

Primljen / Received: 8.1.2016.

Ispravljen / Corrected: 2.4.2016.

Prihvaćen / Accepted: 17.7.2016.

Dostupno online / Available online: 10.3.2017.

Analiza seizmičke osjetljivosti ab konstrukcija ojačanih CFRP-om

Autori:



Mr.sc. **Hammad Salahuddin**, dipl.ing.građ.
COMSATS Institut za inform. tehnologiju
Odjel za građevinarstvo
hammad88@gmail.com



Izv.prof.dr.sc. **Shaukat Ali Khan**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Abasyn, Pakistan
Odjel za građevinarstvo
shaukat.khan@gmail.com



Muhammad Usman Ali, dipl.ing.građ.
Nacionalno sveučilište za znanost i tehn.
Odjel za građevinarstvo, Pakistan
usman130@yahoo.com



Arslan Mushtaq, dipl.ing.građ.
Nacionalno sveučilište za znanost i tehn.
Odjel za građevinarstvo, Pakistan
arslan.ghaara@gmail.com

Pregledni rad

Hammad Salahuddin, Shaukat Ali Khan, Muhammad Usman Ali, Arslan Mushtaq

Analiza seizmičke osjetljivosti ab konstrukcija ojačanih CFRP-om

U radu se istražuje seizmička osjetljivost ab okvira ojačanog s CFRP-om (polimer armiran ugljičnim vlaknima). Proveden je program eksperimentalnih istraživanja kako bi se utvrdilo na koji način ojačanje CFRP-om utječe na čvrstoću betona. Poboļjšana svojstva modelirana su za razne čvrstoće betona i u tu je svrhu korišten program temeljen na metodi konačnih elemenata. Na temelju rezultata analize izvedene su krivulje seizmičke osjetljivosti neojačanih i ojačanih okvira. Dobivene krivulje pokazuju da su nakon ojačanja ostvarena znatna poboljšanja neojačanih armiranobetonskih konstrukcija.

Ključne riječi:

polimer armiran ugljičnim vlaknima, analiza seizmičke osjetljivosti, poboljšanje, PERFORM 3D, nelinearna analiza

Subject review

Hammad Salahuddin, Shaukat Ali Khan, Muhammad Usman Ali, Arslan Mushtaq

Seismic vulnerability assessment of CFRP strengthened RC structures

Seismic vulnerability of a Reinforced Concrete (RC) frame retrofitted with the Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) is analysed in this paper. An experimental programme was conducted to determine the way in which concrete strength is affected by CFRP. The improved properties were modelled for different levels of concrete strength using a finite element based software. Using the results obtained during analysis, seismic vulnerability curves were derived for the unstrengthened and strengthened frames. The curves show significant improvement in the performance of unstrengthened RC structure after retrofitting.

Key words:

CFRP, seismic vulnerability assessment, retrofitting, PERFORM 3D, nonlinear analysis

Übersichtsarbeit

Hammad Salahuddin, Shaukat Ali Khan, Muhammad Usman Ali, Arslan Mushtaq

Analyse der seismischen Vulnerabilität durch CFRP nachgerüsteter Stahlbetonkonstruktionen

In dieser Arbeit wird die seismische Vulnerabilität durch kohlenfaserverstärkten Kunststoff (CFRP) nachgerüsteter Stahlbetonrahmen untersucht. Es wurde ein Programm experimenteller Untersuchungen durchgeführt, um den Einfluss kohlenfaserverstärkten Kunstoffs auf die Betonfestigkeit zu erforschen. Die verbesserten Eigenschaften wurden durch verschiedene Werte der Betonfestigkeit mittels eines Finite-Elemente-Programms modelliert. Aufgrund der Resultate wurden Kurven der seismischen Vulnerabilität für Stahlbetonrahmen in anfänglichem und nachgerüstetem Zustand hergeleitet. Diese zeigen, dass durch die Nachrüstung ein deutlich verbesserter Zustand erzielt wird.

Schlüsselwörter:

CFRP, Beurteilung der seismischen Vulnerabilität, Nachrüstung, PERFORM 3D, nichtlineare Analyse

1. Uvod

Zabrinjava činjenica da seizmički neojačan i tehnički manjkav (nestručno projektiran) građevni fond možemo naći u mnogim zemljama, pa tako i u Pakistanu gdje su mnoge takve građevine djelomično ili čak i potpuno uništene u nedavnim potresima. Primjerice su u pakistanskim gradovima Kašmiru (2005.) i u Beludžistanu (2008. i 2013.) potresi uzrokovali katastrofalne štete kako na imovini tako i u ljudskim žrtvama, što je vrlo negativno utjecalo na društveno-ekonomsku situaciju u tim područjima i na razini čitave države [1].

Armiranobetonske građevine čine približno 10 do 15 % ukupnog građevnog fonda u Pakistanu [2], a većina tih građevina neprimjereno je izvedena te projektirana samo na gravitacijsko opterećenje [3]. Prije potresa koji je zadesio Kašmir (2005.) domaći projektanti nisu bili svjesni potrebe seizmičkog projektiranja građevina, pa su stoga mnoge postojeće građevine projektirane bez predviđanja seizmičkih opterećenja. Veliki broj takvih građevina pretrpio je znatna oštećenja u kašmirskom potresu [3]. Analize provedene nakon potresa upozorile su na brojne nedostatke u izvedbi i projektiranju postojećih građevina. Razlog tome je bila nerazvijena svijest o potrebi seizmičkog projektiranja građevina te manjak obrazovanog stručnog kadra. Neki od takvih nedostataka su: loša kvaliteta i neodgovarajuća čvrstoća građevnih materijala, nedostatna ugradnja armature u čvorovima okvira, primjena načela slab stup-jaka greda, nezaštićena armatura u konstrukcijskim elementima, nedostaci u duljini sidrenja i preklapanja armature, neodgovarajući preklopi armature, nekorištenje ili nedostatno korištenje seizmičkih kuka, primjena neodgovarajuće poprečne armature itd. [1, 4]. Neki od tih nedostataka prikazani su na slici 1.

Sve su to razlozi zašto je potrebno izvesti odgovarajuća ojačanja na postojećem građevnom fondu i to primjenom odgovarajućih tehnika rekonstrukcije, tako da se u što većoj mjeri ublaži utjecaj seizmičkih djelovanja te spriječe nove ljudske žrtve i materijalne štete.

U svrhu ojačanja armiranobetonskih konstrukcija provode se postupci rekonstrukcije konstrukcijskih elemenata kao što su grede, stupovi itd. U usporedbi s ostalim konstrukcijskim elementima, smatra se da su armiranobetonski stupovi najznačajniji za odgovarajuće ponašanje i sigurnost građevina jer upravo oni najviše podnose tlačna opterećenja i nose teret

ostalih elemenata. Ovijanje betona djelotvoran je postupak za povećanje nosivosti i/ili duktilnosti stupa. Ustvari, bočni tlak i generira u betonu troosno stanje naprezanja te posljedično povećava tlačnu čvrstoću i relativnu tlačnu deformaciju betona pri slomu, [5].

Armiranobetonski stupovi u početku su se učvršćivali pomoću čeličnih košuljica injektiranih u jezgru betona. Međutim, od početka devedesetih godina prošlog stoljeća, sve više se koriste "košuljice" od polimera armiranog vlaknima (eng. *fiber reinforced polymer*, FRP). Ojačavanje pomoću FRP-a provodi se tako da se vlakna uglavnom polažu poprečno na uzdužnu os stupa pa se tako dobiva pasivno ojačanje koje se aktivira kada se betonska jezgra počne širiti zbog Poissonovog efekta i pojave pukotina u unutrašnjosti betona. Općenito se smatra da je ojačanje nekružnih stupova manje djelotvorno od ojačanja kružnih stupova jer u ovom potonjem slučaju omatanjem dolazi do jednolikog obodnog tlaka koji sprečava radijalno širenje betona. U slučaju nekružnih stupova, ojačanje je najizrazitije u kutovima, a slabije je na ostalim dijelovima oboda stupa [6].

Danas se provode opsežna analitička i eksperimentalna istraživanja na armiranobetonskim okvirima u naravnoj veličini i na manjim uzorcima običnog betona kružnog i nekružnog presjeka, koji se ovijaju pomoću FRP-a te opterećuju nanošenjem čistog osnog tlačnog opterećenja [6-10]. Kabir i dr. [11] istraživali su mogućnosti koje se pružaju ojačanjem šupljih čeličnih elemenata pomoću polimera armiranog ugljičnim vlaknima (eng. *carbon fibre reinforced polymer*, CFRP). Također se provode i istraživanja većih armiranobetonskih stupova kružnog i nekružnog presjeka (minimalne jedne dimenzije presjeka 300 mm, tj. 12 inča) [12-17]. Međutim, u tim se istraživanjima uglavnom razmatra utjecaj ojačanja na ponašanje konstrukcije, dok se mali broj radova bavi ocjenjivanjem seizmičkog rizika (eng. *earthquake risk assessment*, ERA).

ERA je prvi korak u postupku smanjenja seizmičkog rizika. Da bi se ocjenjivanje ERA uopće moglo provesti, potrebna je analiza seizmičke opasnosti te analiza osjetljivosti. U Pakistanu je do sada malo toga napravljeno u području analize seizmičke osjetljivosti armiranobetonskih građevina [3]. U radovima koje su objavili autori Ahmed [3] i Muhammad [18] za jedan segment građevnog fonda u Pakistanu izvode se analitičke funkcije krhkosti i funkcije društveno-ekonomskih gubitaka.



Slika 1. a) neodgovarajući spoj stupa i grede; b) građevni materijal loše kvalitete; c) nezaštićena armatura u blizini spoja između grede i stupa

Ocjena seizmičke opasnosti i osjetljivosti provodi se da bi se odredili indikatori oštećenja građevina za razne razine opasnosti, te kako bi se ti indikatori iskazali pomoću krivulja osjetljivosti. Osjetljivost konstrukcija bitno varira u raznim dijelovima svijeta, a to ovisi o dostupnosti odgovarajućih građevnih materijala te o lokalno korištenim građevnim metodama i postupcima.

U ovom je radu istraživanje usmjereno na ocjenu seizmičke osjetljivosti neprikladno projektiranih armiranobetonskih konstrukcija koje su u svrhu analize ojačane CFRP-om (polimer armiran ugljičnim vlaknima). Proveden je eksperimentalni program koji je uključivao ispitivanje cilindričnih betonskih uzoraka. Uzorci su ojačani s jednim i s dva sloja CFRP-a, nakon čega je ispitana njihova tlačna čvrstoća. Na temelju postignutih rezultata provedeno je modeliranje i analiza uz pomoć odgovarajućeg programa bazirano na metodi konačnih elemenata. Na kraju su generirane krivulje osjetljivosti neojačanih i ojačanih okvira.

2. Eksperimentalni program

U okviru eksperimentalnog programa ispitano je ponašanje cilindričnih betonskih uzoraka ovijenih u raznim kombinacijama CRFP-a, koji su nakon toga bili podvrgnuti monotonom (osnom) opterećenju. U nastavku su prikazane pojedinosti o materijalima, betonu i uređajima.

2.1. Materijali

2.1.1. Polimer armiran vlaknima

U ovom je istraživanju kao materijal za ojačanje korišten polimer armiran ugljičnim vlaknima (CFRP), a za povezivanje polimera s uzorcima korištena je epoksidna smola. CFRP je odabran zato što je dostupan na lokalnom tržištu. Svojstva CFRP-a dobivena od dobavljača prikazana su u tablici 1.

2.1.2. Epoksidno vezivo

Tijekom ovog istraživanja upotrijebljeno je epoksidno vezivo koje je također dostupno na lokalnom tržištu. Svojstva tog veziva prikazana su u tablici 2. Epoksidno se vezivo sastojalo od dvije mješavine: smola (A) i učvršćivač (B). Prema uputama proizvođača te dvije komponente su miješane u težinskom omjeru od 4(A) prema 1(B) nakon čega je slijedilo sedam dana njege na sobnoj temperaturi.

Tablica 1. Svojstva materijala za ojačanje

Materijal za ojačanje	E [kN/mm ²]	F _{ult} [MPa]	ε _{ult} [%]	t [mm]	Gustoća [gr/cm ³]	Vrsta vlakana
CFRP	335	4100	1,7	0,15	1,76	Jednosmjerna

Tablica 2. Svojstva epoksidnog veziva

Svojstva	Epoksidno vezivo (Chemdur 300)
Gustoća	1,31 kg/litra
Vrijeme uporabivosti nakon miješanja	30 min. pri 35°C
Viskoznost	Pasta, ne teče
Vlačna čvrstoća	30 N/mm ²

2.1.3. Beton

S obzirom na vrijednosti tlačne čvrstoće koje se u Pakistanu obično koriste za niske građevine i građevine srednje veličine, u programu je upotrijebljen beton normalne čvrstoće kojemu je tlačna čvrstoća iznosila 20 MPa. U mješavinu betona nisu dodani aditivi. Težinski odnos komponenata u betonu, potreban za postizanje ciljane čvrstoće, iznosio je 1 : 2 : 4 (cement : pijesak : šljunak).

2.2. Podaci o uzorcima

U okviru eksperimentalnog dijela istraživanja pripremljeno je ukupno devet cilindričnih uzoraka promjera 150 mm i visine 300 mm, i na njima su određene vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće. Za te su uzorke korištene sljedeće oznake: kontrolni uzorci označeni su oznakama C1, C2 i C3. Kod uzoraka ojačanih CFRP-om slovo W na početku označavalo je da se radi o ojačanom uzorku. Nakon toga je slijedio broj koji je označavao broj slojeva, te nakon njega oznaka broja uzorka. Na primjer, W-1-1 znači da se radi o prvom ojačanom uzorku s jednim slojem CFRP-a. Ostali uzorci su bili označeni kako slijedi: W-1-2, W-1-3, W-2-1, W-2-2 i W-2-3.

2.3. Uređaji

Sva su ispitivanja provedena pomoću ispitnog uređaja kapaciteta 2000 kN, a opterećenje je nanošeno brzinom od 0,15 MPa/s. Upotrijebljen je i odgovarajući uređaj za bilježenje podataka, a za mjerenje osne deformacije služio je ekstenzometar. Organizacija ispitivanja prikazana je na slici 2., s uzorcima koji će se ispitati pomoću mjerne doze za mjerenje opterećenja i ekstenzometra.

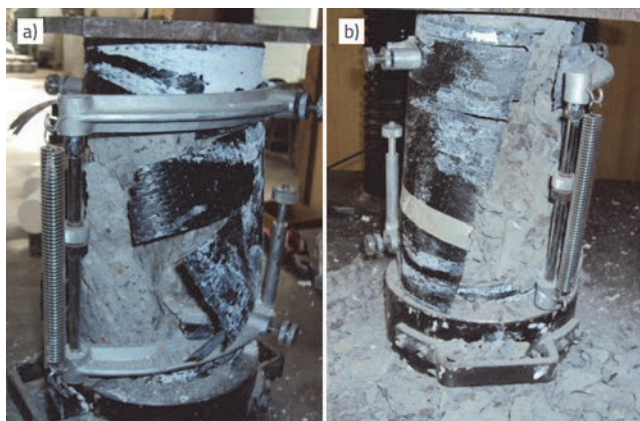


Slika 2. Uzorak pripremljen za ispitivanje

2.4. Eksperimentalni rezultati

2.4.1. Rezultati ispitivanja

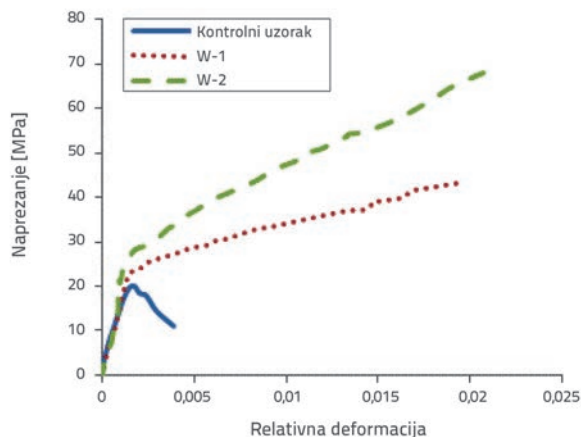
Kod svih ovijenih uzoraka zabilježen je brzi slom kao posljedica popuštanja FRP omotača. Tipičan način popuštanja uzoraka ojačanih FRP-om prikazan je na slikama 3.a i 3.b. Ustanovljeno je da je veza između FRP omotača i betona bila dobra, jer je nakon sloma na FRP omotaču registriran tanak sloj betona. Kako je područje preklopa omotača bilo dostatno, na tim mjestima nije ni došlo do sloma. Kod svih ojačanih uzoraka zabilježeno je brzo popuštanje bez prethodnih znakova upozorenja. Osim toga treba spomenuti da su uzorci pojačani dvostrukim slojem FRP-a popustili u vidu eksplozije tako da su uzorci u potpunosti uništeni.



Slika 3. Tipičan način popuštanja uzoraka: a) W-1-1; b) W-2-1

2.4.2. Odnos osnovnog naprezanja i relativnih deformacija

Prosječne krivulje naprezanje-relativna deformacija za kontrolne, te za jednostruko ovijene (W-1) i dvostruko ovijene (W-2) ojačane uzorke, dobivene na temelju rezultata ispitivanja, prikazane su na slici 4.



Slika 4. Odnosi naprezanje – relativna deformacija za ovijene i neovijene uzorke

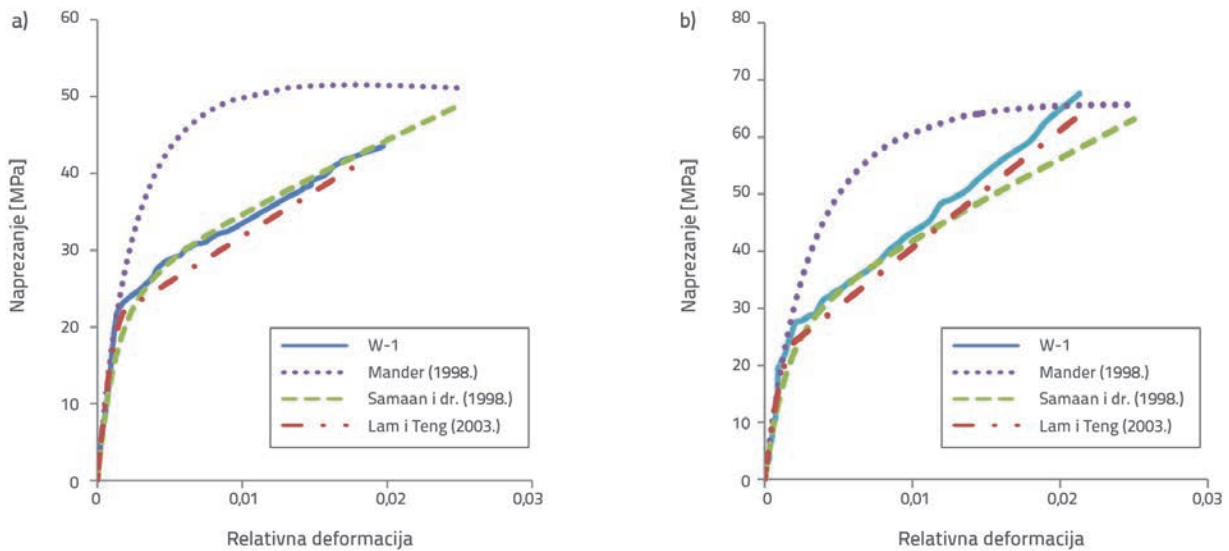
Odnosi naprezanje-relativna deformacija pokazuju znatno poboljšanje svojstava duktilnosti i vršne čvrstoće kod uzoraka ojačanih CFRP-om u odnosu na neojačane uzorke. Kod kontrolnih uzoraka zabilježena je prosječna čvrstoća od 20,3 MPa uz maksimalnu relativnu deformaciju od 0,0018, dok je kod uzoraka s jednim slojem CFRP-a zabilježena prosječna čvrstoća od 43,1 MPa uz maksimalnu relativnu deformaciju od 0,019. Uočeno je i povećanje vrijednosti maksimalne relativne deformacije. Kada su korištena dva sloja CFRP, uočeno je vrlo veliko povećanje vrijednosti graničnog naprezanja i relativne deformacije, pa je tako prosječna vrijednost graničnih naprezanja iznosila 68 MPa dok je odgovarajuća vrijednost relativnih deformacija iznosila 0,021.

2.5. Usporedba s postojećim modelima naprezanja i deformacije

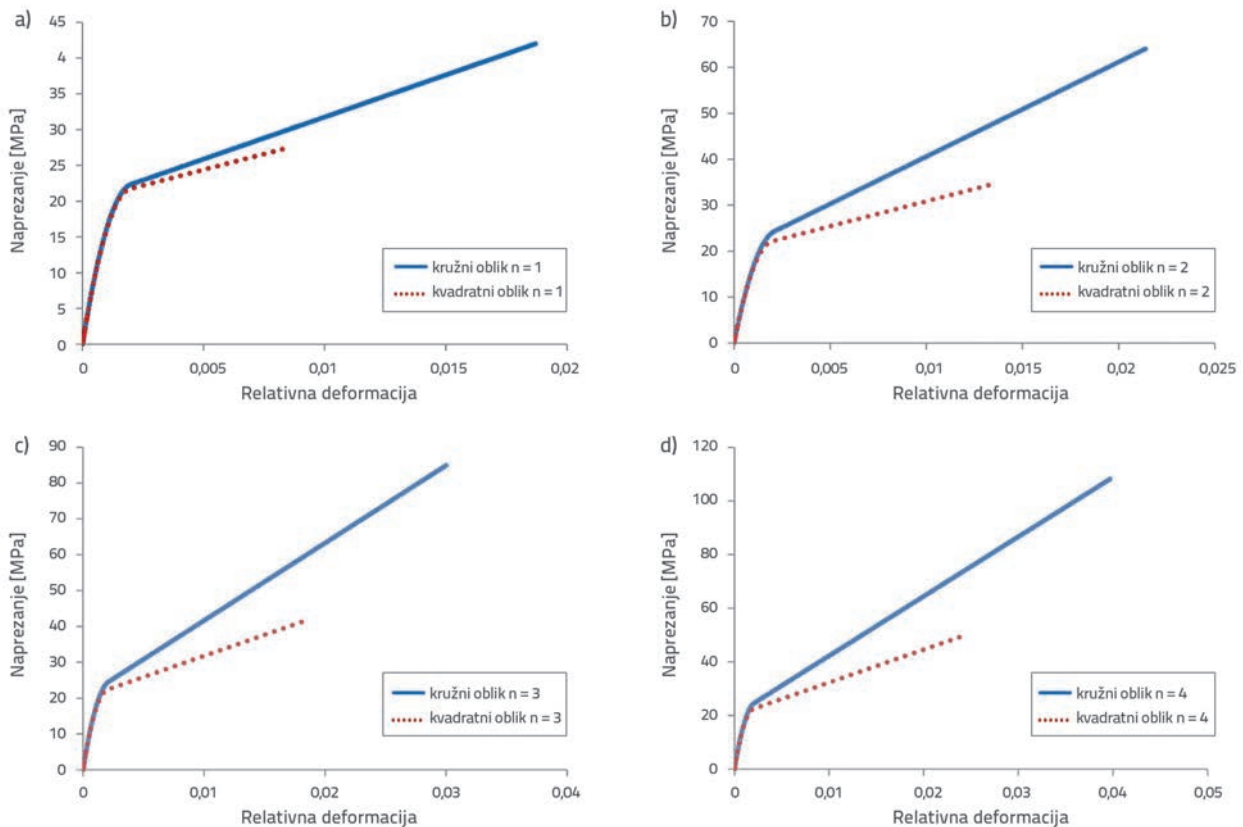
Za potrebe analitičkog modeliranja obavljena je usporedba postojećih modela naprezanje-relativna deformacija, koje su predložili razni istraživači, s eksperimentalnim krivuljama naprezanje-relativna deformacija. Mnogi istraživači predložili su modele naprezanje-relativna deformacija za razne mehanizme ojačanja. Neki od njih predvidjeli su vrijednosti koje su vrlo bliske eksperimentalnim vrijednostima, pa se stoga često koriste za predviđanje vrijednosti naprezanja i relativnih deformacija. Od tih modela, za usporedbu s eksperimentalnim rezultatima odabrani su modeli koje su predložili Saman [19], Mander [20] te Lam i Teng [6]. Na slikama 5.a i 5.b prikazana je usporedba tih triju modela s eksperimentalnim vrijednostima dobivenima za jedan sloj CFRP-a i za dva sloja CFRP-a.

Ta usporedba jasno pokazuje da se modelom koji su predložili Lam i Teng [6] mogu dobro predvidjeti svojstva naprezanja i relativnih deformacija kako jednoslojnih tako i dvoslojnih ojačanja CFRP-om.

Kao što se i spominje kasnije u poglavlju 3., armiranobetonski okvir korišten za modeliranje imao je kvadratne stupove, dok su uzorci korišteni u ispitivanju bili kružnog oblika. Učinak ojačanja



Slika 5. Usporedba eksperimentalnih krivulja naprezanje-relativna deformacija s rezultatima drugih modela: a) jednostruko ojačanje CFRP; b) dvostruko ojačanje CFRP



Slika 6. Konverzija krivulja naprezanje-relativna deformacija za ekvivalentne uzorke kvadratnog oblika: a) n=1; b) n=2; c) n=3; d) n=4

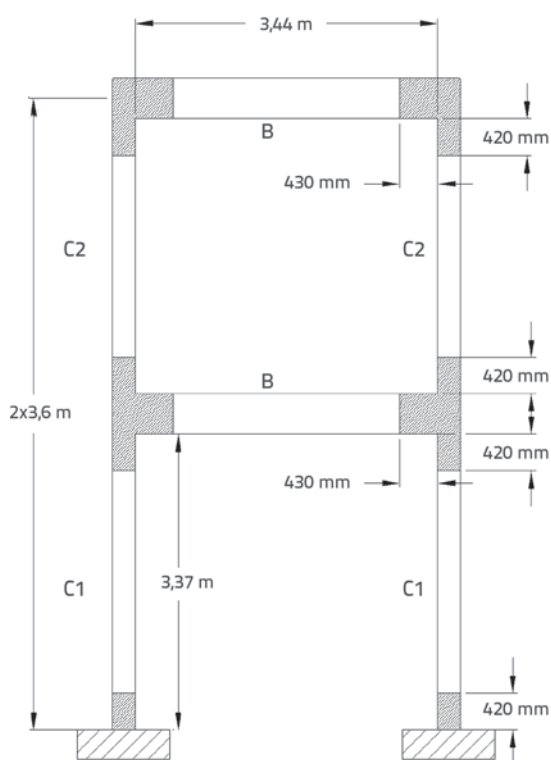
drastično se smanjuje zbog utjecaja oblika [21], pa je stoga uključen i faktor oblika k_{s1} radi korekcije čvrstoće te faktor k_{s2} za korekciju relativnih deformacija.

Kako se točnije predviđanje dobiva pomoću modela naprezanje-relativna deformacija koji su predložili Lam i

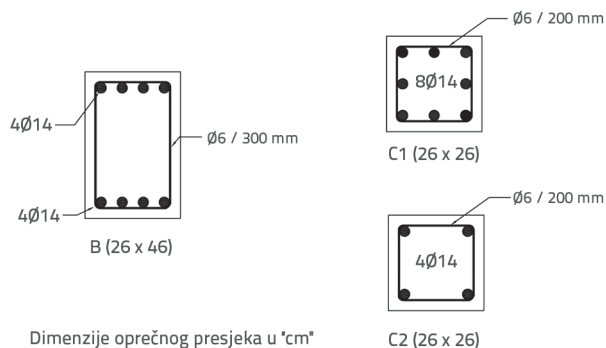
Teng [6], mogu se predvidjeti i krivulje naprezanje-relativna deformacija za 3 i 4 sloja i to mijenjanjem broja slojeva u jednadžbama te, nakon konverzije u ekvivalentni kvadrat, dobiva se predviđeno ponašanje kako je to prikazano na slikama 6.a, 6.b, 6.c i 6.d.

3. Modeliranje i analiza

Za analizu je odabran ab okvir uzimajući u obzir postojeći građevni fond u Pakistanu gdje je oko 10 do 15 % građevina izgrađeno od armiranog betona, a visoke su od 2 do 8 katova [2]. Te niske i srednje visoke građevine u privatnom su vlasništvu i obično nisu stručno izvedene te se u njima mogu pronaći prije spomenuti nedostaci. Okvir je prvobitno projektiran samo za gravitacijska opterećenja, bez seizmičke zaštite. Kao što je spomenuto u poglavlju 2.5 model predložen od Lama i Tenga, koji se u najvećoj mjeri podudara s eksperimentalnim rezultatima, korišten je za modeliranje svojstava betona s raznim stupnjevima ojačanja pomoću CFRP-a. Prihvaćeno je da je zaštitni sloj betona 30 mm od osi armature. Vrijednosti granice popuštanja i granične čvrstoće armature iznosile su $f_v = 551$ MPa, tj. $f_u = 656$ MPa. Za ovo ispitivanje odabran je jednobrodni dvoetažni okvir. Raspon okvira iznosio je 3,70 m, a visina etaže bila je 3,60 m. Dimenzije poprečnog presjeka grede iznosile su 26 x 46 cm, a dimenzije poprečnog presjeka stupa 26 x 26 cm. Dužina FRP ovoja definirana je odabirom između najvećih dužina plastičnog zgloba, 0,5D i 12,5 % dužine elementa, kao što se to predlaže u [22]. Dužina plastičnog zgloba iznosila je $l_p = 0,5$ h prema preporukama iz ATC-40 [23], gdje je l_p dužina plastičnog zgloba, dok je h ukupna visina presjeka. Slika 7. prikazuje geometriju odabranog okvira s područjima koja su bila ojačana pomoću CFRP-a, a slika 8. prikazuje detalje armature za poprečne presjeke grede i stupa.



Slika 7. Geometrija okvira s dijelovima koji su ojačani pomoću CFRP-a

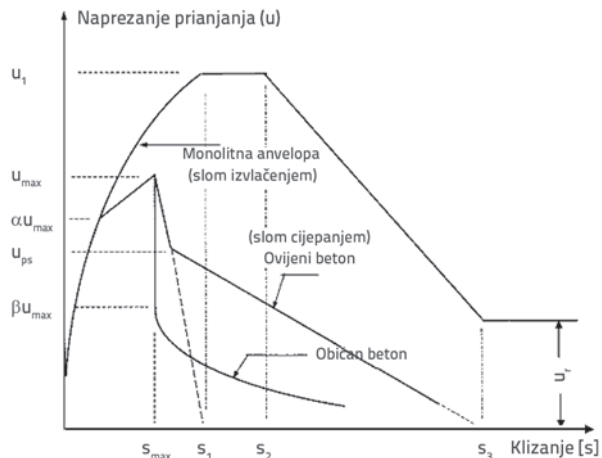


Slika 8. Detalji armature za presjeke grede i stupa

Modeliranje je provedeno pomoću programa PERFORM 3D [24]. Radi se o analitičkom programu s grafičkim korisničkim sučeljem, utemeljenom na metodi konačnih elemenata, koji omogućuje dodjelu različitih svojstava istim konstrukcijskim elementima uz primjenu efekta izvlačenja armaturene šipke tijekom analize.

3.1. Efekt izvlačenja armaturene šipke

Na čvrstoću prijanjanja utječu razne razine ovijanja i drugi parametri, pa tako i način sloma veze između FRP omotača i betona [25, 26]. Harajli [27] je predložio odnos koji se često primjenjuje za predviđanje poboljšanja čvrstoće prijanjanja nakon ovijanja te sloma zbog izvlačenja armature. Taj je model prikazan na slici 9.



Slika 9. Harajlijev model prijanjanje-proklizavanje [27]

Monotona anvelopa (slom uslijed izvlačenja) opisuje ponašanje betona ojačanog FRP-om pri prijanjanju i proklizavanju. Odnos prijanjanje – proklizavanje FRP-a dobro ojačanog betona može se iskazati pomoću izraza (1)

$$u = u_1 \left(\frac{s}{s_1} \right)^{0,3} \tag{1}$$

gdje je:

u - naprezanje prijanjanja

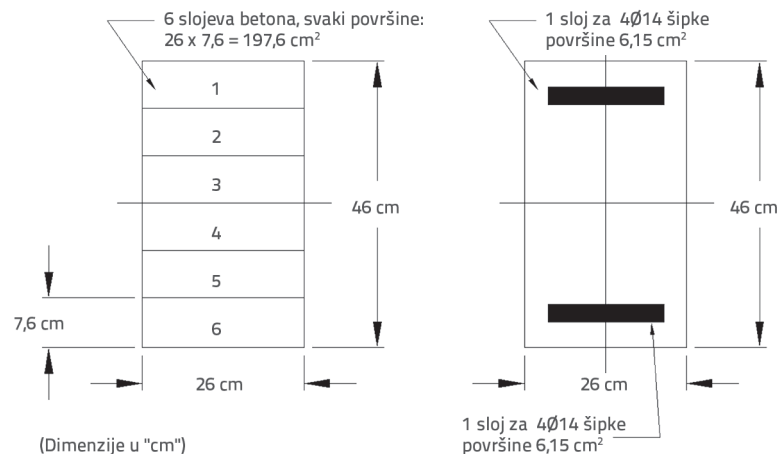
s - proklizavanje

u_1 - maksimalno naprezanje koje šipka može izdržati i koje je iskazano pomoću $2,5\sqrt{f_c}$ (MPa),

$s_1 = 0,15 c_o$, gdje je c_o - udaljenost između rebara armature i može iznositi 10 ako nema podataka o armaturi.

$s_2 = 0,35c_o$, $s_3 = c_o$ i $u_f = 0,35u_1$.

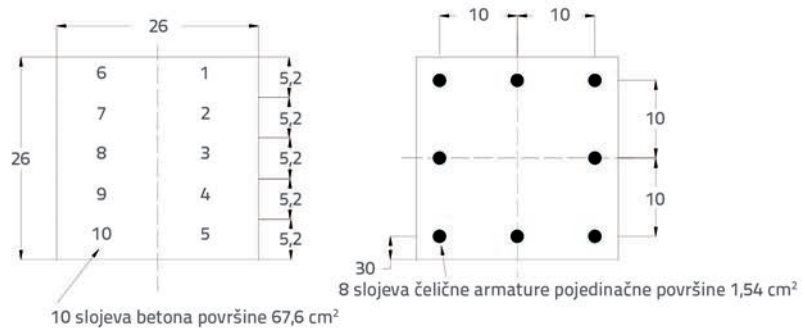
Krivulja sloma uslijed izvlačenja korištena je za modeliranje veze prianjanje – proklizavanje za čelik i beton u područjima u kojima je za ojačanje korišten CFRP.



Slika 10. Poprečni presjek grede sastavljen od 6 slojeva betona (lijevo) i 2 sloja čelične armature (desno)

3.2. Modeliranje poprečnog presjeka greda i stupova

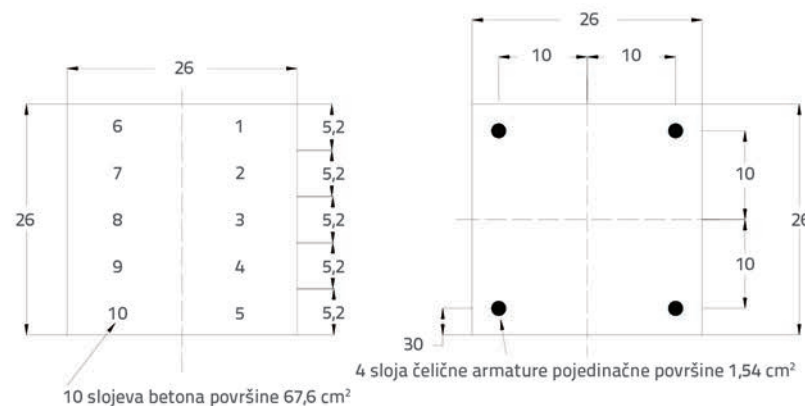
Grede i stupovi modelirani su pomoću programa Perform 3D [24] primjenom presjeka neelastičnih slojeva. Presjek grede podijeljen je na razne brojeve slojeva za beton i za čelik, sa 6 vlakana za beton i 2 vlakna za čelik na vrhu i dnu grede, kako je to prikazano na slici 10. Za definiranje presjeka slojeva korištena je ploština i lokalna os. Modeliranje poprečnog presjeka stupova grafički je prikazano na slikama 11. i 12.



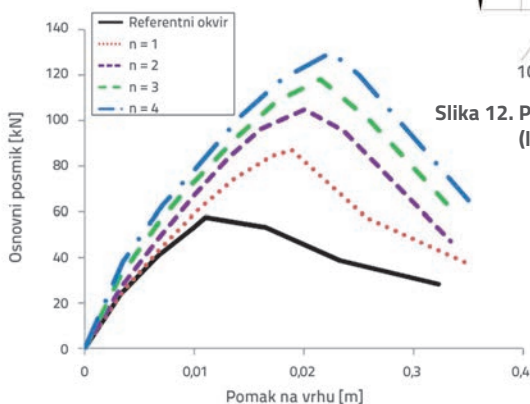
Slika 11. Poprečni presjek stupu prvog kata s 10 slojeva betona i 8 slojeva čelične armature (lijevo) za beton i (desno) za čelik

3.3. Analiza

Nelinearna statička ciklička analiza provedena je za referentni okvir i za sve ojačane okvire te su izvedene odgovarajuće histerezne petlje. Iz tih histereznih petlji za sve su okvire generirane osnovne krivulje (dijagrami pomaka i osnovnog posmika) kako je prikazano na slici 13., gdje "n" predstavlja broj slojeva CFRP ovoja.



Slika 12. Poprečni presjek stupu drugog kata s 10 slojeva betona i 4 sloja čelične armature (lijevo) za beton i (desno) za čelik



Slika 13. Usporedba osnovnih krivulja za sve okvire

Histerezne petlje za sva četiri slučaja jasno upućuju na poboljšanje osnovnog posmika kada se ovoj od CFRP-a koristi u područjima koja su u blizini zglobova AB stupova.

3.4. Analitička ocjena seizmičke osjetljivosti

Rezultati analitičkog modeliranja pomoću osnovnih krivulja iskorišteni su za izvođenje krivulje seizmičke osjetljivosti (odnos

vršnog ubrzanja tla i indeksa oštećenja) za razne razine vršnog ubrzanja tla (eng. *peak ground acceleration*, PGA) za referentni okvir i za ojačane okvire. Zbog toga je primijenjena metodologija za ocjenjivanje seizmičke osjetljivosti koju predlaže Kyriakides [28]. On predlaže postupak utemeljen na metodi spektra kapaciteta (eng. *capacity spectrum method*, CSM) koja je definirana u okviru FEMA 440 [29]. Metodu CSM modificirao je Kyriakides preokrenuvši redosljed kako bi se dobila vršna ubrzanja tla za određenu razinu oštećenja.

U ovom se radu koristi proračunski spektar UBC-97 [30] jer se isti spektar koristi i u lokalnom zakonu o građenju, tj. u zakonu o građenju države Pakistan [31]. Kako spomenuti proračunski spektar ovisi o raznim faktorima kao što su vrsta tla, seizmička zona i lokacija najbliže linije aktivnog rasjeda, on je definiran u skladu s UBC 97, pri čemu je za ovu vrstu konstrukcije usvojen tip tla SD, a vrijednost jedan usvojena je za faktor bliskog izvora. Da bi se mogla primijeniti metoda CSM, proračunski spektar prebačen je u prostor SA-SD poznat pod nazivom spektar odziva za ubrzanje-pomak (eng. *acceleration displacement response spectrum - ADRS*) (β_e). Osnovna krivulja dobivena tijekom analize predstavlja kapacitet sustava s više stupnjeva slobode. U okviru metode CSM ta se krivulja treba pretvoriti u reprezentativnu krivulju ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode. Krivulja kapaciteta idealizirana je radi postizanja elastičnog savršeno plastičnog oblika, kako bi se odredile razine duktilnosti za svaki pojedinačni pomak. Nelinearnost konstrukcije uključena je množenjem ordinate ubrzanja s faktorom redukcije M kako bi se dobio MADRS ($\beta_{eff} M$). Svaka točka s krivulje kapaciteta smatra se točkom ponašanja, a odgovarajuća razina opasnosti, opisana pomoću PGA, predstavlja rezultat potreban za izradu krivulje osjetljivosti.

U sljedećem koraku izrade krivulje osjetljivosti potrebno je kvantificirati potencijal oštećenja za približni odziv konstrukcije. Kyriakides [32] je odredio indeks oštećenja (eng. *damage index - DI*) za svaku točku ponašanja te je predložio da kod $DI = 0$ nema oštećenja dok $DI = 100$ označava potpuni slom. Kyriakides [32] je dodatno povezao indeks oštećenja sa srednjim odnosom oštećenja (eng. *mean damage ratio*, MDR), tj. odnos troškova popravka i zamjene, te je linearno povezao DI s MDR-om pri čemu je pretpostavio da korelacijski koeficijent iznosi 1, prema izrazu (2).

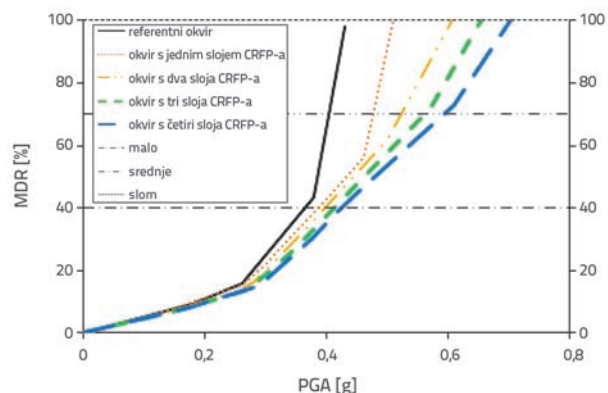
$$MDR = f(DI) \quad (2)$$

3.4.6. Krivulje seizmičke osjetljivosti

Primjenom opisanog postupka razvijene su krivulje seizmičke osjetljivosti za referentni okvir i za četiri pojačana okvira. Krivulje osjetljivosti okvira prikazane su na slici 14. Četiri različite razine oštećenja koje predlaže HAZUS [33] također su naznačene na krivuljama, i to kao malo oštećenje (SD) od 0 do 40 % MDR, srednje oštećenje (MD) od 40 do 70 % MDR, jako oštećenje (ED) od 70 do 100 % MDR, te slom pri 100 % MDR.

Na slici 14. je vidljivo da se za referentni okvir 100 % oštećenja predviđa pri 0,42 PGA, te da krivulja osjetljivosti postaje vrlo

strma pri 0,38 PGA, što pokazuje da konstrukciju karakterizira kruti slom. Tome je razlog kruti slom spojeva zbog klizanja glavne armature u referentnom okviru. Početni pad krivulje za sve je okvire uglavnom isti jer tada CFRP počinje preuzimati naprezanje nakon popuštanja betona, a od tog trenutka CFRP ovaj počinje ostvarivati svoju ulogu.

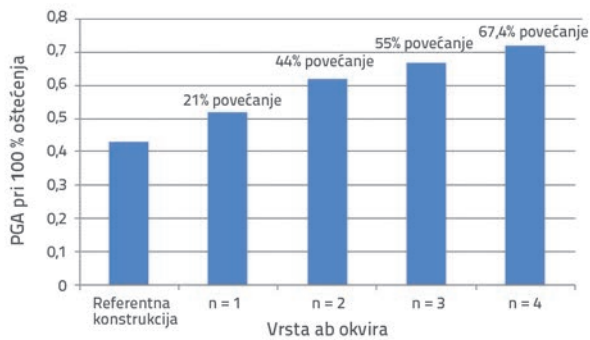


Slika 14. Usporedba krivulja osjetljivosti za referentni okvir i pojačane okvire, pri raznim razinama oštećenja

Uočeno je poboljšanje već kod konstrukcije s jednoslojnim ovojem CFRP-a. Naime, do potpunog oštećenja je došlo pri 0,52 PGA iako je nagib krivulja bio isto tako strm kao i kod referentnog okvira, uz manji porast otpornosti na proklizavanje. Kod primjene dvoslojnog ovoja ponašanje okvira dodatno se poboljšalo, i to kako u odnosu na potpuno oštećenje tako i na samoj krivulji oštećenja. Krivulja za ovu konstrukciju raste postupno, što znači da do oštećenja dolazi postupno zbog dodatnog poboljšanja veze između šipke i betona te zbog efikasnijeg pojačanja koje omogućuje primjena CFRP-a. Okviri s tri i četiri sloja CFRP-a bolje su se ponašali na svim razinama oštećenja, što se može uočiti kroz opći rast efekta ovijanja, bolje ponašanje u vezi s klizanjem šipke, te povećanje duktilnosti okvira tj. sklonosti prema duktilnom slomu. Vrijednosti PGA za pojedinačne razine oštećenja prikazane su za sve okvire u tablici 3., dok je postotak poboljšanja pri stopostotnom oštećenju svih okvira prikazan na slici 15.

Tablica 3. Vrijednost PGA za okvire pri raznim razinama oštećenja, prema HAZUS-u [30]

PGA pri raznim razinama oštećenja	Referentni okvir	n=1	n=2	n=3	n=4
PGA kod manjeg oštećenja	0,364	0,384	0,397	0,41	0,424
PGA kod srednje jakog oštećenja	0,404	0,475	0,523	0,559	0,592
PGA kod sloma	0,430	0,509	0,605	0,654	0,702



Slika 15. Usporedba ponašanja AB konstrukcija pri slomu

Kod konstrukcije s jednom slojem CFRP-a poboljšanje ponašanja pri slomu iznosi 21 %, dok odgovarajući postotak za konstrukciju s dva sloja CFRP-a iznosi 44 %. Kod konstrukcija s tri odnosno četiri sloja, poboljšanje iznosi 55,8 % tj. 67,4 %.

4. Zaključak

Ovijanjem betona jednim slojem CFRP-a, duktilnost se povećava za 322 %, a ovijanjem pomoću dva sloja povećanje je iznosilo 366 %. Čvrstoća uzorka povećana je za 115 %, kad je ovijanje s jednim slojem CFRP-a, tj. za 240 % kad je ovijanje s dva sloja CFRP-a. Ustanovljeno je da je model naprežanja i deformacija koji predlažu Lam i Teng [5] prikladan za predstavljanje eksperimentalnih rezultata. Krivulje seizmičke osjetljivosti izrađene su za referentni okvir i za četiri pojačana okvira. Usporedbom krivulja osjetljivosti ustanovljeno je poboljšanje PGA pri raznim razinama oštećenja prema sugestijama HAZUS-a. Razina opasnosti od sloma poboljšana je za 21 % za ovijanje s jednim slojem CFRP-a, 44 % za ovijanje s dva sloja CFRP-a, 55,8 % za tri sloja, i 67,4 % za četiri sloja. Ustanovljeno je da je ovijanje CFRP-om djelotvoran način za poboljšanje razine osjetljivosti neodgovarajuće zaštićenoga građevnog fonda u Pakistanu.

LITERATURA

- [1] Bothara, J.K., Hicyilmaz, K.M.: General observations of building behavior during the 8th October 2005, Pakistan earthquake, Bull. N. Z. Soc. Earthq., 41 (2008) 4, pp. 209–233.
- [2] Badrashi, Y.I., Ali, Q., Ashraf, M.: Reinforced Concrete Buildings in Pakistan, World Housing Encyclopedia, Earthquake Engineering Research Institute (EERI) & International Association of Earthquake engineering (IAEE), Report # 159, 2010.
- [3] Ahmed, N., Badrashi, Y.I., Ali, Q., Crowley, H., Pinho, R.: Development of displacement-based method for seismic risk assessment of RC building stock of Pakistan, Proceedings of the International Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Islamabad, Pakistan, Paper No. 11, 2011.
- [4] Ali, M., Khan, S., Anwar, M., Gabriel, H.: Probabilistic Application in Seismic Vulnerability Assessment of Deficient Low- to Medium-Rise Reinforced Concrete Buildings in Pakistan. Arab J Sci Eng, 40 (2015) 9, 2479–2486.
- [5] Richart, F.E., Brandtzaeg, A., and Brown, R.L.: A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses, Engineering Experimental Station Bulletin No. 185, Univ. of Illinois, Urbana, IL, USA, 1928.
- [6] Lam, L., Teng, J.: Design-oriented stress–strain model for FRP-confined concrete, Construction and Building Materials, 17 (2003) 6–7, pp. 471–489.
- [7] De Lorenzis, L., Tepfers, R.: A Comparative Study of Models on Confinement of Concrete Cylinders with FRP Composites, Publication No. 01:04, Dept. of Building Materials, Chalmers Univ. of Technology, Division of Building Technology, Gothenburg, Sweden, 2001.
- [8] Lam, L., Teng, J.: Design-Oriented Stress-Strain Model for FRP-Confined Concrete in Rectangular Columns. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 22 (2003) 13, pp. 1149–1186.
- [9] Masia, M., Gale, T., Shrive, N.: Size Effects in Axially Loaded Square-Section Concrete Prisms Strengthened Using Carbon Fibre Reinforced Polymer Wrapping, Can. J. Civ. En., 31 (2004), pp. 1–13.
- [10] Turk, A.M., Comert, M., Cosgun, C.: Seismic upgrade of RC buildings using CFRP sheets, GRADEVINAR, 65 (2013) 5, pp. 435–448.
- [11] Kabir, M.H., Fawzia, S., Chan, T.: Effects of CFRP layer orientation on strengthening of hollow steel elements, GRADEVINAR, 67 (2015) 5, pp. 441–450, <https://doi.org/10.14256/JCE.1127.2014>
- [12] Demers, M., Neale, K.W.: Confinement of Reinforced Concrete Columns with Fibre-Reinforced Composite Sheets – An Experimental Study, Can. J. Civ. En., 26 (1994), pp. 226–241.
- [13] Kestner, J., Harries, K., Pessiki, S., Sause, R., Ricles, J.: Rehabilitation of Reinforced Concrete Columns using Fiber Reinforced Polymer Composite Jackets, ATLSS Rep. No. 97-07, Lehigh University, Bethlehem, PA, USA, 1997.
- [14] Wang, Y.C., Restrepo, J.I.: Investigation of Concentrically Loaded Reinforced Concrete Columns Confined with Glass Fiber-Reinforced Polymer Jackets, ACI Struct. J., 98 (2001) 3, pp. 377–385.
- [15] Youssef, M.N.: Stress-strain Model for Concrete Confined by FRP Composites, Ph.D thesis, Univ. of California-Irvine, CA, USA, 2003.
- [16] Carey, S., Harries, K.: The Effects of Shape, "Gap", and Scale on the Behavior and Modelling of Variably Confined Concrete, Report No. ST03-05, Univ. of South Carolina, Columbia, SC, USA, 2003.
- [17] Matthys, S., Toutanji, H., Audenaert, K., Taerwe, L.: Axial Load Behavior of Large- Scale Columns Confined with Fiber-Reinforced Polymer Composites, ACI Struct. J., 102 (2005) 2, pp. 258–267.
- [18] Muhammad, J.: Seismic risk assessment of unreinforced brick masonry buildings system of Northern Pakistan, PhD thesis, University of engineering and technology, Peshawar, Pakistan, 2009.
- [19] Samaan, M., Mirmiran, A., Shahawy, M.: Model of Concrete Confined by Fiber Composites, J. Struct. En., 124 (1998) 9, pp. 1025–1031.
- [20] Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R.: Theoretical stress-strain model for confined concrete, Journal of structural engineering (ASCE), 114 (1988) 8, pp. 1804 – 1826.

- [21] Mirmiran, A., Shahawy, M., Samaan, M., El Echary, H., Mastrapa, J. C., Pico, O.: Effect of Column Parameters on FRP-Confined Concrete, *ASCE J. Compos. Constr.*, 2 (1998) 4, pp. 175-185.
- [22] Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T., Lam, L.: Behavior and strength of FRP strengthened RC structures: a state-of-the-art review. *Proc Inst Civil Eng-Struct Build*, 156 (2003) 1, pp. 51-62.
- [23] ATC-40.: Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. California, Redwood City, 1, 1996.
- [24] CSI PERFORM 3D: Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures, Version 4, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, 2006.
- [25] ACI: State-of-the-Art Report on Bond under Cyclic Loads. Reported by ACI Committee 408, ACI 408.2R-92, ACI, Michigan, 1992.
- [26] CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, Gmte'Euro-International du Be'ton el Federation International de al Pre-Contrainte, Lausanne, Switzerland, 1990.
- [27] Harajli, M.H.: Effect of confinement using steel, FRC, or FRP on the bond stress-slip response of steel bars under cyclic loading, *Mater. Struct.*, 39 (2006), pp. 621-634.
- [28] Kyriakides, N.: Vulnerability of RC buildings and risk assessment for Cyprus, PhD thesis, Faculty of engineering in the University of Sheffield, UK, 2007.
- [29] FEMA-440, Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, Applied Technology Council for Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA, 2005.
- [30] Uniform Building Code, Volume 2, "Structural Engineering Provisions," International Conference of Building Officials, Whittier, CA 1997.
- [31] BCP (SP 07): Building Code of Pakistan. Ministry of Housing, Islamic Republic of Pakistan 2007.
- [32] Kyriakides, N., Ahmad, S., Pilakoutas, K., Neocleous, K.: A probabilistic analytical seismic vulnerability assessment framework for low strength structures of developing countries. *Earthq Struct*, 6 (2014) 6, pp. 665-687.
- [33] HAZUS99: Earthquake Loss Estimation Methodology. Technical Manual. Report Prepared For The Federal Emergency Management Agency, Washington D.C. Under A Contract with NIBS, 1999.