# PROTIPOTRESNO UTRJEVANJE OPEČNIH ZIDOV S KOMPOZITNIMI OBLOGAMI SEISMIC STRENGTHENING OF BRICK MASONRY WALLS WITH COMPOSITE COATINGS

prof. dr. Miha Tomaževič, univ. dipl. inž. grad., miha.tomazevic@zag.si dr. Matija Gams, univ. dipl. inž. grad., matija.gams@zag.si Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana Aleš Oblak, univ. dipl. inž. str., oblak.ales@si.sika.com Sika, d. o. o., Prevale 13, 1236 Trzin Znanstveni članek UDK: 699.841

**POVZETEK** Raziskovali smo učinkovitost protipotresnega utrjevanja opečnega zidovia z različnimi vrstami kompozitnih obloa, ki smo iih armirali bodisi z mrežo iz steklenih vlaken bodisi s tkanino iz steklenih oziroma karbonskih vlaken. Kot matrični material smo pri armiranju z mrežo uporabili z vlakni ojačeno cementno malto z nizkim modulom elastičnosti, pri armiranju s tkanino pa epoksidno smolo. Preverili smo tudi učinek karbonskih lamel, nalepljenih na zid z epoksidno smolo. Iz opeke normalnega formata dimenzij 250/125/60 mm smo s podaljšano malto nizke trdnosti sezidali 28 zidov. Na štirih smo ugotavljali mehanske lastnosti osnovnega zidovja, ostale pa smo utrdili in jih pri konstantni obremenitvi s tlačno silo preiskali s ciklično vodoravno obtežbo, delujočo v njihovi ravnini. V vseh primerih je bil porušni mehanizem strižnega tipa, njegova značilnosti pa je bila delaminacija obloge, ki se je odtrgala od zidovja in izklonila takoj po nastanku poškodb v zidovju in skrčenju zidovja pri ponovljenih obremenitvah z vodoravno obtežbo. Zaradi delaminacije obloge je prišlo do hipnega upadanja odpornosti in togosti, kar je praktično pomenilo porušitev zidov. Preiskave so pokazale, da obloge s kompozitnimi materiali povečajo togost, v večini primerov povečajo odpornost, le malo pa izboljšajo deformacijsko kapaciteto zidov. Ne glede na to velja sklep, da so metode utrjevanja opečnih zidov s kompozitnimi oblogami učinkovita rešitev za povečanje potresne odpornosti. Rezultati raziskav tudi nakazujejo, v katero smer naj gre razvoj materialov in tehnologij, da bi se izboljšali deformacijska kapaciteta in sposobnost sipanja energije s kompozitnimi materiali utrjenih zidov.

**Summary** The efficiency of strengthening of brick masonry walls for seismic loads by application of different types of composite coating, reinforced by either glass fibre grid or glass/carbon fibre fabric, has been investigated. Fibre reinforced cement mortar with low modulus of elasticity has been used as matrix material in the case of grid, and epoxy resin in the case of fabric reinforcement. In addition, the efficiency of carbon plates, glued on the masonry by epoxy resin, has been also studied. 28 walls, made of normal format, 250/125/60 mm bricks, laid in low strength lime-cement mortar, have been prepared for testing. Four specimens have been tested to determine the basic mechanical properties of unstrengthened masonry, whereas the others have been strengthened and tested by subjecting them to constant pre-loading and cyclic in-plane lateral load reversals. Failure mechanism was of shear type and was characterized by delaminating of coating, which pulled off the masonry and buckled as soon as damages occurred in the walls. As a result of delaminating, sudden resistance and stiffness degradation took place, leading to collapse of the walls. The analysis of test results indicated, that by coating the walls, lateral in-plane stiffness is increased and lateral resistance improved. However, because of failure mechanism, composite coatings had little effect on the improvement of displacement capacity. Although a general conclusion can be made that the strengthening of brick masonry walls with composite coatings represents an efficient strengthening method, further efforts are needed to develop materials and application technologies which would reduce the rigidity of composite-based coatings, and improve the displacement and energy dissipation capacity of the strengthened walls.

# 1 • UVOD

V mestih in na podeželju na hribovitih in drugih potresno najbolj ogroženih območjih Slovenije so za gradnjo hiš stoletja uporabljali lokalno pridobljeni kamen. Opeko so izdelovali in zato tam z njo tudi gradili v severovzhodnem, potresno manj ogroženem ravninskem delu, ki je del Panonske nižine. Šele sredi 19. stoletja je v mestih opeka začela izpodrivati kamen. Potres leta 1895, ki je prizadel Ljubljano, ni bil posebno močan. Je pa povzročil dovolj škode, da je bil del mesta zgrajen na novo. Naravna nesreča je bila izkoriščena za razvoj Ljubljane, ki je šele z urbanizacijo in popotresno obnovo dobila pravo mestno podobo. Mestne večnadstropne stavbe so bile sicer še vedno zidane, vendar grajene z opeko. Po potresu je takratna oblast izdala predpis, v katerem so bila določila za izboljšanje kakovosti gradnje: zahteve glede trdnosti opeke in malte ter debeline zidovja v odvisnosti od višine stavbe in, za potresno odpornost še pomembneje, zahteve za povezovanje zidov z zidnimi vezmi (Vidrih, 1995). V številnih opečnih stavbah iz tistega obdobja je zato v zidovju najti jeklene trakove, v vogalih sidrane okrog navpično vloženih sider, s katerimi so povezali zidovje, v katerega so na podoben način sidrali tudi lesene oziroma kombinirane jekleno-lesene stropne konstrukcije.

Izkušenj z obnašanjem opečnih stavb po potresih pri nas nimamo veliko. Potresi, ki so v zadnjih desetletjih povzročali poškodbe (Ilirska Bistrica, 1956, Kozjansko, 1973, Posočje, 1976, 1998 in 2004), so prizadeli območja, kjer so bile v večini stare kamnite hiše. Opečnih hiš je bilo malo, še manj večnadstropnih, kakršne so v večjih mestih, novejše družinske hiše pa so se obnesle zadovoljivo, če le med gradnjo ni bilo večjih napak. Zato je bila pri nas, pa tudi drugod, kjer so razmere podobne, pozornost posvečena predvsem razvoju tehnoloških rešitev za utrjevanje kamnitega zidovja. Čeprav pričakujemo, da se bodo opečne hiše, zgrajene z upoštevanje pravil, uveljavljenih po potresu leta 1895, obnašale bolje kot kamnite, pa novejše študije potresne ranljivosti kažejo ((Lutman, 2007), (Lutman, 2010)), da potresna odpornost teh stavb ne ustreza zahtevam današnjih standardov (Evrokod, 2005). Zato marsikatero opečno stavbo iz popotresnega obdobja, ki je danes razglašena za arhitekturno kulturno dediščino in bo ostala v uporabi, čaka protipotresna utrditev. Razen stavb arhitekturne dediščine je v Ljubljani in drugih mestih še precej drugih zidanih stavb vseh vrst, ki prav tako ne ustrezajo kriterijem današnjih standardov. Te stavbe so bile sezidane v obdobju med obema svetovnima vojnama, še posebno po drugi svetovni vojni, dokler niso bili uveljavljeni prvi slovenski, kasneje jugoslovanski potresni predpisi ((Odredba, 1963), (Pravilnik, 1964)) oziroma dokler v visoki gradnji ni prevladal armirani beton.

Za utrjevanje opečnega zidovja starih zidanih stavb so bile razvite različne metode, osnovane na uporabi klasičnih materialov, cementne malte ali ometa, betona in jeklene armature, kot so oblaganje z armiranocementnim oziroma armiranobetonskim ometom, torkretiranje, prefugiranje, injektiranje itd. Učinkovitost nekaterih metod je bila preverjena eksperimentalno s preiskavami v laboratoriju in na terenu, že utrjene stavbe pa so bile izpostavljene tudi ponovljenemu potresu. Kot smo že poročali tudi v Gradbenem vestniku ((Tomaževič, 2005), (Tomaževič, 2009)), so bile v nekaterih primerih metode utrjevanja učinkovite, v drugih pa so se izkazale za pomanjkljive.

V zadnjih desetletjih proizvajalci sanacijskih materialov ponujajo številne rešitve za utrjevanje zidanih konstrukcij s kompozitnimi oblogami, ki so armirane s sintetičnimi materiali in ki so se izkazale učinkovite pri armiranobetonskih konstrukcijah. Pri njih s karbonskimi (CFRP) oziroma s steklenimi vlakni utrjeni polimeri (GFRP) nadomeščajo jekleno armaturo. Novim armaturam se prilagaja tudi matrični material, tj. material, v katerega je vložena armatura in ki armaturo povezuje z osnovno konstrukcijo. Namesto klasičnih ometov ali brizganega betona je matrika bodisi z vlakni ojačena cementna malta bodisi epoksidna smola. Razvite so bile različne tehnološke rešitve, učinkovitost marsikatere rešitve pa je bila preverjena tudi z laboratorijskimi preiskavami ((Schwegler, 1994), (Triantafillou, 2001), (ElGawady, 2006), (Konthesingha, 2010)). Postopki so tehnološko primerni, saj so precej bolj čisti kot pri klasičnih materialih. So suhi, preprosto prilagodljivi dejanskim razmeram, ne zahtevajo uporabe mehanizacije, so časovno izjemno učinkoviti itd. Čeprav doktrine varstva arhitekturne dediščine večinoma ne dopuščajo posegov v stare konstrukcije z materiali, ki niso kompatibilni z obstoječimi, so kompoziti večkrat primerni, saj z njihovo uporabo ne spreminjamo dimenzij elementov konstrukcije, ohranimo pa tudi osnovne funkcije obstoječih elementov. Pomanjkljivosti sta cena, ki je še danes, predvsem če se uporabljajo karbonska vlakna, razmeroma visoka, ter dejstvo, da njihova učinkovitost še ni dovolj raziskana.

Zaradi velikih razlik med mehanskimi lastnostmi zidovja in kompozitnih materialov (tlačne in natezne trdnosti in še posebno deformabilnostnih parametrov, modula elastičnosti in strižnega modula) je učinkovit prenos obremenitev med osnovnim zidovjem in kompozitnimi oblogami kljub različnim ponujenim tehnološkim rešitvam lahko vprašljiv. To še posebno velja pri potresni obtežbi, ki povzroča dodatne strižne in natezne obremenitve na stiku obeh vrst materialov. Ker se zanimanje za uporabo sodobnih materialov in tehnoloških rešitev povečuje, cena materialov pa postaja sprejemljiva, smo v Zavodu za gradbeništvo Slovenije v sodelovanju s podjetjem Sika, d. o. o., slovensko izpostavo podjetja Sika AG iz Švice, zasnovali in izpeljali obsežen eksperimentalni program, v okviru katerega smo raziskovali učinkovitost spektra tehnoloških rešitev utrjevanja zidov z oblogami, armiranimi s kompozitnimi materiali, na potresno odpornost opečnih zidov. Cilj raziskav je bil pripraviti navodila za projektiranje in izvrednotiti vrednosti parametrov, ki naj bi jih projek-

## 2 • PROGRAM RAZISKAV, METODE UTRJEVANJA IN PREISKAVE UČINKOVITOSTI

Pri zasnovi programa raziskav smo upoštevali stanje stroke in verjetnost, da se bo posamezna rešitev izkazala za uspešno tudi v praksi. Na podlagi rezultatov drugod opravljenih preiskav smo pozornost namenili učinku utrjevanja z oblogami, katerih armaturo predstavlja mreža oziroma tkanina iz steklenih vlaken (GFRP), in ne toliko učinku utrjevanja s karbonskimi (CFRP) lamelami in z oblogami, armiranimi s karbonsko tkanino. Trdnost oblog z armaturo iz steklenih vlaken je sicer manjša, se pa te obloge zaradi večje deformabilnosti bolj prilagodijo lastnostim zidovja. Takšna obloga je tudi cenejša in s tem primernejša za širšo uporabo.

Raziskave možnosti uporabe kompozitnih oblog smo opravili na opečnih zidovih, ki naj bi predstavljali zidovje starih mestnih opečnih hiš. Ker nam v času izvajanja projekta ni uspelo pridobiti opeke iz primerne obstoječe stavbe, smo preizkusne zidove sezidali iz nove opeke, nabavljene na tržišču. Da bi raziskali učinkovitost različnih tipov oblaganja, smo v laboratoriju sezidali 28 zidov dimenzij 1500/1000/250 mm (višina/ dolžina/debelina). Vsi so bili sezidani na armiranobetonskih temeljih, zaključeni pa z armiranobetonskimi vezmi, preko katerih smo v zidove vnašali navpično in vodoravno obtežbo in vanje po potrebi sidrali tudi kompozitno armaturo oblog. Dimenzije zidov prikazuje slika 1.



Slika 1 • Dimenzije preizkusnih zidov (v cm)

Na štirih zidovih smo ugotavljali mehanske lastnosti osnovnega, neutrjenega zidovja. Dva smo preiskali na tlak, dva pa smo, podobno kot utrjene zidove, pri konstantni tlačni obremenitvi preiskali s ciklično vodoravno obtežbo, delujočo v ravnini zidov. Ta, referenčna zidova sta služila za ugotavljanje učinka različnih načinov utrjevanja. Preostalih 24 zidov smo utrdili z 10 različnimi utrditvenimi rešitvami. Polovico, 12 zidov, smo pred utrditvijo preiskali v osnovnem staniu, pri čemer smo preiskavo zaključili po doseženi maksimalni odpornosti in nastanku zmernih poškodb, polovico pa smo utrdili v nepoškodovanem staniu. Vsega skupaj smo tako izvedli 38 prejskav s ciklično vodoravno obtežbo.

### 2.1 Načini utrjevanja

Zidove smo utrdili z različnimi vrstami oblog, pri čemer smo za armiranje uporabili mrežo iz steklenih vlaken (GFRP) ali pa tkanino iz steklenih (GFRP) oziroma karbonskih vlaken (CFRP). Glede na matrični material in uporabljeno armaturo lahko tipe utrditev razdelimo v štiri skupine:

- a.) oblogo s cementno malto, armirano z GFRP-mrežo,
- b.) oblogo z GFRP-tkanino v matriki iz epoksidne smole,
- c.) oblogo s CFRP-tkanino v matriki iz epoksidne smole in
- d.) utrditev s CFRP-lamelami, nalepljenimi na zidovje z epoksidno smolo.

Podrobneje so posamezni načini utrjevanja opisani v naslednjih točkah:

- utrditev tipa 5: enostranska obloga iz 15 mm debele z vlakni ojačene cementne malte z nizkim modulom elastičnosti, armirana z navpično položeno GFRP-mrežo, ki ni bila sidrana v zid;
- utrditev tipa 6: enaka obloga, vendar položena na obeh straneh zidu. Obloga tipa 6a ni sidrana v zid, obloga tipa 6b je

tanti posegov v stare zidane stavbe uporabljali pri preprojektiranju in računskem preverjanju učinkovitosti utrjevanja opečnih zidov s kompozitnimi oblogami. O delu eksperimentalnih raziskav, ki smo jih šele nedavno zaključili, poročamo v tem prispevku.

sidrana s petimi, obloga tipa 6c z osmimi, obloga tipa 6d pa s 13 sidri;

- utrditev tipa 7: obojestranska obloga iz 25 mm debele cementne malte, po celotni površini zidu armirana z diagonalno položeno GFRP-mrežo, dodatno pa ob robovih še z 250 mm širokima, v navpični smeri položenima trakovoma enake GFRPmreže. Obloga je sidrana s po 4 sidri v vsakem vogalu zidu;
- utrditev tipa 8: enostranska obloga iz diagonalno in navpično položenih 300 mm širokih trakov iz GFRP-tkanine v 2 mm debeli epoksidni matriki, sidrana s po 4 sidri v vsakem vogalu zidu;
- utrditev tipa 9: enako kot tip 8, vendar obojestransko položena obloga;
- utrditev tipa 10: enako kot 9, le da je tkanina iz karbonskih vlaken (CFRP);
- utrditev tipa 11: zid je na obeh straneh utrjen z diagonalno in navpično položenimi togimi CFRP-lamelami (trakovi), nalepljenimi na zid z epoksidno smolo. Lamele (trakovi) so sidrani v temelj in zaključno armiranobetonsko vez;
- utrditev tipa 12: obojestranska obloga iz vodoravno položene GFRP-tkanine v 2 mm debeli epoksidni matriki, sidrana z 8 sidri;
- utrditev tipa 13: obojestranska obloga iz 15 mm debele cementne malte, armirana z diagonalno položeno GFRP-mrežo, ki ni bila sidrana v zid;
- utrditev tipa 14: obojestranska obloga iz tankega sloja cementne malte, armirana z navpično položeno GFRP-mrežo, sidrana v zid z 8 sidri.

Značilnosti posameznih tipov utrditve so povzete v preglednici 1. Navedeno je tudi število zidov, utrjenih na posamezen način ter koliko in kateri zidovi so bili pred preiskavo v utrjenem stanju že poškodovani. Način polaganja kompozitne armature oblog je shematično prikazan na slikah 2–5, posamezni detajli utrjevanja pa na slikah 6 in 7. Utrjevanje zidov v laboratoriju so izvedli inštruktorji sodelujočega podjetja v skladu s tovarniškimi navodili. Pred utrditvijo so bili predhodno že poškodovani zidovi sanirani z injektiranjem oziroma zapiranjem razpok z epoksidno smolo.

#### PROTIPOTRESNO UTRJEVANJE OPEČNIH ZIDOV S KOMPOZITNIMI OBLOGAMI • Miha Tomaževič, Matija Gams, Aleš Oblak

Tip	Št. sider	Armatura	Smer	Matrika	Št. zidov
5*	-	GFRP-mreža	Navpično	Malta	2 (2)**
6a	-	GFRP-mreža	Navpično	Malta	1
6b	5	GFRP-mreža	Navpično	Malta	2 (1)
6c	8	GFRP-mreža	Navpično	Malta	2 (1)
6d	13	GFRP-mreža	Navpično	Malta	1
7	4 x 4 v vogalih	GFRP-mreža	Diagonalno	Malta	2 (2)
8*	4 x 4 v vogalih	GFRP-tkanina	Diag.+navp.	Epoksi	2
9	4 x 4 v vogalih	GFRP-tkanina	Diag.+navp.	Epoksi	2
10	4 x 4 v vogalih	CFRP-tkanina	Diag.+navp.	Epoksi	2
11	-	CFRP-lamele	Diag.+navp.	Epoksi	2
12	8	GFRP-tkanina	Vodoravno	Epoksi	2 (2)
13	-	GFRP-mreža	Diagonalno	Malta	2 (2)
14	8	GFRP-mreža	Navpično	Tenka malta	2 (2)

\* Enostranska obloga

\*\* V oklepaju je navedeno število predhodno poškodovanih zidov

Preglednica 1 • Načini utrjevanja



Slika 2 • Kategorija a, tip 6c. Shematični prikaz utrditve (mere v cm)



Slika 4 • Kategorija a ali c, tipi 8–10. Shematični prikaz utrditve (mere v cm)



Slika 3 • Kategorija a, tip 7. Shematični prikaz utrditve (mere v cm)



Slika 5 • Kategorija d, tip 11. Shematični prikaz utrditve (mere v cm)



Slika 6 • Diagonalno postavljena GFRP-mreža in nanašanje cementne malte



Slika 7 • Vgrajevanje karbonskih sider: a.) vstavljanje sider v luknjo, b.) razširitev vlaken pred nanosom matrike

## 2.2 Materiali

Kot rečeno, smo za zidanje namesto stare opeke, odvzete iz obstoječe stavbe, uporabili novo polno opeko normalnega formata (250/125/60 mm) deklarirane tlačne trdnosti 20 MPa (dejansko 29 MPa) in podaljšano malto, ki smo ji dodali le toliko cementa, da je hitro pridobila želeno trdnost. Iz razpoložljive banke podatkov (Lutman, 2009) je razvidno, da tlačna trdnost uporabljene opeke ustreza trdnosti stare opeke boljše kakovosti. Volumsko razmerje med cementom, apnom in peskom je bilo 0,25 : 1,8, povprečna vrednost tlačne trdnosti, določene na vzorcih, odvzetih med zidanjem vseh zidov, pa 1,14 MPa. Tudi ta vrednost je v skladu z vrednostmi, ugotovljenimi na dejanskih starejših stavbah.

Za utrditev zidov smo uporabili material, ki ga sodelujoče podjetje ponuja na tržišču. Mehanskih in drugih lastnosti uporabljenih materialov nismo preiskovali. Ker ima proizvajalec vzpostavljen učinkovit sistem kontrole kakovosti, smo se zadovoljili z deklariranimi podatki.

Mreža iz steklenih vlaken SikaWrap®-350G se uporablja v kombinaciji s cementno malto Sika® MonoTop®-722 Mur. Mreža z okenci približno 17/15 mm (nominalno 15,7/10,1 mm) je mreža iz steklenih vlaken z alkalno odporno oblogo. Trdnost posamezne niti je 3,4 GPa, obremenitve, ki jih prenese mreža, pa so 77 kN/m v vzdolžni in 76 kN/m v prečni smeri. Natezna togost, ki se izraža z obremenitvijo pri 1 % raztezka, je 20 kN/m v vzdolžni in 25 kN/m v prečni smeri. Raztezek pri porušitvi je 3 %.

Malta Sika® MonoTop®-722 Mur je z vlakni ojačena cementna malta z nizkim modulom elastičnosti, ki vsebuje reaktivne pucolanske komponente, izbrane agregate in posebne dodatke. Tlačna trdnost po 28 dneh, določena po standardu EN 196-1, je 22 MPa, upogibna trdnost 7 MPa in modul elastičnosti, določen po EN 13412, 8 GPa.

Tkanina iz steklenih vlaken SikaWrap®-430G je enosmerno pletena tkanina, ki se na zidove nanaša in lepi z epoksidno smolo Sikadur®-330. Tkanina je debela 0,17 mm in ima modul elastičnosti v nategu 76 GPa. Deformacija pri pretrgu je 2,8 %, natezna trdnost vlaken pa 2,3 GPa. Tkanina iz karbonskih vlaken SikaWrap®-230C je tudi enosmerno pletena tkanina, ki se na zidove polaga v epoksidni matriki Sikadur®-330. Tkanina je debela 0,131 mm in ima modul elastičnosti v nategu 238 GPa. Raztezek pri pretrgu je 1,8 %, natezna trdnost vlaken pa 4,3 GPa.

Sikadur®-330 je dvokomponentna impregnacijska epoksidna smola, ki se uporablja pri nanašanju GFRP- ali CFRP-tkanine na zidovje. Njene lastnosti, izmerjene v skladu s standardom DIN 53455 po 7 dneh, so: natezna trdnost 30 MPa, upogibni modul elastičnosti 3,8 GPa, natezni modul elastičnosti 4,5 GPa in raztezek pri porušitvi 0,9 %.

Sidra iz karbonskih vlaken SikaWrap®Anchor C so v gazo zavita karbonska vlakna, pripravljena v obliki vrvi premera 10 mm, ki se razreže na primerne kose. Natezna trdnost vlaken je 1,59 GPa. Preden se vložijo v luknje, na zahtevanih mestih izvrtane skozi zid, se razrežejo na kose, ki so približno 200 mm daljši od debeline zidu. Z njih se odstrani ovoj (gaza), sidra pa se namočijo v epoksidno smolo. Sidra se skozi luknje, zapolnjene z epoksidno smolo, vstavijo s preprostim orodjem (slika 7a). Na obeh straneh zidu se vlakna pahljačasto razširijo in prilepijo na pripravljeno površino z epoksidno smolo (slika 7b).

CFRP-lamele (trakovi) Carbodur® S 512 so trakovi dimenzije 50/1,2 mm (širina/debelina), ki se na zid nalepijo z dvokomponentnim epoksidnim lepilom Sikadur®-30. Modul elastičnosti trakov je 165 GPa, natezna trdnost 2,8 GPa, raztezek pri porušitvi pa 1,7 %.

#### 2.3 Potek preiskave in meritev

Postopek določevanja tlačne trdnosti in modula elastičnosti zidovja je bil v skladu s standardom EN 1052-1, v osnovnem, neutrjenem stanju pa smo preiskali samo dva zidova. Povprečna vrednost tlačne trdnosti zidovja je bila f = 4,1 MPa, modul elastičnosti pa E = 1094 MPa.

Vse preostale zidove smo preiskali kot navpične elemente, obremenjene s konstantno navpično silo, ki je v zidovih povzročala povprečne tlačne napetosti,  $\sigma$ , v velikosti 30 % povprečne tlačne trdnosti zidovja, f, (razmerje predobremenitve  $\sigma/f = 0,3$ ). Vodoravne potresne sile, delujoče v ravnini zidov, smo ponazorili z vsiljenimi, programiranimi cikličnimi pomiki, ki jih je povzročal dvosmerno delujoči hidravlični bat, preko kardanske gredi pritrjen na zaključno vez zidu. Amplitude vsiljenih pomikov smo postopoma povečevali vse do porušitve zidov. Pri vsaki amplitudi smo obremenjevanje trikrat ponovili, s čimer smo ugotavljali upadanje odpornosti in togosti pri ponavljajočih se cikličnih obremenitvah. Potek pomikov med preiskavo je shematično prikazan na sliki 8.

Armiranobetonski temeljni bloki, na katerih so bili zidovi sezidani, so bili z vijaki pritrjeni na laboratorijsko preizkuševalno ploščad, pričakovano vrtenje (rocking) s togo oblogo utrjenih zidov, pa smo želeli preprečiti s sistemom navpičnih jeklenih vezi, postavljenih ob navpičnih robovih zidu. Vezi smo prednapeli toliko, da je na vsaki strani zidu sila v vezeh znašala 10 % celotne predobremenitve (sila v batu 80 %). Silo v palicah vezi smo med preiskavo merili in jo, če je bilo to potrebno, po vsakem ciklu obremenjevanja zidu nastavili na novo. Preizkuševalni sistem je predstavljal jekleni preizkuševalni okvir, na katerega sta bila pritrjena hidravlična bata za nanos obtežbe. Konstantno navpično silo, ki se je preko jeklenega profila in valjčnega ležišča prenašala na zakliučno vez zidu, je povzročal enosmerno delujoči bat, povezan s plinskim akumulatorjem. Vodoravne pomike smo vsiljevali z dvosmerno delujočim programskim batom, ki je bil z zidom oziroma zakliučno vezio povezan s členkasto priključenim jeklenim drogom (slika 9). Zidovi so bili opremljeni z merilniki pomikov, deformacij in sil, s katerimi smo merili pomike, zasuke in sile. Instrumentiranje zidov prikazuje slika 10.



Slika 8 • Shematično prikazan časovni potek vsiljenih pomikov med preiskavo zidov



Slika 9 • Pogled na tipičen zid med preiskavo



Slika 10 • Razporeditev merilnih pomikov (mere v cm)

## **3 • REZULTATI PREISKAV IN ANALIZA**

## 3.1 Porušni mehanizmi

V vseh primerih je med preiskavo prevladoval strižni mehanizem obnašanja. Kot kažejo meritve in oblika histereznih zank odvisnosti silapomik, izmerjenih med preiskavo, so jeklene navpične vezi v veliki meri preprečile tudi vrtenje zidov (rocking) na temelju.

Pri referenčnih, neutrjenih zidovih so poškodbe v obliki diagonalno usmerjenih razpok najprej nastale v osrednjem območju zidov. S povečevanjem amplitud vsiljenih pomikov so nastajale nove razpoke, ki so potekale tako po vodoravnih in navpičnih regah kot po opeki in so se razširile po celotni površini zidov. Število razpok se je večalo in njihova širina povečevala, pri ponovljenih obremenitvah z enako amplitudo pa je zid začel izgubljati odpornost. Zid se je porušil, ko sta začela razpadati stranska dela zidu, s širokima poševnima razpokama ločena od osrednjega dela (slika 11).

Pri zidovih, utrjenih z oblogami, lahko v splošnem ločimo dve fazi obnašanja: fazo, ko se utrjeni zid obnaša kot monoliten element,



Slika 11 • Referenčni, neutrjeni zid pred porušitvijo



Slika 12 • Diagonalno položena GFRP-mreža v cementni malti (utrditev tipa 13): razpoke v zidu po odstranitvi delaminirane obloge

in fazo, ko se obloga loči od zidovja. Pred ločitvijo – delaminacijo se z oblogo utrjeni zid obnaša kot monoliten element sestavljenega prereza. Ko pa zaradi velikih strižnih napetosti, nastalih med na eni strani togo in močno oblogo, na drugi strani pa mehkim in šibkim zidovjem, odpove slabši material in se obloga začne ločevati oziroma se odlupi, pride do trenutnega padca odpornosti in togosti. V končni fazi se vse obremenitve spet prenašajo po zidovju, tako da se vsa preostala kapaciteta odpornosti lahko pripiše osnovnemu zidu. Pri zidovih, utrjenih z oblogo iz z vlakni ojačene cementne malte, armirane z GFRP-mrežo (utrditev tipa 5, 6 in 13), je bil mehanizem odtrganja



Slika 13 • Diagonalno položena GFRP-mreža v cementni malti (utrditev tipa 13): odstranjena obloga po končani preiskavi zidu

Miha Tomaževič, Matija Gams, Aleš Oblak • PROTIPOTRESNO UTRJEVANJE OPEČNIH ZIDOV S KOMPOZITNIMI OBLOGAMI



Slika 14 • Navpično položena GFRP-mreža v cementni malti, 5 sider (utrditev tipa 6b). Poškodbe pri porušitvi

s katerimi je bila obloga povezana z osnovnim zidom, pa tudi od smeri, v kateri je bila mreža položena. V primerih, ko sider ni bilo (utrditev tipa 5 in 6a in 13), so v spodnjem delu zidu najprej nastale vodoravne upogibne razpoke. Te so se pri navpično položeni mreži precej povečale, medtem ko so bile pri diagonalno položeni mreži manj izrazite. Ker je obloga v območiu vodoravne razpoke kmalu začela odstopati od zidu, se ostale razpoke niso pretirano širile in povečevale. Ko so vsiljeni pomiki dosegli vrednost mejnega pomika osnovnega zidu, je obloga v celoti odstopila. Odpornost zidu je pri ponovljeni obremenitvi z enako amplitudo pomika močno padla. Na sliki 12 se vidi stanje razpok v zidu po odstranitvi odlepljene obloge z diagonalno položeno mrežo, slika 13 pa prikazuje po preiskavi odstranjeno oblogo z diagonalno položeno GFRP-mrežo, naneseno na isto stran zidu. Na primeru obloge z GFRP-mrežo v malti se na odtisu obloge lepo vidi, da se je večinoma porušil stik med malto in opeko. Čeprav sledovi opeke na oblogi kažejo dobro sprijemnost, so večji deli opeke ostali le na manišem delu površine obloge, ki se, nanesena na zid brez sider, niti ni premočno poškodovala.

Pri utrditvi, kjer je bila enaka obloga sidrana (utrditev tipa 6b, 6c in 6d), so sidra preprečila njeno popolno delaminacijo. Tudi pri teh zidovih je najprej tik nad spodnjo vrsto sider nastala vodoravna razpoka, pri povečanih vsiljenih pomikih pa skoraj po celotni površini obloge poševno usmerjene



Slika 15 • Navpično položena GFRP-mreža v cementni malti, 13 sider (utrditev tipa 6d). Poškodbe pri porušitvi

razpoke. Ob robovih je bilo opaziti tudi nekaj vodoravnih razpok, nastalih zaradi upogiba utrjenega zidu (slika 14). Čeprav je kazalo, da obloga dobro sodeluje z osnovnim zidom, je pri povečanih obremenitvah začela odstopati. V končnem stanju se je del obloge tik nad vodoravno razpoko, kjer se je po nekaj ciklih obremenjevanja začela drobiti tudi opeka, izklonil in porušil. Okrog sider je lepo vidna krožna porušna linija (slika 15). V



Slika 17 • Poševno usmerjene razpoke v osrednjem delu zidu in natezne razpoke v robnih ojačitvah (utrditev tipa 7)



Slika 16 • Pretrganje GFRP-mreže pri porušitvi zidu (utrditev tipa 14)

primeru obloge, kjer je bila mreža položena v tanki malti (utrditev tipa 14), je pred porušitvijo nastala razmeroma velika, diagonalno usmerjena razpoka, mreža iz steklenih vlaken pa se je vzdolž razpoke strgala (slika 16). To je povzročilo, da se odpornost in deformacijska kapaciteta zidu v primerjavi z referenčnim zidom nista prav nič povečali.

Pri zidovih, ki so bili utrjeni z diagonalno položeno GFRP-mrežo, ojačeno ob robovih



Slika 18 • Detajl pretrganja niti diagonalno položene GFRP-mreže (utrditev tipa 7)



Slika 19 • Detajl odluščene obloge z GFRP-tkanino v epoksidni matriki po končani preiskavi (utrditev tipa 9)



Slika 20 • Izbočenje obloge z GFRP-tkanino v epoksidni matriki (utrditev tipa 9)



Slika 21 • Zid, utrjen s CFRPtrakovi (utrditev tipa 11), pred porušitvijo

zidov z navpičnimi trakovi iz enake mreže, v vogalih sidranimi s sidri iz karbonskih vlaken (utrditev tipa 7), je bil mehanizem porušitve drugačen. V osrednjem delu zidov med obema robnima ojačitvama je nastala mreža enakomerno porazdeljenih, diagonalno usmerjenih razpok. Ko so med preiskavo vsiljeni pomiki presegli mejne vrednosti referenčnih zidov, so v pasovih robnih ojačitev nastale vodoravne natezne razpoke. V končni fazi se je zid porušil zaradi povečanja poševne razpoke v osrednjem delu zidu, kar je privedlo do pretrganja mreže (sliki 17 in 18). Tudi v tem primeru je prišlo do delaminacije posameznih delov obloge, vendar pri občutno povečani odpornosti in pri večjih pomikih kot pri referenčnem zidu.

Porušni mehanizmi zidov, utrjenih z oblogo iz GFRP- ali CFRP-tkanine v matriki iz epoksidne smole (utrditve tipa 8–10 in 12), so bili nekoliko drugačni. Predvsem so bili odvisni od porazdelitve in števila sider. V primeru, ko so bila sidra skoncentrirana v vogalih zidov, se je obloga bodisi odluščila bodisi izbočila po celi površini zidu (sliki 19 in 20), pri čemer je – v nasprotju z malto – odtrgala plast opečnega materiala. V primerih, ko so bila sidra enakomerno porazdeljena po celotni površini zidu (utrditev tipa 12), pa je prišlo do lokalnega izbočenja obloge. Takoj ko je delaminacija obloge dosegla dovolj veliko površino, se je učinek utrditve izgubil.

Pri zidovih, ki so bili utrjeni s CFRP-lamelami/ trakovi, z epoksidno smolo nalepljenimi na zid v obeh diagonalnih smereh in navpično ob obeh robovih zidov (utrditev tipa 11), so trakovi začeli odstopati in se izklanjati že pri razmeroma majhnih amplitudah vsiljenih pomikov (slika 21). Čeprav sidranje lamel v beton temeljnega bloka in zgornjo armiranobetonsko vez ni popustilo, odtrgane lamele niso imele nobenega učinka na odpornost in deformabilnost preiskanih zidov. Pri utrditvi s togimi lamelami so še posebno prišle do izraza velike razlike v deformabilnosti enega in drugega materiala: ko so v zidu zaradi nastalih poškodb pri ciklični obtežbe začeli nastajati opaznejši skrčki (deformacije v navpični smeri), so toge lamele, nalepljene z epoksidno smolo, takoj iztrgale plast opeke in se izbočile. Kot v primeru GFRPali CFRP-tkanine v epo ksidni matriki je bilo tudi v primeru CFRP-lamel, nalepljenih z epoksidno smolo, zidovie tisti material, ki je prvi popustil.



Slika 22 • Obloga s cementno malto, armirano z GRFP-mrežo, sidrano v zid, je močno izboljšala odpornost, ne pa toliko deformacijsko kapaciteto zidu. Rdeče: neutrjeni zid a.) navpično položena mreža (utrditev tipa 6c), b.) diagonalno položena mreža z robnimi ojačitvami (utrditev tipa 7)



Slika 23 • Obloga z GFRP- ali CFRP-tkanino v epoksidni smoli (utrditev tipov 8–10 in 12) je nekoliko izboljšala odpornost (a), medtem ko CFRP-lamele (utrditev tipa 11) niso vplivale na mehanske lastnosti zidu (b). Rdeče: neutrjeni zid

Miha Tomaževič, Matija Gams, Aleš Oblak • PROTIPOTRESNO UTRJEVANJE OPEČNIH ZIDOV S KOMPOZITNIMI OBLOGAMI

#### 3.2 Odpornost in deformabilnost

Med preiskavo s ciklično vodoravno obtežbo smo merili odvisnosti med vodoravnimi silami in pomiki zgornjega roba zidov. Nekaj histereznih odvisnosti med vodoravno silo in pomiki, izmerjenimi na zidovih, značilnih predstavnikih vseh kategorij utrditvenih metod, je prikazanih na slikah 22 in 23. Za boljšo predstavo o učinkih posameznih utrditvenih metod so na vseh slikah vrisane tudi histerezne odvisnosti, izmerjene med preiskavo neutrjenih, referenčnih zidov.

Da bi lahko ovrednotili učinkovitost posameznih utrditvenih načinov, smo med seboj primerjali odpornost in deformacijsko kapaciteto pri treh mejnih stanjih, ki jih lahko definiramo na ovojnicah histerezni zank:

- mejno stanje nastanka razpok (poškodb); stanje je določeno z vodoravno silo in pomikom, pri katerih v zidu nastanejo razpoke (poškodbe), ki povzročijo očitno spremembo togosti;
- maksimalna odpornost;
- mejno stanje porušitve, ki je določeno z močnim upadanjem odpornosti pri ponovitvi strižnih obremenitev oziroma s samo porušitvijo zidu.

Rezultati preiskav so povzeti v preglednici 2, kjer so pri značilnih mejnih stanjih navedene vrednosti vodoravne sile, *H*, pomika, izmerjenega v višini zaključne vezi, *d*, in pomika, izraženega v brezdimenzijski obliki s kotom zasuka,  $\Phi$ , to je z razmerjem med pomikom zidu v višine zaključne vezi in višino zidu, *h*,  $\Phi = d/h$  (v % *h*). V preglednici 2 navedene vrednosti so povprečja, izmerjena pri prvem od treh amplitudnih ciklov v pozitivni in negativni smeri. Za primerjavo so navedene tudi vrednosti, izmerjene med preiskavo referenčnih zidov.

Rezultati preiskav so analizirani v preglednici 3, kjer so vrednosti odpornosti in pomikov utrjenih zidov primerjane s povprečnimi vrednostmi, izmerjenimi med preiskavo neutrjenih, referenčnih zidov. Med seboj so primerjane tudi vrednosti efektivne togosti, dogovorno definirane z razmerjem med vodoravno silo in pomikom pri mejnem stanju poškodb,  $K_{\rm e} = H_{\rm cr}/d_{\rm cr}$ .

Če analiziramo rezultate, navedene v preglednici 3, lahko ugotovimo, da je debelejša obloga, tj. obloga iz cementne malte, armirana z GFRP-mrežo, nekoliko bolj izboljšala odpornost zidu kot tanjša obloga, tj. obloga z GFRP- ali CFRP-tkanino v matriki iz epoksidne smole. V prvem primeru se je odpornost glede na odpornost osnovnega zidu povečala za 20–70 %, v drugem pa za 17–42 %. Proti pričakovanjem

Tip utrditve	Meja poškodb		Maksimalna odpornost			Porušitev			
	H <sub>er</sub> (kN)	d <sub>cr</sub> (mm)	$\varPhi_{ m cr}$	H <sub>max</sub> (KN)	d <sub>max</sub> (mm)	$\varPhi_{\mathrm{max}}$	H <sub>u</sub> (kN)	d <sub>u</sub> (mm)	$arPsi_{u}$
Neutrjeno	54,74	3,00	0,19	89,54	9,01	0,58	34,33	20,00	1,28
5	44,41	1,75	0,11	107,79	11,02	0,71	39,89	20,00	1,30
6a	56,52	1,50	0,10	114,34	6,68	0,43	36,51	14,99	0,96
6b	59,75	1,50	0,10	132,93	9,15	0,59	35,62	22,50	1,46
6c	57,87	1,75	0,11	143,09	12,35	0,80	54,72	22,49	1,46
6d	63,97	2,00	0,13	125,10	13,45	0,86	18,60	24,97	1,60
7	94,70	3,50	0,23	204,18	21,69	1,40	17,47	30,05	1,93
8	44,44	1,50	0,10	104,39	9,82	0,63	40,63	17,51	1,12
9	39,65	1,50	0,10	108,82	11,71	0,75	31,80	19,98	1,28
10	44,86	1,50	0,10	115,77	9,89	0,64	21,54	19,99	1,29
11	42,67	1,50	0,09	76,12	11,03	0,69	33,77	17,49	1,10
12	63,18	2,75	0,17	126,58	13,68	0,85	29,34	19,99	1,25
13	81,38	3,00	0,19	153,27	10,80	0,70	42,67	17,48	1,13
14	53,95	2,00	0,13	125,41	15,97	1,00	34,10	27,48	1,72

Preglednica 2 • Rezultati preiskav: odpornost, H, pomiki, d, in zasuki,  $\Phi$ , pri značilnih mejnih stanjih

število in porazdelitev sider nista bistveno vplivali na povečanje odpornosti.

Po pričakovanju je debelina obloge vplivala na togost zidov: zidovi, utrjeni z oblogo iz cementne malte, armirane z GFRP-mrežo, so bili bolj togi kot zidovi, utrjeni z GFRP- ali CFRP-tkanino v matriki iz epoksidne smole. Ne glede na debelino in število sider pa je bilo razmeroma majhno povečanje deformacijske kapacitete zidov. Vzrok za to je pripisati izrazitejšemu upadanju odpornosti pri ponovljenih obremenitvah kot pri neutrjenih, referenčnih zidovih (glej preglednico 4), upadanje odpornosti pri ponovljenih obremenitvah pa je bilo posledica hitre delaminacije obloge.

V obnašanju na enak način utrjenih zidov, ki so bili pred utrditvijo poškodovani, in tistih, ki so bili utrjeni nepoškodovani, ni bilo opaziti razlik. Proti pričakovanjem nismo opazili večjih razlik v obnašanju in vrednostih odpornosti in deformabilnosti niti pri zidovih, kjer je bil enak način utrditve izveden samo na eni ali pa obeh straneh zidu (primerjaj utrditev tipov 5 in 6a oziroma utrditev tipov 8 in 9).

Med vsemi tipi utrditve se je najbolje izkazala utrditev z obojestransko oblogo s cementno malto, armirano z diagonalno položeno GFRPmrežo in navpičnimi robnimi ojačitvami, s sidri v vogalih, povezanimi z zidom (utrditev tipa 7). V tem primeru je bila odpornost v primerjavi z neutrjenim zidom večja za skoraj 130 %, za 50 % pa je bil večji tudi pomik pri porušitvi. Žal je tudi v tem primeru pri ponovitvi obremenitve prišlo do močnega in hitrega upadanja odpornosti.

Najslabše se je obnesla utrditev s togimi CFRP-lamelami (trakovi), nalepljenimi na zidovje z epoksidno smolo. V tem primeru se v primerjavi z referenčnim, neutrjenim zidom ni povečala niti odpornost niti deformacijska kapaciteta. Lamele so povečale samo začetno togost zidu, niso pa imele praktično nobenega vpliva na odpornost in deformacijsko kapaciteto. Čeprav sidranje lamel v betonske temelje in zgornjo vez ni popustilo, so zaradi delaminacije in izbočenja tlačenih lamel, elementi v nategu ostali neizkoriščeni.

Meritve, ki smo jih izvajali med preiskavami, so pokazale, da pri ciklično spreminjajoči se vodoravni obtežbi v nelinearnem območju nastanejo v zidovju tudi veliki skrčki v navpični smeri, kljub temu da se navpična sila ne spreminja. Prenosa deformacij reda velikosti skoraj odstotka višine zidu z zidovja na kompozitne materiale trdnost opeke ne more zagotoviti. Mehanizem nastanka delaminacije je bil še posebno očiten pri togih CFRP-lamelah, ki so se odtrgale in izklonile takoj, ko so v zidovju nastale poškodbe. Zaradi velikih razlik med trdnostjo osnovne opeke in sprijemnostjo, ki jo zagotavlja epoksidna matrika, je porušitev nastala v opeki in ne na stiku epoksidne matrike oziroma lepila z zidovjem.

#### PROTIPOTRESNO UTRJEVANJE OPEČNIH ZIDOV S KOMPOZITNIMI OBLOGAMI • Miha Tomaževič, Matija Gams, Aleš Oblak

Tip utrditve	Togost		Odpo	rnost	Mejni pomik	
	<i>K</i> <sub>e</sub> (kN/mm)	Utrjen/ neutrjen	H <sub>max</sub> (kN)	Utrjen/ neutrjen	<i>d</i> " (mm)	Utrjen/ neutrjen
Neutrjeno	18,20		89,6		20,00	
5	25,23	1,38	107,79	1,20	20,00	1,00
6a	37,68	2,06	114,34	1,28	14,99	0,75
6b	39,83	2,18	132,93	1,48	22,50	1,13
6c	33,29	1,82	143,09	1,60	22,49	1,12
6d	31,98	1,75	125,10	1,40	24,97	1,25
7	27,47	1,51	204,18	2,28	30,05	1,50
8	29,62	1,62	104,39	1,17	17,51	0,88
9	26,43	1,45	108,82	1,22	19,98	1,00
10	29,91	1,64	115,77	1,29	19,99	1,00
11	28,45	1,56	76,12	0,85	17,49	0,87
12	25,82	1,42	126,58	1,41	19,99	1,00
13	28,57	1,57	153,27	1,71	17,48	0,87
14	27,94	1,53	125,41	1,40	27,48	1,37

Preglednica 3 • Učinek utrjevanja

Tip utrditve	d <sub>Hmax</sub>		ď	* -1	<b>d</b> u	
	<b>H</b> <sub>2</sub> / <b>H</b> <sub>1</sub>	<b>H</b> <sub>3</sub> / <b>H</b> <sub>1</sub>	<b>H</b> <sub>2</sub> / <b>H</b> <sub>1</sub>	<b>H</b> <sub>3</sub> / <b>H</b> <sub>1</sub>	<b>H</b> <sub>2</sub> / <b>H</b> <sub>1</sub>	<i>H</i> <sub>3</sub> / <i>H</i> <sub>1</sub>
Neutrjeno	0,94	0,91	0,88	0,80	0,69	-
5	0,92	0,88	0,88	0,79	0,79	0,68
6a	0,87	0,74	0,86	0,80	0,85	0,77
6b	0,91	0,85	0,83	0,72	-	-
6c	0,97	0,93	0,88	0,78	0,71	0,60
6d	0,94	0,89	0,84	0,69	0,62	0,33
7	0,97	0,94	0,88	0,76	0,59	0,33
8	0,93	0,85	0,87	0,78	0,77	0,68
9	0,94	0,90	0,88	0,79	0,77	0,55
10	0,89	0,84	0,85	0,74	0,39	-
11	0,97	0,95	0,93	0,86	0,84	0,68
12	0,93	0,88	0,90	0,85	0,63	0,59
13	0,94	0,91	0,94	0,88	0,62	0,48
14	0,93	0,89	0,82	0,71	0,52	0,66

\* Amplituda pomika v fazi pred doseženim mejnim pomikom

Preglednica 4 • Upadanje odpornosti pri maksimalni odpornosti in pri mejnem stanju porušitve (H<sub>icikel</sub>/H<sub>1-cikel</sub>)

V preglednici 4 analiziramo upadanje odpornosti pri ponavljanju obremenitev. Analiza kaže, da se je referenčni, neutrjeni zid obnašal razmeroma stabilno, saj je odpornost pri ponovitvi obremenitve pri maksimalni odpornosti upadla za samo 9%, eno amplitudno stopnjo pred doseženim mejnim pomikom, d<sub>u-1</sub> pa upadanje pri tretji ponovitvi ni bilo večje od 20%. Medtem ko o posebnih razlikah velikosti upadanja odpornosti pri doseženi maksimalni odpornosti zidov, utrjenih z različnimi kompozitnimi oblogami, težko govorimo, so razlike v obnašanju utrjenih zidov v nadaljevanju preiskave večje. Stopnja upadanja odpornosti pri ponavljanju obremenitev kaže, da po delaminaciji obloge večino obremenitev prevzame osnovni zid, vendar na podlagi vrednosti, navedenih v preglednici 4, težko sklepamo o zakonitostih.

Da bi opažanja med preiskavo potrdili tudi z energetskimi kriteriji, smo analizirali razmerja med vhodno in disipirano energijo, ki jih dobimo med preiskavo posameznega zidu. Kapaciteto sipanja energije smo analizirali s primerjavo med kumulativno vhodno energijo, Eino, potrebno za deformacijo zidu od začetka preiskave do pomika, pri katerem razmerje analiziramo, in disipirano histerezno energijo do istega trenutka, E<sub>hvs</sub>. Kumulativno vhodno energijo smo definirali kot skupno delo hidravličnega bata, opravljeno na celotni poti od začetka preiskave do deformacije zidu pri obravnavani amplitudi pomika. V posameznem ciklu obremenjevanja vhodna energija predstavlja delo hidravličnega bata, potrebno za potisk zidu od neobremenjenega položaja do amplitudnega vrha, ter povlek zidu od razbremenjenega položaja do amplitudnega vrha v nasprotni smeri. Disipirano energijo smo izvrednotili na podlagi izmerjenih histereznih odvisnosti med vodoravno silo in pomikom. Količino disipirane energije v enem ciklu obremenjevanja predstavlja površina histerezne zanke med dvema zaporednima amplitudnima vrhovoma, kumulativno disipirano energijo pa vsota površin vseh histereznih zank od začetka preiskave do obravnavane amplitude pomika. Razmeria med disipirano histerezno in kumulativno vhodno energijo pri posameznih mejnih stanjih so izračunana v preglednici 5, razmerja med vhodno oziroma disipirano energijo pri meji nastanka poškodb in porušitvi glede na vhodno oziroma disipirano energijo pri maksimalni odpornosti pa so izračunana v preglednici 6.

Razmerja med disipirano in vhodno energijo ne kažejo posebnih zakonitosti oziroma razlik med posameznimi kategorijami in tipi utrditve zidov. Razmerja, ki smo jih ugotovili pri utrjenih zidovih, ne odstopajo od razmerja, ugotovljenega pri neutrjenih vzorcih. Z analizo vrednosti, navedenih v preglednici 5, lahko ugotovimo le, da se z naraščajočimi poškodbami v vseh primerih povečuje razmerje med disipirano histerezno in vhodno energijo. Enak sklep nam da tudi analiza oblike registriranih histereznih zank. Miha Tomaževič, Matija Gams, Aleš Oblak • PROTIPOTRESNO UTRJEVANJE OPEČNIH ZIDOV S KOMPOZITNIMI OBLOGAMI

	Meja poškodb	Maksimalna odpornost	Porušitev
Tip utrditve	$rac{E_{ m hys}}{E_{ m inp}}$	$rac{E_{ m hys}}{E_{ m inp}}$	$rac{E_{ m hys}}{E_{ m inp}}$
Neutrjeno	0,29	0,39	0,55
5	0,31	0,37	0,52
6a	0,27	0,28	0,53
6b	0,26	0,35	0,51
6c	0,24	0,33	0,48
6d	0,24	0,50	0,59
7	0,17	0,32	0,42
8	0,33	0,42	0,53
9	0,30	0,46	0,56
10	0,30	0,44	0,55
11	0,36	0,43	0,53
12	0,26	0,41	0,50
13	0,21	0,26	0,39
14	0,29	0,42	0,54

Preglednica 5 • Razmerja med disipirano histerezno in kumulativno vhodno energijo, *E*<sub>hys</sub>/*E*<sub>inp</sub>, pri mejnih stanjih

	Vhodna		Disipirana		
Tip utrditve	$\frac{E_{\rm inp,cr}}{E_{\rm inp,max}}$	$\frac{E_{\rm inp,coll}}{E_{\rm inp,max}}$	$\frac{E_{\rm hys,cr}}{E_{\rm hys,max}}$	$rac{E_{ m hys,coll}}{E_{ m hys,max}}$	
Neutrjeno	0,18	2,23	0,13	3,17	
5	0,04	1,79	0,03	2,46	
6α	0,06	2,17	0,05	4,12	
6b	0,03	1,63	0,02	2,33	
6c	0,03	1,79	0,02	2,61	
6d	0,03	1,49	0,02	1,77	
7	0,06	1,32	0,03	1,74	
8	0,04	1,85	0,03	2,37	
9	0,02	1,57	0,01	1,91	
10	0,03	1,52	0,02	1,91	
11	0,04	1,67	0,03	2,05	
12	0,07	1,32	0,04	1,58	
13	0,10	1,47	0,07	2,17	
14	0,03	1,62	0,03	2,11	

Preglednica 6 • Razmerja med disipirano histerezno oziroma kumulativno vhodno energijo na meji nastanka poškodb in porušitve glede na energijo pri maksimalni odpornosti

Rezultati v preglednici 6 kažejo, da je bil za nastanek prvih poškodb pri vseh utrjenih zidovih potreben manjši del energije, potrebne, da se doseže maksimalna odpornost, kot pri neutrjenih zidovih. Na to, da je obnašanje utrjenih zidov manj duktilno kot obnašanje neutrjenih zidov, kaže razmerje med energijo, potrebno za porušitev, in energijo, potrebno, da se doseže maksimalna odpornost. Razmerje  $E_{inp,coll}/E_{inp,max}$  je v vseh primerih manjše pri utrjenih kot pri neutrjenih zidovih. Podobno lahko ugotovimo, če analiziramo disipirano histerezno energijo. Nepričakovano odstopa le zid, utrjen z oblogo s cementno malto, armirano z GFRP-mrežo, ki pa ni bila sidrana v zid (utrditev tipa 6a). Razmerja so precej višja za disipirano histerezno kot pa za vhodno energijo, kar je v skladu z ugotovitvami, ki jih da analiza rezultatov iz preglednice 5.

## 4 • SKLEPI

Raziskovali smo učinkovitost protipotresnega utrjevanja opečnih zidov z različnimi tipi oblog, armiranih s kompozitnimi materiali. Med seboj smo primerjali obnašanje oblog s cementno malto, armirano z GFRP-mrežo in oblog z GRFP- ali CFRP-tkanino v matriki iz epoksidne smole. Poleg tega smo preiskali tudi zidove, utrjene s togimi CFRP-lamelami (trakovi), nalepljenimi na zid z epoksidno smolo. Preiskali smo 24 zidov, utrjenih na 10 različnih načinov, dodatno pa za primerjavo še dva zidova v osnovnem, neutrjenem stanju.

V vseh primerih je prevladovalo strižno obnašanje. Raziskave so potrdile učinkovitost utrjevanja opečnih zidov s kompozitnimi oblogami. Povečanje odpornosti, ki se je gibalo med 20–130 % odpornosti osnovnega, nearmiranega zidu, je bilo odvisno od tipa obloge. Obloge so precej povečale tudi togost zidov. Žal je bil zaradi delaminacije in uklona obloge mehanizem porušitve večinoma neduktilen, z izrazitim upadanjem odpornosti in togosti pri ponovitvi obremenitev že kmalu po doseženi maksimalni odpornosti. Zaradi neduktilnega porušnega mehanizma se deformacijska kapaciteta zidov, utrjenih s kompozitnimi oblogami, ni bistveno izboljšala.

Rezultati študije kažejo, da je izmed vseh preiskanih metod najbolj učinkovito oblaganje opečnih zidov s cementno malto, ojačeno z vlakni in armirano z mrežo iz steklenih vlaken. Če je mreža položena v diagonalni smeri in sidrana na ustrezen način, se povečata tako odpornost kot deformabilnost zidu. Izdelati splošno veljavna priporočila, kot smo načrtovali, za zdaj še ni mogoče. Raziskave v tej smeri nadaljujemo v sodelovanju z raziskovalci iz tujine. Poleg tega raziskujemo lastnosti materialov, ki jih potrebujemo pri razvoju računskega modela. O tem bomo poročali v enem od naših prihodnjih prispevkov. Ugotovili smo, da so metode utrjevanja opečnih zidov s primernimi kompozitnimi oblogami lahko učinkovita rešitev za povečanje potresne odpornosti, čeprav sama uporaba FRP-jev še ne pomeni nujno izboljšanja potresne odpornosti. Rezultati raziskav tudi nakazujejo, v katero smer naj gre razvoj materialov in tehnologij, da bi se učinkovitost posameznih tehnoloških rešitev izboljšala. Treba bo razviti materiale in aplikacije, ki bodo zmanjšali razlike med togostjo kompozitne obloge in zidovja in preprečili prezgodnjo delaminacijo obloge.

# 5 • ZAHVALA

Raziskave, ki jih predstavljamo v članku, so del aplikativnega raziskovalnega projekta L2-0578, ki ga je financirala Agencija Republike Slovenije za raziskovalno dejavnost, sofinanciralo pa podjetje Sika, d.o.o., iz Trzina, slovenska podružnica matične korporacije Sika AG iz Švice. Pri pripravi programa raziskav so sodelovali strokovnjaki podjetja Sika iz Ljubljane in Züricha, materiale za utrjevanje je dobavila italijanska podružnica, zidove pa so utrdili inštruktorji slovenske podružnice podjetja Sika.

# 6 • LITERATURA

ElGawady, M., Lestuzzi, P., Badoux, M., Shear Strength of URM Walls Retrofitted Using FRP, Engineering Structures, 28(12): 1658–1670, 2006. Konthesingha, C., Masia, M., Petersen, R., Mojsilović, N., Simundic, G., Page, A., Cyclic In-plane Shear Behaviour of Unreinforced Masonry Panels

Retrofitted with Fibre Reinforced Polymer Strips, Proceedings of the 8th International Masonry Conference, Dresden, 2010.

- Lutman, M., Ocenjevanje potresne odpornosti in ranljivosti objektov, poročilo. Zavod za gradbeništvo Slovenije, Ljubljana, 2007.
- Lutman, M., Bohinc, U., Report on laboratory tests of brick masonry walls: compressive strength and resistance to cyclic lateral loading, poročilo. Zavod za gradbeništvo Slovenije, Ljubljana, 2009.
- Lutman, M., Seismic Resistance Assessment of Heritage Masonry Buildings in Ljubljana, International Journal of Architectural Heritage, 4(3): 198–221, 2010.
- Odredba o dimenzioniranju in izvedbi gradbenih objektov v potresnih območjih, Uradni list SR Slovenije, št. 18, Ljubljana, 1963.
- Pravilnik o tehničnih normativih za graditev objektov visoke gradnje na seizmičnih območjih, Uradni list SFRJ, št. 31, Beograd, 1981.
- Schwegler, G., Masonry Construction Strengthened with Fiber Composites in Seismically Endangered Zones, Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering, Dunaj, 1994.
- SIST EN 1990-1-1: 2004, Evrokod, Osnove projektiranja konstrukcij, 2005.
- SIST EN 1998-1: 2005, Evrokod 8, Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij, 1. del, Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe, 2005.
- Triantafillou, T. C., Fardis, M. N., Strengthening of Historic Masonry Structures With Composite Materials, Materials and Structures, 30(8): 486–496, 1997.
- Tomaževič, M., Lutman, M., Klemenc, I., Weiss, P., Obnašanje zidanih stavb med potresom v Bovcu, 12. 7. 2004, Gradbeni vestnik, 54(1): 2–12, 2005.
- Tomaževič, M., Stavbe kulturne dediščine in potresna odpornost: kaj smo se naučili? Gradbeni vestnik, 58(9): 219–228, 58(10): 242–249, 2009. Vidrih, R., Godec, M., Ljubljanski potres leta 1895 in njegov vpliv na razvoj gradbeno-tehničnih predpisov, Ujma, 9: 231–237, 1995.

