

UTRJEVANJE KAMNITEGA ZIDOVJA S KOMPOZITNIMI OBLOGAMI

STRENGTHENING OF STONE MASONRY WALLS WITH COMPOSITE COATINGS

akad. prof. dr. Miha Tomažević, 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 620.17:692.2

Povzetek | Raziskovali smo učinkovitost utrjevanja tradicionalno zidanega trislojnega kamnitega zidovja z različnimi vrstami kompozitnih oblog. Za oblogo smo uporabili mrežo oziroma tkanino iz steklenih vlaken v z vlakni ojačeni malti oziroma epoksidni smoli. Zidove smo obložili na štiri različne načine, bodisi samo na eni bodisi na obeh straneh, oblogo pa v nekaterih primerih v vogalih tudi dodatno sidrali v zidovje. S ciklično strižno obtežbo pri konstantni predobremenitvi smo preiskali deset zidov, med njimi sta bila dva za primerjavo preiskana v osnovnem, neutrjenem stanju. Vsi zidovi so se porušili strižno, preiskave pa so pokazale opazno, tudi štirikratno povečanje odpornosti utrjenih zidov v primerjavi z referenčnima, neutrjenima zidovoma. Stopnja povečanja odpornosti ni bila toliko odvisna od tipa obloge kot od tehnologije nanašanja. Kot so pokazali rezultati preiskav, je oblaganje izboljšalo tudi sposobnost deformiranja in sipanja energije, vendar je hkrati povečalo togost zidov.

Ključne besede: kamnito zidovje, utrjevanje, obloga, mreža iz steklenih vlaken, obnašanje pri potresni obtežbi, ciklične strižne preiskave

Summary | The efficiency of strengthening traditional three-leaf stone masonry walls with different types of polymer coating has been investigated. Glass fibre grid or fabric and single component fibre reinforced mortar or epoxy resin were used as coating materials. Four different coating types have been applied, with coating placed on one or both sides of the walls and anchored or not anchored to the masonry at the corners. Altogether 10 walls have been tested by subjecting them to cyclic shear at constant precompression, among them two walls have been tested in the original state as control specimens. All walls failed in shear. Significant increase in lateral resistance of the strengthened walls with regard to control walls has been observed in all cases, amounting to 4.0-times the resistance of the control walls. The degree of improvement did not depend on the type of the coating but on the technology of application. Although the coating increased the rigidity of the walls, displacement and energy dissipation capacities have been also improved.

Keywords: stone masonry, strengthening, glass fibre grid, coating, seismic behaviour, cyclic shear tests

1 • UVOD

Lokalno pridobljen kamen je v Sredozemlju in hribovitih delih Evrope in drugod po svetu že od nekdaj najpogosteje uporabljen gradbeni material. Če ni šlo za monumentalne stavbe, katerih konstrukcije so zahtevale njegovo obdelavo, je bilo treba kamen le pobrati iz rečnih strug ali ga izkopati in razbiti na ustrezno velike kose, obdelati pa le toliko, da se ga je dalo vgraditi. Opeka je bila v teh krajih dražja, saj jo je bilo treba pripeljati od daleč. Tudi njena izdelava ni povsem preprosta. Zato je prišla v poštev le tam, kjer kamna ni bilo v izobilju, primerne surovine pa so bile pri roki – navadno v prostranih ravninskih predelih. Opeko so bodisi samo oblikovali in posušili na soncu bodisi žgali v pečeh, da je postala trdnejša. Tako kot drugod po svetu je bilo tudi pri nas. Ker je Slovenija pretežno hribovita dežela, je večina starejših hiš v mestih in na podeželju sezidanih iz kamna. Gradnja z opeko, ki so jo sicer že prej uporabljali predvsem v ravninskem, severovzhodnem delu dežele, je začela povsod prevladovati šele pred dobrimi sto leti.

Po vrsti surovine, tj. kamna, in načinu gradnje v svetu poznamo številne vrste kamnitega zidovja. Pri nas se je za kamnito zidovje uporabljali rečni ali lomljeni kamen lokalnega izvora, apnenec ali skrilavec, zidovje pa je bilo sezidano iz dveh zunanjih slojev večjih kamnov nepravilne velikosti z vmesnim zasutjem iz manjših kosov kamna, navadno ostalih pri obdelavi. Debelina takšnega zidu po navadi ni manjša od 50 cm. Kot vezivo se je uporabljala apnena malta boljše ali slabše kakovosti, z več ali manj blatnega peska. Zaradi načina gradnje ima takšno zidovje številne votline, katerih količina je odvisna predvsem od tega, kako je bil z malto zapolnjen vmesni sloj. V večjih krajih in mestnih središčih je zidovje bolj kompaktno. Izrazitih slojev tam ni videti, med kamne pa je večkrat pomešana tudi opeka. Zidovje iz obdelanega ali delno obdelanega kamna je zelo redko, redko pa so se za boljše povezavo glavnih slojev zidu vsake toliko vgrajevali tudi vezni kamni.

Kamnite hiše v mestnih jedrih in naseljih imajo tri do štiri nadstropja, medtem ko na podeželju višina stanovanjskih hiš le redko preseže dve nadstropji. Konstruktivna zasnova hiš je po navadi ustrezna. Nosilni in vezni zidovi so enakomerno porazdeljeni v obeh pravokotnih smereh. Zaradi debeline zidov in omejene velikosti prostorov je razmerje med površino zidov in etažno tlorisno površino precej veliko, saj v vsaki smeri površina zidov presega deset odstotkov etažne tlorisne površine. Vendar so stropne konstrukcije in preklade navadno lesene, zidovje pa v višini stropov ni povezano z vodoravnimi zidnimi vezmi. Lesena so tudi ostrešja, ki so krita s težko kamnito ali opečno kritino, včasih celo položeno v malto. Lesene stropne konstrukcije in preklade navadno zamenjujejo opečni ali kamniti oboki. Praviloma kamniti hiše nimajo posebnih temeljev, temeljni zidovi pa so slabše kakovosti kot zidovi nad nivojem terena. Kot po vrsti dokazujejo potresi, je potresna odpornost starih hiš na splošno problematična. Tudi če trdnost zidovja še ustreza, zaradi nepovezanih zidov lahko nastanejo poškodbe že pri zmerno močnih potresih.

Eksperimentalne raziskave, o katerih smo na tem mestu v preteklosti že poročali (Tomaževič, 1995), in analize poškodb po potresih kažejo ((Dolce, 1999), (Tomaževič, 2005)), da že samo povezovanje zidov pomembno izboljša obnašanje starih kamnitih hiš med potresi. Povezovanje pa ne pomaga, če je trdnost zidovja premajhna, da bi bili zidovi sposobni prevzeti med potresom nastale sile. Zato na potresnih območjih ni dovolj, da v kamniti hiše, ki jih ohranjamo, ker predstavljajo arhitekturno kulturno dediščino, vgradimo samo zidne vezi, pač pa moramo utrditi tudi zidovje. Med številni poznanimi metodami utrjevanja, ki so bile preizkušene v laboratorijih in tudi izvedene v praksi, se je pri kamnitem zidovju najbolj uveljavilo injektiranje s cementno-silikatno mešanico. Raziskave so pokazale, da se je mogoče s primerno sestavo injekcijske mase izogniti neprijetnostim, ki jih povzročata čista cementna injekcija, in se prilagoditi zahte-

vam varstva kulturne dediščine, ne da bi pri tem kaj posebej zmanjšali učinek injektiranja ((Tomaževič, 1993), (Vintzileou, 2006), (Uranjek, 2010)).

Alternativa injektiranju je oblaganje kamnitega zidovja na eni strani ali na obeh straneh z armiranimi ometi, ki se po polaganju in povezovanju jeklene armature nanašajo ročno ali strojno, ali pa »prefugiranje« (zamenjava obstoječe slabe malte v spojnica med kamni s trdnejšo). Metodi sta se pri opečnem zidovju izkazali kot učinkoviti, medtem ko za kamnito zidovje za zdaj še ni podatkov. Kot lahko sklepamo na podlagi nekaterih opažanj po potresih v Italiji, predvsem v Umbriji leta 1997 (Dolce, 1999), se nista posebej izkazali.

Kot metode injektiranja, kjer se poskuša cement zamenjati z inertnimi materiali ali apnom, se razvijajo tudi metode oblaganja kamnitega zidovja. Ker so se izkazali kot učinkoviti na konstrukcijah iz drugih materialov, predvsem na armiranobetonskih, sprejemljiva pa postaja tudi njihova cena, postajajo razmišljanja o možnostih, da bi tudi za utrjevanje kamnitega zidovja klasične materiale zamenjali s sintetičnimi, vedno močnejša. Kot armatura obloge pridejo v poštev mreže ali tkanine iz polimerov, ojačanih s steklenimi (GFRP) ali karbonskimi vlakni (CFRP). Mreže se polagajo v malto, ojačani z vlakni, ali v epoksidni smoli, tkanine pa se na izravnano površino zidu lepijo z epoksidnimi smolami. Po ne tako številnih eksperimentalnih raziskavah o učinkovitosti tovrstnih oblog na opečnih zidovih (glej npr. (Schwegler, 1994), (Triantafyllou, 1997), (ElGawady, 2006), (Konthesingha, 2010)) smo učinek večjega števila tehničnih rešitev oblaganja opečnih zidov raziskali tudi v Zavodu za gradbeništvo Slovenije. O izsledkih raziskav smo tudi na tem mestu že poročali (Tomaževič, 2011). Ker podatkov o učinkovitosti iste metode utrjevanja za kamnito zidovje praktično ni, smo v okviru istega raziskovalnega projekta poskušali ugotoviti, kakšne bi bile možnosti uspeha v primeru kamnitega zidovja. Kamnitih hiš, ki jih bo treba utrditi, je veliko, tehnologija je časovno učinkovita in razmeroma čista, pa tudi cena z vlakni ojačanih polimernih materialov in tehnologije nanosa oblog se vztrajno znižuje. O rezultatih eksperimentalnih raziskav poročamo v nadaljevanju.

oblogami, katerih armaturo predstavlja mreža oziroma tkanina iz steklenih vlaken (GFRP) v mikroarmirani malti oziroma epoksidnem premazu. Metodo oziroma tehnologijo nanašanja oblog smo prilagodili kamnitemu zidovju. Obloga, armirana z GFRP-mrežo oziroma tkanino,

2 • PROGRAM RAZISKAV, NAČINI OBLAGANJA IN MATERIALI

Pri zasnovi programa raziskav smo upoštevali izkušnje, ki smo jih pridobili med preiskavo

opečnih zidov, utrjenih na podoben način. Tako smo pozornost namenili učinku utrjevanja z

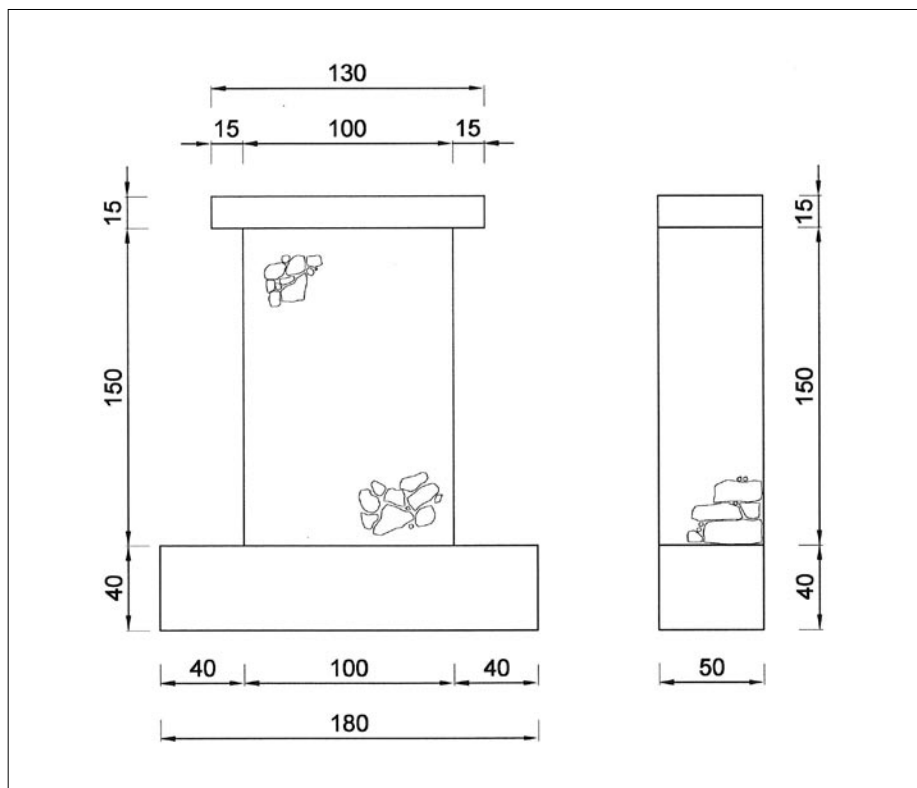
je manj toga kot obloga, armirana s CFRP, je cenejša in tako v primeru ugodnih rezultatov tudi primernejša za uporabo.

Izbranih utrditvenih rešitev oziroma posameznih tipov obloge je bilo manj kot pri opečnih zidovih, zato je bilo za raziskavo dovolj dvanajst zidov. Zidove dimenzij 1500/1000/500 mm (višina/dolžina/debelina) smo sezidali v laboratoriju na način, tipičen za slovensko podeželje. Za zidanje trislojnega kamnitega zidovja smo uporabili lomljeni apnenec tlačne trdnosti okoli 220 MPa, ki smo ga odvzeli iz porušene kamnite hiše v Posočju. Posamezni kamni, katerih dimenzije niso presegle 30 cm, so bili povezani z apnenno malto, ki smo ji za hitrejše strjevanje dodali majhno količino cementa. Tlačna trdnost malte, sestavljene iz rečnega peska (največji premer zrna 4 mm), hidriranega apna in cementa v volumskem razmerju 8 : 1 : 0,5, je bila v povprečju za vse zidove 3,3 MPa (s koeficientom variacije 0,35). Preizkusni zidovi so bili sezidani na armiranobetonskih temeljnih blokih, zgoraj pa so bili zaključeni z armiranobetonskim veznim blokom, preko katerega smo v zidove vnašali navpične tlačne in vodoravne strižne obremenitve. Dimenzije zidov prikazuje slika 1.

Na dveh zidovih smo ugotavljali tlačno trdnost zidovja, na drugih dveh pa parametre potresne odpornosti v osnovnem, neutrjenem stanju. Z obnašanjem referenčnih zidov smo primerjali obnašanje na različne načine utrjenih zidov in ugotavljali učinkovitost posameznih načinov oblaganja. Utrjene zidove smo preiskali na enak način kot referenčna zidova.

Izbrali smo štiri različne načine utrditve. Pri utrditvi tipa 1 in 2 smo utrdili zidove, ki so bili predhodno poškodovani, medtem ko smo pri utrditvah tipa 3 in 4 oblogo nanесли na predhodno nepoškodovani zid. Predhodno poškodovanih zidov pred nanosom oblog tipa 1 in 2 nismo sanirali. Program preiskav podajamo v preglednici 1.

Pri utrditvi tipa 1 je bil zid obložen z navpično položeno GFRP-mrežo v 15 do 20 mm debeli mikroarmirani cementni malti. Obloga, ki je bila v vogalih sidrana v zid, je bila nanesena samo na eni strani zidu. Pri utrditvi tipa 2 je bila enaka obloga nanesena na obeh straneh zidu, vendar ni bila sidrana. Pri utrditvi tipa 3 je bila GFRP-mreža postavljena v diagonalni smeri, obloga nanesena na obeh straneh zidu in v vogalih sidrana v zid. Pri utrditvi tipa 4 je bila GFRP-mreža v malti nadomeščena z GFRP-tkanino, položeno v sloj epoksidne smole (epoksidno matriko). 30 cm široki trakovi so bili ob robovih zidov položeni navpično,



Slika 1 • Dimenzije preizkusnih zidov (v cm)

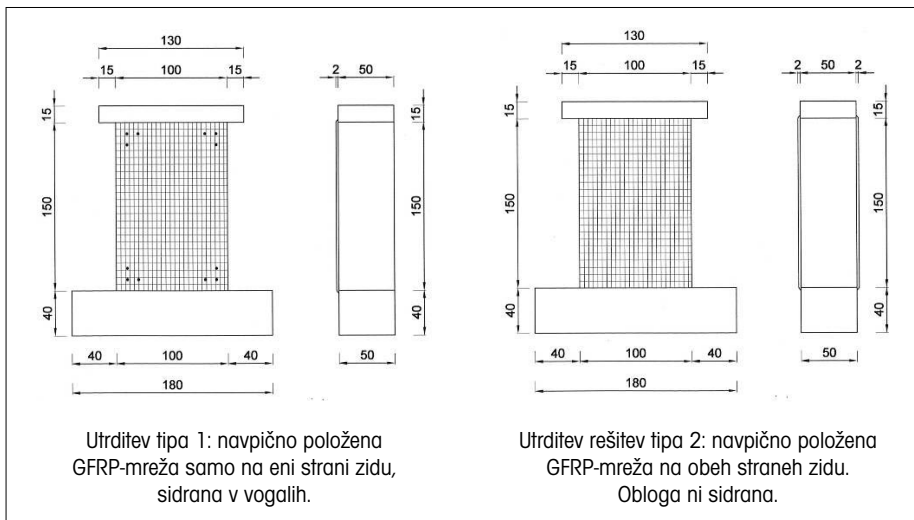
Oznaka zidu	Število zidov	Vrsta preiskave	Tip utrditve	Opomba
SM-V1, SM-V2	2	Tlačna	–	Referenčna zidova
SM-1, SM-2	2	Ciklična strižna	–	Referenčna zidova
SM-4S, SM-6S	2	Ciklična strižna	Tip 1	Poškodovan
SM-3S, SM-5S	2	Ciklična strižna	Tip 2	Poškodovan
SM-9S, SM-10S	2	Ciklična strižna	Tip 3	Nepoškodovan
SM7S, SM-8S	2	Ciklična strižna	Tip 4	Nepoškodovan

Preglednica 1 • Program preiskav

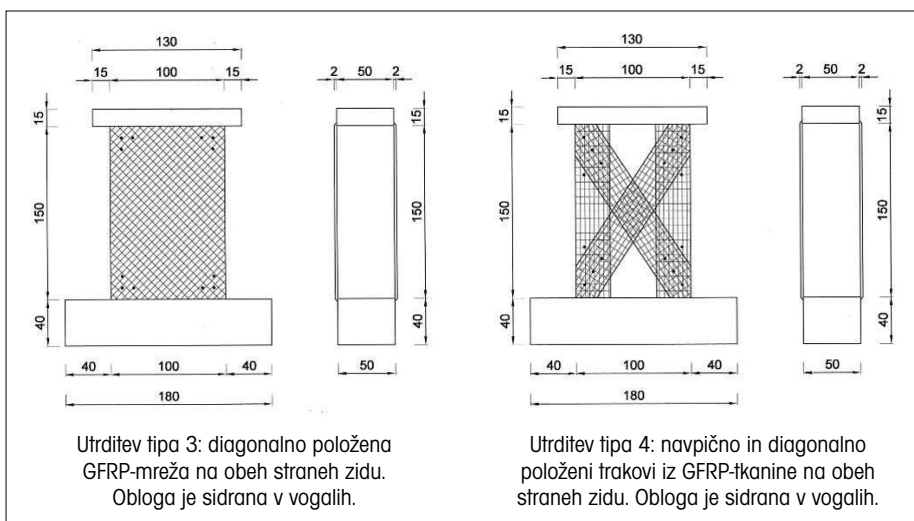
vmes pa še diagonalno. Pred nanosom obloge je bila neravna površina kamnitega zidu zglajena s cementno mikroarmirano malto. Obloga je bila v vogalih sidrana v zid, tkanina pa ni bila prilepljena niti spodaj na armiranobetonski temeljni niti zgoraj na zaključni vezni blok. Preiskani tipi utrditve so shematično prikazani na slikah 2 in 3.

Za utrjevanje smo uporabili material, ki ga je mogoče dobiti na trgu in ga je dobavilo v aplikativnem raziskovalnem podjetju sodelujoče podjetje, katerega tehnično osebje je tudi opravilo utrditvena dela. Mehanskih lastnosti nismo posebej preiskovali. Ker točnejših ni-

smo potrebovali, smo povzeli kar tovarniške podatke. Za obloge tipa 1, 2 in 3 smo uporabili mrežo z oznako SikaWrap®-350G in mikroarmirano 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 % raztežka, je 20 kN/m v vzdolžni in 25 kN/m v prečni smeri. Raztezek pri porušitvi je 3 %. Tlačna trdnost malte po 28 dneh, določena



Slika 2 • Shematični prikaz utrditvenih rešitev tipov 1 in 2 (dimenzije v cm)



Slika 3 • Shematični prikaz utrditvenih rešitev tipov 3 in 4 (dimenzije v cm)

3 • ZASNOVA PREISKAV IN MERITVE

Kot rečeno v uvodu, smo dva zidova v osnovnem, neutrjenem stanju preiskali na tlak, da bi ugotovili tlačno trdnost, f_c , in modul elastičnosti zidovja, E . Preiskavo mehanskih lastnosti pri tlačni obremenitvi smo opravili na način, ki ga predpisuje standard SIST EN 1052-1. Povprečne vrednosti, dobljene s preiskavo obeh zidov, so: tlačna trdnost $f_c = 1,26$ MPa in modul elastičnosti $E = 470$ MPa.

Vse preostale zidove smo preiskali s ciklično vodoravno obtežbo, delujočo v osi zidne vezi, pri čemer smo jih obremenili s konstantno

navpično silo, ki je v zidovih ves čas preiskave povzročala tlačne napetosti, σ , v velikosti 26 % izmerjene tlačne trdnosti zidovja (razmerje predobremenitve $\sigma/f_c = 0,26$). 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

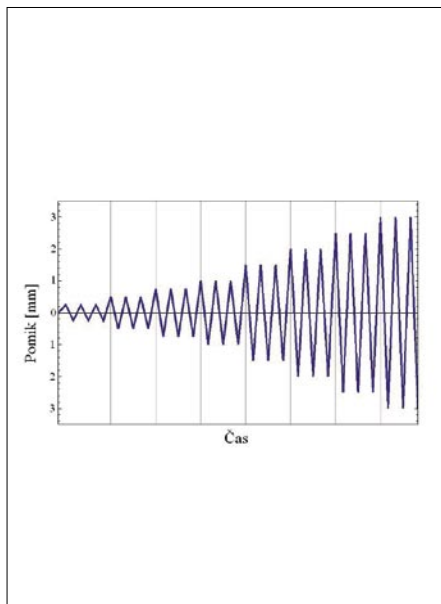
po standardu EN 196-1, je 22 MPa, upogibna trdnost 7 MPa in modul elastičnosti, določen po EN 13412, je 8 GPa.

Za oblogo tipa 4 smo uporabili tkanino SikaWrap®-430G in dvokomponentno epoksidno smolo SikaDur-330. Tkanina iz steklenih vlaken je enosmerno pletena tkanina, 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. Lastnosti dvokomponentne epoksidne smole, izmerjene v skladu s standardom DIN 53455 pri sedmih 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, s katerimi smo oblogo v vogalih sidrali v zidove, 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 ovaj (gaza), sidra pa se prepojijo s počasni vezočo epoksidno smolo. Sidra se skozi luknje, zapolnjene z epoksidno smolo, vstavijo z enostavnim orodjem. Vlakna se na zunanji strani zidu pahljačasto razširijo in prilepijo na pripravljeno površino z epoksidno smolo.

pri ponavljajočih se cikličnih obremenitvah. Potek vsiljenih pomikov med preiskavo je shematično prikazan na sliki 4.

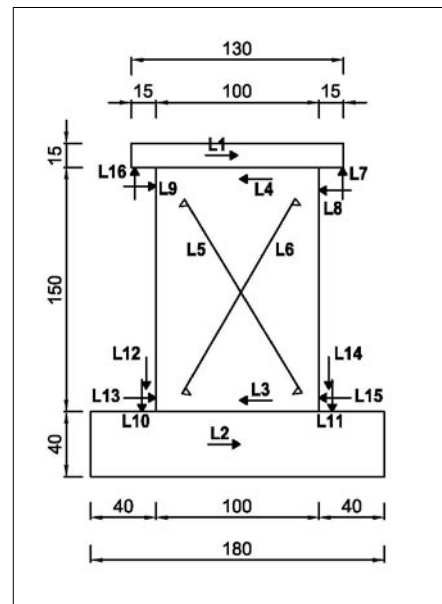
Preizkuševalni sistem je bil prilagojen laboratorijskim razmeram in dimenzijam preizkusnih zidov. Na jekleni okvir, katerega navpični elementi so bili zaradi večje togosti sestavljeni iz več profilov, so bili pritrjeni hidravlični bati za nanos navpične in vodoravne obtežbe. Konstantno navpično silo, ki se je preko jeklenega profila in valjčnega ležišča prenašala na zaključno vez zidu, sta povzročala dva enosmerno delujoča bata, povezana s plinskim akumulatorjem. Vodoravno obtežbo je povzročal dvosmerno delujoči programski bat, ki je bil z zidom oziroma zaključno vezjo povezan s členkasto priključenim jeklenim drogom.



Slika 4 • Shematični prikaz časovnega poteka vsiljenih pomikov med preiskavo zidov



Slika 5 • Preizkuševalni sistem



Slika 6 • Porazdelitev merilnih instrumentov

Armiranobetonski temeljni bloki, na katerih so bili zidovi sezidani, so bili z vijaki pritrjeni na laboratorijsko preizkuševalno ploščad. Da bi se zidovi med preiskavo obnašali kot simetrično vpeti oziroma da bi preprečili njihovo sukanje, pri tem pa obdržali navpično obremenitev nespremenjeno, smo sukanje zaključne vezi nad zidom med vsiljevanjem vodoravnih pomikov

kontrolirali 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 treba, po vsakem ciklu obremenjevanja zidu nastavili na novo.

Zidovi so bili opremljeni z merilniki pomikov, deformacij in sil, s katerimi smo merili pomike, zasuke in sile. Preizkuševalni okvir in postavitve zidu, opremljena z merilnimi instrumenti med preiskavo, prikazuje slika 5, postavitve merilnikov, s katerimi smo spremljali pomike, zasuke in deformacije zidu, pa je shematično prikazana tudi na sliki 6.

4 • REZULTATI PREISKAV

4.1 Porušni mehanizem

Med ciklično strižno preiskavo je pri vseh, tako referenčnih, neutrenih kot tudi z oblogo utrjenih zidovih prevladovalo pričakovano strižno obnašanje. Pri referenčnih zidovih so razpoke najprej nastale v osrednjem delu zidov v malti med posameznimi kamni. Razpoke so bile usmerjene poševno, v smereh obeh diagonal. Pri povečanih amplitudah vsiljenih pomikov so se razpoke razširile po celotni površini zidov, povečala pa se je tudi njihova širina (slika 7). Pred poružitvijo se je zid razslojil, iz njega pa so začeli izpadati tudi posamezni kamni.

V splošnem so bili tudi porušni mehanizmi utrjenih zidov podobni, saj so v vseh primerih v oblogah nastale diagonalno usmerjene, razmeroma enakomerno porazdeljene razpoke, v končni fazi pa se je zid razslojil. Kljub temu

je bilo med posameznimi tipi utrditve opaziti razlike. Pri zidovih, utrjenih z oblogo samo na eni strani (utrditev tipa 1 – slika 8), je bila porazdelitev razpok na neobloženi strani podobna kot pri referenčnem, neutrenem zidu. Razpoke v oblogi, ki je bila v vogalih sidrana v zid, so nastajale in potekale podobno kot na neutreni strani. V končni fazi, pri poružitvi, se je neutreni sloj zidu ločil in deloma porušil, medtem ko je sloj, utrjen z oblogo, kljub poškodbam ostal celovit.

Čeprav je bila razslojitev (ločevanje posameznih slojev zidu) razlog za porušitev tudi v primerih, ko je bila obloga nanescena na obeh straneh zidu, je bil potek razpok odvisen od tipa utrditve (slike 9b, 10b in 11b). Pri oblogi z navpično položeno mrežo, ki ni bila sidrana v zid (utrditev tipa 2), so bile razpoke enakomerno porazdeljene po celotni površini



Slika 7 • Poškodbe referenčnega neutrenega zidu pri končnem mejnem stanju



a)



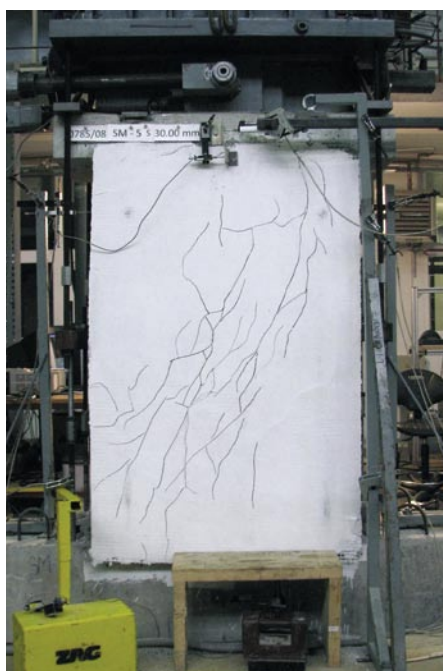
b)



c)

Slika 8 • Utrditev tipa 1. a) Poškodbe na neobloženi strani zidu pri končnem mejnem stanju; b) razpoke v oblogi; c) razslojitev zidu

obloge (slika 9a), medtem ko so bile pri oblogi z diagonalno položeno mrežo, sidrano v vogalih, razpoke skoncentrirane v osrednjem delu zidu (slika 10a). Pri oblogi z navpičnimi in diagonalno položenimi trakovi CFRP- tkanine, sidranimi v vogalih, pa so bile razpoke vidne samo na tistem delu površine zidov, ki ni bil prekrit z oblogo (slika 11a).



a)



b)

Slika 9 • Utrditev tipa 2. a) Razpoke v oblogi pri končnem mejnem stanju; b) razslojitev zidu

4.2 Odpornost in sposobnost deformiranja

Histerezne odvisnosti med vodoravno obtežbo (odpornostjo) in pomiki (relativni pomik med osjo vezi in temeljem), izmerjene med preiskavo, so za tipične predstavnike posameznih tipov utrditve prikazane na slikah 12 in 13. Za primerjavo je na diagramih vrisana tudi povprečna ovojnica odpornosti, dobljena s

preiskavo referenčnih, neutrjenih zidov (rdeča črta).

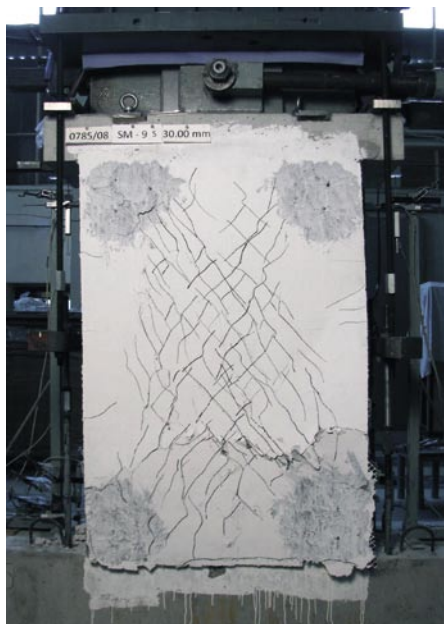
Da bi ocenili učinkovitost posameznega tipa utrditve, smo primerjali odpornost in odgovarjajoče pomike na posamezne načine utrjenih in neutrjenih zidov pri treh značilnih mejnih stanjih:

a) mejnem stanju poškodb (razpok), ki določata odpornost, H_{cr} in pomik, d_{cr} pri katerih v zidu nastanejo prve poškodbe oziroma se njegova togost opazno spremeni;

b) maksimalni odpornosti, ki jo določata maksimalna sila, dosežena sila med preiskavo, H_{max} in njej pripadajoči pomik, d_{Hmax} ;

c) končnem mejnem stanju (mejnem stanju porušitve), ki ga določa maksimalni, med preiskavo doseženi pomik, d_v in temu pomiku pripadajoča preostala odpornost, H_{du} .

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, Φ , 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 izmerjene pri prvem amplitudnem ciklu od treh v pozitivni in negativni smeri. Vrednosti so povprečja vrednosti, izmerjenih med preiskavo dveh enakih preizkušancev. Za primerjavo so navedene tudi vrednosti, izmerjene med preiskavo referenčnih zidov.



a)



b)

Slika 10 • Utrditve tipa 3. a) Razpoke v oblogi pri končnem mejnem stanju; b) izbočenje obloge in razslojitev zidu



a)



b)

Slika 11 • Utrditve tipa 4. a) Razpoke v zidu pri končnem mejnem stanju; b) razslojitev zidu

Učinek utrjevanja je analiziran v preglednici 3, kjer so povprečne vrednosti odpornosti in pomikov dveh, na enak način utrjenih zidov primerjane s povprečnimi vrednostmi, izmerjenimi med preiskavo neutrjenih, referenčnih zidov.

Kot kažejo rezultati, zbrani v preglednici 3, je utrjevanje tradicionalno sezidanega trislojnega zidovja z nanosom polimernih oblog precej izboljšalo odpornost in sposobnost deformiranja preiskanih zidov. Učinkovitost ni bila toliko odvisna od tipa utrditve (navpično

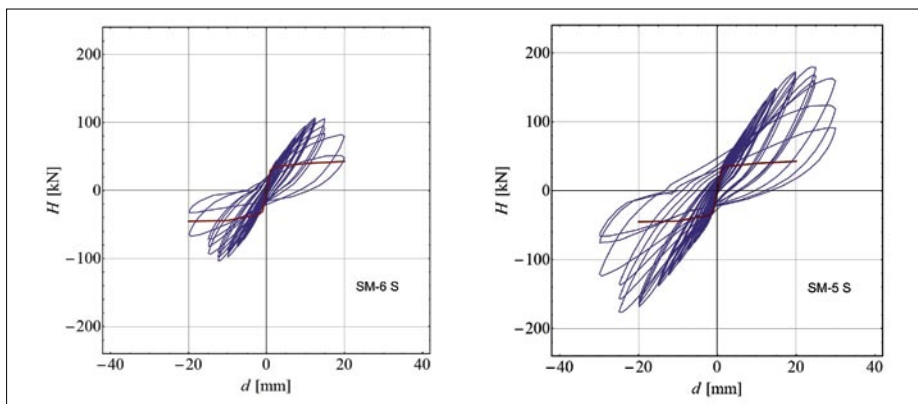
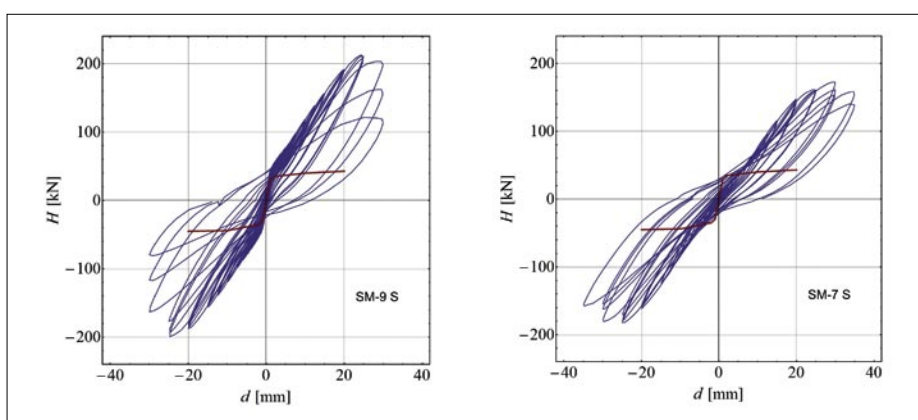
oziroma v diagonalni smeri položena CFRP-mreža v malti, ojačeni z vlakni; navpično in v diagonalnih smereh položena CFRP-tkanina v epoksidni smoli), pač pa bolj od tega, kako je bila obloga nanosena (eno- ali obojestransko, brez sider ali sidrana vogalih). Analiza rezultatov preiskav ne pokaže bistvenih razlik, ki bi jih lahko pripisali nanašanju obloge na predhodno nepoškodovan zid oziroma na zid, ki je bil predhodno poškodovan, vendar poškodbe pred nanosom obloge niso bile sanirane. Če analiziramo mehanizem obnašanja, manjše odpornosti zidov, utrjenih s tipoma utrditve 1 in 2, ne moremo pripisati predhodnim poškodbam zidov.

Nanašanje obloge samo na eni strani zidu je bilo manj učinkovito kot nanašanje na obeh straneh, čeprav je bila enaka obloga v prvem primeru sidrana. Nanašanje obloge samo na eni strani tudi ni bistveno izboljšalo sposobnost deformiranja. Analiza rezultatov pokaže, kako pomembno je, da se obloga sidra v zid vsaj v vogalih. Kot je razvidno iz preglednice 3, je povečanje odpornosti in sposobnosti deformiranja večje v primeru utrditve tipov 3 in 4, kjer je bila obloga sidrana v vogalih, kot v primeru utrditve tipa 2, kjer obloga ni bila sidrana. Razlike v odpornosti in sposobnosti deformiranja med utrditvijo tipa 3 (mreža v malti) in tipa 4 (tkanina v epoksidni smoli) niso pomembne.

Vrsta in smer nanosa polimerne armature obloge (mreža/tkanina; navpično/diagonalno) vplivata na položaj in porazdelitev razpok. Čeprav se obloga zaradi drugačnih lastnosti površine kamnitega zidovja v nobenem primeru ni ločila od zidu (delaminacija) kot pri opečnih zidovih, oblaganje s polimernimi oblogami ni moglo preprečiti razslojevanja zidov. Kot posledica razslojevanja, izpadanja posameznih kosov kamna in stisnjenja zidu, je v zadnji fazi preiskave prišlo tudi do izbočenja obloge in do hitrega velikega upadanja odpornosti (glej slike 12 in 13).

V preglednici 3 so med seboj primerjane tudi vrednosti efektivne togosti, dogovorno definirane z razmerjem med vodoravno silo in pomikom pri mejnem stanju poškodb, $K_e = H_c/d_c$. Kot kaže primerjava, se je togost zidov z obojestranskim nanosom obloge povečala za dvakrat, če je bila obloga v vogalih sidrana v zid (tipa utrditve 3 in 4). Če je bila obloga nanosena samo na eni strani zidu oziroma če obojestransko nanosena obloga ni bila sidrana, povečanje togosti ni bilo tako izrazito.

Analizirali smo tudi razmerja med vhodno in disipirano histerezo energijo, ugotovljeno


 Slika 12 • Histerezne odvisnosti odpornost-pomik, dobljene s preiskavo utrjenih zidov
 a) Utrditev tipa 1, b) Utrditev tipa 2. Rdeče: ovojnica odpornosti neutrjenih zidov

 Slika 13 • Histerezne odvisnosti odpornost-pomik, dobljene s preiskavo utrjenih zidov
 a) Utrditev tipa 3, b) Utrditev tipa 4. Rdeče: ovojnica odpornosti neutrjenih zidov

Tip utrditve	Meja poškodb			Maksimalna odpornost			Porušitev		
	H_{cr} (kN)	d_{cr} (mm)	Φ_{cr}	H_{max} (kN)	d_{max} (mm)	Φ_{max}	H_u (kN)	d_u (mm)	Φ_u
Neutrjen	27,5	1,5	0,05	45,2	11,13	0,75	26,6	20,0	1,35
1	32,3	1,5	0,10	123,6	14,8	1,00	45,6	22,5	1,52
2	35,1	1,3	0,08	169,8	22,2	1,50	64,7	27,5	1,86
3	39,0	1,1	0,08	191,5	23,5	1,60	79,9	30,3	2,06
4	40,3	1,0	0,07	188,6	24,3	1,84	93,2	32,5	2,20

 Preglednica 2 • Rezultati preiskav: odpornost, H , pomik, d , in zasuk, Φ , pri značilnih mejnih stanjih

Tip utrditve	Togost		Odpornost		Mejni pomik	
	K_c (kN/mm)	Utrjen/neutrjen	H_{max} (kN)	Utrjen/neutrjen	d_u (mm)	Utrjen/neutrjen
Neutrjen	18,33	–	45,2	–	20,0	–
1	21,53	1,17	123,6	2,73	22,5	1,13
2	27,00	1,47	169,8	3,76	27,5	1,38
3	35,45	1,93	191,5	4,24	30,3	1,51
4	40,30	2,20	188,6	4,17	32,5	1,63

Preglednica 3 • Učinek utrjevanja

med preiskavo posameznega zidu. Kapaciteto sipanja energije smo analizirali s primerjavo med disipirano histerezno energijo, E_{hys} , in kumulativno vhodno energijo, E_{inp} , potrebno za deformacijo zidu od začetka preiskave do pomika, pri katerem razmerje analiziramo. Disipirano energijo smo iz vrednotili na podlagi izmerjenih histereznih odvisnosti med vodoravno silo in pomikom. Količino disipirane energije v enem ciklu obremenjevanja predstavljata površina histerezne zanke med dvema zaporednima amplitudnima vrhovoma, kumulativno disipirano energijo pa vsota površin vseh histereznih zank od začetka preiskave do obravnavane amplitude pomika. 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. Razmerja med disipirano histezno in kumulativno vhodno energijo pri posameznih značilnih mejnih stanjih so izračunana v preglednici 4, razmerja med vhodno oziroma disipirano energijo pri meji nastanka poškodb ($E_{hys,cr}$, $E_{inp,cr}$) in porušitvi ($E_{hys,col}$, $E_{inp,col}$) glede na vhodno oziroma disipirano energijo pri maksimalni odpornosti ($E_{hys,max}$, $E_{inp,max}$) pa so izračunana v preglednici 5.

Kot lahko ugotovimo, razmerja niso bistveno odvisna od tipa utrditve. Lahko tudi ugotovimo, da so razmerja stabilna, vse dokler v zidu ne nastanejo resne poškodbe tik pred porušitvijo. Opažanja so v skladu z mehanizmi obnašanja.

Tip utrditve	Meja poškodb	Maksimalna odpornost	Porušitev
	$\frac{E_{hys}}{E_{inp}}$	$\frac{E_{hys}}{E_{inp}}$	$\frac{E_{hys}}{E_{inp}}$
Neutrjen	0,47	0,42	0,51
1	0,30	0,30	0,43
2	0,30	0,32	0,41
3	0,29	0,29	0,37
4	0,31	0,30	0,37

Preglednica 4 • Razmerja med disipirano histerezo in kumulativno vhodno energijo, E_{hys}/E_{inp} , pri posameznih mejnih stanjih

Tip utrditve	Vhodna		Disipirana	
	$\frac{E_{inp,cr}}{E_{inp,max}}$	$\frac{E_{inp,coll}}{E_{inp,max}}$	$\frac{E_{hys,cr}}{E_{hys,max}}$	$\frac{E_{hys,coll}}{E_{hys,max}}$
Neutrjen	0,01	1,72	0,02	2,11
1	0,02	1,53	0,02	2,21
2	0,01	1,30	0,01	1,64
3	0,01	1,26	0,01	1,59
4	<0,01	1,25	<0,01	1,51

Preglednica 5 • Razmerja med disipirano histerezo oziroma kumulativno vhodno energijo na meji nastanka poškodb in porušitve glede na energijo pri maksimalni odpornosti

5 • POVZETEK IN SKLEPI

Raziskovali smo možnost protipotresnega utrjevanja kamnitih zidov z oblogo, armirano s kompozitnimi materiali. Z zidovi, ki smo jih sezidali v laboratoriju, smo ponazorili trislojno kamnito zidovje iz neobdelanega kamna, značilno za starejše hiše in stavbe arhitekturne kulturne dediščine. Sezidali smo dvanajst zidov, med katerimi smo jih deset namenili za ciklične strižne preiskave, s katerimi ugotavljamo obnašanje zidov pri potresni obtežbi. Osem zidov smo utrdili z oblogo z armaturo iz polimerov, ojačanih s steklenimi vlakni (GFRP), dva zidova pa smo za primerjavo preiskali v osnovnem, neutrjenem stanju. Med seboj smo primerjali dve različni vrsti oblog, ki smo ju na površino zidov nanесли na štiri različne načine. Pri treh tipih utrditve smo

zid obložili z navpično oziroma diagonalno položeno GFRP-mrežo v 15 do 20 mm debelom sloju mikroarmirane cementne malte, pri enem tipu utrditve pa s 30 cm širokimi trakovi iz GFRP-tkanine, ki so bili z epoksidno smolo nalepljeni na z malto izravnano površino zidu. Načini nanosa oblog so se med seboj razlikovali: na eni strani ali na obeh straneh zidu, s sidri ali brez njih, nanos na nepoškodovan ali predhodno poškodovan zid.

Preiskave so nakazale, da je lahko učinkovitost oblaganja kamnitega zidovja s polimernimi oblogami nepričakovano velika. Primerjava med odpornostjo in sposobnostjo deformiranja med osnovnim, neutrjenim zidom in zidovi, utrjenimi s polimernimi oblogami, v danem primeru pokaže, da se odpornost kamnitega

zidu z oblaganjem lahko poveča tudi do štirikrat. Izboljšanje sposobnosti deformiranja in sipanja energije ni toliko izrazito, so pa te sposobnosti pri utrjenih zidovih še vedno do 50 % večje kot pri zidovih v osnovnem stanju, odvisno od tipa utrditve. Oblaganje s polimerno oblogo poveča tudi togost zidu. Najboljše rezultate sta dali obojestranski oblogi z armaturo v obliki mreže ali tkanine v diagonalnih smereh, ki sta bili sidrani v zid. Na podlagi rezultatov preiskav ne moremo sklepati, da bi na učinek utrditve lahko bistveno vplivale predhodno nesanirane poškodbe. Čeprav lahko ugotovimo, da so kompozitne obloge učinkovito povečale odpornost in deformacijske sposobnosti tradicionalno zidanega trislojnega kamnitega zidovja, je treba pred njihovo širšo uvedbo v prakso razviti in preizkusiti tehnološke rešitve, ki bodo preprečile razslojevanje zidovja in preprečile hipno upadanje odpornosti in togosti v fazi rušenja.

6 • ZAHVALA

Raziskave, ki jih predstavljamo v članku, so del aplikativnega raziskovalnega projekta L2-0578, ki ga je financirala Agencija Republike Slovenije

za raziskovalno dejavnost (ARRS), sofinanciralo pa podjetje Sika, d. o. o., iz Trzina, slovenska podružnica matične korporacije Sika AG iz

Švice, in programa P2-0273 Gradbeni objekti in materiali, ki ga prav tako financira ARRS. Pri pripravi programa raziskav so sodelovali strokovnjaki iz podjetja Sika iz Ljubljane in Züricha, materiale za utrjevanje je dobavila italijanska podružnica korporacije, zidove pa so utrdili inštruktorji slovenske podružnice podjetja Sika.

7 • LITERATURA

- Dolce, M., Massi, A., Goretti, A., Damage to buildings due to 1997 Umbria-Marche earthquake, Proceedings, Seismic damage to masonry buildings, A. A. Balkema, Rotterdam, 1999.
- 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., Simundić, G., Page, A., Cyclic In-plane Shear Behaviour of Unreinforced Masonry Panels Retrofitted with Fibre Reinforced Polymer Strips, Proceedings, 8th International Masonry Conference, Dresden, 2010.
- Schwegler, G., Masonry Construction Strengthened with Fiber Composites in Seismically Endangered Zones, Proceedings, 10th European Conference on Earthquake Engineering, Dunaj, 1994.
- Tomažević, M., Apih, V., Ojačevanje kamnitega zidovja z zidovju prijaznim injektiranjem, Gradbeni vestnik, 42(1/2): 45–48, 42(3/4): 115–122, 1993.
- Tomažević, M., Weiss, P., Lutman, M., Eksperimentalna raziskava povezovanja zidov opečnih hiš z jeklenimi vezmi, Gradbeni vestnik, 44(4/5/6): 123–129, 1995.
- Tomažević, M., Lutman, M., Klemenc, I., Weiss, P., Obnašanje zidanih stavb med potresom v Bovcu 12. 7. 2004, Gradbeni vestnik, 54(1): 2–12, 2005.
- Tomažević, M., Gams, M., Oblak, A., Protipotresno utrjevanje opečnih zidov s kompozitnimi oblogami, Gradbeni vestnik, 60(10): 246–257, 2011.
- Triantafyllou, T.C., Fardis, M.N., Strengthening of Historic Masonry Structures With Composite Materials, Materials and Structures, 30(8): 486–496, 1997.
- Uranjek, M., Žarnić, R., Bokan-Bosiljkov, V., Design of Mortars and Grouts for Restoration and Strengthening of Historic Buildings, Proceedings of the 2nd Historic Mortars Conference and RILEM TC 203-RHM Repair Mortars for Hystoric Masonry final Workshop, Prague, 2010.
- Vintzileou, E., Grouting of three-leaf stone masonry: types of grouts, mechanical properties of masonry before and after grouting, Proceedings, Structural analysis of historical constructions, Vol.1., Delhi, 2006.