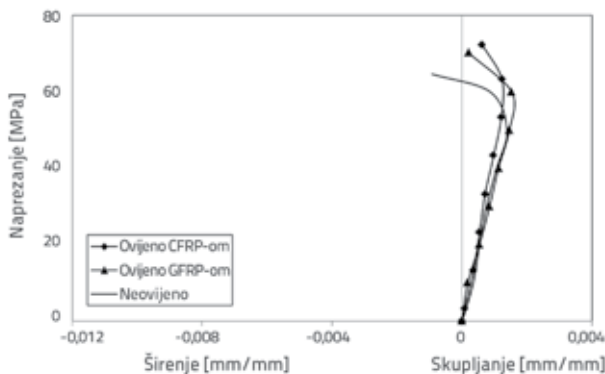
Odnos naprezanja i volumetrijske relativne deformacije za tri vrste betona prikazan je na slikama. 7., 8. i 9. Odnos naprezanje – volumetrijska relativna deformacija pokazuje da uzorci doživljavaju kontrakciju u uzdužnom smjeru pod uzdužnim tlačnim opterećenjem, a zatim neposredno prije sloma uzorci se počinju širiti bočno, što ukazuje na veće relativne deformacije u bočnom smjeru. Odnos naprezanje – volumetrijska relativna deformacija uzoraka ovijenih GFRP-om slijedi sličan obrazac kao i neovijeni uzorci kod kojih dolazi do kontrakcije uzoraka kad su izloženi uzdužnom tlačnom opterećenju. Uzorci ovijeni GFRP-om apsorbiraju energiju do njihove nosivosti, a zatim se počinju širiti u bočnom smjeru, ali zbog ovijenosti uzorci apsorbiraju više energije od neovijenih uzoraka. To se može opravdati činjenicom da se ovijanje odupire bočnom širenju što omogućuje da ovijeni uzorci podnose veća opterećenja prije širenja.



Slika 7. Naprezanje–volumetrijska relativna deformacija ovijenog i neovijenog betona čvrstoće 30 MPa



Slika 8. Naprezanje–volumetrijska relativna deformacija ovijenog i neovijenog betona čvrstoće 42 MPa



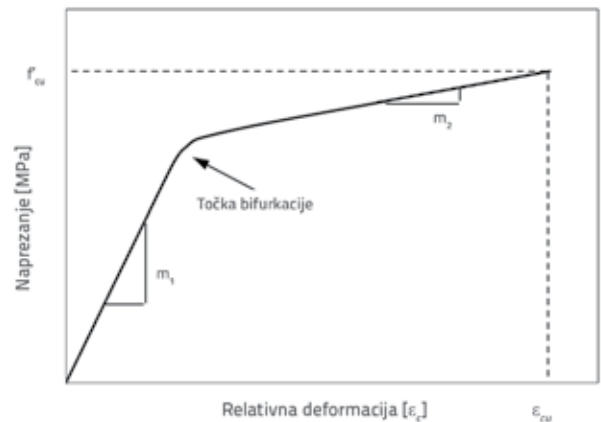
Slika 9. Naprezanje–volumetrijska relativna deformacija ovijenog i neovijenog betona čvrstoće 64 MPa

Beton ovijen CFRP-om pokazuje povećanu sposobnost preuzimanja opterećenja bez velike promjene volumena. Uzorci se odupiru i skupljanju i širenju u usporedbi s onima ovijenim GFRP-om. CFRP ovojnica sudjeluje u apsorpiranju energije zajedno s betonom. To rezultira duktilnijim ponašanjem kao što se vidi na uzorcima betona čvrstoće 30 MPa i 42 MPa gdje se uzorci slamaju pri većim bočnim deformacijama. Ponašanje betona čvrstoće 64 MPa pokazuje veću krutost zbog svoje veće čvrstoće i povećane krutosti zbog FRP-a, dakle, FRP uzrokuje samo povećanje čvrstoće HSC-a.

Podaci ispitivanja također su uspoređeni s nekoliko prethodnih sličnih radova. Rahai i suradnici [8] upotrijebili su CFRP ovojnice debljine 0,9, 1,8, 2,7 i 3,6 mm, a Bisby i suradnici [14] upotrijebili su CFRP ovojnice na betonskim cilindrima od 100 mm do 200 mm kako bi prikazali odnos naprezanje – relativna deformacija. Slično tome, Pessiki i suradnici [11] koristili su FRP ovojnice različitih čvrstoća i gustoća vlakana na uzorcima betona visine 610 mm i promjera 152 mm. Odnos naprezanje – relativna deformacija slijedi sličan obrazac kao u prije navedenim istraživanjima, međutim, vrijednosti odgovarajućih naprezanja – relativna deformacija su različite, što se pripisuje razlici u veličini uzorka, čvrstoći i gustoći vlakana FRP ovojnice.

3.3. Odnos naprezanje – krutost betona ovijenog FRP-om

Naprezanje u uzorcima običnog i ovijenog betonskog valjka izračunano je dijeljenjem primijenjenog opterećenja s izvornom ploštinom poprečnog presjeka betona. Pri izračunu naprezanja debljina ovojnice nije uzeta u obzir, jer je zanemariva u usporedbi s dimenzijama uzoraka. Krutost je procijenjena prema odnosu naprezanje – relativna deformacija izračunavanjem nagiba m_1 i m_2 u bifurkacijskim točkama kako su predložili Samaan i suradnici [15]. Početni nagib krivulje je m_1 , a nagib nakon bifurkacijske točke je m_2 , kao što je prikazano na slici 10.

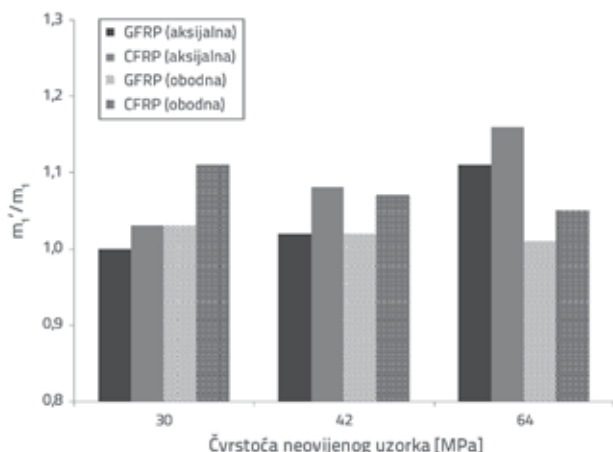


Slika 10. Nagibi krutosti i bifurkacijska točka krivulje naprezanje – relativna deformacija

Povećanje krutosti prikazano je na slici 11. u kojoj je omjer krutosti ovijenih uzoraka (m'_1) i krutosti neovijenih uzoraka (m_1) prikazan naspram krutosti neovijenih uzoraka i u uzdužnom i u obodnom smjeru.

Krutost (m'_1) u uzdužnom smjeru povećava se od 1,02 do 1,11 puta u slučaju GFRP-a, a u slučaju CFRP-a povećava se od 1,03 do 1,16 puta, kako se povećava čvrstoća neovijenog betona, kao što je prikazano na slici 11. U obodnom smjeru krutost se također povećava, ali porast krutosti opada kako se povećava čvrstoća neovijenog betona. Samo uzorci betona čvrstoće 64 MPa pokazuju kruće ponašanje u usporedbi s prethodnim istraživanjima zbog razlike u omjeru smjese i uvjeta ispitivanja,

dok uzorci čvrstoća 30 MPa i 42 MPa pokazuju slično ponašanje prethodno objavljeno za beton ovijen GFRP-om i CFRP-om [8, 9].



Slika 11. Usporedba krutosti ovijenih uzoraka

3.4. Ponašanje s obzirom na relativnu deformaciju

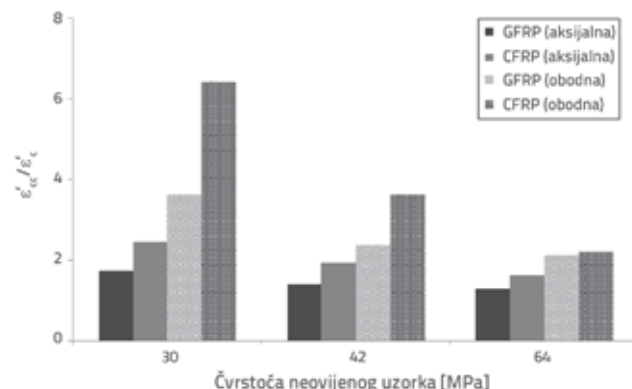
Relativna deformacija pri slomu uzoraka je zabilježena mjeračima relativnih deformacija koji su pričvršćeni i u vertikalnom i vodoravnom smjeru pa su zabilježene i vrijednosti uzdužne i obodne relativne deformacije. Maksimalne vrijednosti relativne deformacije prikazane su u tablici 4.

Tablica 4. Prosječna uzdužna i obodna relativna deformacija sloma

Čvrstoća neovijenog uzorka	Vrsta ovijanja	Prosječna uzdužna relativna deformacija pri slomu	Prosječna obodna relativna deformacija pri slomu
30 MPa	Neovijen	0,0026	0,0014
	Ovijen GFRP-om	0,0045	0,0051
	Ovijen CFRP-om	0,0064	0,0090
42 MPa	Neovijen	0,0029	0,0019
	Ovijen GFRP-om	0,0041	0,0045
	Ovijen CFRP-om	0,0056	0,0069
64 MPa	Neovijen	0,0032	0,0022
	Ovijen GFRP-om	0,0041	0,0047
	Ovijen CFRP-om	0,0052	0,0049

Odnos relativne deformacije pri slomu ovijenih uzoraka (ϵ'_{cc}) u odnosu na relativne deformacije pri slomu neovijenih uzoraka (ϵ'_c) prikazan je na slici 12. Može se vidjeti da su obodne relativne deformacije u neovijenim uzorcima od običnog betona mnogo manje od uzdužnih relativnih deformacija. Odnos između obodnih i uzdužnih relativnih deformacija varira od 0,15 do 0,20, jer se Poissonov koeficijent za beton nalazi u tom području. Zabilježeno je da je povećanje obodnih relativnih deformacija ovijenih uzoraka

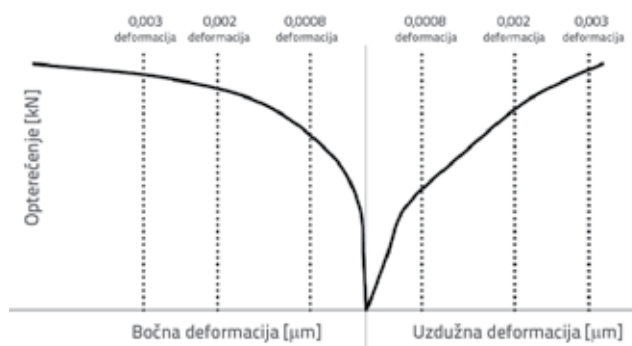
mного veće od povećanja uzdužne relativne deformacije zbog poboljšanja duktilnosti koje pruža ovijanje FRP-om duž oboda. Uzorci ovijeni CFRP-om pokazuju povećanje relativne deformacije pet puta veće od relativne deformacije neovijenih uzoraka, a uzorci ovijeni GFRP-om pokazuju povećanje relativne deformacije do dva puta veće u odnosu na neovijene uzorke, što upućuje na to da ovijanje CFRP-om znatno više poboljšava sposobnost deformacije betona u odnosu na uzorke ovijene GFRP-om.



Slika 12. Usporedba uzdužne i obodne relativne deformacije ovijenih uzoraka

3.5. Ponašanje s obzirom na duktilnost

Ponašanje s obzirom na duktilnost materijala jest njegova sposobnost apsorpiranja energije. Duktilni materijali omogućuju bolju raspodjelu naprezanja i upozoravaju na predstojeći slom. U slučaju betonskih uzoraka ovijenih FRP-om, duktilnost uzorka dana je u obliku deformabilnosti koja se definira kao omjer granične apsorpcije energije (ili površine ispod krivulje opterećenje - progib) prema apsorpciji energije pri graničnoj zakrivljenosti, kao što je prikazano na slici 13.



Slika 13. Dijagram opterećenje–progib s graničnom relativnom deformacijom za proračun apsorpcije energije

U ovom je istraživanju deformabilnost izračunana pronalaženjem ukupne energije ispod krivulje do sloma i izračunom odnosa između ukupne energije i energije pri graničnim relativnim deformacijama od 0,0008, 0,002 i 0,003, kako je prikazano u tablicama 5. i 6. za uzdužne i obodne smjerove.

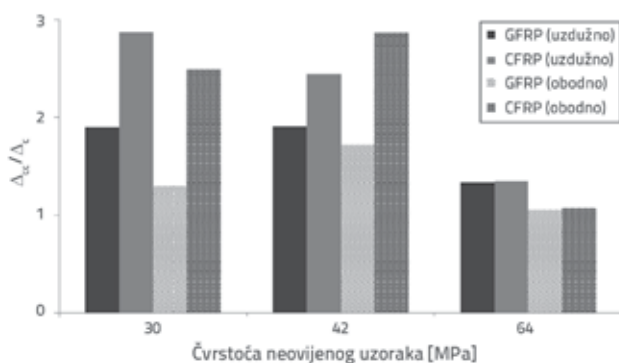
Tablica 5. Faktori deformabilnosti za neovijene betonske uzorke te ovijene GFRP-om i CFRP-om u uzdužnom smjeru

Vrsta ovijanja	Granične relativne deformacije		
	0,0008	0,002	0,003
Neovijen	27,1742	0,1906	0,58
Ovijen GFRP-om	43,5517	0,1868	0,46
Ovijen CFRP-om	53,5423	0,1859	0,46

Tablica 6. Faktori deformabilnosti za neovijene betonske uzorke te ovijene GFRP-om i CFRP-om u obodnom smjeru

Vrsta ovijanja	Granične relativne deformacije		
	0,0008	0,002	0,003
Neovijen	17,5627	0,2332	0,59
Ovijen s GFRP-om	21,2005	0,2346	0,55
Ovijen s CFRP-om	32,1929	0,2380	0,55

Na slici 14. uspoređuje se energija koju apsorbiraju ovijeni uzorci (Δ_{cc}) uzimajući omjer ukupne energije koju apsorbiraju ovijeni uzorci u ukupnoj energiji koju apsorbiraju neovijeni uzorci Δ_c . Na slici 13. se može vidjeti kako je energija koju apsorbiraju uzorci ovijeni GFRP-om 1,33 do 1,99 puta veća od energije koju apsorbiraju kontrolni uzorci u uzdužnom smjeru, dok je energija apsorbirana u obodnom smjeru 1,05 do 1,3 puta veća od energije koju su apsorbirali neovijeni uzorci betona. Uzorci ovijeni CFRP-om pokazuju 1,34 do 2,87 puta veću energiju od one koju apsorbiraju neovijeni uzorci betona, dok u obodnom smjeru taj porast apsorpcije energije iznosi 1,07 do 2,4 puta. Nadalje, porast apsorpcije energije opada kako se povećava čvrstoća uzoraka u uzdužnom i obodnom smjeru za obje vrste ovijanja FRP-om, kao što je izvijestio Rahai sa suradnicima [8]. To pokazuje da je učinkovitost ovijanja FRP-om izraženija kod nižih čvrstoća betona, a postaje manje učinkovita s povećanjem čvrstoće betona.



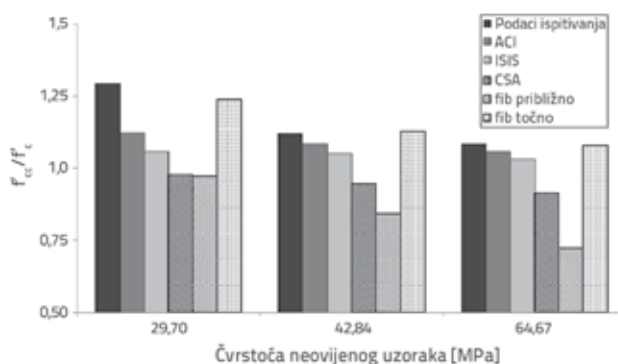
Slika 14. Usporedba apsorpcije energije ovijenih uzoraka

3.6. Predviđanja čvrstoće na temelju različitih smjernica i normi za betone ovijene FRP-om

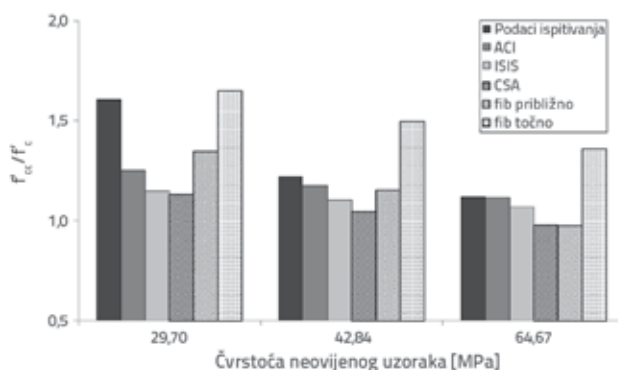
Razvijene su različite norme za projektiranje i smjernice za predviđanje pritiska ovijanja, tlačne čvrstoće ovijanja, nosivosti na uzdužno opterećenje i drugih parametara. Najistaknutije smjernice za projektiranje su one American Concrete Institute ACI, Canadian Standards Association CSA, Canadian Intelligent Sensing for Innovative Structures ISIS i European CEB/FIP Model Code koji koristi smjernice sadržane u tehničkom izvješću Fédération Internationale du Béton, fib bilten 14 [16-19]. Eksperimentalni rezultati dobiveni ispitivanjima uspoređuju se i povezuju s teorijskim vrijednostima predviđenim iz ovih smjernica i normi za FRP. Empirijske formule prikazane su u tablici 7.

3.7. Usporedba teorijskih smjernica s eksperimentalnim rezultatima

Vrijednosti tlačne čvrstoće dobivene eksperimentima i teorijskim smjernicama prikazane su u tablici 8. Može se primijetiti da točna metoda prema fib-u daje najbliža predviđanja za beton ovijen s obje vrste FRP-a. Međutim, ove smjernice precjenjuju čvrstoću uzoraka ovijenih CFRP-om, jer se čvrstoća neovijenog betona povećava iz područja normalne u visoku čvrstoću. Usporedba teorijskih smjernica s eksperimentalnim rezultatima prikazana je na slikama 15. i 16.



Slika 15. Usporedba rezultata ispitivanja i teorijske tlačne čvrstoće GFRP-a



Slika 16. Usporedba rezultata ispitivanja i teorijske tlačne čvrstoće CFRP-a

Tablica 7. Empirijske formule smjernica i normi za projektiranje

Norma za projektiranje	Pritisak ovijanja f_l [MPa]	Tlačna čvrstoća ovijenog betona f'_{cc} [MPa]	Granična uzdužna relativna deformacija ϵ_{ccu}	Granična nosivost na uzdužno opterećenje P_u [kN]
ACI-440-2R-2008	$f_l = \frac{2\epsilon_{fe}E_f n t_f}{D}$ $f_l = \frac{2\epsilon_{fe}E_f n t_f}{D}$	$f'_{cc} = f'_c + 3.3k_s \Psi_f f_l$ $f'_{cc} = f'_c + 3.3k_s \Psi_f f_l$	$\epsilon'_{ccu} = \epsilon'_c \left[1.5 + 12K_b \frac{f_l}{f'_c} \left(\frac{\epsilon_{fe}}{\epsilon'_c} \right)^{0.45} \right]$ $\epsilon'_c = \frac{2f'_c}{E_c - E_2}$ $E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_c}{\epsilon'_{ccu}}$	$P_u = 0.85f'_{cc}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}$
CSA-S806-02	$f_l = \frac{2n t_f f_{frp}}{D}$ f_{frp} će biti manji od $0,004 E_{frp}$ i $0,75^* f_{frpu}$	$f'_{cc} = 0.85f'_c + k_1 k_s f_l$ $k_1 = 6,7(f'_c)^{-0,17}$		$P_u = \alpha f'_{cc} A_c + A_{st} f_y$ $\alpha = 0,85 - 0,0015f'_c$
ISIS MO4 2001	$f_l \geq 4$ MPa	$f'_{cc} = f'_c(1 + \alpha_{pr} \omega_w)$ $\omega_w = \frac{f_l}{f'_c}$		$P_u = \alpha f'_{cc} A_c + A_{st} f_y$ $\alpha = 0,85 - 0,0015f'_c$
CEB/FIP Model Code 2010 fib Približ. metoda	$f_l = \frac{2N_b f_{frpu} t_{frp}}{D_g}$ za potpuno ovijene kružne profile $\rho_f = \frac{4n t_f (b_f / s)}{10}$	$f'_{cc} = f'_c(0.2 + 3\sqrt{\frac{f_l}{f'_c}})$		$P_u = \lambda n f'_{cc} A_c + A_{st} f_y$ $\lambda = 0,8$
CEB/FIP Model Code 2010 fib Točna metoda		$f'_{cu} = \epsilon_{cu} \frac{E_{sec,u}}{E_c}$ $E_{sec,u} = \frac{E_c}{1 + 2\beta \epsilon_{fu}}$ $E_c = 4730\sqrt{f'_c}$	$\epsilon_{cu} = \epsilon_{cc} \left[\frac{E_{cc}(E_c - E_{sec,u})}{E_{sec,u}(E_c - E_{cc})} \right]^{1 - \frac{E_{cc}}{E_c}}$ $E_{cc} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}}$	$P_u = \lambda f'_{cc} A_c + A_{st} f_y$ $\lambda = 0,8$

Objašnjenje pojmova uz tablice 7.

- P_u - granična nosivost na uzdužno opterećenje
- f'_{cc} - tlačna čvrstoća ovijenog betona
- A_g - površina presjeka ovijenog betona
- A_{st} - površina uzdužne čelične armature
- f_y - granica popuštanja uzdužnih čeličnih šipki
- f'_c - tlačna čvrstoća neovijenog betona
- f'_l - bočni pritisak ovijanja
- n - broj FRP slojeva
- t_f - debljina jednog FRP sloja
- E_f - modul elastičnosti FRP-a
- ϵ_{fe} - efektivna relativna deformacija FRP-a = k_e
- Ψ_f - faktor smanjenja čvrstoće FRP-a = 0,95

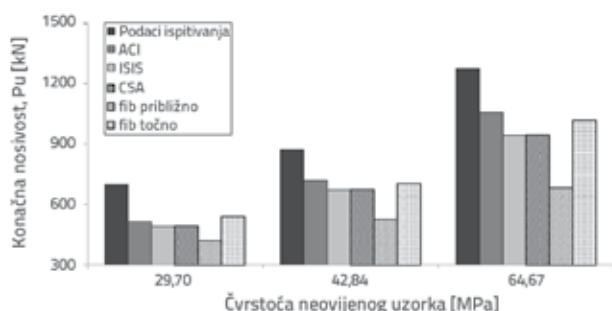
- N_b - broj slojeva FRP-a
- f_{frpu} - granična čvrstoća FRP-a
- t_{frp} - debljina jednog FRP sloja
- D_g - promjer uzorka
- b_f - širina FRP trake u parcijalnom ovijanju
- s - korak u parcijalnom ovijanju
- k_e - koeficijent učinkovitosti ovijanja = 0,55
- λ - faktor smanjenja čvrstoće = 0,8
- $E_{sec,u}$ - sekantni modul elastičnosti
- ρ_f - volumetrijski odnos FRP armature
- $\rho_f = \frac{4n t_f (b_f / s)}{10}$ - za kružne profile

Tablica 8. Eksperimentalni i teorijski rezultati za čvrstoću ovijenih i neovijenih uzoraka

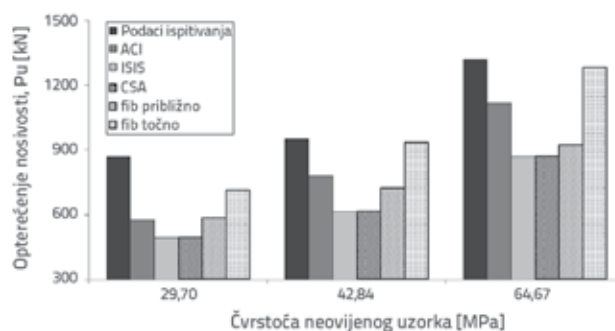
Čvrstoće neovijenih uzoraka f'_c [MPa]	Ovojnica	Eksperiment f'_{cc} [MPa]	ACI f'_{cc} [MPa]	CSA f'_{cc} [MPa]	ISIS f'_{cc} [MPa]	fib približna f'_{cc} [MPa]	fib točna f'_{cc} [MPa]
29,7	GFRP	38,45	33,34	29,7	31,38	28,89	36,82
42,84		47,99	46,48	42,84	44,95	36,13	48,37
64,67		70,20	68,32	64,67	66,78	46,79	69,84
29,7	CFRP	47,74	37,19	33,61	34,16	40,03	48,99
42,84		52,22	50,33	44,78	47,3	49,51	64,11
64,67		72,39	72,16	64,67	69,13	63,24	87,98

Tablica 9. Eksperimentalni i teorijski podaci za nosivost ovijenih i neovijenih uzoraka

Čvrstoće neovijenih uzoraka [MPa]	Način ovijanja	Eksperimentalni rezultati P_u [kN]	ACI P_u [kN]	CSA P_u [kN]	ISIS P_u [kN]	fib približna P_u [kN]	fib točna P_u [kN]
29,7	GFRP	699,79	517	430,6	456	420,63	536,09
42,84		873,36	720,7	605,87	635,74	526,02	704,26
64,67		1277,70	1059,2	876,53	905,13	681,34	1016,87
29,7	CFRP	868,81	576,6	493	495,25	584,16	713,3
42,84		950,40	780,38	641,83	669	720,96	933,44
64,67		1317,56	1177	876,53	937	920,85	1280,93



Slika 17. Usporedba rezultata ispitivanja i teorijske nosivosti GFRP-a



Slika 18. Usporedba rezultata ispitivanja i teorijske nosivosti CFRP-a

ACI, iako konzervativniji od *fib točnih smjernica*, daje bliža predviđanja pri većoj čvrstoći neovijenog betona. *Približne fib smjernice* i CSA smjernice daju vrlo konzervativna predviđanja do te mjere da se predviđene vrijednosti ne mogu sigurno koristiti primjenom ovih smjernica. To se može pripisati činjenici da su približne metode prema fib-u napisane za FRP koji može osigurati visok pritisak ovijanja, a CSA koristi faktor 0,85 za smanjenje čvrstoće neovijenog betona.

Vrijednosti nosivosti iz ispitivanja i predviđanja smjernica za projektiranje FRP-a prikazane su u tablici 9., a njihova je usporedba prikazana na slikama 17. i 18. Uočeno je da sve primijenjene smjernice daju značajno konzervativna predviđanja za niže čvrstoće betona, ali predviđanja se približavaju stvarnim rezultatima pri većim čvrstoćama neovijenog betona. Točna *fib* metoda daje najbliže predviđanje CFRP-a u usporedbi s ostalim smjericama za projektiranje FRP-a. ACI smjernice predviđaju bolje rezultate u usporedbi s metodom *fib točne smjernice* u slučaju ovijenoga GFRP-a. Među svim smjericama, *približna fib metoda* daje najkonzervativnije rezultate u slučaju ovijenoga GFRP-a, a CSA daje najkonzervativnije rezultate u slučaju ovijenoga CFRP-a kako je potvrđeno u drugom usporednom istraživanju ovih modela [20].

3.8. Načini i oblici sloma

Nakon dostizanja krajnjeg opterećenja, pažljivo je pregledana površina ovijenih uzoraka valjka. Načini sloma uzoraka ovijenih GFRP-om i CFRP-om prikazani su na slici 19. Svi uzorci ovijeni CFRP-om otkazali su slomom ovojnice od FRP-a uslijed

obodnog napreznja. Slično je bilo i s uzorcima ovijenim GFRP-om. Do otkazivanja je došlo gotovo bez prethodnog upozorenja iznenadnim slomom kompozitne ovojnice. Za sve ovijene uzorke nije opaženo raslojavanje na mjestu preklapanja ovojnice.



Slika 19. Načini i oblici sloma ispitanih uzoraka: a) ovijen GFRP-om; b) ovijen CFRP-om

4. Zaključak

Na temelju istraživanja predstavljenih u ovom radu izvučeni su sljedeći zaključci:

- Uzdužna tlačna čvrstoća uzoraka betona povećava se ovijanjem FRP-om. Uzorci ovijeni CFRP-om pokazuju veće

- poboljšanje tlačne čvrstoće od 12 do 61 %, dok je tlačna čvrstoća uzoraka ovijenih s GFRP-om povećana od 9 do 29 %.
- Učinkovitost FRP-a smanjuje se s porastom čvrstoće neovijenog podložnog betona.
 - Povećanje uzdužne (osne) relativne deformacije u betonu ovijenom CFRP-om veće je 1,99 do 2,22 puta veće nego za beton ovijen GFRP-om, dok je obodna relativna deformacija betona ovijenog CFRP-om 1,08 do 2,04 puta veća od neovijenog betona tlačne čvrstoće 30 do 64 MPa. Oba uzorka ovijena FRP-om povećavaju obodnu relativnu deformaciju mnogo više od uzdužne relativne deformacije, ali taj učinak povećavanja smanjuje se s porastom čvrstoće neovijenog betona.
 - Na krutost betona ovijenog FRP-om utječe i čvrstoća neovijenog betona, jer se krutost smanjuje povećanjem čvrstoće neovijenog betona, i obrnuto.
 - Povećanje ukupne apsorpcije energije izraženije je kod betona ovijenog CFRP-om u usporedbi s betonom ovijenim GFRP-om; međutim taj prirast u ukupnoj apsorpciji energije opada s porastom čvrstoće neovijenog betona.
 - Smjernice American Concrete Institute ACI 440.2R 2008, Canadian Standard Association (CSA- S806 02), Intelligent Sensing for Innovative Structures Canada (ISIS M04 2001) i *fib približne metode* pokazuju konzervativna predviđanja tlačne

čvrstoće betona, međutim, predviđanja iz ovih smjernica daju bliže rezultate čvrstoće s povećanjem čvrstoće neovijenog betona.

- Među svim normama i smjericama za projektiranje FRP-a, *fib točne smjernice* daju najbliža predviđanja za oba FRP-a, međutim precjenjuju čvrstoću betona ovijenog CFRP-om pri povećanju čvrstoće neovijenog betona.
- ACI 440.2R 2008 daje konzervativne rezultate u usporedbi s *fib točnim smjericama* i manje je ovisan o čvrstoći neovijenog betona.
- CSA-S806-02 smjernice prikazuju najkonzervativnije rezultate. To se pripisuje faktoru sigurnosti 0,85 koji CSA-S806-02 koristi za smanjenje čvrstoće neovijenog betona što dovodi do podcjenjivanja učinkovitosti CFRP-a.
- Za ovijanje GFRP-om, CSA-S806-02 i *fib približne smjernice* daju nižu čvrstoću ovijenih uzoraka od neovijenih uzoraka.

Zahvala

Istraživanje prikazano u ovome radu podržalo je National University of Sciences and Technology, Islamabad, Pakistan. Svako mišljenje, nalaz i zaključak, objašnjeni u ovom radu stajališta su ovih autora i ne odražavaju nužno stajalište sponzora.

LITERATURA

- [1] Seible, F., Priestley, M.J.N., Hegemier, G.A., Innamorato, D.: Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets. *Journal of composites for Construction*, 1 (1997) 2, pp. 52-62.
- [2] Khaliq, W.: Performance characterization of high performance concretes under fire conditions, in PhD Dissertation, Michigan State University, East Lansing, MI. pp. 345, 2012.
- [3] Khaliq, W., Kodur, V.: Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, 41 (2011) 11, pp. 1112-1122.
- [4] Ozbakkaloglu, T.: Axial compressive behavior of square and rectangular high-strength concrete-filled FRP tubes, *Journal of composites for Construction*, 17 (2012) 1, pp. 151-161.
- [5] Mirmiran, A., Shahawy, M., Samaan, M., El Echary, H., Mastrapa, J.C., Pico, O.: Effect of column parameters on FRP-confined concrete, *Journal of composites for Construction*, 2 (1998) 4, pp. 175-185.
- [6] Wu, G., Lü, Z., Wu, Z.: Strength and ductility of concrete cylinders confined with FRP composites, *Construction and Building Materials*, 20 (2006) 3, pp. 134-148.
- [7] Nanni, A., Bradford, N.M.: FRP jacketed concrete under uniaxial compression, *Construction and Building Materials*, 9 (1995) 2, pp. 115-124.
- [8] Rahai, A., Sadeghian, P.P., Ehsani, M.: Experimental Behavior of Concrete Cylinders Confined with CFRP Composites, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008.
- [9] Li, G.: Experimental study of FRP confined concrete cylinders. *Engineering structures*, 28 (2006) 7, pp. 1001-1008.
- [10] Parvin, A., Jamwal, A.S.: Effects of wrap thickness and ply configuration on composite-confined concrete cylinders, *Composite structures*, 67 (2005) 4, pp. 437-442.
- [11] Pessiki, S., Harries, K.A., Kestner, J.T., Sause, R., Ricles, J.M.: Axial behavior of reinforced concrete columns confined with FRP jackets, *Journal of composites for Construction*, 5 (2001) 4, pp. 237-245.
- [12] Rochette, P.P., Labossiere, P.P.: Axial testing of rectangular column models confined with composites. *Journal of composites for Construction*, 4 (2000) 3, pp. 129-136.
- [13] Thériault, M., Neale, K.W., Claude, S.: Fiber-reinforced polymer-confined circular concrete columns: investigation of size and slenderness effects, *Journal of composites for Construction*, 8 (2004) 4, pp. 323-331.
- [14] Bisby, L., Take, W.A., Casparly, A.: Effects of Unconfined Concrete Strength on FRP Confinement of Concrete, *International Institute for FRP in Construction*, 2007.
- [15] Samaan, M., Mirmiran, A., Shahawy, M.: Model of concrete confined by fiber composites, *Journal of Structural Engineering*, 124 (1998) 9, pp. 1025-1031.
- [16] ACI 440.2: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA, 2002.
- [17] CSA S806-02: Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers, Canadian Standards Association, 2002.
- [18] ISIS M04-01: Externally Bonded FRP for Strengthening Reinforced Concrete Structures, The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, Winnipeg, MB, Canada, 2001.
- [19] fib, Fédération internationale du Béton: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, Bulletin No. 14, Technical Report 2001, Lausanne, Switzerland.
- [20] Chaallal, O., Hassan, M., LeBlanc, M.: Circular columns confined with FRP: Experimental versus predictions of models and guidelines, *Journal of composites for Construction*, 10 (2006) 1, pp. 4-12.