

Primljen / Received: 9.5.2013.

Ispravljen / Corrected: 27.1.2014.

Prihvaćen / Accepted: 19.5.2014.

Dostupno online / Available online: 10.7.2014.

Ispitivanje i analiza nosivosti na posmik zidova ojačanih s FRP-om

Autori:



Dr.sc. **Mojca Jarc Simonič**, dipl.ing.građ.
Institut građevinarstva ZRMK
mojca.jarc-simonic@gi-zrmk.si



Dr.sc. **Samo Gostič**, dipl.ing.građ.
Institut građevinarstva ZRMK
samo.gostic@gi-zrmk.si



Izv.prof.dr.sc. **Vlatko Bosiljkov**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Ljubljani
Fakultet za građevinarstvo i geodeziju
vlatko.bosiljkov@fgg.uni-lj.si



Prof.dr.sc. **Roko Žarnič**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Ljubljani
Fakultet za građevinarstvo i geodeziju
rzarnic@fagg.uni-lj.si

Pregledni rad

[Mojca Jarc Simonič, Samo Gostič, Vlatko Bosiljkov, Roko Žarnič](#)

Ispitivanje i analiza nosivosti na posmik zidova ojačanih s FRP-om

U radu je opisana usporedba laboratorijskih i terenskih ispitivanja na posmik zidova ojačanih karbonskim (C) trakama i staklenim (G) mrežicama u polimerima s rezultatima proračunskih modela za zidove s FRP-om. Rezultati ispitivanja na zidovima od nove i stare pune opeke pokazali su povećanje posmične nosivosti i graničnog pomaka – najviše za horizontalne i horizontalno-vertikalne epoksidom zalijepljene trake te mrežice u modificiranom cementnom mortu, a najmanje za dijagonalne trake zbog odstupanja sa zida. ACI i CNR računski modeli pokazali su najbolje podudaranje s eksperimentima.

Ključne riječi:

zidovi, FRP, ojačanje, terensko ispitivanje, laboratorijski ispitivanje, otpornost na posmik, proračunski modeli

Subject review

[Mojca Jarc Simonič, Samo Gostič, Vlatko Bosiljkov, Roko Žarnič](#)

Testing and analysis of walls strengthened with FRP

Laboratory and in-situ shear tests of walls strengthened with Carbon FRP (Fiber Reinforced Polymer) strips and Glass FRP grid were compared to the results of different calculation models for masonry with FRP. Tests on new and old solid brick specimens showed an increase in shear strength and ultimate displacement. The best results were obtained with horizontally and horizontally-vertically epoxy-bonded strips and modified cement mortar grid configurations, worse with diagonal strips due to peeling failure. ACI and CNR calculation approaches showed the best agreement with experimental results.

Key words:

masonry, FRP, strengthening, in-situ test, laboratory test, shear strength, calculation models

Übersichtsarbeit

[Mojca Jarc Simonič, Samo Gostič, Vlatko Bosiljkov, Roko Žarnič](#)

Versuche und Analysen zur Scherfestigkeit durch FKV ertüchtigten Mauerwerks

In dieser Arbeit sind Laborversuche und in-situ Tests an durch FKV (Faser-Kunststoff-Verbund) Streifen aus Kohlenstoff- und Glasfasern ertüchtigtem Mauerwerk mit Resultaten verschiedener Berechnungsmodelle verglichen. Versuche an Proben aus neuem und altem Vollziegel haben einen Zuwachs der Scherfestigkeit und Verschiebungskapazität vorgezeigt, der insbesondere für horizontal und horizontal-vertikal mit Epoxid verklebte Streifen und Netze mit Zementmörtel erzielt wurde, während diagonale Streifen dazu neigten abzuschälen. ACI und CNR Berechnungsverfahren haben die beste Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen gezeigt.

Schlüsselwörter:

Mauerwerk, FRP, Ertüchtigung, in-situ Test, Laborversuch, Scherfestigkeit, Berechnungsmodelle

1. Uvod

Povećanje otpora zgrade na djelovanje seizmičke sile može se poboljšati adekvatnim rješenjima ojačavanja. Svaka tehnika ojačanja nije prikladna za zgrade kulturne baštine, ali FRP ojačanje to omogućuje jer je reverzibilno, s malom težinom, ne zahtijeva puno vremena za realizaciju i ne utječe na izgled zgrade. Jedan od prvih pokušaja ojačanja zidova vlaknima testirao je Croci [1] istražujući posmične stijene s vertikalnim i nagnutima polipropilenskim trakama. Schwegler [2] je prvi predložio upotrebu FRP traka za seizmičko ojačanje. Ispitano je dijagonalno ojačanje pomoću nekoliko dijagonalnih traka u svakom smjeru samo s jedne i s obje strane zida. Schwegler je utvrdio da linearna ovisnost posmične otpornosti ovisi o količini FRP ojačanja. Triantafillou [3] je istaknuo, ispitujući FRP ojačanje (upotrijebio je horizontalno-vertikalne jednosmjerne trake), da postizanje pune otpornosti zida u njegovoj ravnini zavisi od dobrog sidrišta. Poput njega i Ehsani [4] je izvijestio da je odstupanje FRP-a od površine zidova kritično. Međutim Borri [5] je imao drugačije iskustvo. On je dijagonalnim tlačnim ispitivanjem sa CFRP i GFRP-om usporedio učinkovitost cementnog morta i epoksidnog ljepila za lijepljenje FRP traka. Pokazalo se da je povećanje otpornosti ojačanih zidova oko 55 % kad se upotrijebi cementni mort, bez obzira na vrstu vlakana, da nije nastupilo odstupanje. Epoksidno ljepilo bilo je još učinkovitije. Povećanje otpornosti bilo je 240 % i također nije nastupilo odstupanje. Valluzi [6] i Santa-Maria [7] ispitivanjem jednostrano ojačanih primjeraka utvrdili su savijanje okomito na njihovi ravninu (*out-of-plane*) zbog ekscentričnosti ojačanja. Prirast posmične otpornosti nije bio primijećen. U primjeru dvostranog ojačanja pokazali su da je dijagonalno ojačanje učinkovitije od horizontalnog. Posmična otpornost neojačanog zida može se povećati do 70 %. Alcaino [8] i Gostič [9] pokazali su da je u dijagonalno ojačanom zidu došlo do krhkog loma s trenutačnim gubitkom otpornosti, dok su horizontalno ojačani zidovi pokazali manje krhki lom. Što je CFRP ojačanje bolje raspoređeno, manja je mogućnost trenutačnog gubitka otpornosti. U Hrvatskoj su 2007 godine u laboratoriju Građevinskog fakulteta u Zagrebu izvedena ispitivanja uzoraka ojačana postavljanjem traka od staklenih vlakana u horizontalnom i dijagonalnom smjeru, te u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Najveće povećanje nosivosti od 86 % utvrđeno je kod uzorka ojačanog horizontalnim i vertikalnim trakama. Slične rezultate pokazali su i uzorci s dijagonalno postavljenim trakama: povećanje od 83,5 % kod horizontalnog opterećenja. Galič [10], Španić [11] i ElGawady [12] proveli su ispitivanje za ispucale zidove ojačane FRP trakama. Tehnika ojačanja FRP-om i u tom je primjeru djelotvorna i značajno povećava otpornost zida u njegovoj ravnini, kao i krutost te deformabilnost neojačanog zida. Prirast otpornosti može se postići i površinskim slojem FRP mrežice ili tkanine. Papanicolaou [13], Triantafillou [14] i Tomažević [15] iskazali su nekoliko rezultata istraživanja.

Mehanizam loma u takvom je slučaju posmični lom s odstupanjem GFRP obloge od površine zida.

Analiza rezultata ispitivanja raznih autora pokazala je da različiti oblici utvrđivanja, svojstva materijala i geometrija zidova imaju međusobno zavisnan učinak na posmičnu otpornost i mehanizam loma ojačanih zidova FRP-om koji su opterećeni posmičnom silom u ravnini zida. Zbog toga rezultati mogu znatno varirati. Uzimajući u obzir, da je odstupanje traka čest problem FRP ojačanja koje je nalijepljeno na površinu zida, provedeno je ispitivanje s omotanim trakama kako bi se riješio taj problem. Pretpostavka je bila da imaju horizontalne trake važnu prednost u odnosu na dijagonalne trake jer se mogu omotati oko zida i može se izbjeći krhki lom zbog odstupanja traka. Uske trake odabrane su s obzirom na materijalne troškove i lakšu montažu na terenu. Njihova je prednost u tome što se mogu postaviti oko zida bez uklanjanja susjednih prozora ili vrata. Da bi se potvrdila pretpostavka, različiti načini CFRP ojačanja bili su izvedeni na starim i novim zidovima. Nova rješenja uspoređena su s neojačanim zidovima i drugim različitim načinima posmičnog ojačanja zidova - dijagonalnim trakama i učvršćenjem GFRP mrežicom ugrađenom u modificiran cementni mort po cijeloj površini. S ojačanjem dobiveno je povećanje posmične čvrstoće i duktilnosti neojačanih zidova – slično kao kod prije navedenih ispitivanja. Za razliku od Schweglera, nije bila utvrđena nikakva linearna ovisnost između količine ojačanja i posmične čvrstoće. Važnost dobrog sidrišta za postizanje pune otpornosti zida u njegovoj ravnini potvrdili su različiti autori, a to su također utvrdila i naša ispitivanja.

Namjena je znanstvenog istraživanja poticati upotrebu novorazvijenih tehnologija u općoj građevinskoj praksi. Zbog toga je za namjene projektiranja potrebno definirati analitičke modele. Postojeći proračunski modeli mogu biti previše specifični (primjenljivi samo za poneke oblike) ili nisu dovoljno točni za poneke razrede svojstva materijala. Usporedba eksperimentalnih rezultata i pet postojećih proračunskih modela napravljena je u ovom radu kako bi se ocijenila točnost različitih postupaka. Triantafillou [16] je predložio jedan od prvih proračunskih modela za određivanje otpornosti zidova sa FRP ojačanjem. Taj model je primjenljiv samo za horizontalno ili vertikalno ojačane zidove i njihovu kombinaciju. Wang [17] predložio je proračunski model za horizontalnu i kosu konfiguraciju koja se pokazala veoma točna za veliki spektar analiziranih eksperimentalnih podataka. Marcari [18] je proračunski model izradio za dijagonalno ojačanje. U ovom radu napravljena je usporedba navedenih proračunskih modela i dva standarda: CNR-DT 200/2004 [19] i ACI 440.7R-2010 [20]. Rezultati proračuna uspoređeni su s eksperimentalnim rezultatima.

2. Eksperimentalni program

Provedeno je ispitivanje dijelova zidova koji su tijekom potresa najkritičniji – to su dijelovi zidova između otvora. Ispitivani su

različiti načini utvrđivanja zida CFRP horizontalnim trakama (sa širokim i uskim trakama, bez traka ili u kombinaciji s vertikalnim trakama), ojačavanje s dijagonalama i mrežom GFRP ugrađenom u duktilnom modificiranom cementnom mortu po cijeloj površini. Ispitivanja posmične nosivosti zidova opterećenih i vertikalno provedena su terenska na dvije zgrade i u laboratoriju. Svojstva osnovnog materijala (opeke, morta i FRP tkanina) određena su standardnim ispitivanjima u laboratoriju.

Najprije su provedena laboratorijska ispitivanja na novim zidovima od opeke, (Gostič [9]). Pripremljene su dijagonalno položene trake, orijentirane u smjeru najvećih vlačnih napona (lab D, slika 1.) i dva tipa konfiguracija s horizontalnim trakama iz CFRP-a. Horizontalna i vertikalna konfiguracija (lab HV, slika 1.) imale su 15 mm široke horizontalne trake sa savijanim krajevima oko rubova i povezane su bile vertikalnim trakama sa strane. Trake su jednakomjerno podijeljene dvjema trakama u sredini visine zida, na mjestu pojavljivanja najvećih posmičnih pukotina kod neojačanih zidova. Kod horizontalne konfiguracije (lab H, slika 1.) horizontalne trake bile su omotane oko zida s prekrivnim spajanjem. Omotane trake postavljene su u zonama maksimalnih opterećenja od sredine visine do fiksnog kraja. Na fiksnom kraju trake su bile zgusnute radi sprječavanja loma pete zida koji je bio uočen u prethodnim ispitivanjima na HV. Kod slobodnog kraja (konzola) sile su bile niske, tako da nije provedeno ojačanje. Omatanje traka oko zidova od opeke u laboratorijskim se ispitivanjima pokazalo vrlo povoljnim. Slično ojačanje takvih zidova odabrano je i za ispitivanja na terenu (slika 2.). S obzirom na to da je dijagonalno ojačanje pokazalo manje poboljšanje posmične nosivosti tijekom laboratorijskih ispitivanja, za ojačanje na terenu (D, slika 2.) udvostručena je širina traka i iznosila je 100 mm, također uzimajući u obzir da su zidovi bili slabiji. Jednako široke trake upotrijebljene su i za horizontalno ojačanje. Iako je laboratorijsko ispitivanje s uskim trakama pokazalo dobro djelovanje, brzi proračun za slabe zidove na terenu pokazao je niski prirast, tako da je donesena odluka o upotrebi širih traka. Odabrane trake širine 100 mm (kao kod dijagonalnog ojačanja) položene su na svaki fiksni kraj, gdje postoji mogućnost loma pete zida i u sredini uzorka (za gornji i donji dio) na mjesto najvećih vlačnih napona (H, slika 2.). Kombinirane su horizontalne i vertikalne trake da se spriječi pojava prvih pukotina u uglovima panela zbog savijanja zida. Za dijagonalnu konfiguraciju pretpostavljeno je da vertikalne trake nisu potrebne, jer će kapacitet protiv mehanizma ljučenja osigurati usidrena dužina (200 mm) dijagonala. Tijekom ispitivanja na prvoj zgradi primijećena je delaminacija kod vertikalnih traka i dijagonala pa zbog toga nisu odabrane pri zadnjem ispitivanju. Ispitivanja na drugoj zgradi (slika 3.) obavljena su na zidovima koji su ojačani uskim horizontalnim trakama (C-S) širine 15 mm, a položene su slično na krajeve svakog gornjeg i donjeg dijela zida za sprječavanje loma pete zida i u sredini zida zbog odgađanja pojave posmičnih

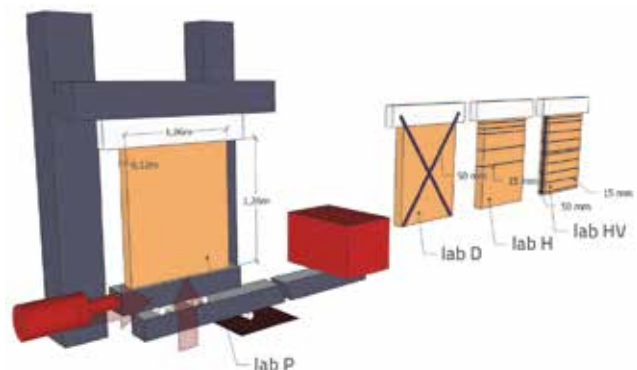
dijagonalnih pukotina. Posljednja konfiguracija ojačanja (C-M) bila je provedena za posmično ojačanje GFRP mrežicom, položenom u duktilni modificirani cementni mort po cijeloj površini. Pretpostavka je bila da se može povećana nosivost neojačanog zida postići uz nižu cijenu materijala za ojačanje (staklena vlakna umjesto karbonskih, modificirani cementni mort umjesto epoksidnog ljepila). Također bi duktilnost ojačanog sustava FRP-zid mogla bi biti poboljšana jer je mort duktilniji (kada se uspoređi sa epoksidom) i pokriva veće površine. To može voditi do kasnije delaminacije GFRP obloge.

2.1. Laboratorijska ispitivanja

Šesnaest uzoraka zidova (visina / širina / debljina = 1,26 / 1,06 / 0,12 m) građenih od suvremene pune opeke (250 × 120 × 65 mm) ispitano je u Laboratoriju za ispitivanje materijala i konstrukcija Sveučilišta u Ljubljani. Mort koji se koristio je mješavina cementa, vapna i pijeska ($D_{max} = 4$ mm) u volumenskom omjeru 1:2:6. Uzorci su izgrađeni na armiranobetonskom temelju i njegovani najmanje godinu dana prije ispitivanja.

Zidovi su ojačani jednosmjernim karbonskim vlaknima različitih oblika: šest sa 50 mm širokim dijagonalnim trakama (označeni sa lab D), tri sa 15 mm uskim horizontalnim trakama u pet nivoa (lab H), a tri u kombinaciji 15 mm uskih horizontalnih traka na devet nivoa i 50 mm širokim trakama na bočnim stranama (lab HV). Trake su primijenjene na prednjoj i zadnjoj strani ili su omotane oko zida ako su horizontalne. Njihova težina bila je 800 g/m². Četiri zida ostavljena su nearmirana (označeno sa lab P, slika 1.). Uzorci su bili vertikalno opterećeni silom 400 kN, koja predstavlja 25 % tlačne otpornosti zida.

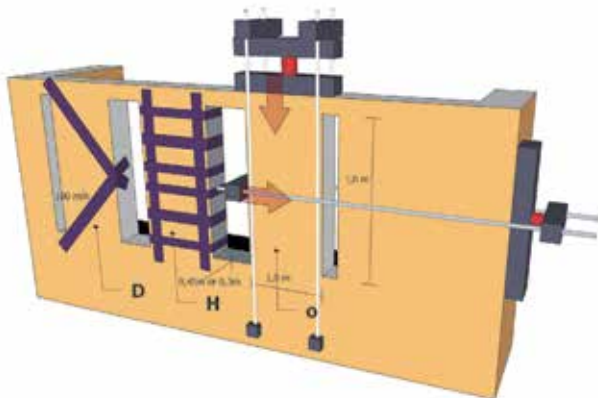
Tehnika lijepljenja *wet lay-up* upotrijebljena je za lijepljenje CFRP traka na zidove. Paneli su bili očišćeni brušenjem. Zatim je primijenjen epoksidni temeljni premaz za bolju adheziju. CFRP trake nalijepljene su na površinu zida epoksidnim ljepilom u kombinaciji s punilom. Na kraju je primijenjen zadnji sloj epoksidnog ljepila kako bi se osiguralo zasićenje vlakana.



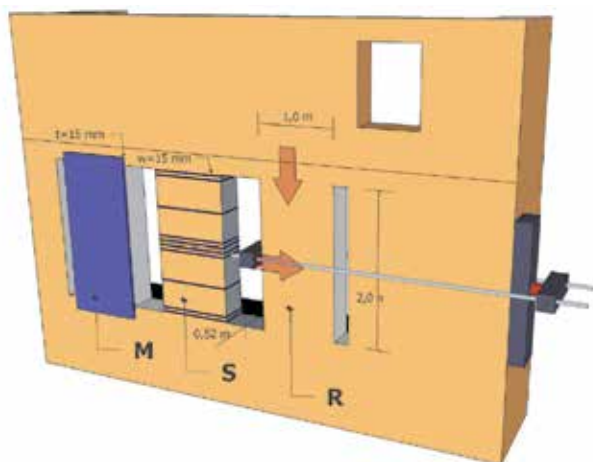
Slika 1. Konfiguracija laboratorijskog ispitivanja posmične čvrstoće i konfiguracije ojačavanja zidova CFRP trakama

2.2. Terenska ispitivanja

Ispitivanja su provedena na dvije tipične stare zidane zgrade, Gostič [21], Jarc Simonič [22]. Jedna zgrada potječe iz 1930-ih godina i nalazi se u Mariboru (MB), a druga iz godine 1874. u selu Cirkovce (C). Nosivi zidovi su izrađeni od pune opeke (MB: 295 × 140 × 65 mm) i (C: u prosjeku oko 300 × 120 × 60 mm), a građene su slabim vapnenim mortom, uobičajenim materijalom za zgrade koje su kulturna baština iz tog razdoblja. Zidovi zgrade u MB (Mariboru) bili su ispitivani na dvije debljine: 0,30 m i 0,45 m, a na svakoj debljini po tri uzorka: netaknut-referentni uzorak, ojačan dijagonalnim trakama i kombinacija horizontalnih i vertikalnih traka (H, slika 2.). Debljina zidova u zgradi C bila je 0,52 m. Šest uzoraka izrezano je i pripremljeno na mjestu ispitivanja. Dva uzorka bila su referentna (netaknuti etaloni), označeni kao R, dva su bila ojačana sa uskim horizontalnim trakama (S) namještenim na uzorcima u 10 nivoa, a dva ojačana GFRP mrežom (M) ugrađenom po cijeloj površini (slika 3.).



Slika 2. Izgled terenskog ispitivanja posmične čvrstoće (MB)



Slika 3. Konfiguracija terenskog ispitivanja posmične čvrstoće

Da bi se dobile glatke stranice i prouzročila što manja šteta, uzorci su izrezani dijamantnom žicom na 2,0 m visine (MB),

odnosno 2,1 m (C) i širine 1,0 m. Na površinu su nakon uklanjanja žbuke, brušenja i otklanjanja labavih dijelova zalijepljene CFRP trake i GFRP mrežice, a na mjestima gdje je bilo potrebno izvedeno je i zaokruživanje na rubovima zidova, kako bi se izbjeglo pucanje CFRP vlakana tijekom savijanja. Neravnine na površini ispravljene su cementnim mortom debljine do 5 mm.

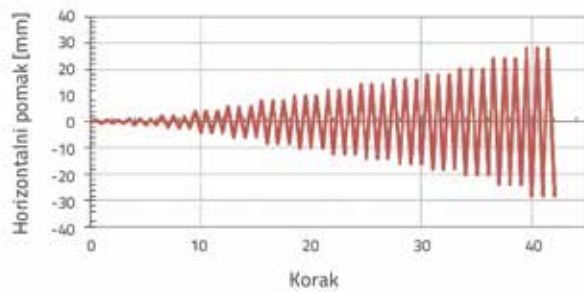
Za lijepljenje CFRP traka na zid primijenjena je *wet lay-up* tehnika. CFRP trake su zalijepljene pomoću epoksidne smole sa obje strane zida ili omotane oko zida. U slučaju MB upotrijebljene su trake širine 100 mm i masom 300 g/m², dok su u slučaju C bile široke 15 mm i masom 800 g/m². Jedna (MB) odnosno dvije (C) horizontalne trake bile su zalijepljene u svakoj zoni kompresije te po jedna traka u sredini svake polovice uzorka. Dijagonalne trake su zalijepljene samo na vlačno opterećenu dijagonalu zida budući da konfiguracija opterećenja omogućava samo jedan smjer primjene horizontalne sile. GFRP mrežice su položene u modificirani cementni mort debljine do 15 mm. Osnovne informacije o postojećim zidovima, tj. tlačna čvrstoća i modul elastičnosti, utvrđene su tlačnim ispitivanjima.

Svi uzorci na terenu imali su vertikalno konstantno opterećenje oko 10 % tlačne nosivosti zida (za C-S opterećenje bilo je 67 kN, C-M: 65 kN, MB30: 65 kN i MB45: 45 kN). Na zgradi u Mariboru morali smo primijeniti dodatno predopterećenje kako bismo simulirali dva kata zgrade. Zgrada C (u selu Cirkovce) imala je dva kata (prizemlje i kat), svaki visine 3,2 m i dodatno vertikalno opterećenje nije bilo primijenjeno.

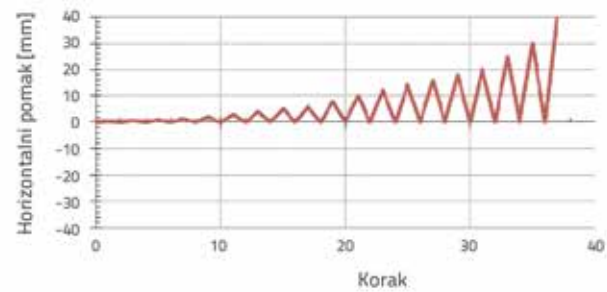
2.3. Postupci ispitivanja

U laboratoriju su uzorci zidova ispitivani kao posmične konzole u čeličnom pokusnom okviru (slika 1). Slobodan kraj bio je na dnu ispitivanog okvira, gdje su se vertikalna i horizontalna sila prenosile u uzorak. Pri ispitivanju na terenu horizontalna je sila aplicirana hidrauličkim batom (1000 kN) u sredini visine pojedinog uzorka, podijelivši zid na gornji i donji "uzorak". Horizontalna sila sa hidrauličkog bata podijeljena je pola u gornji i pola u donji dio zida. Pretpostavljene su identične sile na oba dijela zida, ali su deformacije različite (i to je mjereno, slike 7. i 8.). Uzorci su ispitani kao elementi simetrično uklješteni u okolne zidove.

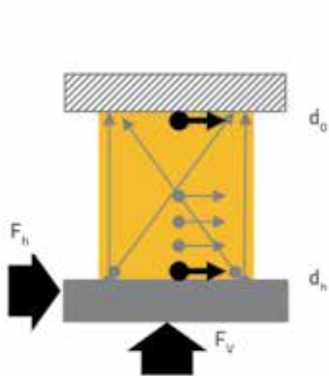
Horizontalno opterećenje u laboratoriju postupno se povećavalo prirastom 0,5 mm; 1,0; 2,0; 4,0 mm itd, gdje se svaki prirast opterećenja ponovio ciklično tri puta s jednakim amplitudama i brzinom (slika 4.). Posmična sila unosila se preko dvosmjernog servohidrauličnog bata kapaciteta 250 kN. Bat je bio fiksiran na okolni potporni okvir. Opterećenje, kad se je ispitivalo na terenu također je bilo vođeno pomacima s prirastom (do 0,5 mm; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 mm itd) i otpuštanjem do približno na nulu (slika 5.). Opterećenje je prekinuto u trenutku kada sila u zadnjem prirastu više nije mogla postići 80 % maksimalne sile dostignute tijekom ispitivanja.



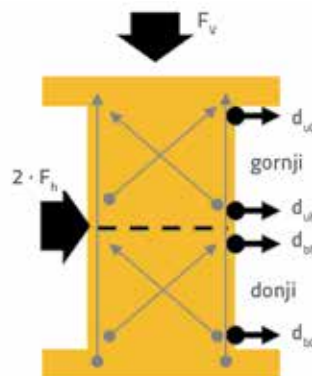
Slika 4. Opterećenje tijekom laboratorijskih ispitivanja



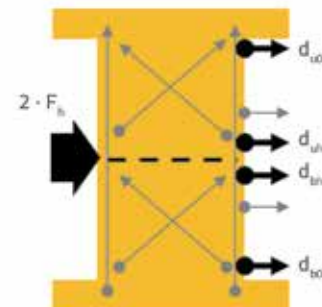
Slika 5. Opterećenje tijekom terenskih ispitivanja



Slika 6. Točke mjerenja u laboratoriju (P, D, H i HV)



Slika 7. Točke mjerenja tijekom ispitivanja na terenu (D i H)



Slika 8. Točke mjerenja tijekom ispitivanja na terenu (R, S i M)

U sva tri slučaja mjereni su horizontalni pomaci i deformacije pomoću linearnih diferencijalnih pretvornika (eng. *linear variable differential transducer* - LVDT). Deformacije u zidovima također su bile mjerene LVDT-ovima koji su bili namješteni dijagonalno i vertikalno uzduž visine zida.

Uređajem za mjerenje sile pratili su se vertikalne sile predopterećenja i horizontalne sile uređaja za ostvarivanje pomaka. Tipični položaj mjernih uređaja prikazan je na slikama (slike 6. do 8.), a najznačajnija mjesta istaknuta su debljim tiskom (sile i pomaci).

2.4. Materijali

U laboratoriju su paralelno s glavnim ispitivanjima na posmik obavljena i uobičajena ispitivanja na osnovnim materijalima kako bi se utvrdila tlačna čvrstoća opeke, morta, vlačna čvrstoća FRP tkanine, kao i druge karakteristike koje su navedene u tablici 1. Svojstva uzoraka ispitivanih *in situ* laboratorijski znatno se razlikuju. S obzirom na suvremene materijale i oprezno zidanje (posebice zbog upotrebe boljeg morta), tlačna čvrstoća laboratorijskih uzoraka bila je petnaest puta veća, a moduli elastičnosti devet puta veći od uzoraka starog zida koji su ispitivani na mjestu gradnje.

Tablica 1. Mehaničke karakteristike materijala (laboratorijska ispitivanja)

Materijal	Karakteristika	Laboratorij	In situ (Maribor)	In situ (Cirkovce)	Metoda
Opeka	tlačna čvrstoća	32 MPa	20,1 MPa	6,5 MPa	EN 772-1:2000
	vlačna čvrstoća	5,34 MPa	-	-	
Mort	tlačna čvrstoća	6,77 MPa	~0,5 MPa	~0,5 MPa	EN 1015-11 :1999
	čvrstoća savijanja	2,08 MPa	-	-	
CFRP	vlačna čvrstoća	3400 MPa	3800 MPa*	3400 MPa*	ASTM D 3039/D 3039M
	Youngov modul	230 GPa*	240 GPa*	230 GPa*	
GFRP mrežica u mortu	Youngov modul			75 GPa*	

*podaci dobiveni od proizvođača

Tablica 2. Rezultati tlačnog ispitivanja zida

Materijal	Karakteristika	Laboratorij	In situ (Maribor)	In situ (Cirkovce)
Ziđe	tlačna čvrstoća	12,4 MPa	1,92 MPa*	1,45 MPa*
	E (modul elastičnosti)	5,74 GPa	0,64 GPa	0,77 GPa
	ν (Poissonov koeficijent)	0,12	0,49	-
	G (modul posmika**)	2,29 GPa	0,21 GPa	0,30 GPa

* tlačna nosivost izračunana iz vlačne nosivosti zida (dobiveno iz Brazilskog testa cijepanja $f_{mc}=10 f_{mt}$, $f_{mt}=2 F_v/(\pi L H)$ gdje je L dužina a H visina uzorka (Bosiljkov [23])

** modul posmika zida izračunan je kao $G=E/(2(1+\nu))$ iz rezultata tlačnih ispitivanja

2.5. Ispitivanje na tlak

Za terensko ispitivanje na tlak uzorci zida od opeke rezani su pomoću žičane pile. Pripremljeni su za utvrđivanje tlačne čvrstoće i modula elastičnosti. Dimenzije uzorka koji se ispitivao za zgradu C bile su (širina / visina / debljina) 1,0 x 1,0 x 0,48 m. Za ispitivanje MB bila su pripremljena dva uzorka, jedan debljine 0,3 m (širina / visina / debljina) 1,0 x 1,0 x 0,30 m i jedan od 0,45 m debljine (širina / visina / debljina) 1,0 x 0,85 x 0,45 m. Laboratorijski uzorci bili su u dimenzijama 0,50 x 0,50 x 0,12 m. Tri su bila neojačana i tri ojačana pomoću 15 mm širokim CFRP trakama, omotanim oko zida na krajnjim i srednjim redovima opeke. Kod tlačnih ispitivanja na terenu upotrijebili smo hidraulični bat kapaciteta 1300 kN, a u laboratorijskima hidraulični bat kapaciteta 5000 kN. Vertikalne i horizontalne deformacije mjerile su se LVDT-ovima, koji su bili montirani s jedne strane zida kad se je ispitivalo na terenu (dvije vertikale i jedna horizontala), i obostrano kad su ispitivanja bila laboratorijska. Zbog nedostataka u opremi za ispitivanje (čelični nosač za distribuciju vertikalnog opterećenja bio je uži od debljine zida za 0,1 m), konačni lom *in situ* uzorka bio je bliži cijepanju nego pravom tlačnom lomu. U takvom slučaju realnija vrijednost tlačne nosivosti dobivena je iz zatezne nosivosti prema Brazilskom testu cijepanja i pretpostavkom da je tlačna nosivost približno deset puta veća od zatezne nosivosti kod cijepanja, Bosiljkov [24]. Mehaničke karakteristike dobivene tlačnim ispitivanjima prikazane su u tablici 2.

3. Rezultati posmičnih ispitivanja

Histerezni odziv i ovojnice rezultata za različite konfiguracije ojačanja uspoređeni su u dijagramima (slike 9., 11. i 14.). Rezultati su prikazani kao prosjek "pozitivnog" i "negativnog" smjera prisilnog pomaka u primjeru laboratorijskih ispitivanja (prosjeci su izračunani za horizontalnu silu i pomak). Kad se ispitivalo na terenu, prosjek je bio izračunan iz izmjerenih pomaka za donji i gornji dio zida zato što je mjerena sila jednako podijeljena (kako bi i morala djelovati) između gornjeg i donjeg uzorka (slika 7.). Rotacija je izračunana iz horizontalnog pomaka podijeljenog s visinom uzorka. Konfiguracije R, M i S ispitane su na dva uzorka (označena a i b) jednake debljine 0,52 m. Konfiguracije o, D i H ispitane su

na zidovima debljine 0,30 m i 0,45 m. Učinkovitost različitih konfiguracija ojačanja FFRP-om prikazana je na dijagramima "horizontalna sila" (slike 10., 12. i 15.) i "granična rotacija" (slike 10., 13. i 16.), gdje su uspoređeni s referentnim neojačanim uzorcima za svaki način ispitivanja.

Zbog boljih materijala i pažljivih zidarskih radova, uzorci ispitivani u laboratoriju iskazali su puno veću nosivost (0,7 - 1,0 MPa) nego stari zidovi na terenu (0,1 - 0,2 MPa).

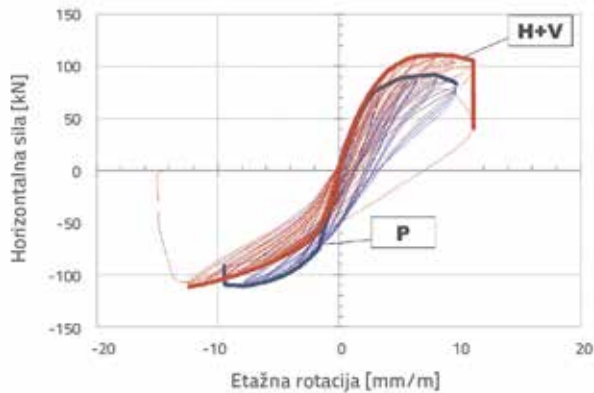
Najveći prirast posmične čvrstoće (do 170 %) dobiven je horizontalnim ojačanjem (loših) zidova na terenu. Učinak horizontalnog ojačanja laboratorijskih zidova bio je 120 %. Najveći rast (380 %) granične rotacije zapažen je kod horizontalnog (i vertikalnog) ojačanja zidova CFRP trakama na terenu, koja je također bila velika (oko 200 %) za konfiguracije H i HV ispitane u laboratoriju.

Usporedbom s neojačanim uzorcima, koji su se tipično lomili dijagonalnim vlačnim mehanizmom, širenje pukotina bilo je uspješno ograničeno pomoću CFRP traka omotanih oko zida te je izazvalo stvaranje više manjih pukotina. Horizontalne FRP trake nisu se odvojile od površine zida jer su bile dobro povezane oko zida. U laboratoriju je mehanizam loma započeo kao kombinacija smicanja i savijanja. Prve pukotine pojavile su se u uglovima uzorka zbog ljuštenja zida. Prevladavajući način loma kod tipa H i HV ojačanja bilo je savijanje koje je rezultiralo lokalnim lomom tlačne pete zida (slika 19.b).

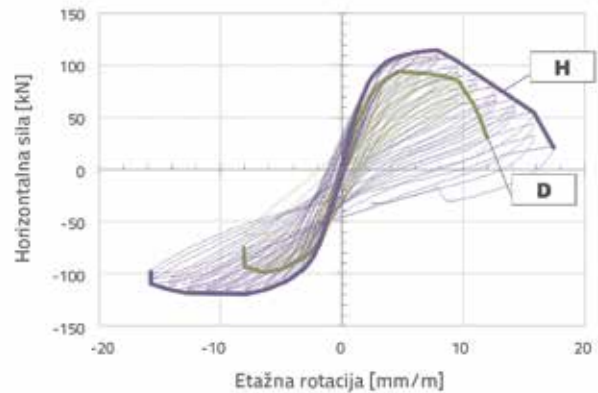
Iako je kod konfiguracije H, ispitane na terenu (MB) došlo do manjih lokalnih odstupanja vertikalnih traka (širine 100 mm) od površine, horizontalne trake su ostale neoštećene do kraja ispitivanja (slika 19.d). Dominantan mehanizam loma bio je posmičnog tipa stvarajući dijagonalne pukotine koje su bile donekle spriječene FRP trakama.

Dijagonalna konfiguracija je samo malo doprinijela posmičnoj čvrstoći (~5 %) i oko 10 % graničnoj rotaciji. FRP trake u dijagonalnoj konfiguraciji na terenu odvojile su se na neravnoj površini u slabijem materijalu – opeki. Dijagonalno ojačani zidovi u laboratoriju pokazali su razvoj posmičnih i savojnih pukotina. Tlačni lom pete bio je glavni razlog loma kod ove vrste ojačanja u laboratorijskim ispitivanjima (lab D).

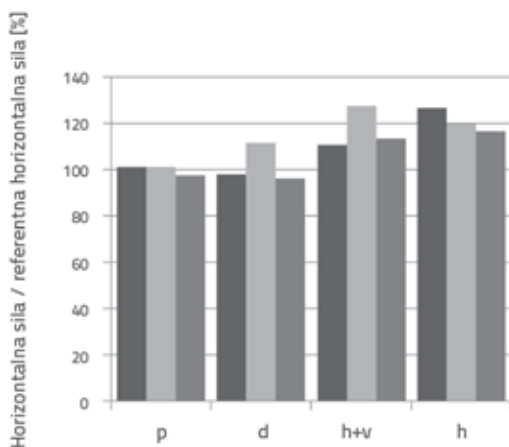
Kod GFRP mrežica u modificiranom cementnom mortu nosivost je na posmično naprezanje u ravnini zida gotovo udvostručena, ali zid se ponašao neduktilno sa sličnim graničnim pomakom neojačanog zida. Mehanizam loma bio je



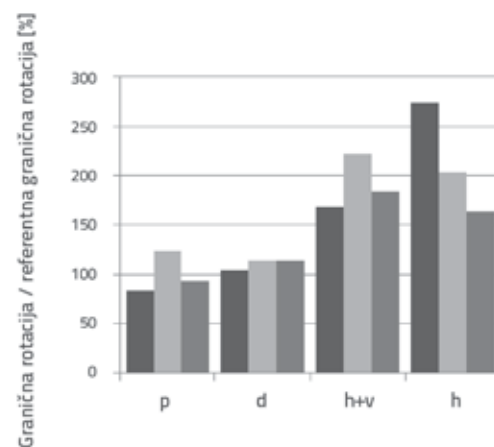
Slika 9. Histerese i envelope za laboratorijsko posmično ispitivanje konfiguracija: P (pure - referentni) i HV (horizontalne i vertikalne trake)



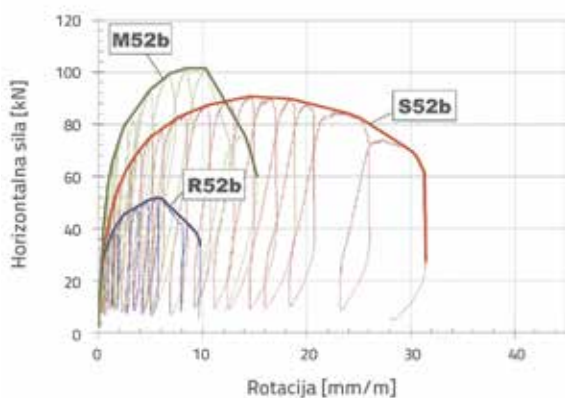
Slika 11. Histerese i envelope za laboratorijsko posmično ispitivanje konfiguracija: D (dijagonalno) i H (horizontalno)



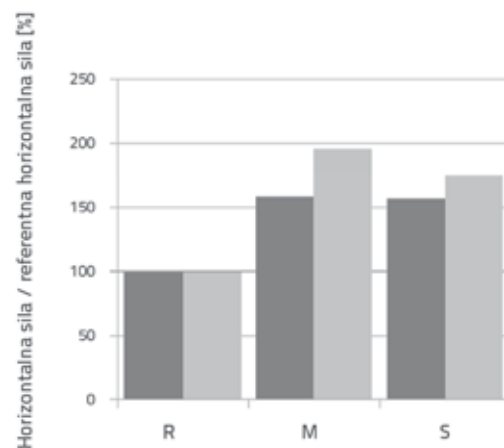
Slika 10. Rezultati laboratorijskih ispitivanja za efektivnost horizontalne sile: D, H i HV uspoređeni s neojačanim zidovima (p); za sva tri uzorka (i, ii, iii)



Slika 12. Rezultati granične rotacije kod laboratorijskih ispitivanja za: D, H i HV uspoređeni s neojačanim zidovima (p); za sva tri uzorka (i, ii, iii)



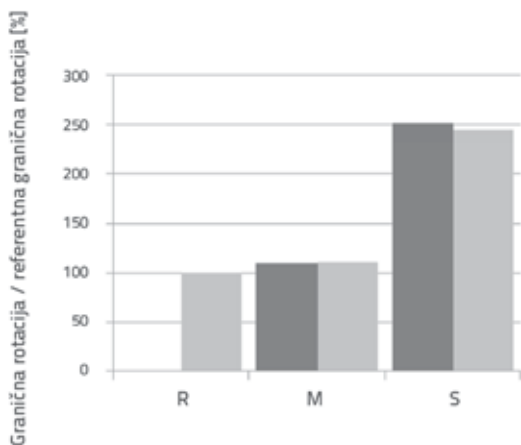
Slika 13. Histerese i envelope za posmično ispitivanje na terenu, konfiguracija FRP ojačanja M (mrežicom) i S (horizontalnim trakama) u odnosu na R (referentni zid)



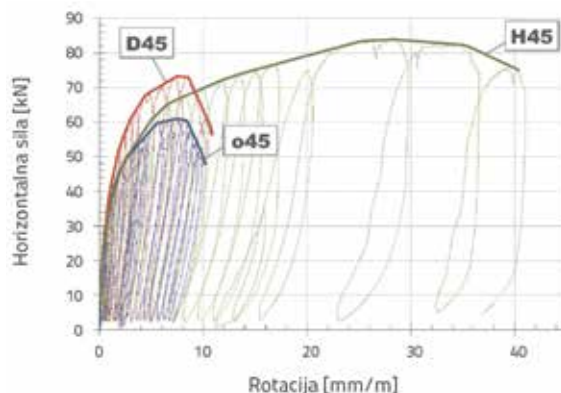
Slika 14. Rezultati o učinkovitosti nosivosti konfiguracija FRP ojačanja (M, S u odnosu na R)

posmični lom s odstupanjem GFRP obloge od površine zida. Odstupanje je najviše izraženo u tlačnim zonama. Iz rezultata naših ispitivanja možemo zaključiti da ojačanje samo pomoću CFRP traka lijepljenim u dijagonalnom smjeru

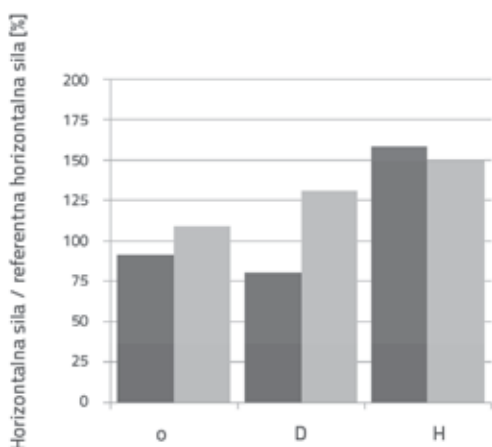
zida nije učinkovito rješenje. Za laboratorijsko i terensko ispitivanje učinkovitost je horizontalnih traka omotanih oko zida bila presudna za visoku nosivost i posebno za visoki kapacitet granične rotacije.



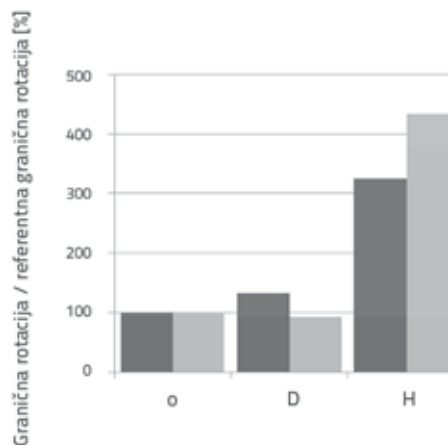
Slika 15. Rezultati u učinkovitosti granične rotacije konfiguracija FRP ojačanja (M, S u odnosu na R)



Slika 16. Histereze i envelope za posmično ispitivanje zidova na terenu i učinkovitost konfiguracija FRP ojačanja M (mrežicom) i S (horizontalnim trakama) u odnosu na R (referentni) uzorak



Slika 17. Rezultati o učinkovitosti nosivosti konfiguracija FRP ojačanja (D, H, o)



Slika 18. Rezultati u učinkovitosti granične rotacije konfiguracija FRP ojačanja (D, H, o)



Slika 19. Načini loma FRP ojačanih zidova tijekom provedenih ispitivanja

4. Usporedba modela proračuna

U protekla dva desetljeća razvijeni su neki proračunski modeli i postavljene smjernice za proračun zidova ojačanih FRP materijalom (Garbin [24], Prota [25], Zhuge [26], Myers [27], Nardone [28]). U ovom radu uzeto je u obzir nekoliko

računskih modela kako bi se utvrdilo njihovo podudaranje s eksperimentalnim rezultatima. Konfiguracije s horizontalnim trakama, zatim kombinacijom horizontalnih i vertikalnih traka te mrežom izračunane su po formulama koje su zapisane u američkim smjericama ACI 440.7R-10 i talijanskim CNR-DT 200/2004, te formulama koje su predložili Wang [17],

Triantafillou [16] i Marcari [18]. Wangove i Marcarijeve formule su upotrijebljene i za izračun dijagonalno ojačanih zidova.

Ukupna posmična sila ojačanog uzorka je zbroj dviju komponenti: posmične sile neojačanog zida i doprinos posmične sile FRP ojačanja. Proračun posmičnog kapaciteta neojačanog zida su različiti, kao i definicije FRP doprinosa. Za proračun neojačanog zida uzeti su u obzir klizanje u sljubnicama (Triantafillou, ACI, CNR, Wang), dijagonalni vlačni lom (ACI, Wang, Marcari) i drobljenje pete zida (Triantafillou, ACI, CNR). FRP doprinos je izračunan po analogiji štapova bazirajući se na mehanizmu loma s odstupanjem trake. Na temelju eksperimentalnih podataka ili analitičkog/numeričkog modela, deformacije $\varepsilon_{frp,e}$ su ograničene na vrijednost, gdje ponašanje sustava FRP-zid više nije dovoljno za prijenos posmične sile. Ograničenje je postavljeno na osnovi različitih koeficijenata. Kod Triantafilloua [3] osnova za izračun $\varepsilon_{frp,e}$ je formula bazirana na eksperimentalnim podacima dobivenih na betonskim uzorcima a koja je bila kasnije promijenjena na osnovi eksperimenata u točnijem obliku (TA model - Triantafillou & Antonopoulos [16]). U ACI smjernicama upotrebljava se formula $\varepsilon_{frp,e} = \kappa_v \cdot \varepsilon_{frp,e}$ gdje je κ_v redukcijski koeficijent kod posmičnog mehanizma i ovisi o indeksu armiranosti sa FRP ω_f . Redukcijski koeficijent lijepljenja je dobiven eksperimentom. CNR koristi eksperimentalno određeni koeficijent c_f za proračun specifične energije loma lijepljenja, a pomoću toga izračunano je i efektivno naprezanje. Wang u tu svrhu koristi eksperimentalno određeni koeficijent ξ . Marcari koristi eksperimentalno dobivene deformacije u FRP-u (ε_{frp}).

4.1. Modeli Triantafillou i Antonopoulosa

Triantafillouov model [3] pogodan je za zidove ojačane horizontalno, a vertikalno ojačanje je zanemareno u proračunskom modelu. Prema europskoj normi EC6 za neojačane zidove, Triantafilloujeva formula za sumu posmične otpornosti neojačanog zida V_{Rd1} i efekt posmične armature V_{Rd2} modelirane po analogiji štapova može se izraziti na sljedeći način:

$$V_{Rd} = V_{Rd1} + V_{Rd2} \quad (1)$$

$$V_{Rd} = \frac{f_{vk} \cdot t \cdot d}{\gamma_M} + V_{Rd2} \leq \frac{0.3 \cdot f_{vk} \cdot t \cdot d}{\gamma_M} \quad (2)$$

Karakteristična čvrstoća zida f_{vk} izražena je sljedećim izrazom:

$$f_{vk} = \min \left(f_{vk0} + 0.4 \cdot \frac{N_{Rd}}{l \cdot t}, 0.7 \cdot f_{vk,lim}, 0.7 \cdot \max(0.065 \cdot f_b, f_{vk0}) \right) \quad (3)$$

$$\min \left(f_{vk0} + 0.4 \cdot \frac{N_{Rd}}{l \cdot t}, f_{vk,max} \right)$$

Faktor 0,7 upotrebljava se samo ako treba izračunati potres. Doprinos FRP ojačanja posmičnom kapacitetu povezana je s djelovanjem horizontalnog FRP ojačanja:

$$V_{Rd2} = \frac{0.7}{\gamma_{frp}} \cdot \rho_h \cdot E_{frp} \cdot \varepsilon_{frp,e} \cdot l \cdot t \quad (4)$$

Parcijalni faktor sigurnosti γ_{frp} zavisi od tipova vlakna: 1,15 za CFRP, 1,20 za AFRP i 1,25 za GFRP. Određivanje efektivnih deformacija FRP-a ($\varepsilon_{frp,e}$) uzeta je iz Triantafillouva i Antonopoulosova [16] modela:

$$\varepsilon_{frp,e} = \min \left[0.65 \left[\frac{(f_m)^2}{E_{frp} \cdot \rho_h} \right]^{0.56} \cdot 0.001, 0.17 \left[\frac{(f_m)^2}{E_{frp} \cdot \rho_h} \right]^{0.3} \cdot \varepsilon_{frp,u} \right] \quad (5)$$

4.2. Smjernice ACI 440.7R-10

U ACI smjernicama doprinos FRP ojačanja u slučaju loma kontroliranog smicanjem određuje redukcijski koeficijent veze κ_v , koji je bio umjeren na osnovi eksperimentalnih podataka različitih istraživača. ACI smjernice pogodne su za proračun posmične sile zidova ojačanih horizontalno i vertikalno. Nosivost neojačanog zida izračunana je kao najniža od: V_{bjs} – posmične nosivosti ovisne o klizanju u sljubnicama, V_{dt} posmične nosivosti ovisne o dijagonalnom vlačnom lomu ili V_{tc} posmične nosivosti ovisne o drobljenju pete zida:

$$V_{n,s} = V_{n,URM} + V_f \quad (6)$$

$$V_{n,URM} = \min(V_{bjs}, V_{dt}, V_{tc}) \quad (7)$$

$$V_{bjs} = v_{mL} \cdot A_n \quad (8)$$

$$v_{mL} = 0.75 \cdot \frac{0.75 \cdot v_{tL} + \frac{P_D}{A_n}}{1.5} \quad (9)$$

$$V_{dt} = f_{dt} \cdot A_n \frac{L}{h_{eff}} \sqrt{1 + \frac{f_a}{f_{dt}}} \quad (10)$$

$$f_a = \frac{P_D}{A_n} \quad (11)$$

$$V_{tc} = \alpha \cdot Q_G \cdot \frac{L}{h_{eff}} \cdot \left(1 - \frac{f_a}{0.7 \cdot f_m} \right) \quad (12)$$

$$f_a = \frac{Q_G}{A_n} \quad (13)$$

Nakon proračuna posmičnog kapaciteta ili nosivosti neojačanog zida $V_{n,URM}$ proračunska nosivost može biti izračunana kao $FV_{n,URM}$. Ako je proračunska posmična nosivost veća kao faktorirana posmična sila V_f , onda zidu ne trebaju ojačanja za nosivost u ravnini zida, a u suprotnom je potrebno:

$$\Phi \cdot V_{n,URM} > V_u \quad (14)$$

Doprinos FRP posmičnog ojačanja, kod kojeg je p_{fv} ukupna sila koju FRP sustav može unositi u zid, jest:

$$V_f = p_{fv} \frac{d_v}{s_f} \quad (15)$$

$$d_v = \min(H, L) \quad (16)$$

$$p_{fv} = A_f \cdot f_{fe} \quad (17)$$

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \quad (18)$$

Efektivni naponi su zavisni od efektivnih deformacija, funkcije k_v i granične deformacije loma FRP-a koju navode proizvođači.

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_v \cdot \varepsilon_{fu} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \kappa_v &= 0.4 & \text{ako je} & \omega_f \leq 0.2 \\ \kappa_v &= 0.64 - 1.2 \cdot \omega_f & \text{ako je} & 0.2 < \omega_f \leq 0.45 \\ \kappa_v &= 0.1 & \text{ako je} & \omega_f > 0.45 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\omega_f = \frac{1}{85} \cdot \frac{A_f \cdot E_f}{A_n \sqrt{f_m}} \quad (21)$$

Kada je proračunska posmična nosivost ojačanih zidova veća od nosivosti koja ovisi o lomu pete neojačanog zida, tada treba provjeriti je li savojno FRP ojačanje spriječilo lom zida zbog drobljenja pete. Maksimalna $V_{n,f}$ koju podnosi zid prije savojnog loma izračunava se na sljedeći način:

$$V_{n,f} = \frac{M_n}{k \cdot h_{eff}} \quad (22)$$

Kapacitet momenata M_n ojačanog zida podvrgnutog sili u ravnini zida može se izračunati na sljedeći način:

$$M_n = \sum_i \left[F_i \cdot \left(d_i - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \right] + P_u \cdot \left(\frac{L}{2} - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \quad (23)$$

Nosivost zida ojačanog FRP-om jest minimum između posmične nosivosti i nosivosti na savijanje:

$$V_n = \min(V_{n,s}, V_{n,f}) \quad (24)$$

4.3. CNR-DT 200/2004

Proračun posmične čvrstoće zidova ojačanih FRP-ovima izračunava se kao zbroj doprinosa zidova i doprinosa FRP ojačanja, ali lom zida može se pojaviti kod $V_{Rd,max}$ (tlačne čvrstoće u smjeru tlačnih napona). Vrijednost f_{vk} mora se odrediti sukladno sadašnjoj europskoj normi EC6 (isto kao kod Triantafilloua – jednadžba 3). Za zidove ojačane FRP trakama smještenima uz dijagonale, CNR DT200 ne daje postupak proračuna:

$$V_{Rd} = \min(V_{Rd,m} + V_{Rd,f}, V_{Rd,max}) \quad (25)$$

$$V_{Rd,m} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot d \cdot t \cdot f_{vd} \quad (26)$$

$$f_{vd} = \frac{f_{vk}}{\gamma_M} \quad (27)$$

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot \frac{0.6 \cdot d \cdot A_{fw} \cdot f_{fd}}{p_f} \quad (28)$$

$$f_{fd} = E_f \cdot \varepsilon_{fd} \quad (29)$$

$$\varepsilon_{fd} = \min \left(\eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{fk}}{\gamma_f}, \varepsilon_{f,dd} \right) \quad (30)$$

$$\varepsilon_{f,dd} = \frac{f_{f,dd}}{E_f} \quad (31)$$

$$f_{f,dd} = \frac{1}{\gamma_{f,d} \cdot \sqrt{\gamma_M}} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{E_f \cdot \Gamma_{FK}}{t_f}} \quad (32)$$

$$\Gamma_{FK} = c_1 \cdot \sqrt{f_{mk} \cdot f_{mtm}} \quad (33)$$

$$V_{Rd,max} = 0.3 \cdot f_{md,h} \cdot t \cdot d \quad (34)$$

Parcijalni faktor sigurnosti γ_{Rd} je 1,2 pri smicanju i_c , je empirijski određeni koeficijent jednak 0,015.

4.4. Wang i suradnici

Wang [17] je predložio formule za zidove ojačane horizontalnim, dijagonalnim ili kombinacijom dijagonalnih i horizontalnih traka.

$$V_u = V_w + V_{frp} \quad (35)$$

Jednadžbu za kapacitet posmične čvrstoće neojačanog zida u slučaju mehanizma klizanja autori su preuzeli iz EC6:

$$f_v = f_{v0} + 0.4 \cdot \sigma_v \quad (36)$$

a za dijagonalni lom upotrijebili su jednadžbu na osnovi teorije vlačnih napona, gdje su dodali statistički koeficijent 2,1 a isti je dobiven statističkom analizom podataka tijekom eksperimenata na mnogim sveučilištima:

$$f_v = \frac{f_{v0}}{1.2} \sqrt{1 + 2.10 \cdot \frac{\sigma_v}{f_{v0}}} \quad (37)$$

$$V_w = f_v \cdot A_0 \quad (38)$$

Doprinos posmičnoj čvrstoći zida ojačanjem FRP trakama izražen je na sljedeći način:

$$V_{frp,d} = E_f \cdot \varepsilon_u \cdot [\xi_s \cdot n_s \cdot A_{fs} + \xi_x \cdot n_x \cdot A_{fx} \cdot (\cos \theta + 0.2 \cdot \sin \theta)] \quad (39)$$

$$\xi_s = -0.245 \cdot \ln(\rho) - 0.128 \quad (40)$$

$$\xi_x = -0.411 \cdot \ln(\rho) - 0.107 \quad (41)$$

gdje indeks "s" znači horizontalni, a "x" kosi doprinos.

4.5. Marcar i suradnici

Marcar [6] je predstavio proračunski model za proračun posmičnih zidova ojačanih kosim trakama. Posmična nosivost je zbir posmične nosivosti zida izračunane kod povećane vertikalne sile $N_0 + N_{m,frp}$ i doprinosa FRP-a posmičnoj nosivosti:

$$V_{SM} = \min(V_{m,diag, shear} + V_{frp}, V_{m,flexural}) \quad (42)$$

Za proračun doprinosa zida uzeti su u obzir dijagonalno smicanje i lom zbog ljuljanja. Jednadžba klizanja u sljubnicama nije prikazana i bila je zanemarena zato što se u njegovom primjeru nisu pojavile nikakve eksperimentalne potvrde. Dijagonalna vlačna posmična nosivost izračunana je pomoću formulacije posmične nosivosti koju su izveli Turnšek i Čačovič [29]:

$$V_{m,diag, shear} = B \cdot t \cdot \frac{1.5 \cdot \tau_{0d}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5 \cdot \tau_{0d}}} \quad (43)$$

$$b = \frac{H}{B} \quad 1 \leq b \leq 1.5 \quad (44)$$

$$\sigma_0 = \frac{N}{A} \quad (45)$$

Maksimalano je smicanje u slučaju mehanizma savijanja:

$$V_{m,flexural} = \psi \cdot \frac{B^2 \cdot t}{H} \cdot \frac{\sigma_0}{2} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_0}{0.85 \cdot f_m}\right) \quad (46)$$

Nosivost zida izračunana je za povećanu vertikalnu silu $N_0 + N_{m,frp}$ pomoću mehanizma štapova:

$$N = \max(N_0 + N_{m,frp}) \quad (47)$$

$$N_{m,frp} = F_{frp} \cdot \sin(\theta) \quad (48)$$

$$F_{frp} = n \cdot (E_{frp} \cdot w_{frp} \cdot t_{frp}) \cdot \varepsilon_{frp} \quad (49)$$

$$V_{frp} = F_{frp} \cdot \cos(\theta) \quad (50)$$

Lista simbola

A	bruto presjek zida (Marcari)
A_0	horizontalni presjek zida (Wang)
A_{fs}	presjek FRP u horizontalnom smjeru
A_{fw}	efektivni presjek FRP-a
A_{fk}	presjek FRP-a u kosom smjeru
A_n	horizontalni presjek zida (ACI)
B	dužina panela
E_f	modul elastičnosti FRP ojačanja (ACI; Wang, CNR)
E_{frp}	modul elastičnosti FRP ojačanja (Triantafillou, Marcari)
F_{frp}	vlačna sila u dijagonali
F_i	sila u i -toj FRP traci
H	visina panela
L	dužina zida
M_n	nominalna savojna nosivost
N	vertikalno opterećenje
N_0	prosječno predopterećenje
$N_{m,frp}$	povećano vertikalno opterećenje u zidovima zbog FRP-a

N_{Rd}	uzdužna sila
P_D	projektno stalno opterećenje
P_u	uvećana uzdužna sila kao rezultanta skupno distribuirane sile na zidu
Q_G	projektno vlastito opterećenje
V_{bjs}	posmična nosivost u zavisnosti od klizanja u sljubnicama
V_{dt}	posmična nosivost u zavisnosti od napetosti u dijagonali
V_f	doprinos FRP-a posmičnoj nosivosti zida (ACI)
V_{frp}	doprinos FRP-a posmičnoj nosivosti (Wang, Marcari)
$V_{frp,d}$	računski posmični doprinos FRP-a
$V_{m,diag, shear}$	dijagonalna posmična nosivost zida
V_n	nominalna nosivost ojačanog zida FRP-om
$V_{n,f}$	posmična nosivost zavisna od loma zbog savijanja FRP-om ojačanog zida
$V_{n,s}$	posmična nosivost ojačanog zida (ACI)
$V_{n,URM}$	posmična nosivost neojačanog zida (ACI)
V_{Rd}	posmična nosivost ojačanog zida (Triantafillou, CNR)
V_{Rd1}	posmična nosivost zida (Triantafillou)
V_{Rd2}	doprinos FRP-a posmičnoj nosivosti zida (Triantafillou)
$V_{Rd,f}$	doprinos FRP-a posmičnoj nosivosti zida (CNR)
$V_{Rd,m}$	posmična nosivost zida (CNR)
V_{Rdmax}	limit tlačne čvrstoće
V_{SM}	posmična nosivost ojačanog panela (Marcari)
V_{lc}	posmična nosivost zavisna od loma pete zida
V_u	uvećana posmična sila
V_w	posmična nosivost zida (Wang)
b	omjer visine i širine zida: H/B
c	razmak između vlakana s maksimalnom tlačnom deformacijom i neutralne osi
c_f	empirijski dobiveni koeficijent (0,015)
d	efektivna dužina zida ($d = 0,8 l$) (Triantafillou, CNR)
d_i	udaljenost sile F_i od ekstremnih tlačnih vlakana
d_f	razmak između tlačne strane zida i središta savojnog FRP ojačanja
d_v	efektivna dužina zida za proračun smicanja (ACI)
f_a	osna tlačna naprezanja u ovisnosti o gravitacijskoj sili
f_b	normalizirana tlačna čvrstoća zida
f_{dt}	specificirana dijagonalna vlačna nosivost
f_{fd}	proračunska nosivost u FRP ojačanju
f_{fdd}	proračunska nosivost FRP ojačanja zbog odstupanja
f_{fe}	efektivna veličina naprezanja u FRP ojačanju
f_k	karakteristična tlačna čvrstoća zida (Triantafillou)
f_m	tlačna čvrstoća zida (ACI)
$f_{md,h}$	proračunska tlačna čvrstoća zida u horizontalnom smjeru
f_{mk}	karakteristična tlačna čvrstoća zida (CNR)
f_{mtm}	srednja vrijednost vlačne čvrstoće zida

f_v	karakteristična posmična nosivost zida (Wang)
f_{v0}	karakteristična posmična nosivost zida kod nultog tlačnog napona
f_{vd}	proračunska posmična nosivost zida
f_{vk}	karakteristična posmična nosivost zida (Triantafillou, CNR)
f_{vk0}	posmična nosivost zida kod nultog tlačnog napona
$f_{vk,lim}$	granična vrijednost f_{vk}
$f_{vk,max}$	maksimalna vrijednost f_{vk}
h_{eff}	visina do rezultante horizontalne sile
k	koeficijent kod graničnih uvjeta zida
l	dužina zida
n	broj FRP slojeva
n_s	broj horizontalnih FRP traka
n_x	broj kosih FRP traka
p_f	razmak FRP traka
s_f	središte do sredine razmaka FRP ojačanja mjereno okomito na smjer posmične sile
t	debljina zidnog panela
t_f	debljina FRP trake
t_{fp}	debljina dijagonalnog sloja
w_{fp}	širina dijagonalnog sloja
Γ_{Fk}	karakteristična vrijednost specifične energije loma
λ	faktor jednak 0,5 za fiksni slobodni konzolni zid ili jednak 1,0 za fiksni zid

4.6. Usporedba eksperimentalnih i izračunanih vrijednosti

Na slici 20. uspoređeni su rezultati eksperimentalnih ispitivanja (linije) i izračunani rezultati različitih pristupa proračuna posmične čvrstoće (stupci). Crtkana linija je eksperimentalno dobiven rezultat samo za zid, a puna linija predstavlja kapacitet horizontalne nosivosti za zidove ojačane FRP-om. Izračunani doprinos samog zida za svaki način ojačanja prikazan je u svjetlosivoj boji, dok je zajedničko djelovanje zida i FRP-a prikazano u tamnosivoj.

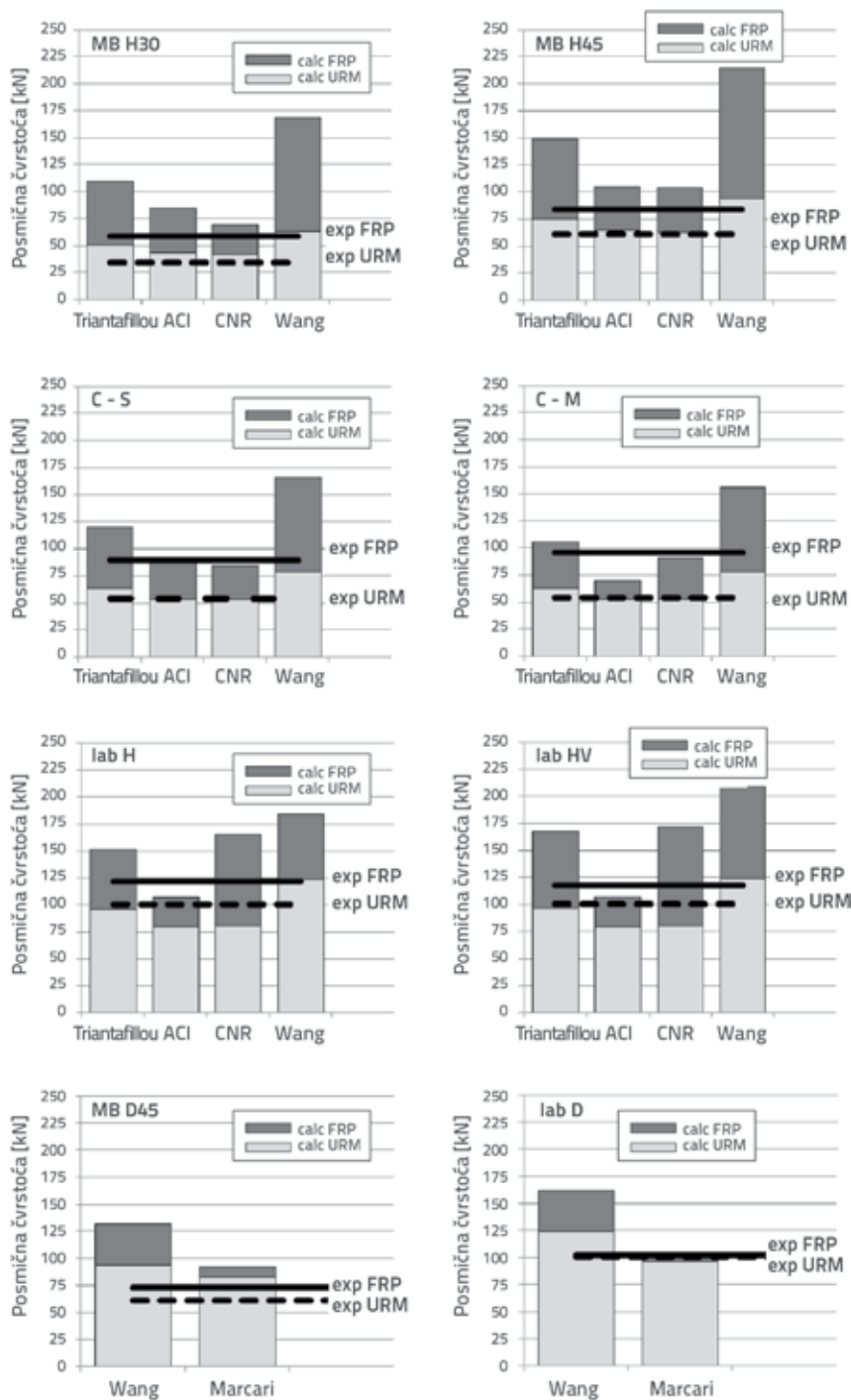
Stupci u dijagramima označuju računski dobivene rezultate. Svaki model proračuna upotrebljava različit pristup za određivanje načina loma (u svakom modelu svaki način loma nije predstavljen). Iz tog razloga stvarni način loma nije nužno sukladan pretpostavljenom lomu, mada posmična nosivost može biti točno izračunana. Različiti načini loma bili su uočeni tijekom eksperimenata. Lom dijagonalnih traka bio je uvijek zbog odstupanja traka sa zida (u laboratoriju i in situ). Način loma tijekom laboratorijskih ispitivanja zida s omotanim trakama prevladao je zbog drobljenja tlačene pete zida (zajedno s dijagonalnim pukotinama) jer su se trake ponašale poput pojasa. Tijekom ispitivanja način je loma bio više (dijagonalni) posmični šireći dijagonalne pukotine nastale

zbog prekoračenih vlačnih napona u sredini zida. Međutim lom se dogodio kada deformacije i sile više nisu mogle biti prenesene sa zida u FRP. Budući da trake nisu očito odstupile od površine zida, maksimalni kapacitet veze FRP-zid bio je ograničen relativnim efektivnim deformacijama. Može se reći da je bio kapacitet potrošen kada se deformacije sa zida (zbog unutrašnjih pukotina) više nisu mogle prenositi na trake. Prema tome, izračunane relativne efektivne deformacije, koje su predložili spomenuti autori, maksimalno su moguće razvijene deformacije mješovitog sustava (zid zajedno sa FRP-om). Može se zaključiti da je vrlo bitno imati dobro sidrenje FRP ojačanja kako bi se dostigla puna nosivost zidova u njihovoj ravnini. S omotanim trakama oko zida bilo je postignuto dovoljno sidrenje.

Triantafillouov model uglavnom realno definira doprinos neojačanog zida, posebno kod relativno jakih zidova ispitanih u laboratoriju (4 % na konzervativnoj strani). Za uzorke ispitane na terenu (bili su prilično loši) model precjenjuje doprinos posmičnog kapaciteta zidova za 26 %. Ukupni kapacitet nosivosti ojačanih zidova precijenjen je gotovo kod svih uzoraka u rasponu od 10 % (C-M) do 85 % (MB45). Lošiji materijal za ojačanje bolje je ocijenjen. Triantafillou je točan kad treba predvidjeti mehanizam loma za lošije ali ne i za jake zidove. Za jake zidove ako se predviđa lom tlačene pete zida uz 30 % tlačne čvrstoće, čini se da je ona previsoka ili nije dobro definirana.

CNR model je malo više konzervativan kod proračuna doprinosa neojačanih zidova. Prilično je točan kod relativno loših zidova (5 % iznad eksperimentalnih vrijednosti), a podcjenjujući za jake zidove (20 % ispod eksperimentalnih). Triantafillouov i CNR model uzimaju EC 6 definiciju za neojačane zidove, kod kojih se klizanje u sljubnicama zida pretpostavlja kao najkritičniji mehanizam loma za posmičnu nosivost zida podložnog horizontalnoj sili. CNR rezultati za posmičnu nosivost neojačanog zida više su konzervativni jer je karakteristična vrijednost posmične nosivosti f_{vk} podijeljena s parcijalnim faktorom sigurnosti otpornog modela γ_{Rd} . Posmična nosivost ojačanih zidova izračunana prema modelu CNR blizu je eksperimentalno postignutoj u slučaju loših zidova (in situ testovi, 7 % precijenjena), ali nažalost u ponekim primjerima (in situ MB) dobiveni mehanizmi loma nisu sukladni stvarnim, koji su se dogodili tijekom ispitivanja. Kod in situ C mehanizmi loma bili su točno predviđeni. Kod jakih zidova doprinos FRP-a i dijagonalna tlačna nosivost su precijenjeni za 41 %. Usporedba CNR-ova i Triantafillouova modela pokazala je da je određeni lom pete zida u visini 15 % tlačne čvrstoće, koja je za polovicu manja od Triantafillouog prijedloga. Stvarno ponašanje je negdje između – bliže nižoj vrijednosti kod jakih zidova i do 25 % tlačne nosivosti kod loših zidova.

ACI smjernice daju gotovo jednake rezultate kao i CNR doprinos neojačanog zida posmičnoj nosivosti. Približno su točni rezultati kod relativno loših zidova (7 % precijenjenje) i 20 % podcjenjujući kod jakih zidova. U ACI smjernicama



Slika 20. Usporedba posmične čvrstoće zida i doprinos FRP ojačanja za provedena ispitivanja prema različitim autorima

prilično je dobro predviđen mehanizam loma, osim za niske vertikalne sile (pod 10 % tlačne čvrstoće) kada se proračunom dobije drobljenje tlačne pete, a ispitivanjem je opažen drukčiji lom (dijagonalne pukotine). U takvom primjeru potrebno je oprezno promatrati rezultate, zato što bi kod umjerenog nivoa pretkompresije moralo klizanje u sljubnicama prevladati

posmični lom u isto vrijeme. Izračunana nosivost zidova zajedno s doprinosom FRP-a bila je precijenjena kod svih primjera (od 52 % do 185 %).

Marcariov [6] pristup prilično je točan za doprinos posmičnoj nosivosti neojačanog zida kod jakih zidova (4 % podcjenjivanje), ali kod loših zidova vrijednosti su 36 % precijenjene. Nosivost

mehanizam loma tlačne pete zida. ACI smjernice sadržavaju više aspekata za predviđanje pojava loma tlačne pete zida negoli pristup modelom CNR ili Triantafilloua. To zavisi od stvarnog opterećenja, tlačne nosivosti efektivne visine uzorka i drugih faktora, a ne samo od tlačne nosivosti. ACI također pretpostavlja oba dijagonalni vlačni lom i klizanje u sljubnicama kao moguće mehanizme loma kod posmičnog opterećenja, a ne samo klizanje u sljubnicama kao što predviđa CNR i Triantafillou. To se posebno odnosi na zidove s većim vertikalnim silama kod kojih dijagonalni vlačni lom može biti dominantan, što je odlučujuće. Kod ACI postupka klizanje u sljubnicama bilo je odlučujuće u primjeru in situ zidova s niskim predopterećenjem. Računski je razlika između klizanja i dijagonalnog vlačnog loma približno 50 % za zidove u laboratoriju (zbog visokih vertikalnih sila), a približno je to jednako za in situ zidove s niskim vertikalnim silama. Ukupno u prosjeku je za sva ispitivane zidove ACI najbliži eksperimentalnim rezultatima za neojačane zidove (2 % podcjenjivanje) i za ojačane FRP-ima (4 % precjenjivanje).

Wangov [5] model ocjenjuje posmičnu nosivost neojačanih zidova, koja je mnogo veća u usporedbi s rezultatima na terenu (58 % precjenjivanje) i onih u laboratoriju (23 % precjenjivanje). Wang pretpostavlja klizanje u sljubnicama (model iz EC6) i dijagonalni vlačni lom kao moguće mehanizme loma kod posmičnog opterećenja ali ne kontrolira mogućnosti loma tlačne pete zida. Premda su koeficijenti u Wangovoj jednadžbi za dijagonalni vlačni lom statistički dobiveni, rezultati visoko precjenjuju naše eksperimentalne rezultate (za 54 %). Dijagonalni vlačni lom bio je odlučujuć za jake zidove u laboratoriju, ali na primjeru loših zidova dogodilo se klizanje i dijagonalni

ojačanih zidova je 26 % precijenjena za loši zid (D45) i vrlo blizu (1 %) za primjer D iz laboratorija. Pri proračunu doprinosa zidova samo je dijagonalno smicanje uzeto u obzir. Klizanje u sljubnicama bilo je zanemareno u originalnom Marcariovu modelu zato što takav lom nikad nije bio uočen eksperimentima. S obzirom na to, za potrebe proračuna nisu predložene formule za klizanje u sljubnicama. Naša ispitivanja, slično kao kod Marcarija, također nisu uočila takve vrste loma. Lom zbog savijanja također je bio provjeren, ali u našim primjerima nije bio odlučujući. To je sukladno našim eksperimentalnim rezultatima. Formula za lom pete zida slična je onoj u ACI smjernicama. Predviđeni mehanizam loma nažalost je u oba naša primjera suprotan tomu što se stvarno dogodilo.

O tome hoće li se ili neće primijeniti obje formule (za klizanje u sljubnicama i za dijagonalni vlačni lom) za proračun doprinosa neojačanog zida odlučuje razlika među proračunskim modelima. Također je vrlo važno kako je provjeren mehanizam loma pete zida zbog savijanja. Ako su zidovi loši, rezultati variraju i zbog drugih faktora. Najveći utjecaj ima način kako je sudjelujući poprečni presjek zida definiran (dužina uzorka). U CNR i Triantafillouovu modelu, efektivna dužina definirana je kao 80 % dužine zida, a Wang u proračun uzima ukupnu neto površinu. Ova razlika daje 20 % višu posmičnu nosivost neojačanih zidova prema Wangovom modelu u odnosu na Triantafillouov. Za jake zidove granična je posmična nosivost prema EC 6 (upotrijebljene kod CNR i Triantafilloua) vrlo važna. Kad je nosivost neojačanog zida dobivena previsoka, tada može biti konačna posmična nosivost ojačanog zida prekomjerna. ACI i CNR su modeli uglavnom točni pri proračunu neojačanog zida. Triantafillouovi rezultati malo su bili viši, a Wangovi su uvelike precijenjeni za skup eksperimentalnih podataka koji je predstavljen u ovom radu. Ograničenje dijagonalne tlačne nosivosti također može voditi u precjenjivanje posmičnog ponašanja zidova (Wang). U proračunima je mehanizam loma pete zida bio odlučujući, posebno kad je bio (obično za neojačan zid) dijagonalni mehanizam ili mehanizam klizanja u sljubnicama odgođen zbog upotrebe FRP-a.

5. Zaključak

Za procjenu učinkovitosti ojačanja zida karbonskim CFRP trakama i staklenim GFRP mrežicama stavljenim na njegovu površinu izvedena su dva skupa terenskih (sa 12 uzoraka) i jedan skup laboratorijskih ispitivanja (sa 16 uzoraka) na zidovima izloženim cikličnoj horizontalnoj sili. Rezultati su uspoređeni u ovisnosti o tehnikama ojačanja i izračunanim vrijednostima koje su dobivene pomoću pet različitih računskih modela. FRP ojačanje povoljno je utjecalo na mehanizam ponašanja zidova u svim slučajevima. Najveći porast posmične čvrstoće (oko 170 %) dobiven je horizontalnim ojačanjem (slabih) zidova na terenu. Učinak horizontalnog ojačanja laboratorijskih zidova bio je 120 %. Najveći porast (380 %) granične rotacije zapažen je kod horizontalnog (i vertikalnog) ojačanja CFRP trakama na

zidovima na terenu, koja je također bila visoka (oko 200 %) i za konfiguracije H i HV ispitane u laboratoriju. Mehanizam loma uzoraka na terenu uglavnom je bio dijagonalni posmični lom. Laboratorijski uzorci srušili su se drobljenjem tlačene pete u kombinaciji s dijagonalnim pukotinama. FRP trake nisu odstupile od površine zida jer su bile dobro povezane oko zida. Trake u dijagonalnoj konfiguraciji nisu bile učinkovite. Dijagonalna FRP konfiguracija malo je pridonosila posmičnoj čvrstoći (~5 %) i oko 10 % graničnoj rotaciji. FRP trake u dijagonalnoj konfiguraciji na terenu odstupile su na neravnoj površini u slabijem materijalu – opeki. Dijagonalno ojačani zidovi u laboratoriju pokazali su razvoj posmičnih pukotina i pukotina zbog savijanja. Tlačni lom pete (zbog ljuljanja) bio je glavni razlog loma za ovu vrstu ojačanja.

Kod GFRP mrežica u modificiranom cementnom mortu, nosivost na posmično naprezanje u ravnini zida gotovo je udvostručena, ali zid se ponašao neduktilno slično neojačanom zidu. Mehanizam loma bio je posmičan lom s odstupanjem obloge od zidne površine.

Kvaliteta osnovnog materijala imao je značajan utjecaj na ponašanje ojačanih uzoraka. Bolji rezultati dobiveni su na početno slabijim (starim in situ) zidovima. Najbolji rezultati (u pogledu nosivosti i deformacijske nosivosti) bili su na zidovima ojačanim horizontalnim trakama. Horizontalne trake mogu se kombinirati s vertikalnim, ali ne utječu znatno na rezultate. Najbolje ojačanje u smislu nosivosti pokazalo je ojačanje GFRP mrežicom. Doprinos dijagonalnih traka posmičnoj otpornosti i graničnoj rotaciji ojačanog zida u prosjeku je bio zanemariv. U ovom radu prikazano je pet različitih proračunskih modela za određivanje posmične čvrstoće FRP ojačanih zidova (Triantafillou, Wang i Marcari) i objašnjene su dvije smjernice ACI 440.7R-10 (2010) i CNR-DT 200/2004). Točnost svakog pristupa ocijenjena je na temelju usporedbe s eksperimentalnim rezultatima. ACI i CNR proračunski modeli daju najbliže vrijednosti eksperimentalnim rezultatima, osim za doprinos FRP-a kod jakih (laboratorijskih) zidova u CNR primjeru. Pristupi Triantafilloua i Wangova daju previsoke vrijednosti za posmičnu nosivost. Triantafillou malo precjenjuje doprinos neojačanog zida za loše zidove i jako precjenjuje doprinos FRP-a, ali kod Wangova su obje vrijednosti znatno precijenjene. Pristup Marcarija je prilično točan za doprinos neojačanog zida kad su posrijedi jaki zidovi. Kod loših zidova posmična nosivost neojačanih zidova je precijenjena, ali je doprinos FRP-a (malo u našem primjeru) ocijenjen točno. Načini loma dobiveni eksperimentalno u skladu su s načinima loma kod ACI smjernica, ali kod drugih postupaka određivanje mehanizama loma manje je točno.

Svaki proračunski model ima različit pristup za određivanje posmične nosivosti i mehanizma loma, koji ga definiraju. Zbog toga stvarni mehanizmi loma nisu nužno jednaki pretpostavljenima, iako je posmična nosivost bila izračunana točno. Modeli različito izračunavaju doprinos neojačanog zida – uzimajući u obzir samo klizanje u sljubnicama ili/ i dijagonalni vlačni lom. Druge granice i granične vrijednosti također

utječu na konačni rezultat (sudjelujući poprečni presjek zida, granična posmična nosivost i slično). Važno je točno izračunati doprinos neojačanog zida zato što mogu previsoki rezultati rezultirati prekomjernim vrijednostima konačne posmične nosivosti ojačanog zida. Za proračun doprinosa FRP-a presudna je definicija efektivnih deformacija prije odstupanja FRP-a. Cijepanje FRP traka u našim eksperimentima nije se dogodilo. Ograničenje dijagonalne tlačne nosivosti zidova također je važno za ojačane zidove, zato što se obični mehanizmi loma neojačanog zida (dijagonalni vlačni lom i klizanje u sljubnicama) često promijene u dijagonalni tlačni lom FRP-om ojačanih zidova. Usporedba eksperimentalnih i analitičkih rezultata pokazala je prilično velik nesklad. Količina

provedenih ispitivanja ne može omogućiti cjelovitu ocjenu proračunskih modela – trebalo bi više podataka, iako analiza proračunskih modela pokazuje smjer mogućih očekivanih rezultata.

Zahvale

Rezultati terenskih ispitivanja postignuti su u europskom projektu PERPETUATE, koji je financirala Europska komisija u okviru Sedmog okvirnog programa (FP7/2007-2013), prema ugovoru broj 244229. Laboratorijska ispitivanja financiralo je Ministarstvo za visoko školstvo, razvoj i tehnologiju Republike Slovenije, prema ugovoru broj Z2-3411. Svima zahvaljujemo na potpori.

LITERATURA

- [1] Croci, G., D'Ayala, D., D'Asdia, P., Palombini, F.: Analysis on shear walls reinforced with Fibers, IABSE Symp. On Safety and Quality Assurance of Civ. Engrg. Struct., Int. Assoc. For Bridge and Struct., Lisbon, Portugal, 1987.
- [2] Schwegler, G.: Masonry constriction strengthened with fiber composites in seismically endangered zones Proc., 10th Europ. Conf. On Earthquake Engineering, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 454-458, 1994.
- [3] Triantafillou, T.C.: Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy- Bonded FRP Laminates, Journal of Composites for Construction, Vol. 2, Iss. 2., 1998.
- [4] Ehsani, M.R., Saadatmanesh, H.: Shear behaviour of URM retrofitted with FRP overlays, Journal of composites for construction, pp. 17-25, 1997.
- [5] Borri, A., Corradi, M., Vignoli, A.: Seismic upgrading of masonry structures with FRP, 7th International Conference on inspection appraisal repairs and maintenance of buildings and structures, Nottingham Trent University, Nottingham, United Kingdom, pp. 43-54, 2001.
- [6] Valluzi, M.R., Tinazzi, D., Modena, C.: Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates, Construction and Building materials, 16, pp. 409-416, 2002.
- [7] Santa-Maria, H., Duarte, G., Garib, A.: Experimental investigation of masonry panels externally strengthened with CFRP laminates and fabric subjected to in-plane shear load, 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, USA, Paper No.1042, 2004.
- [8] Alcaíno, P., Santa María, H.: Shear response of brick masonry walls externally retrofitted with bonded carbon fiber fabric, 8th Pacific Conference on Earthquake Engineering, Singapur, 2007.
- [9] Gostič, S., Mezgec, A., Žarnič, R.: Študija učinkovitosti naprednih metod za sanaciju zidanih stavb, Raziskovalni projekt MŠZŠ Z2-3411, 2004.
- [10] Galič, J., Sorič, Z., Rak, M.: Ojačavanje posmično opterećenih zidanih zidova, Građevinar, volumen 59, broj 4, pp. 289-299, 2007.
- [11] Španič, M., Hadzima-Nyarko, M., Morič, D.: Ojačanje povijesnih građevina kompozitnim polimerima, e-gfos, broj 5, pp. 74-85, 2012.
- [12] ElGawady, M.; Lestuzzi, P., Badoux, M.: In-Plane Seismic Response of URM Walls Upgraded with FRP, Journal of Composites for Construction, Vol. 9, Iss. 6, November/December 2005, pp. 524-535, 2005.
- [13] Papanicolaou, C.G., Triantafillou, T.C., Karlos, K., Papathanasius M.: Textile-reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: in-plane cyclic loading, Materials and structures, 40, pp. 1081-1097, 2006.
- [14] Triantafillou, T.: Textile-Reinforced Mortars (TRM): A new generation of Composite Materials as Alternative to Fibre-reinforced Polymers (FRP) for strengthening and Seismic Retrofitting of Structures, Composite materials, Springer-Verlag London Limited, 2011.
- [15] Tomažević, M., Gams, M., Oblak, A.: Protipotesno utrijevanje opečnih zidov s kompozitnimi oblogami, Gradbeni vestnik, letnik 60, september 2011, pp. 246-257, 2011.
- [16] Triantafillou, T.C., Antonopoulos, C.P.: Design of concrete flexural members strengthened in shear with FRP, Journal of Composites for Construction, ASCE, 4 (4), pp. 198-205, 2000.
- [17] Wang, Q., Chai, Z., Huang, Y., Yang, Y., Zhang Y.: Seismic shear capacity of brick masonry wall reinforced by GFRP, Asian journal of civil engineering (building and housing), Vol. 7, No. 6, pages 563-580, 2006.
- [18] Marcari, G., Oliveira, D., Fabroccino, G., Lourenço, P. B.: In-plane behaviour of tuff masonry panels strengthened with FRP diagonal layout, The 11th North American Masonry Conference, Minneapolis, Minnesota, USA, 2011.
- [19] CNR-DT 200/2004, Guide for design and Construction of Externally Bonded FRP systems for Strengthening Existing Structures, Advisory committee on technical recommendations for construction, Rome – CNR July 13th, 2004.
- [20] ACI 440.7R-10, Guide for Design & Constr. of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Unreinforced Masonry Structures, ACI Committee 440, USA, 2010.

- [21] Gostič, S., Bosiljkov, V., Jarc Simonič, M.: In-situ testing of brick masonry walls strengthened with CFRP fabric, 15th International Brick and Block masonry Conference, Florianopolis, Brazil, 2012.
- [22] Jarc Simonič, M., Gostič, S., Žarnić, R.: In-situ tested brick masonry walls strengthened with horizontal carbon strips and FRP mesh, 12th Canadian masonry Symposium, Vancouver, British Columbia, 2013.
- [23] Bosiljkov, V.: Micro vs. macro reinforcement of brickwork masonry, *Mat. struct.*, vol. 39, no. 2, pp. 235-245, 2006.
- [24] Garbin, E., Galati, N., Nanni, A., Modena, C., Valluzzi, M.R.: Provisional design guidelines for the strengthening of masonry structures subjected to in-plane loading, North American masonry Conference, St. Louis, Missouri, USA, 2007.
- [25] Prota, A., Manfredi, G., Nardone F.: Assessment of Design Formulas for In-Plane FRP Strengthening of Masonry Walls, *Journal of composites for construction*, ASCE, Vol. 12:6, pp. 643-649, 2008.
- [26] Zhuge, Y.: FRP-Retrofitted URM Walls under In-Plane Shear: Review and Assessment of Available Models, *Journal of Composites for Construction*, Vol14, No. 6, 2010.
- [27] Myers, J.J.: Strengthening unreinforced masonry structures using externally bonded fiber reinforced polymer systems: An overview of the American concrete institute 440.7R design approach, 9th Australasian masonry Conference, Queenstown, New Zealand, 2011.
- [28] Nardone, F., Prota A., Manfredi, G.: Design criteria for FRP seismic strengthening of masonry walls, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- [29] Turnšek, V., Čačovič F.: Some Experimental Results on the Strength of Brick Masonry Walls, *Proceedings to 2nd International Brick Masonry Conference*, Stoke-on-Trent, U.K., pp. 149-156, 1971.