

Ojačavanje posmično opterećenih zidanih zidova

Josip Galić, Zorislav Sorić, Mladenko Rak

Ključne riječi

zidani zid,
posmično opterećenje,
šipke od PASV-a,
uzorak,
staklena vlakna,
ispitivanja

Key words

masonry wall,
shear load,
GFRP bars,
sample,
glass fibres,
testing

Mots clés

mur en maçonnerie,
charge de cisaillement,
barres GFRP,
échantillon,
fibres de verre,
essais

Ключевые слова

кладочная стена,
сдвиговая нагрузка,
GFRP стержни,
образец,
стеклянные волокна,
испытания

Schlüsselworte

gemauerte Wand,
Schubbelastung,
GFRP Stäbe,
Prüfkörper,
Glasfasern,
Untersuchungen

J. Galić, Z. Sorić, M. Rak

Izvorni znanstveni rad

Ojačavanje posmično opterećenih zidanih zidova

Prikazani su rezultati ispitivanja nearmiranih, armiranih i ojačanih zidanih zidova na vertikalno tlačno opterećenje i promjenljivo horizontalno opterećenje. Ispitani su nearmirani uzorci, uzorci armirani čeličnim šipkama i šipkama od PASV-a, uzorci ojačani horizontalno i vertikalno te horizontalnim i dijagonalnim trakama od staklenih vlakana. Svi uzorci ispitivani su na isti način. Prikazana je usporedba rezultata ispitivanja. Opisano je ponašanje pojedinih uzoraka za vrijeme ispitivanja.

J. Galić, Z. Sorić, M. Rak

Original scientific paper

Strengthening masonry walls subjected to shear load

Test results for unreinforced, reinforced and strengthened masonry walls, subjected to vertical compressive load and variable horizontal load, are presented. Unreinforced samples, samples strengthened with steel and GFRP bars, samples strengthened horizontally and vertically, and with horizontal and diagonal glass fibre strips, were tested. All samples were tested in the same manner. The comparison of test results is presented. The behaviour of individual samples during testing is described.

J. Galić, Z. Sorić, M. Rak

Ouvrage scientifique original

Renforcement des murs en maçonnerie soumis au cisaillement

Les résultats pour les murs en maçonnerie non armés, armés et renforcés, soumis à la charge verticale de compression et à la charge horizontale variable, sont présentés. Les échantillons non armés, les échantillons renforcés à l'acier et aux barres GFRP, les échantillons renforcés horizontalement et verticalement, et avec les bandes de fibres de verre horizontales et diagonales, ont été analysés. Tous les échantillons ont été analysés de même manière. La comparaison des résultats d'essais est présentée. Le comportement des échantillons individuels au cours de l'essai est décrit.

Ї. Галич, З. Сориц, М. Рак

Оригинальная научная работа

Упрочнение кладочных стен, нагруженных сдвиговой нагрузкой

В работе показаны результаты испытаний неармированных, армированных и упрочнённых кладочных стен на вертикальную нагрузку и изменяемую горизонтальную нагрузку. Испытаны неармированные образцы, образцы, армированные стальными и GFRP стержнями, образцы, упрочнённые горизонтально и вертикально, а также горизонтальными и диагональными лентами из стеклянных волокон. Все образцы испытывались одним и тем же способом. Показано сравнение результатов испытаний. Описано поведение отдельных образцов во время испытаний.

J. Galić, Z. Sorić, M. Rak

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Verstärkung schubbelasteter gemauerter Wände

Dargestellt sind Untersuchungsergebnisse unbewehrter, bewehrter und verstärkter gemauerter Wände bei vertikaler Druck- und veränderlicher horizontaler Belastung. Untersucht waren unbewehrte Prüfkörper, Prüfkörper bewehrt mit Stahl- und GFRP Stäben, Prüfkörper verstärkt horizontal und vertikal sowie mit horizontalen und diagonalen Bänden aus Glasfasern. Alle Prüfkörper wurden auf gleiche Weise untersucht. Dargestellt ist ein Vergleich der Untersuchungsergebnisse. Beschrieben ist das Verhalten der Prüfkörper während der Untersuchung.

Autori: Mr. sc. **Josip Galić**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; prof. dr. sc. **Zorislav Sorić**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, član Akademije tehničkih znanosti Hrvatske; prof. dr. sc. **Mladenko Rak**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.

1 Uvod

Danas su inženjeri sve više suočeni s rekonstrukcijama i ojačanjima postojećih starih zidanih građevina. Potreba za ojačavanjem pojavljuje se u slučajevima kada neke od tih starih zgrada mijenjaju svoju funkciju, pri čemu se uporabna opterećenja povećavaju. Također većina starih zidanih zgrada u Hrvatskoj ne zadovoljava suvremene seizmičke propise pa ih je potrebno ojačati, kako bi se povećala posmična nosivost zidanih zidova, a samim tim i seizmička otpornost građevine.

Sve se više nameće mogućnost ojačavanja postojećih zidanih zidova proizvodima od polimera armiranog vlaknima (FRP, prema engleskom nazivu *Fiber Reinforced Polymer*: hrvatski PAV, *polimeri armirani vlaknima*). Pri tome se za primjenu mogu rabiti aramidna (A), ugljična (C), ili alkalno otporna staklena (G) vlakna. Tkanine ili trake od aramidnih ugljičnih ili staklenih vlakana na površinu postojećega nosivog zida postavljaju se na prethodno nanešen premaz epoksidnog ljepila, koji je ujedno i matrica novonastalog kompozita, te tako tvore (prema engleskih arkonimima) AFRP, CFRP ili GFRP materijale za ojačanje. Za razliku od postavljanja tkanih ili traka na polimerno ljepilo, ovi materijali mogu biti unaprijed pripremljeni u obliku šipaka ili lamela. Šipke od PAV-a mogu se uporabiti kao nova armatura, ali i kao ojačanje postojeće konstrukcije, dok se lamele od PAV-a gotovo redovito rabe kao materijal za ojačanje.

Takav način ojačanja nudi čitav niz prednosti prema postojećim načinima ojačavanja nosivih elemenata od zida. Najvažnije prednosti jesu: ne narušava se struktura nosivosti zgrade nakon ojačanja, postupak ojačanja je ekonomski prihvatljiv, jednostavan i brz za izvedbu, zadovoljava estetske zahtjeve te funkcionalnost zgrade za vrijeme izvedbe ojačanja.

Proizvodi od PAV-a imaju nedostatke kao što su: linearno-elastično ponašanje do sloma bez popuštanja kakvo posjeduju čelični proizvodi, manji modul elastičnosti od čelika te mogućnost alkalne korozije staklenih vlakana. Međutim prednosti materijala od PAV-a pri ojačanju zidanih konstrukcija veće su od nedostataka, pa se ovi materijali sve više upotrebljavaju.

U svijetu se provode istraživanja nosivosti ojačanih zidanih konstrukcija. Ojačanje zidanih zidova provodi se na razne načine: horizontalno, vertikalno ili dijagonalno postavljenim trakama, omatanjem zidova plahtama, te naknadnim postavljanjem šipki od PAV-a u sljubnice morta postojećeg zida, nakon što se stari mort do određene dubine izvadi iz sljubnice, a šipka se poveže novim mortom. Određivanje vlačne čvrstoće ojačanog zida provodi se najčešće tzv. dijagonalnim pokusom. Osim vlačne čvrstoće ojačanog zida određuju se i nosivosti ojača-

POPIS OZNAKA

b	=	oblikovni parametar posmičnog naprezanja
E	=	modul elastičnosti
E_f	=	modul elastičnosti šipke od PASV-a
F	=	vertikalna tlačna sila
$F_{H,max}$	=	vertikalna sila očitana na dinamometru ispod vertikalne preše za maksimalnu vrijednost horizontalne sile
f_t^e	=	ekvivalentna vlačna čvrstoća ojačanog zida
H	=	horizontalna sila kojom se opterećuje zidni uzorak
H_{max}	=	maksimalna horizontalna sila pri slomu zidnog uzorka
t	=	debljina zida
l	=	duljina zida
V	=	ukupna vertikalna tlačna sila zidnog uzorka
V_1	=	dotatna vertikalna tlačna sila koja se pojavljuje na mjestu ukrute zida uslijed spriječenog zaokreta zida
$V_{1,H,max}$	=	dotatna vertikalna sila na mjestu vertikalne ukrute za vrijednost maksimalne horizontalne sile pri slomu
ε_f	=	relativna deformacija u šipki od PASV-a
$\varepsilon_{failure}$	=	relativna deformacija pri slomu
ε_{max}	=	maksimalna relativna deformacija šipki pri slomu
$\varepsilon_{f,max}$	=	maksimalna relativna deformacija u šipki pri PASV-a slomu
ε_{yu}	=	relativna deformacija pri gornjoj granici popuštanja čelične armature
σ_f	=	naprezanje šipki od PASV-a
$\sigma_{failure}$	=	naprezanje pri slomu šipki
σ_{02}	=	naprezanje čelične armature pri kojem su trajne deformacije 2,0 %
σ_{max}	=	maksimalno naprezanje u šipki pri slomu
$\sigma_{f,max}$	=	maksimalno naprezanje u šipki od PASV-a pri slomu
σ_{o1}	=	vertikalno tlačno naprezanje u zidnom uzorku koje odgovara maksimalnoj posmičnoj sili H_{max}
τ_{RI}	=	posmično naprezanje u zidnom uzorku koje odgovara maksimalnoj horizontalnoj posmičnoj sili H_{max}

nog zida na tlak, na posmik, a ako je zide opterećeno i bočnim tlakom onda i na savijanje opterećenjem okomito na ravninu zida.

Radi određivanja povećanja nosivosti i duktilnosti ojačanih zidanih zidova provedena su eksperimentalna istraživanja na nekoliko serija uzoraka zida. Uzorci zidanih zidova bili su ojačani rebrastim čeličnim šipkama ϕ 6 kvalitete B500B, ili šipkama od polimera armiranog

staklenim vlaknima (PASV) #2 (#2 je ACI = američka oznaka šipke promjera 6,3 mm), te trakama ili tkaninom od staklenih vlakana. Istraživanje nosivosti ovih uzoraka na konstantno vertikalno i promjenljivo horizontalno opterećenje u ravnini izvedeno je u laboratoriju Zavoda za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu. U ovome je članku opisano to istraživanje.

2 Gradivo

Za izradu uzoraka iskorišteni su stari zidni elementi od pune opeke uzeti pri rušenja stare zgrade (izgrađene 1941.), birale su se „zdrave” opeke, to jest. one koje nisu izgledale oštećene. Dimenzije ove pune opeke su standardne iz tog razdoblja: š/v/d (širina/visina/duljina) = 12/6,5/25 cm. Vrijednosti tlačne čvrstoće opeke određene ispitivanjem prema normi HRN EN 772-1 [7] dane su u tablici 1. Ispitano je deset uzoraka opeke.

Tablica 1. Tlačne čvrstoće opeke

	Tlačna čvrstoća [N/mm ²]
Minimalna vrijednost	13,16
Maksimalna vrijednost	27,98
Srednja vrijednost	18,58
Standardna devijacija	4,53

Uzorci za ispitivanje su zidovi od stare opeke zidani produžnim mortom obujamskih omjera komponenti c:v:p (cement:vapno:pijesak) = 1:2:8 kako bi se dobio mort razreda M2,5 [24]. Mort je ispitan prema normi HRN EN 1015-11 [8], a čvrstoće su nešto veće od očekivanih (tablica 2.). Ispitano je šest prizmica morta.

Tablica 2. Vlačna čvrstoća morta na savijanje i tlačna čvrstoća morta

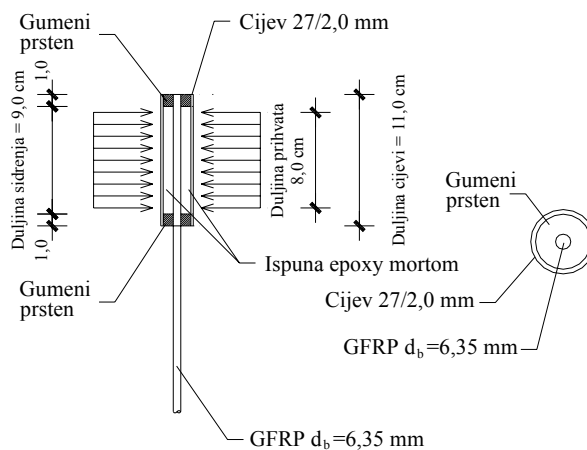
	Vlačna čvrstoća morta na savijanje [N/mm ²]	Tlačna čvrstoća morta [N/mm ²]
Minimalna vrijednost	1,11	4,59
Srednja vrijednost	1,38	6,27
Standardna devijacija	0,21	1,00

Za armiranje uzoraka korištene su rebraste čelične šipke promjera $\phi 6$ deklarirane granice popuštanja $f_y = 500$ N/mm² i šipke od PASV-a #2. Šipke su nabavljene od tvrtke Pultrull iz Texasa, SAD (slika 1.). U okviru ovog istraživanja ispitana su svojstva čeličnih i šipki od PASV-a. Za svaki tip armature su ispitana po tri uzorka. Određivanje vlačne čvrstoće i modula elastičnosti je provedeno na Zwick/Roell uređaju za ispitivanje. Šipke od PASV-a

su bile ispitivane nakon posebno obrađenog sidrenog dijela šipke prikazanom na slici 2. Ovaj sustav sidrenja je korišten u istraživanjima Benmokrane i dr. [21] te Castro-a i Carino-a [22]. Rezultati ispitivanja šipki od PASV-a su prikazani u tablici 3. i na slici 3. Prosječne vrijednosti ispitanih svojstava armature za svaki tip šipki dan je u tablici 4. Na slici 4. prikazani su dijagrami $\sigma - \epsilon$ (vlačno naprezanje – relativna deformacija) čelične šipke i šipke od PASV-a. Iz prikazanih slika vidljivo je da čelične šipke imaju duktilno ponašanje dok šipke od PASV-a imaju linearno elastično ponašanje do sloma.



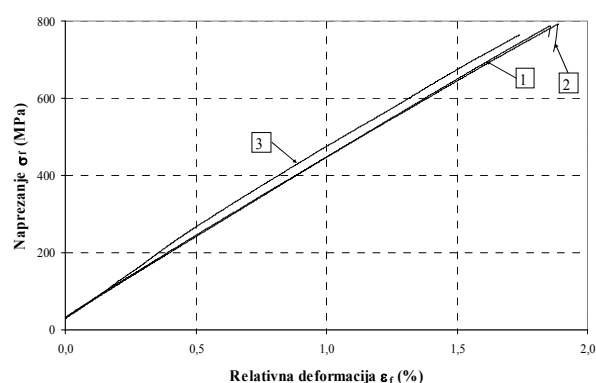
Slika 1. Izgled šipki od PASV-a korištenih za armiranje



Slika 2. Obrada sidrenog dijela šipke od PASV-a za ispitivanje vlačnog ponašanja

Tablica 3. Rezultati ispitivanja šipki od PASV-a promjera 6,3 mm

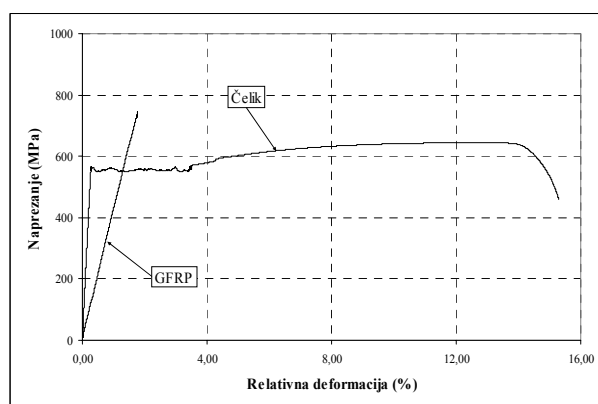
Uzorak	Duljina sidrenja [mm]	E_f [GPa]	$\sigma_{f,max}$ [MPa]	$\epsilon_{f,max}$ [%]
1	90	41,9	792,30	1,89
2	90	41,7	787,93	1,89
3	90	44,0	763,86	1,74



Slika 3. Dijagram "vlačno naprezanje – relativna deformacija" za uzorke šipki od PASV-a promjera 6,3 mm

Tablica 4. Prosječne vrijednosti ispitanih svojstava čelične i armature od PASV-a

Materijal	E [GPa]	σ_{02} [MPa]	ε_{yu} [%]	σ_{max} [MPa]	σ_{sloma} [MPa]	ε_{max} [%]
Čelik	211,3	590,17	3,217	672,05	462,73	10,26
GFRP	42,5	-	-	781,36	-	1,84



Slika 4. Usporedni dijagram "vlačno naprezanje – relativna deformacija" jedne čelične šipke ϕ 6 i jedne šipke ϕ 6,3 mm od PASV-a

Za ojačavanje uzoraka korištene su trake i tkanine od staklenih vlakana proizvođača MAPEI d.o.o., Italija, uz epoksidno ljepilo MapeWrap 31 i pastu za izravnavanje MapeWrap 12. Karakteristike trake i tkanine iz staklenih vlakana prema podacima proizvođača i prema ispitivanjima izvedenim na Građevinskom fakultetu u Zagrebu dane su u tablici 5. Ispitano je šest uzoraka.

Karakteristike paste za izravnavanje MapeWrap 12 i impregnirajućeg ljepila MapeWrap 31 prema podacima proizvođača dane su u tablici 6.

Tablica 5. Karakteristike trake i tkanine iz staklenih vlakana [6]

Karakteristika	Tehnički podaci proizvođača	Rezultati ispitivanja *
Gustoća [kg/dm^3]	2,62	-
Ekvivalentna debljina tkanine [mm]	0,48	0,636
Prosječna vrijednost ploštine tkanine [mm^2/m]	342,2	-
Sila pri slomu [kN/m]	876,03	312,26
Vlačni modul elastičnosti [GPa]	80,7	38,51
Granična relativna deformacija izduženja [%]	3-4	1,49

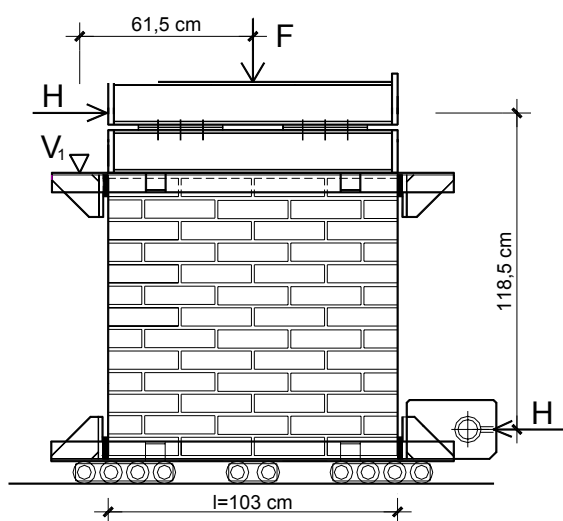
* U sklopu istraživanja ojačanja provedena su ispitivanja tkanine od staklenih vlakana. Rezultati ispitivanja se razlikuju od deklariranih vrijednosti proizvođača

Tablica 6. Svojstva paste za izravnavanje MapeWrap 12 i impregnirajućeg ljepila MapeWrap 31 [6]

Karakteristika	MapeWrap 12	MapeWrap 31
obujamska masa	$> 1,55 \text{ g}/\text{cm}^3$	$> 1,06 \text{ g}/\text{cm}^3$
tlačna čvrstoća (ASTM C 579)	$> 70 \text{ N}/\text{mm}^2$	$> 80 \text{ N}/\text{mm}^2$
vlačna čvrstoća (ASTM D 638)	$> 30 \text{ N}/\text{mm}^2$	$> 30 \text{ N}/\text{mm}^2$
vlačna granična relativna deformacija	1,0 %	1,2 %
vlačna čvrstoća na savijanje (ISO 178)	$> 40 \text{ N}/\text{mm}^2$	$> 70 \text{ N}/\text{mm}^2$
modul elastičnosti pri tlaku (ASTM C 579)	$8000 \text{ N}/\text{mm}^2$	$3000 \text{ N}/\text{mm}^2$
čvrstoća prijanjanja pri starosti betona od 7 dana (pull out test)	$> 3,0 \text{ N}/\text{mm}^2$ (slom preko betona)	$> 3,0 \text{ N}/\text{mm}^2$ (slom preko betona)

3 Uzorci i načini ojačanja

Ispitivanje je provedeno na uzorcima zidova dimenzija $l/t/h = 103/12/106 \text{ cm}$ (slika 5.). Ispitano je 5 vrsta zidnih uzoraka. Jedna vrsta uzoraka su neojačano zide dok su ostale četiri vrste ojačano ili armirano zide.

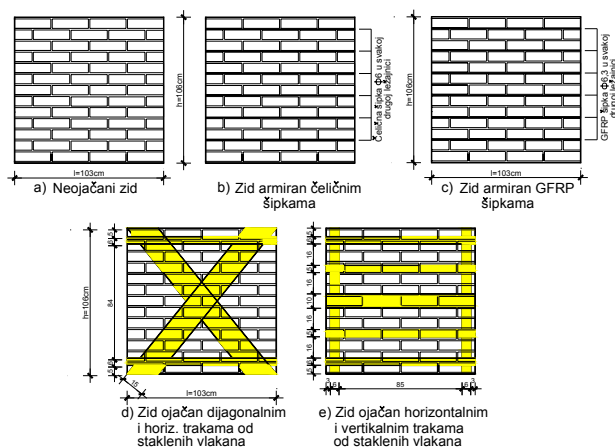


Slika 5. Skica uzorka i adaptera tj. opreme za ispitivanje na stalno vertikalno i promjenjivo horizontalno opterećenje. **H:** horizontalna promjenjiva sila; **F:** vertikalna sila; **V₁:** vertikalno pridrzanje koje ne dopušta odizanje lijevog ruba zida

Vrste zidnih uzoraka su:

- Neojačani zid* – obični zid zidan punom opekom u produžnom mortu (tri uzorka s oznakama: 1, 2, 3).
- Zid armiran čeličnim šipkama* – čelična armatura $\phi 6$ postavljena po jedna u svaku drugu sljubnicu (ležajnicu) morta (slika 6.b, jedan uzork s oznakam ČŠ_H1).
- Zid armiran šipkama od PASV-a* – armatura $\phi 6,3$ (ACI = američka oznaka #2) postavljene po jedna u svaku drugu (ležajnicu) sljubnicu morta (slika 6.c, jedan uzork s oznakam GŠ_H1).
- Zid ojačan dijagonalnim i horizontalnim trakama od staklenih vlakana*. Na pripremljnu površinu lica zida obrađenog pastom za izravnavanje, pomoću epoksidnog ljepila nalijepljene su jednoslojne dijagonalne trake i jednoslojne horizontalne trake. Trake širine 15 cm postavljene su, kao križ, po glavnim dijagonalama na oba lica zida (slika 6.d). Horizontalnom jednoslojnom trakom širine 6 cm i preklopom od 50 cm omotan je zid na cijelom svom opsegu na dva mjesta, jedno pri vrhu i drugo pri dnu zida (dva uzorka s oznakama: TR_D-1 i TR_D-2).
- Zid ojačan horizontalnim i vertikalnim trakama od staklenih vlakana*. Na površinu zida koja je pripremljena s pastom za izravnavanje, pomoću epoksidnog ljepila nalijepljene su prvo vertikalne jednoslojne trake na oba kraja i oba lica zida, a nakon toga pet jednoslojnih horizontalnih traka jednoliko razmaknutih po visini zida. Vertikalne trake širine su 6 cm. Horizontalne trake su širine 6 cm na vrhu i dnu te širine 5 cm na četvrtinama visine, a na sredini visine zida

traka je širine 10 cm. Zid je u cijelom opsegu na pet mjesta omotan jednoslojnim horizontalnim trakama pri čemu je preklop iznosio 50 cm. Navedeni tipovi uzoraka za ispitivanje prikazani su na slici 6.e (dva uzorka s oznakama: TR_H-1, TR_H-2).

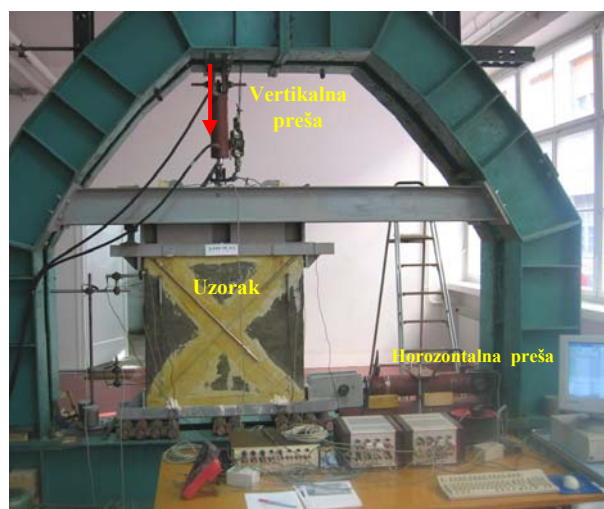


Slika 6. Vrste ispitivanih zidnih uzoraka

Budući da nema definiranih europskih norma za ovakvu vrstu ispitivanja ono je napravljeno prema nekim znanstvenim radovima koji su navedeni u popisu literature [2], [13], [15] i [20]. S ovakvim načinom ispitivanja željela se postići kvazistatička simulacija ponašanja međuprozorskog zida zgrade pri seizmičkom opterećenju.

4 Postupak ispitivanja i rezultati ispitivanja

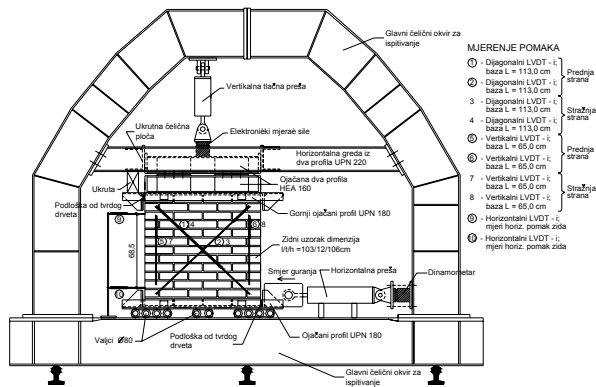
Svi zidni uzorci su ispitani na horizontalno promjenljivo opterećenje koje se jednoliko povećavalo do sloma. Pri tome je tlačno vertikalno opterećenje bilo konstantno i iznosilo je oko 1/6 tlačne čvrstoće ziđa (oko 79 kN, tj. tlačno naprezanje je iznosilo oko 0,64 N/mm²).



Slika 7. Uzorak i uređaj za ispitivanje i bilježenje podataka

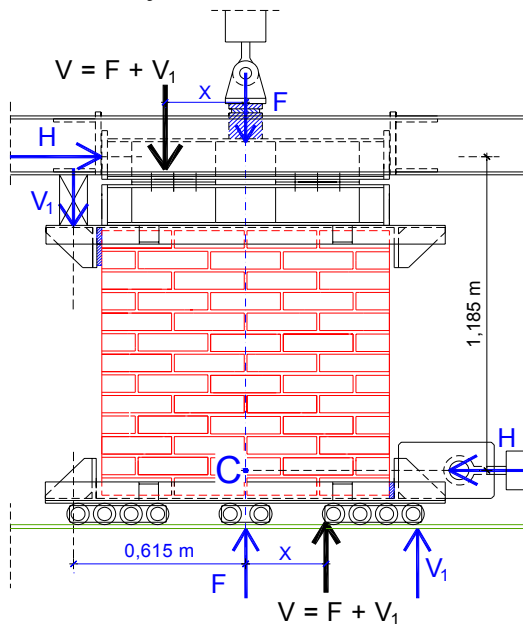
Svi uzorci su zidani isti dan 15. travnja 2004. U srpnju 2004. godine su se “lica” zidova, za koje je bilo predviđeno da će se ojačavati trakama od staklenih vlakana, izravnala pastom za izravnavanje. Nakon toga 17. i 18. kolovoza 2004. su na tako pripremljene zidove lijepljene trake od staklenih vlakana.

Ispitivanje nosivosti obavljeno je osam mjeseci kasnije. Pri tome je jedan neojačan uzorak ispitan krajem rujna 2004. g. dok su ostali uzorci ispitani u travnju 2005. g. Svi uzorci su ispitivani istim postupkom, a izgled uzorka, okvirna konstrukcija i pojedini uređaji prikazani su na slikama 7. i 8.



Slika 8. Shema uređaja za ispitivanje i uzorka

Tijekom ispitivanja, uočeno je da rotacija uzorka nije apsolutno spriječena posebno kad se radilo o ojačanim zidovima koji su imali povećanu nosivost. Kod svih uzoraka su se mjerili iznosi vertikalne i horizontalne sile



Slika 9. Sile koje djeluju na uzorak tijekom ispitivanja i ovisnost vertikalne sile V_1 o horizontalnoj sili H

u vremenu preko električnih mjerača sile postavljenih kod gornje i donje preše. Mjerenje pomaka i deformacija izvedeno je pomoću elektro-mehaničkih mjerača, LVDT-a (engl. *Linear Variable Differential Transformer*). Mjereni su i horizontalni pomaci gornjeg i donjeg ruba zida (LVDT br. 9 i 10; slika 8.), vertikalne deformacije zida (LVDT br. 5, 6, 7, 8; slika 8) kao i dijagonalne deformacije (LVDT br. 1, 2, 3, 4; slika 8.). Vertikalna tlačna sila (F) tijekom ispitivanja održavana je konstantnom. Međutim ukupna vertikalna tlačna sila koja je ostvarena u zidu nije bila konstantna jer povećanjem horizontalne sile H zbog upetosti zida na dnu i vrhu (tj. zbog spriječenog zaokretanja zida) došlo je do povećanja ukupne vertikalne tlačne sile u zidu (slika 9.). Zaokretanje zida spriječeno je ukrotom gdje se ostvaruje dodatna vertikalna sila V_1 koja ovisi o horizontalnoj sili H i geometriji uzorka (slika 9.).

Ukupna vertikalna tlačna sila jednaka je: $V = F + V_1$. Udaljenost reakcije ukupne tlačne sile (V) od težišta zida na dnu zida je na slici 9. označena s x .

Vertikalna sila bila je konstantna i iznosila je $F = 79,1$ kN. Horizontalna sila se povećavala od $H = 0$ do $H = 170$ kN. Iz uvjeta ravnoteže momenata savijanja na točku C u osi zida (slika 9.) izlazi da je:

$$H \cdot 1,185 - V_1 \cdot 0,615 - V_1 \cdot 0,615 = 0 \tag{1}$$

Vrijednost sile V_1 se može odrediti iz gornjeg izraza:

$$V_1 = 0,9634 \cdot H \tag{2}$$

Udaljenost, x , rezultante V od sile F , tj. od težišta presjeka (slika 9.) određuje se iz izraza:

$$V_1 \cdot 0,615 - V \cdot x = 0 \tag{3}$$

no kako je $V = F + V_1$, izlazi da se udaljenost, x može izraziti kao:

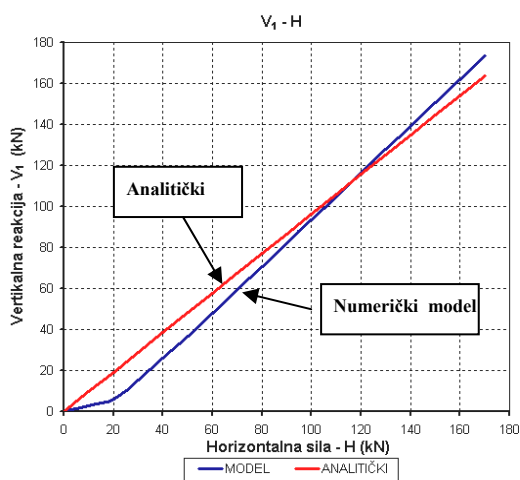
$$x = \frac{0,9634 \cdot H}{F + 0,9634 \cdot H} \cdot 0,615 \tag{4}$$

Za horizontalnu silu $H = 0$ kN izlazi da je $x = 0$ m. Za $H = 100$ kN izlazi da je $x = 0,338$ m, dok za $H = 170$ kN izlazi da je $x = 0,415$ m.

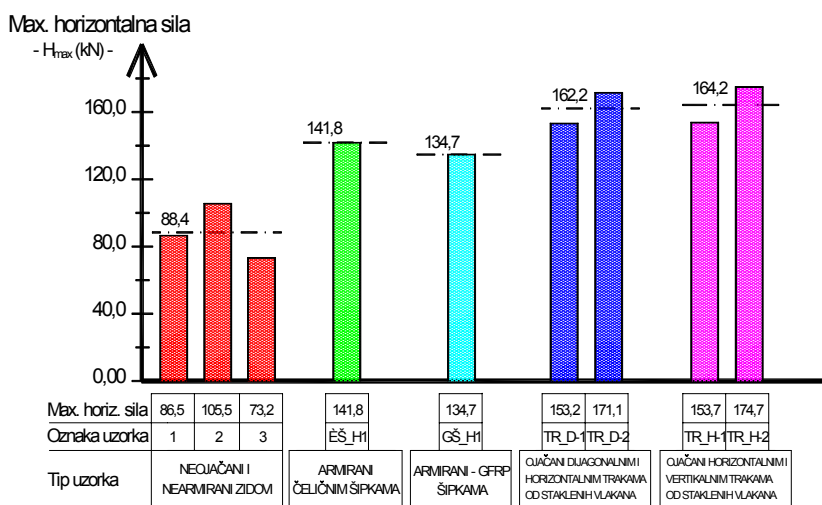
Za kontrolu točnosti sile V_1 u ovisnosti o sili H , prema izrazu (2) napravljen je ravninski model s konačnim elementima pri čemu je zid od opeke modeliran pločastim elementima debljine 12 cm i modulom elastičnosti $E_{zida} = 4906$ N/mm². Ovaj modul elastičnosti određen je ispitivanjem zida prema normi HRN EN 1052-1 [9]. Adapteri su modelirani od čelika modula elastičnosti $E_{čelik} = 210000$ N/mm² sa “plate” i štapnim “beam” elementima kako bi se dobila geometrija što bliža realnoj. Čelični okvir oko uzorka (slike 7. i 8.) nije modeliran, a valjci su modelirani s “beam” čeličnim elementima koji mogu

prihvatiti samo tlačno naprezanje. U proračunskom modelu je vertikalna sila $F = 79,1$ kN konstantna, a vrijednost horizontalne sile se mijenjala od $H = 0$ do 170 kN u intervalu po 10 kN. Za svaku vrijednost horizontalne sile izračunana je reakcija na mjestu sile V_1 i tako su određeni dijagrami "H - V_1 " (slika 10).

Iz dijagrama na slici 10 se može zaključiti da postoji odstupanje u vrijednosti sile V_1 koja se odredi analitički izrazom (2) i vrijednosti iz numeričkog modela. To odstupanje je najveće za malu vrijednost sile H tj. kada se nije pojavilo vlačno naprezanje u donjem lijevom uglu zida. Za veće vrijednosti sile H tj. za područje kada dolazi do sloma zida, odstupanje te dvije proračunske vrijednosti sile V_1 je malo. Iz gornjega je vidljivo da se vrijednost sile V_1 može, bez veće pogreške, uzeti kao ono dano izrazom (2).

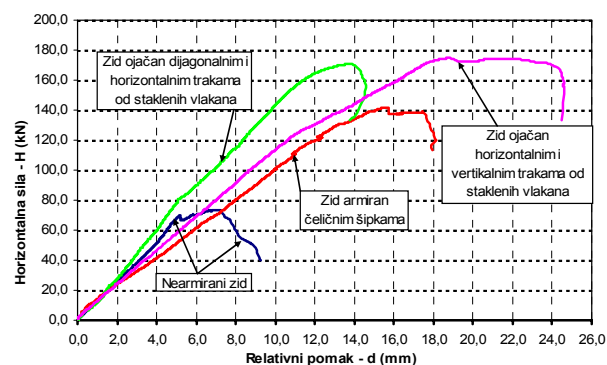


Slika 10. Dijagrami ovisnosti vertikalne reakcije (V_1) o horizontalnoj sili (H) određeni proračunskim modelom i analitički izrazom (1)



Slika 11. Maksimalne horizontalne sile pojedinih uzoraka i njihove prosječne vrijednosti

Ispitivanje uzoraka zidanih zidova pokazalo je da je ojačanje trakama ili armiranjem zida znatno povećalo nosivosti zida na horizontalno opterećenje u odnosu na neojačano nearmirano žiđe. Maksimalne horizontalne sile eksperimentalnih ispitivanja grafički su prikazane na slici 11. Najveće povećanje je postignuto ojačavanjem horizontalnim i vertikalnim trakama od staklenih vlakana. To povećanje iznosilo je približno 86 %. Slično povećanje nosivosti (83,5 %) postignuto je ojačanjem kombinacijom horizontalnih i dijagonalnih traka. Nešto manje povećanje postignuto je armiranjem zida šipkama od PASV-a u horizontalnim sljubnicama morta (52 %), a povećanje nosivosti armiranjem čeličnim šipkama iznosilo je oko 60 %.



Slika 12. Prikaz odnosa „Sila – horizontalni relativni pomak“ za pojedine uzorke

Osim povećanja horizontalne nosivosti zida ojačanjem i armiranjem postignuto je i povećanje horizontalnog relativnog pomaka između gornjeg i donjeg ruba zida (razlika pomaka mjerenih pomoću LVDT br. 9 i 10, sa slike 8.) što se najbolje vidi na slici 12. Važno je uočiti da je horizontalna krutost ojačanih zidova ostala gotovo nepromijenjena u odnosu na neojačan zid.

Kod nearmiranoga zida prve pukotine su se pojavile pri horizontalnim silama $H = 58$ kN za uzorak s oznakom „1“ i $H = 81$ kN s uzorak s oznakom „2“. Kod čeličnim šipkama armiranog zida prva pukotina se pojavila pri horizontalnoj sili oko $H = 67$ kN, a kod uzorka armiranog sa šipkama od PASV-a pri sili od oko $H = 90$ kN. Prve pukotine su bile orijentirane u smjeru tlačnih dijagonala te su se samo širile do sloma uzorka.

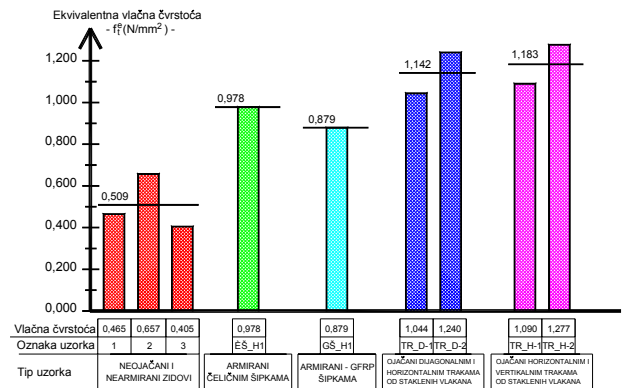
Kod uzorka ojačanih horizontalnim trakama nije bilo vidljivih dijagonalnih pukotina, a kod uzorka ojačanih dijagonalnim trakama te pukotine su bile slabo uočljive. Kod ovih uzoraka pukotine su bile slabo uočljive i zbog

izravnavajućeg morta te se nije moglo točno odrediti pri kojoj je sili nastala pukotina.

Pri ispitivanju su, pomoću mjerača smještenih na dijagonalama (LVDT 1, 2, 3, i 4, slika 8.) dobiveni dijagrami odnosa horizontalne sile i deformacija u smjeru dijagonala (slika 13.). LVDT 1 i 4 su postavljeni u smjeru tlačne dijagonale dok su LVDT br. 2 i 3 postavljeni u smjeru vlačne dijagonale. Iz tih se dijagrama mogu uočiti točke nastanka pukotine duž tlačne dijagonale, tako što dolazi do naglog povećanja dijagonalne deformacije. Kod nearmiranih uzoraka zidova deformacije u smjeru dijagonala su jednake sve do pojave prve pukotine. Nakon pojave prve pukotine deformacije u smjeru vlačne dijagonale su bile veće nego u smjeru tlačne dijagonale. Iz usporedbe istih dijagrama ojačanog zida i nearmiranoga neojačanoga zida (slika 13.) može se uočiti kako su dijagonalne deformacije ojačanih zidova bile znatno manje od istih deformacija neojačanih zidova. Naročito su smanjene deformacije u smjeru vlačne dijagonale (oko sedam puta) što je značajno za kompaktnost зида pri seizmičkom opterećenju. Razlog tomu je što ojačanja sprečavaju rani nastanak vlačnih pukotina i njihovo širenje.

Važna značajka ispitivanja je da su se uzorci ojačani trakama od staklenih vlakana (i horizontalnim i dijagonalnim trakama) slomili uslijed tlačnog drobljenja зида u tlačnom uglu uzorka. Ostali uzorci su se slomili dijagonalnim posmičnim mehanizmom sloma tj. razvojem dijagonalne pukotine uslijed premašaja vlačne čvrstoće зида.

Budući da pri slomu svi uzorci nisu imali jednako tlačno opterećenje, jer je ono ovisilo o horizontalnoj sili, povećanje nosivosti prikazano na slici 11. ne daje najbolju sliku, što se najbolje vidi iz usporedbe ekvivalentnih vlačnih čvrstoća зида - f_t^e (slika 14.). Ekvivalentna vlačna čvrstoća je proračunana pomoću izraza (5) [2] i [24]:



Slika 14. Ekvivalentne vlačne čvrstoće зида i njihove prosječne vrijednosti

$$f_t^e = -\frac{\sigma_{o1}}{2} + \sqrt{(b \cdot \tau_{R1})^2 + \left(\frac{\sigma_{o1}}{2}\right)^2} \quad (5)$$

- τ_{R1} (N/mm²) – posmično naprezanje koje odgovara maksimalnoj horizontalnoj posmičnoj sili H_{max} ; (6)

$$\tau_{R1} = \frac{H_{max}}{l \cdot t} \quad (6)$$

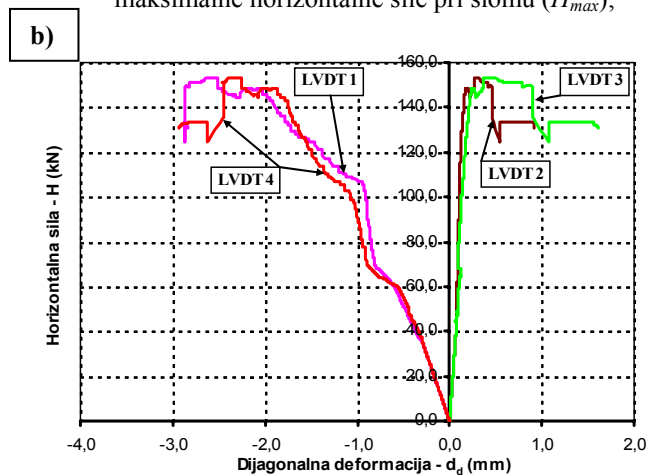
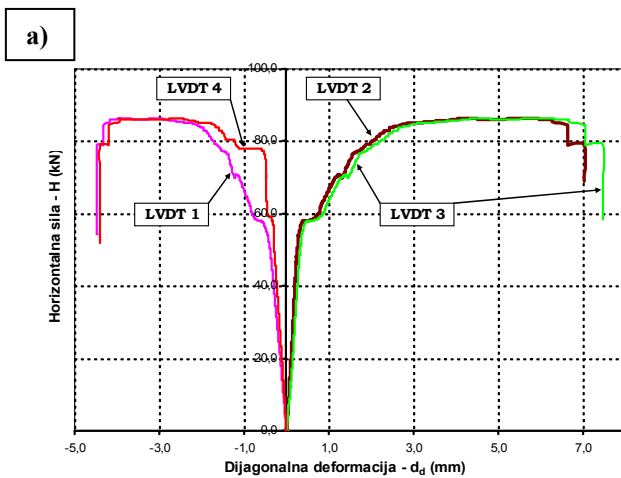
- l i t – dimenzije horizontalnog poprečnog presjeka зида, l je duljina, a t je debljina зида.

- σ_{o1} (N/mm²) – vertikalno tlačno naprezanje koje odgovara ukupnoj vertikalnoj tlačnoj sili pri slomu uzorka.

$$\sigma_{o1} = \frac{(V_{1,Hmax} + F)}{l \cdot t} \quad (7)$$

- F (kN) – vertikalna (konstantna) sila

- $V_{1,Hmax}$ (kN) – dodatna vertikalna sila na mjestu vertikalne ukrute određena iz izraza (2) za vrijednost maksimalne horizontalne sile pri slomu (H_{max});



Slika 13. Prikaz odnosa „Sila – dijagonalna deformacija (LVDT br. 1 i 4 u smjeru tlačne a LVDT 2 i 3 u smjeru vlačne dijagonale)“, a) za nearmirani zid (lijevo) i b) za zid ojačan dijagonalnim i horizontalnim trakama od staklenih vlakana

- b – oblikovni parametar posmičnog naprezanja i iznosi: $b = h/l$

veličina b nalazi se između vrijednosti 1,1 i 1,5. U ovom slučaju usvojeno $b = 1,1$ (objašnjenje oblikovnog parametra b dano je u literaturi [20] i [2]).

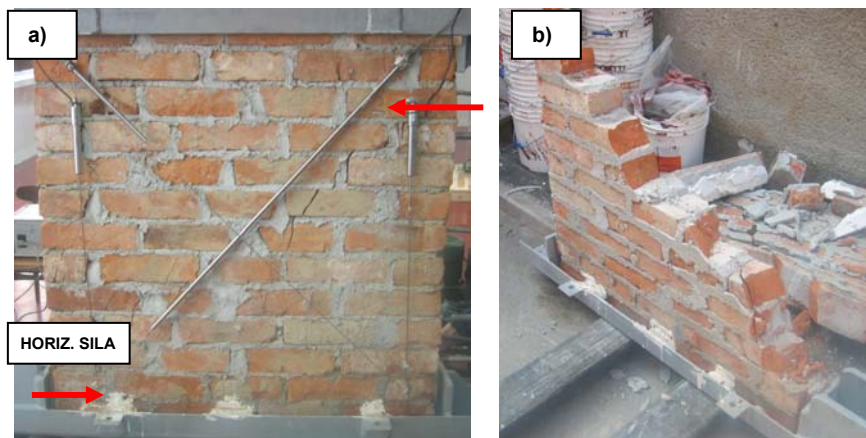
Premda su se pojedini uzorci slomili uslijed tlačnog drobljenja zida na mjestu tlačnog ugla uzorka, otpornost zida je svedena na ekvivalentnu vlačnu čvrstoću. Usporedbom ekvivalentne vlačne čvrstoće pri slomu, ojačanog prema neojačanom zidu, najveće povećanje postigli su uzorci zida koje je ojačano vertikalnim i horizontalnim trakama, a povećanje u odnosu na neojačani uzorak iznosilo je 115,8 % (slika 14). Pri tome je povećanje horizontalne sile pri slomu iznosilo 85,7 %. Slično povećanje ekvivalentne vlačne čvrstoće postignuto je kod zidova ojačanih dijagonalno postavljenim trakama (109,2 %) što je povećanje horizontalne sile pri slomu od 83,5 %. Povećanje nosivosti trakama ojačanih zidova uvjetovano je i tlačnom čvrstoćom zida. Slom trakama ojačanih zidova nastupio je premašajem tlačne čvrstoće

(drobljenjem zida), a ne razvojem dijagonalne vlačne pukotine u zidu ili vlačnim slomom traka od staklenih vlakana. Kod zidova ojačanih križnim dijagonalnim trakama nastale su sitne dijagonalne pukotine duž tlačne dijagonale, ali slom zida se dogodio drobljenjem opeke u tlačnim uglovima zida. Značajnije povećanje nosivosti bi se postiglo boljim omatanjem tlačnih uglova zida trakama od PAV-a.

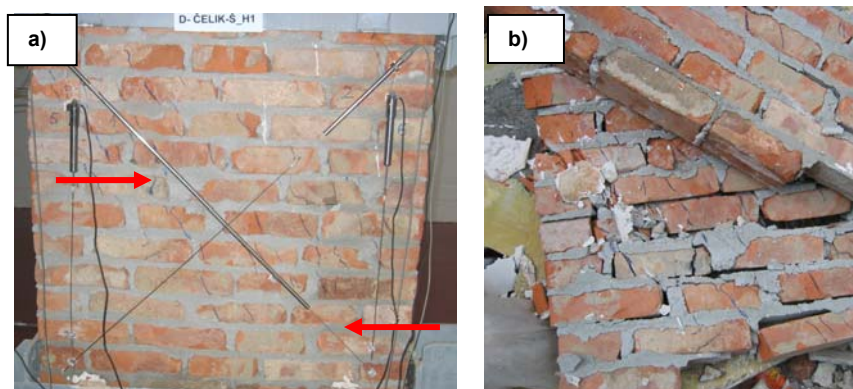
Povećanje nosivosti su ostvarili i uzorci armirani čeličnim i oni armirani šipkama od PASV-a. Povećanje je bilo nešto manje nego za uzorke ojačane trakama tj. 81,1 % za čelične šipke i 64,7 % za šipke od PASV-a ako se uspoređuje ekvivalentna vlačna čvrstoća, a 60,4 % za čelične šipke i 52,4 % za šipke od PASV-a, ako se uspoređuje maksimalna horizontalna sila. Ovi rezultati s armiranim zidom potvrđuju da bi se kvalitetno i značajno ojačanje zida moglo postići tako da se naknadno u sljubnice nearmiranoga zida, vađenjem postojećeg morta do dubine od 15 mm, ugrađuju šipke od čelika ili PAV-a te nakon toga zapunjavaju novim mortom. Engleski naziv za takvo naknadno ugrađivanje šipki je "structural repointing".

Armatura bi se postavljala u novi mort koji bi imao bolju prionljivost za opeku, za postojeći mort i šipku.

Kako u ovim eksperimentalnim istraživanjima nosivosti zidanih zidova preše nisu imale mogućnost kontrole pomaka nisu se mogli dobiti vrijednosti «padajuće» grane dijagrama sila-pomak, tj. dijagrama nakon doseganja maksimalne horizontalne sile. Radilo se o opečnim zidovima koji su u području blizu maksimalne horizontalne sile imali puno pukotina zbog kojih su se pojedini mjerni uređaji otkinuli i otpali s uzorka. Ojačani uzorci su imali manje pukotina a pokazali su veći horizontalni pomak pri slomu. To znači da takvi uzorci ne samo da su preuzeli veće horizontalne sile nego su pokazali i povećanje duktilnosti. Sama činjenica da je ojačanjem promijenjen mehanizam sloma, iz dijagonalnog sloma premašajem vlačne čvrstoće u slom savijanjem tj. tlačnim drobljenjem zida na mjestu tlačnih uglova zida, upućuje na povećanje duktilnosti. U literaturi [15], [19], [20], [2] se navodi da je dijagonalni slom premašajem vlačne čvrstoće najmanje duktilan i da ga treba iz-



Slika 15. a) Izgled dijagonalne pukotine neojačanog-nearmiranog uzorka; b) izgled uzorka nakon što je uklonjen dio zida iznad pukotine



Slika 16. a) Izgled dijagonalnih pukotina od gornjeg lijevog prema donjem desnom uglu uzorka armiranog čeličnom armaturom; b) Izgled armiranog uzorka nakon njegova uklanjanja iz okvira.



Slika 17. Zdrobljeni tlaćni ugao nakon uklanjanja gornje horizontalne trake (za ispitivanja trake nisu pukle)

bjegavati. Zidovi ojačani trakama su nakon sloma bili kompaktni, u jednom komadu i nisu se rasipali. Taj način ojačanja povećava sigurnost na izbočivanje i sprječavaju ispadanje zida okomito na ravninu. Treba imati na umu da je izbočivanje i ispadanje zida van ravnine česta pojava kod starih opečenih zidova za vrijeme jačih potresa.

5 Načini sloma pojedinih uzoraka

Neojačani uzorci (slika 15.) su se slomili razvojem pukotine u smjeru tlaćne dijagonale koja je nastala uslijed premašaja vlačne čvrstoće zida. Pukotina se postupno, s povećanje horizontalne sile, širila sve do sloma uzorka. Na ostalom dijelu tlaćne dijagonale bilo je još nekoliko sitnih pukotina paralelnih s glavnom, ali slom je nastupio razvojem i širenjem jedne pukotine.

Armirani uzorci (slika 16.) su se slomili također tzv. dijagonalno-posmičnim mehanizmom sloma kao i nejačani uzorci ali pri znatno većoj sili. Slom zida je nastupio premašajem vlačne čvrstoće zida uz nastanak puno paralelnih dijagonalnih pukotina. Čelične šipke u sljubnicama nisu imale plastično deformiranje i imale su veliku prionljivost s mortom što se dovodi u vezu s činjenicom da je zid bio ispucan mnoštvom dijagonalno orijentiranih sitnih pukotina po cijeloj površini zida. Uzorci koji su bili armirani šipkama od PASV-a ponašali su se slično kao zidovi armirani čeličnom armaturom i imali su također puno paralelnih pukotina u smjeru tlaćne dijagonale.

Uzorci ojačani trakama od staklenih vlakana su se slomili drobljenjem zida na mjestu tlaćnih uglova uzorka. Pri horizontalnoj sili bliskoj sili sloma uzorka trake nisu pukle ali je došlo i do odvajanja paste za izravnavanje površine lica zida od opeke. Ovi uzorci su pokazali najveću nosivost. Nosivost ovako ojačanih uzoraka nije ovisila o vlačnoj čvrstoći zida nego o lokalnoj tlaćnoj čvrstoći zidnih elemenata u «peti» tlaćne dijagonale. Dosezanju granične nosivosti prethodilo je drobljenje

zida u tlaćnim uglovima uzorka (slika 17.) i zbog toga je na tim mjestima dolazilo do odvajanja paste za izravnavanje i traka od zida. Nakon sloma osim oštećenja na mjestima tlaćnih uglova uzorka nije bilo vidljivih oštećenja zida. Zid je bio cjelovit i krut.

Kod uzoraka ojačanih dijagonalnim trakama pojavila se dijagonalna pukotina za razliku od zidova ojačanih s horizontalnim trakama koji nisu imali vidljivih dijagonalnih pukotina na zidu. No, i kod ovih zidova (s dijagonalnim trakama) slom je nastupio tlaćnim drobljenjem ugla zida. Trake su spriječile posmični dijagonalni slom.

6 Zaključak

Ispitivanjem horizontalne nosivosti nearmiranih, armiranih i ojačanih uzoraka zidanih zidova utvrđen je značajan doprinos povećanja nosivosti armiranih i ojačanih zidova. Najveće povećanje nosivosti postiglo se kod ojačanih zidova s horizontalno postavljenim trakama. Doprinos ojačanja trakama je u tome što nije nastao neduktilni mehanizma sloma pukotinom uzduž tlaćne dijagonale, što se zid nije raspao i što je značajno povećana nosivost. Povećanje horizontalne sile sloma zida ojačanog horizontalnim trakama u odnosu na silu sloma neojačanog zida iznosilo je oko 86 %, dok je povećanje ekvivalentne vlačne čvrstoće iznosio oko 116 %. Ako se usporede postignute efektivne horizontalne sile (horizontalna sila pri slomu za istu vrijednost tlaćnog napreznja kod svih uzoraka) povećanje nosivosti ojačanih uzoraka je bilo veće od 64 %. Armiranjem zida se također postiglo značajno povećanje horizontalne nosivosti, ali slom je opet nastupio nastankom pukotine u smjeru tlaćne dijagonale, no značajno je to što se zid tom prilikom nije raspao, jer je armatura pojedine dijelove slomljenog zida držala na okupu. Povećanje duktilnosti armiranih i ojačanih zidova se nije moglo točno odrediti jer ispitivanje nije bilo obavljeno s prešama koje bi imale kontrolirani prirast pomaka. No, moglo se uočiti da ojačani zidovi imaju znatno veće maksimalne horizontalne relativne po-

make između gornjeg i donjeg ruba zida nego nearmirani zidovi. To povećanje je iznosilo između 1,5 i 2,7 puta. Kod doseganja granične nosivosti zida, trake od staklenih vlakana za ojačanje uzoraka nisu pukle. Zidovi ojačani trakama su i nakon sloma bili cjeloviti, kompaktni tj. nisu se raspali nakon uklanjanja iz okvira kao što je to bio slučaj s nearmiranim zidovima.

Ovim ispitivanjima potvrđena je učinkovitost ojačanja zidanih zidova proizvodima od PASV-a posebno kad se

radi o zidovima koje je potrebno ojačati na seizmička djelovanja.

Ojačanjem zida trakama postiže se veća nosivost i ujedno se može izbjeći mehanizam sloma nastankom dijagonalne vlačne pukotine koji slom je najmanje duktilan.

Sva ispitivanja su napravljena u laboratoriju Zavoda za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Zahvala

Ovaj rad je obrađen u okviru znanstvenog projekta br. 0082203 "Primjena nemetalnih materijala u betonskim konstrukcijama" koje je poduprlo Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske. Autori se zahvaljuju na potpori. Zahvaljujemo se djelatnicima Zavoda za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu gdje je ispitivanje obavljeno.

LITERATURA

- [1] ASTM (1995): *Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, D 3039/D 3039M*. Annual book of ASTM Standards, Vpl.15.03, American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, USA.
- [2] Gostić, S. (Centar za materiale in tehnologije): *Študija učinkovitosti naprednih metod sanacije zidanih stavb*, Raziskovalni projekt MŠZŠ Z2-3411, Končno poročilo, Ljubljana 2004.
- [3] FIB (CEB-FIP), *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*, Technical report on the Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement for reinforced concrete structures, Task Group 9,3 FRP, bulletin 14, FIP, March 2001.
- [4] ACI Committee 440, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, 440.2R-02, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2002.
- [5] ACI Committee 440, *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars*, 440.1R-01, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001.
- [6] www.mapei.it - službena stranica proizvođača traka od staklenih vlakana, paste za izravnjanje i epoksidnog ljepila s kojim su provedena ispitivanja
- [7] HRN EN 772-1, *Methods of test for masonry units – Part 1: Determination of compressive strength*. European Committee for Standardization, Bruxelles, June, 2000.
- [8] HRN EN 1015-11, *Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. European Committee for Standardization, Bruxelles, August, 2000.
- [9] HRN EN 1052-1, *Methods of test for masonry – Part 1: Determination of compressive strength*. European Committee for Standardization, Bruxelles, September, 1998.
- [10] Galić, J.: *Ojačanje međuprozorskog opečnog zida*, Magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2005.
- [11] Bieker, C., Seim, W., Stürz, J.: *Post-Strengthening of Masonry Columns by use of Fiber – reinforced polymers (FRP)*, Third International Conference of Composites in Infrastructure, San Francisco, 2002.
- [12] Sonobe, Y., Fukuyama, H., Okamoto, T., Kani, N., Kimura, K., Kobayashi, K., Masuda, Y., Matsuzaki, Y., Mochizuki, S., Nagasaka, T., Shimizu, A., Tanano, H., Tanigaki, M., Teshigawara, M., *Design Guidelines of FRP Reinforced Concrete Building Structures*, Journal of composites for Construction, V. 1, No. 3, August 1997., pp. 90-115.
- [13] Tumialan, G., Micelli, F., Nanni, A.: *Strengthening of Masonry Structures with FRP Composites*, Structures 2001, Washington DC, May 21-23, 2001.
- [14] Silva, P. F., Myers, J. J., Belarbi, A., El-Domiaty, K., Tumialan, J. G., Nanni, A.: *Performance of Infill URM Wall Systems Retrofitted with FRP Rods and Laminates to Resist In-Plane and Out-of-Plane Loads*, Structural Faults and Repairs, London, UK, July 4-6, 2001.
- [15] Tomažević, M.: *Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings*, Imperial College Press, London, 1999
- [16] Ehsani, M. R.; Saadatmanesh, H.; Velazquez-Dimas, J. I.: *Behavior of Retrofitted URM Walls under Simulated Earthquake Loading*, ASCE Journal of Composites for Construction, 3(3) 134-142, August 1999.
- [17] Velazquez-Dimas, J. I., Ehsani, M. R., and Saadatmanesh, H.: *Out-of-Plane Behavior of Brick Masonry Walls Strengthened with Fiber Composites*, ACI Structural J., 97 (3), 377-387. May-June 2000.
- [18] Schwegler, G.: *Earthquake Resistance of Masonry Structures Strengthened with CFRP-Sheets*, Proceeding of the International Workshop on Urban Heritage and Building Maintenance V: "Maintenance and Restrengthening of Materials and Structures Brick and Brickwork", Swiss Federal Institute F Technology Zürich, Switzerland August 31st 2000, AEDIFICATIO Freiburg, 2000.
- [19] Drysdale, R. G.; Hamid, A.A.; Baker, L. R.: *Masonry Structures; Behavior and design*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1994.
- [20] Bosiljkov, V.: *Eksperimentalne in računske raziskave vpliva modificiranih malt na mehanske lastnosti opečne zidovine*, Doktorska disertacija, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerza v Ljubljani, Februar 2000, Ljubljana.
- [21] Benmokrane, B.; Zhang, B., Laoubi, K., Tighiouart, B., Lord, I. (2001): *Mechanical and Bond Properties of New Generation of Isorod CFRP Reinforcing Wires for Concrete Structures*, Technical Progress Report, NSERC Research Chair in FRP Reinforcement for Concrete Structures, Canada.
- [22] Castro, P., Carino, N.J. (1998). *Tensile and Nondestructive Testing of FRP Wires*, Journal of Composites for Construction, Vol. 2, No. 1, 17-27.
- [23] Valluzzi, M.R., Tinazzi, D., Modena, C.: *Shear behaviour of masonry panels strengthened by FRP laminates*, Construction and Building materials, 16, 409-416.
- [24] Sorić, Z.: *Zidane konstrukcije I*, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Manualia Universitatis Studiorum Zagabiensis, Zagreb, 2004, Tisak tmg-topgraf, Velika Gorica, 422 str.
- [25] Žarnić, R.: *Utrditev konstrukcij z armiranimi plastičnimi masami*, Gradbeni vestnik, letnik 51, oktober, 2002., pp. 279-289