

POTRESNI ODZIV VEČETAŽNIH STRIŽNIH ZIDANIH STEN IN UČINEK UTRJEVANJA S KOMPOZITNIMI OBLOGAMI

SEISMIC RESPONSE OF MULTISTOREY PLAIN MASONRY WALLS AND EFFICIENCY OF STRENGTHENING WITH COMPOSITES

Petra Triller, univ. dipl. inž. grad.
akad. prof. dr. Miha Tomažević, univ. dipl. inž. grad.
doc. dr. Matija Gams, univ. dipl. inž. grad.

Zavod za gradbeništvo Slovenije,
Dimičeva ulica 12, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 624.042.7:692.2(497.4)

Povzetek | V članku sta predstavljeni dve temi. Prva obravnava potresno obnašanje večetažnih sten, sezidanih iz modularnih zidakov, s poudarkom na opazovanju mehanizmov odziva in porušitve, ki se razvijejo v večetažnih stenah z odprtini. Druga tema je osredotočena na raziskave utrjevanja takšnega zidovja z malto, armirano z mrežicami iz steklenih vlaken. Za raziskave smo na Zavodu za gradbeništvo Slovenije zgradili in preiskali posamezne zidove in večji trietažni preizkušane v naravni velikosti. V cikličnem strigu pri konstantnem tlaku smo preizkusili več referenčnih in utrjenih zidov ter trietažni model dimenzij 4 x 4 m v tlorisu in višine 6,7 m. Trietažni model smo najprej obremenili do večjih, a popravljivih poškodb. Zatem smo poškodovani preizkušane utrdili s kompozitnimi oblogami iz malte, armirane s steklenimi vlakni (GFRP), ter ga ponovno preiskali, tokrat skoraj do porušitve. V obeh primerih je bil odziv modela na vodoravno obtežbo s t. i. etažnim mehanizmom, pri katerem se večina poškodb skoncentrira v zidovih najšibkejše etaže. V zidovih smo opazili tipične strižne poškodbe z diagonalnimi razpokami. Potresno obnašanje posameznih zidov je bilo zelo podobno odzivu zidnih slopov večetažnega preizkušanca. Rezultati kažejo, da je mogoče z ustreznim načinom utrjevanja zidov doseči občutno izboljšanje potresnega obnašanja.

Ključne besede: nearmirano zidovje, laboratorijske preiskave, ciklične strižne preiskave, GFRP-kompoziti, utrjevanje

Summary | Two topics are presented in the paper. The first one deals with seismic behaviour of multistorey masonry shear walls with openings built from hollow clay units. Special attention is given to the response and failure mechanisms. The second one deals with strengthening of such masonry with fibre reinforced mortar coatings. To study these topics, full scale walls as well as a full scale three storey model were built and tested at Slovenian National Building and Civil Engineering Institute. Reference and strengthened walls as well as the three storey building model with plan dimensions 4 m x 4 m and height of 6.7 m were tested in cyclic shear under constant compressive load. First, the multistorey model was tested in its original state until major but still repairable damage. Then, the damaged model was strengthened with glass fibre (GFRP) mesh reinforced mortar and re-tested to near collapse. In both cases the response to horizontal loads was with storey mechanism, with the majority of damage concentrated in the walls of the weakest storey. The dominant damage was of the diagonal shear type. The seismic response of individual walls tested in cyclic shear was very similar to what was observed in the walls

of the multistorey model. Results show that seismic response of masonry structures can be significantly improved by an appropriate strengthening method.

Key words: unreinforced masonry; laboratory testing; cyclic shear test; glass fibre reinforced polymers (GFRP), strengthening

1 • UVOD

Pred letom 1964, ko so začeli veljati prvi potresni predpisi, je bilo v urbanih območjih Slovenije sezidanih več večetažnih stanovanjskih stavb v tehnologiji nepovezanega opečnega zidovja (brez navpičnih potresnih vezi). Takrat sodobna gradnja ne dosega zahtev danes veljavnih predpisov. Za Ljubljano je to računsko prikazano npr. v delu Lutmanove (Lutman, 2010). Ker so izkušnje s potresnim obnašanjem takih stavb omejene in ker takšne stavbe predstavljajo velik delež našega stavbnega fonda, je njihov potresni odziv smiselno natančneje raziskati. Raziskave so še posebno zanimive, ker smo v teh preiskavah prvič v zgodovini ZAG preizkusili trietažni preizkušaneec v naravni velikosti in tako opazovali odziv celotnega konstrukcijskega sistema. Take preiskave predstavljajo pomembno nadgradnjo od raziskovanja odziva zidovja na posameznem zidnem slopu in ponujajo nov vpogled v potresni odziv in porušne mehanizme zidanih stavb.

Prej omenjeni stavbni fond je nemogoče nadomestiti, zato je treba najti učinkovite načine njegove utrditve oz. izboljšanja njegove potresne odpornosti. Načine utrjevanja in njihov vpliv pa je še bolj pomembno raziskati na celotnih konstrukcijskih sklopih, zato smo trietažni preizkušaneec izkoristili tudi za preučevanje možnosti utrditve takih stavb z malto, ki je armirana z mrežico iz steklenih vlaken. Tak način utrjevanja se je namreč uveljavil kot najbolj učinkovit in finančno smotrni pri popotresni obnovi stavb v Italiji.

Raziskave obnašanja zidovja na potresno obtežbo se običajno opravijo z laboratorijsko preiskavo na posameznem zidnem slopu oz. zidu. Tak zid predstavlja tipičen zid iz dejanske stavbe, zato se pri preizkušanju skušamo čim bolj približati pogojem, ki nanj delujejo v stavbi med potresom. Slop se zato obremeni s konstantno vertikalno oz. tlačno obremenitvijo in z vodoravnimi obremenitvami simulira potresne obremenitve. Takšne preiskave se na podoben način opravljajo že od leta 1965, med drugimi so njihove rezultate predstavili Mayes in Clough (Mayes, 1975), Calvi (Calvi, 1996) in van Vliet (van Vliet, 2004).

Pogosto pri preizkušanju posameznih zidnih slopov poleg prevladujočega mehanizma, ki je običajno strižni z diagonalnimi razpokami ali pa upogibni s tlačno porušitvijo na vogalih, zasledimo tudi fenomen sukanja zidu (ang. rocking), ki ga pri potresno poškodovanih stavbah ali pa testih in-situ ne opazimo. Na pojav takšnih spremljajočih mehanizmov poleg geometrije zidu, materialnih karakteristik zidovja in stopnje vertikalnih napetosti ključno vplivajo robni pogoji, ki jih zagotovimo v preiskavi (Tomažević, 2016).

Pojav različnih mehanizmov odziva, ki jih po potresnih ne opazimo, je najverjetneje posledica idealizacije vpetostnih robnih pogojev pri preiskavi posameznega zidu. Da bi to idealizacijo v čim večji meri izločili iz raziskave in hkrati preizkusili odziv cele konstrukcije, vključno z interakcijo med slopi, parapeti in prekladami ter med zidovjem in stropnimi ploščami, smo v sklopu te raziskovalne naloge zgradili večetažni preizkušaneec z odprtiniami. Preizkušaneec predstavlja tipično nearmirano in nepovezano večetažno stavbo, ki je bila v Sloveniji in njeni okolici zgrajena pred letom 1970. Takšne preiskave so v raziskovalnem svetu dokaj redke, saj predstavljajo precejšen finančni in tudi izvedbeni zalogaj. Od drugih raziskav cikličnih strižnih preiskav na večetažnih preizkušancih omenimo npr. preiskave Leiva (Leiva, 1991) ter Heerema (Heerema, 2014), vendar se vsaka posamezna raziskava osredotoča na specifično problematiko, in ne podaja odgovora na vprašanja, na katera smo želeli odgovoriti v raziskavi.

Drugi razlog za preiskavo modela večetažne stavbe v naravnem merilu je eksperimentalna analiza možnosti utrjevanja zidanih objektov s sodobnimi tehnikami sanacije. Pri tem je pomembno poudariti, da raziskava na večetažni stavbi omogoča preučevanje sistemske rešitve utrjevanja, ki pri preiskavah posameznih zidov ni mogoča.

Ključni problem utrjevanja zidovja je, da mora biti postopek učinkovit in ekonomičen, a hkrati nezahteven za gradnjo. Poleg izboljšanja nosilnosti mora zagotavljati tudi povečano

sposobnost sipanja energije, duktilnost in kapaciteto pomikov. Klasične načine utrjevanja (prefugiranje, injektiranje, uporaba armiranih ometov ...) so v zadnjih dveh desetletjih začele nadomeščati nove tehnike, ki temeljijo na uporabi kompozitnih polimernih (FRP) oblog. Zanje je značilno, da so hitrejše, čistejše, enostavnejše in cenovno vedno bolj dostopne, hkrati pa ne zahtevajo začasnega umika ljudi iz stavb, saj pri izvedbi ne posegamo v geometrijo nosilnih elementov. Poznamo več načinov aplikacije FRP-materialov, na tem mestu omenimo tri glavne skupine: uporaba FRP-tkanin, ki jih z epoksidno smolo lepimo na zid, oblaganje zidov s kompozitnimi mrežami v kombinaciji z mrežo iz polimernih vlaken in sidri ter uporaba deformabilnih polimerov, s katerimi opečni zid povežemo s kompozitnimi polimeri. Omenjene načine utrjevanja so na primeru opečnih zidov preiskovali Schwegler (Schwegler, 1994), Triantafillou (Triantafillou, 2001) in Gams s sodelavci (Gams, 2014).

Metoda utrjevanja s kompozitnimi mrežami in z vlakni ojačano malto je že bila potrjena na primeru armiranobetonskih (v nadaljevanju AB) konstrukcij (Hollaway, 1999), v primeru zidovja, predvsem zgrajenega iz votlakov, pa njena učinkovitost še ni dokazana v celoti. Z željo po preučevanju takšne tehnike utrjevanja preiskave osnovnega (neutrjenega) preizkušanca nismo izvedli do porušitve, temveč smo jo prekinili, ko so se v zidovih pojavile večje, a še popravljive razpoke. V nadaljevanju smo večetažni preizkušaneec utrdili s FRP-materiali in ga ponovno preizkusili; tokrat praktično do porušitve. Poleg večetažnega preizkušanca smo v osnovnem in utrjenem stanju preizkusili tudi posamezne zidne slope, s čimer smo pridobili možnost ocene ustreznosti zagotovljenih robnih pogojev v cikličnih strižnih preiskavah.

Raziskovalna naloga, v kateri nas je zanimalo, kako se tipična večetažna stanovanjska stavba iz 70. let prejšnjega stoletja obnaša pri potresu in kakšna je učinkovitost modernih tehnik njenega utrjevanja oziroma sanacije, je bila v krajši različici že predstavljena na 38. zborovanju gradbenih konstruktorjev Slovenije, na tem mestu pa podajamo razširjeno analizo obravnavane problematike.

2 • MATERIALI

2.1 Zidaki

Za gradnjo preizkušancev so bili uporabljeni opečni votlaki z nominalnimi dimenzijami 290/190/190 mm (dolžina/širina/višina), ki jih v skladu z Evrokodom 6 (SIST EN 1996-1-1) uvrščamo v skupino 2 (slika 1). Karakteristična tlačna trdnost zidakov, določena skladno s SIST EN 771-1, znaša 15 MPa.



Slika 1 • Opečni votlak MB 29-19.

2.2 Malta

Zidaki so bili med seboj povezani s podaljšano cementno malto, ki je bila zmešana na gradbišču. Sestavine za malto so bile odmerjene v volumskem razmerju cement : apno : pesek = 0,5 : 1 : 8. Količina dodane vode je bila takšna, da je mešanici ustrezal razlez približno 170 mm.

Upogibno in tlačno trdnost malte smo določili s preizkušanjem prizem (40/40/160 mm) v skladu s standardom EN 1015-11. Dodatno smo preizkusili tlačno trdnost malte na kockah (70/70/70 mm). Teste mehanskih lastnosti malte smo naredili pri starosti 28 dni in v času cikličnih strižnih preiskav zidovja. Povprečna vrednost tlačne trdnosti malte pri starosti 28 dni na prizmah ($f_{m,prizma,28}$) je znašala 2,0 MPa, na kockah ($f_{m,kocka,28}$) pa 1,8 MPa. Pri enaki starosti

je bila povprečna upogibna trdnost malte na prizmah ($f_{x1,28}$) 0,7 MPa. Trdnostne karakteristike malte so zbrane v preglednici 1.

2.3 Beton in jeklo za AB-plošče

Temeljna plošča in etažne plošče so bile armiranobetonske, armirane z armaturnimi mrežami Q503. Beton kvalitete C30/37 je bil izdelan v betonarni in pripeljan na gradbišče. Med betoniranjem so bili vzeti vzorci betona za določitev tlačne trdnosti skladno s standardom SIST EN 12390-3. Povprečna vrednost izmerjene tlačne trdnosti pri starosti 28 dni, določena na kockah s stranico 150 mm, je znašala 40,8 MPa.

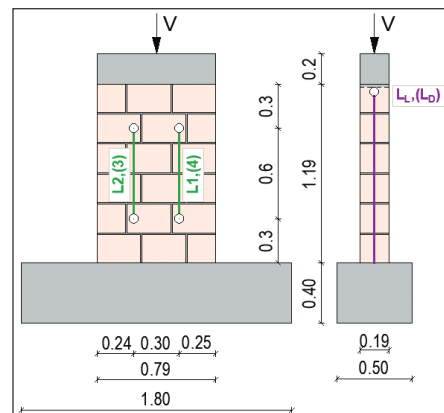
2.4 Trdnostne in deformabilnostne lastnosti zidovja

Tlačno trdnost zidovja smo določili na treh preizkušancih dimenzij dolžina/višina/debelina = 79/119/19 cm skladno s standardom EN 1052-1. Povprečna tlačna trdnost zidovja je znašala 3,8 MPa. Shema tipičnega preizkušanca in tlačna porušitev sta prikazani na slikah 2 in 3.

Odnos med napetostmi in deformacijami, ki ga pridobimo s preiskavo tlačne trdnosti zidovja, predstavlja temelj za izrednotenje modula elastičnosti zidovja. Tega določimo pri 1/3 vrednosti največje izmerjene napetosti v preiskavi in v primeru obravnavanega zidovja v povprečju znaša 4340 MPa. Podrobnejši rezultati preiskav za vse tri vzorce so v preglednici 2.

V skladu s standardom SIST EN 1052-3 smo na vzorcih iz treh zidakov določili začetno strižno trdnost zidovja f_{vo} in pa trenjski kot α (slika 4). Omenjeni karakteristiki smo izrednotili na osnovi rezultatov preiskav, v katerih so bili vzorci obremenjeni s kombinacijo tlačne in strižne obtežbe.

Glede na rezultate testov, kjer je bila porušitev strižnega tipa (8 vzorcev), je znašala začetna strižna trdnost zidovja 0,16 MPa, trenjski kot pa 39,5°, pripadajoči karakteristični vrednosti sta bili 0,13 MPa in 33,4°. Rezultati testiranih vzorcev so prikazani na sliki 5.



Slika 2 • Shema preizkušanca za test tlačne trdnosti zidovja z označenimi merilnimi mesti in vnosom sile (dimenzije so v metrih).



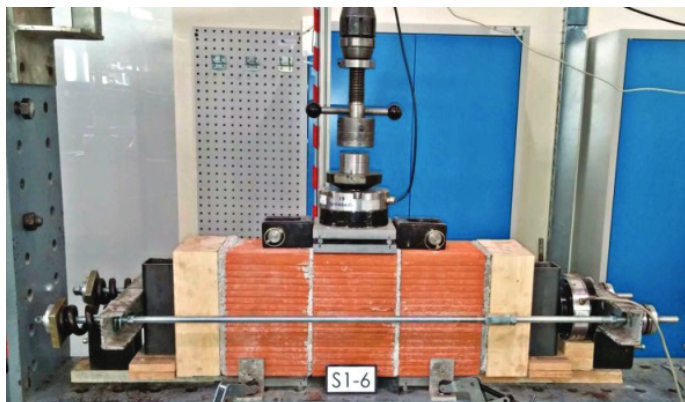
Slika 3 • Tlačna porušitev preizkušanca.

Oznaka	Trdnostna karakteristika	Povprečna starost vzorcev pri preiskavi (dni)	Število vzorcev	Povprečna vrednost (MPa)	Koeficient variacije (%)
$f_{m,kocka,28}$	Tlačna trdnost	28	16	1.8	18
$f_{m,prizma,28}$		28	30	2.0	24
$f_{m,kocka,55}$		55	58	1.8	20
$f_{m,prizma,55}$		55	110	2.4	24
$f_{x1,28}$	Upogibna trdnost	28	15	0.7	21
$f_{x1,55}$		55	55	0.8	21

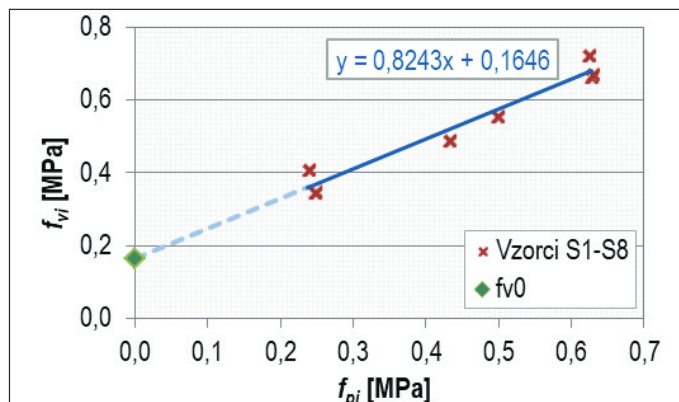
Preglednica 1 • Tlačna in upogibna trdnost malte.

Zid	Tlačna trdnost f_c (MPa)	Elastični modul E (MPa)
C1	3,9	4350
C2	4,1	4180
C3	3,4	4500
Povprečna vrednost	3,8	4340

Preglednica 2 • Rezultati tlačnih preiskav zidovja.



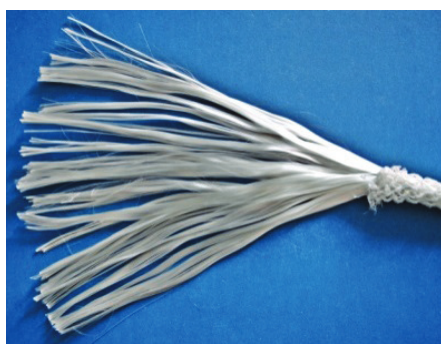
Slika 4 • Preizkuševališče za test začetne strižne trdnosti zidovja.



Slika 5 • Rezultati testov začetne strižne trdnosti zidovja.

2.5 Materiali za utrjevanje

Za utrjevanje nearmiranega zidovja smo v eksperimentalni študiji uporabili cementno malto, mreže iz steklenih vlaken in sidra iz steklenih vlaken.



Slika 6 • Mreža iz steklenih vlaken (levo) in sidra iz steklenih vlaken (desno).

Dvosmerne nosilne mreže iz steklenih vlaken (GFRP), zaščitene z alkalno odporno oblogo, imajo okna dimenzij 18/15 mm (slika 6, levo).

Vezivo pri utrjevanju predstavlja (sanacijska) malta, ojačena s steklenimi mikrovlakni. Zanje je značilna nizka vrednost modula elastičnosti,

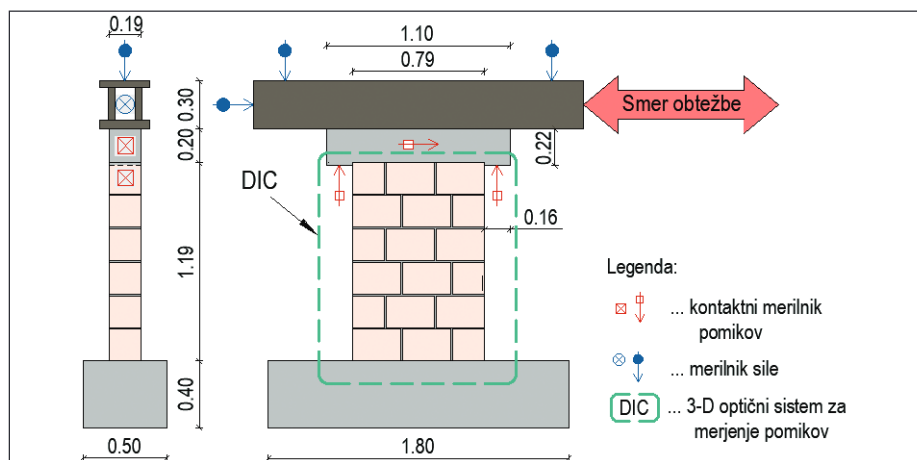
ki je podoben opeki oziroma slabemu betonu. Njena tlačna trdnost, določena skladno s standardom EN 998-2, znaša 27,1 MPa, modul elastičnosti, izrednoten na podlagi standarda EN 13412, pa je 8 GPa. Vrednosti tlačne trdnosti malte, ki je bila preizkušena v laboratoriju pri starosti 109 dni (ob preizkušanju večetažnega vzorca), je na kockah oziroma prizmah znašala 25,2 MPa oziroma 24,0 MPa, medtem ko je upogibna trdnost malte znašala 7,6 MPa.

Sistem utrjevanja dopolnjujejo sidra iz steklenih vlaken (slika 6, desno), ki predstavljajo povezavo med konstrukcijskim in utrjevalnim sklopom. Uporabljajo se za sidranje sanacijskega materiala v obstoječo konstrukcijo (zidovje, beton). Zanje je značilna majhna specifična teža, visoka trajnost in nezahtevna vgradnja. Sidra so vrvi debeline 10 mm, ki so sestavljene iz številnih tanjših vlaken, objetih z mrežico. Natezna trdnost slednjih znaša 2,5 GPa, modul elastičnosti pa 70 GPa.

3 • GEOMETRIJA PREIZKUŠANCEV

3.1 Zidovi

Zidovi za ciklične strižne preiskave so bili enakih dimenzij kot medokenski slopi v večetažnem preizkušancu za lažjo primerjavo in so znašale 1,19/0,79/0,19 m (višina/dolžina/debelina). Zidovi so bili za lažji transport in sidranje v laboratorijska tla zgrajeni na AB-temeljih. Vodravne in navpične rege so bile zapolnjene z malto debeline približno 1,0 cm. Minimalni preklap med zidaki je znašal 33 % dolžine zidaka. Na vrhu posameznega zidu je bila zgrajena zidna AB-vez, ki je služila enakomerni razporeditvi vertikalne in horizontalne obtežbe na zid. Shema zidu in instrumentacija med preiskavo sta prikazani na sliki 7.



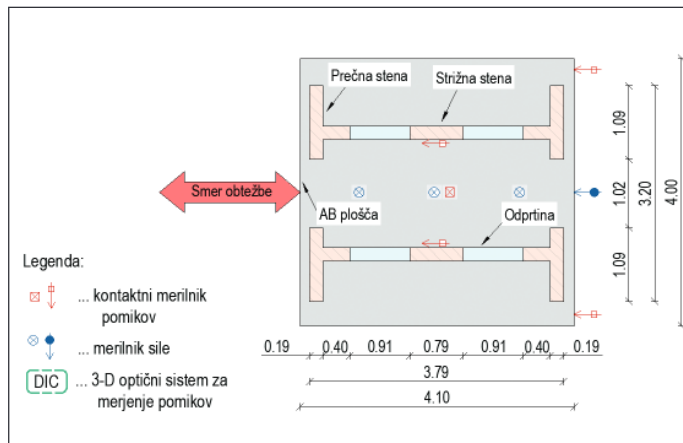
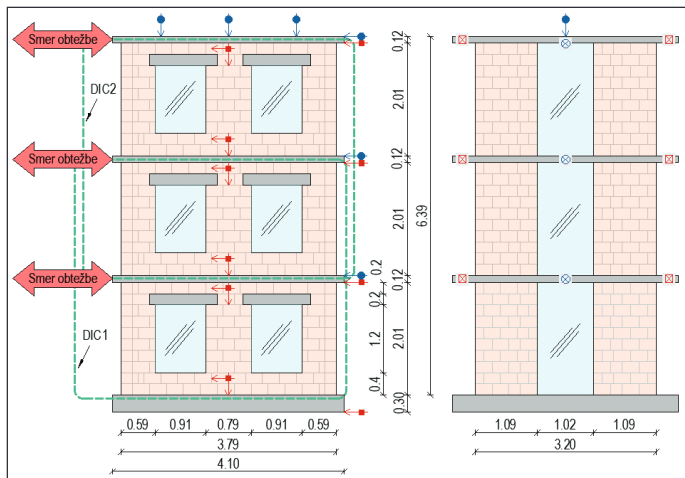
Slika 7 • Zidni preizkušanec in instrumentacija.

3.2 Večetažni model

Večetažni model je bil zgrajen na AB-temelju debeline 30 cm, ki je bil pritrjen v toga laboratorijska tla. Sestavljata ga še dve trietažni strižni steni s svetlo etažno višino 2,01 m, ki so ju na obeh koncih z namenom zagotavljanja stabilnosti z-

naj lasne ravnine povezovale štiri prečne stene. Tlorisni dimenziji preizkušanca sta 3,79 in 3,20 m. Debelina vseh zidov znaša 19 cm. Vodoravne in navpične rege debeline 10 mm so bile v celoti zapolnjene z malto. V vsaki od vzdolžnih sten sta bili v posamezni etaži po dve okenski odprtini,

vsaka s površino v velikosti 1,1 m². Horizontalno nosilno konstrukcijo so predstavljale AB-plošče debeline 12 cm, celotna višina zidnega preizkušanca pa je znašala 6,39 m. Shema modela s prikazanimi dimenzijami in instrumentacijo je prikazana na sliki 8.



Slika 8 • Geometrija in instrumentacija večetažnega preizkušanca.

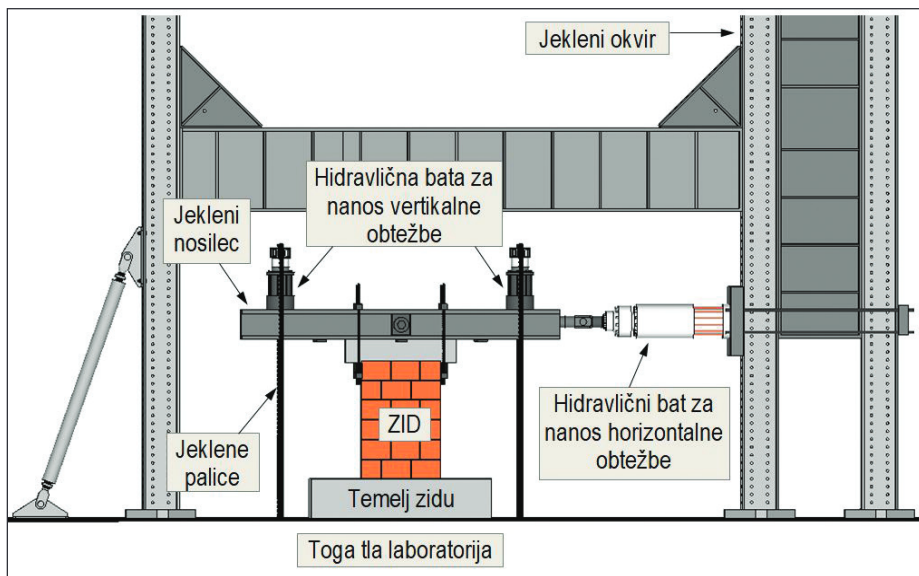
4 • POTEK PREISKAV IN INSTRUMENTACIJA

4.1 Preizkuševališče

Preizkuševališče za ciklične strižne preiskave zidov je sestavljeno iz togih laboratorijskih tal, na katera s prednapetimi vijaki togo vpneemo temelj zidu ter iz jeklenega okvirja, ki služi kot podpora za bat za vnos vodoravne obtežbe na zid. Na vrhu zidu sta zidna AB-vez in močan jekleni nosilec, preko katerega vnašamo vodoravno in navpično obtežbo. Vnašamo

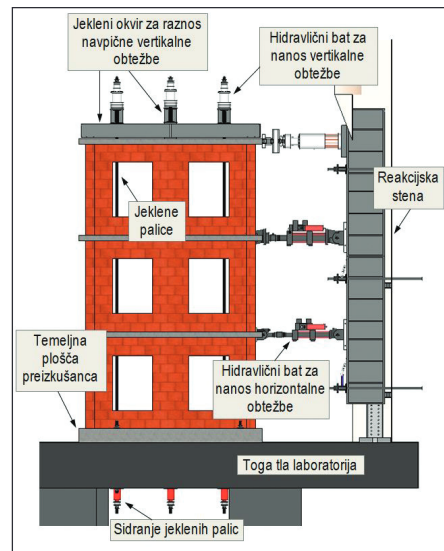
jo z dvema hidravličnima batoma na obeh koncih jeklenega nosilca, ki sta z jeklenimi palicami sidrana v klet. Shema preizkuševališča je na sliki 9.

Temelj večetažne konstrukcije je bil togo vpet v laboratorijska tla, preizkušanec pa je bil sezidan ob masivni reakcijski steni, na kateri so bili pritrjeni hidravlični bati za vnos vodoravne obtežbe. Na vrhu večetažnega pre-



Slika 9 • Pogled na preizkuševališče za ciklične strižne preiskave zidnih stopenj.

izkušanca je bila nameščena jeklena okvirna konstrukcija, ki je služila za raznos vertikalne obtežbe. Vertikalno obtežbo na model so povzročali trije hidravlični bati, ki so bili položeni na jekleno konstrukcijo in so bili z jeklenimi palicami sidrani v klet. Preizkuševališče je prikazano na sliki 10.



Slika 10 • Pogled na preizkuševališče za preiskavo trietažnega modela.

4.2 Instrumentacija

Med preiskavami smo s kontaktnimi merilniki pomikov (LVDT) opazovali in merili vodoravne in navpične pomike v različnih točkah, s pomočjo optičnega merilnega 3D-sistema GOM Aramis

pa smo merili polje pomikov po celotni površini vzdolžnih sten oziroma posameznih zidov. Za optimalno delovanje sistema je bila površina vseh preizkušancev na eni strani prepletkana z naključnim pikčastim kontrastnim vzorcem. Na drugi strani je površina preizkušanca prebarvana belo za lažje pregledovanje in označevanje nastalih razpok. Sile smo merili na vsakem od hidravličnih batov.

V primeru večetažnega modela smo kontrolirali tudi zdrs med zidovi in stropnimi ploščami v vsaki etaži na spodnjem in zgornjem stiku ter na obeh strižno obremenjenih stenah. Na etažnih ploščah so bili nameščeni pospeškomeri, s katerimi smo merili lastno nihanje preizkušanca. Za vzbujanje vibracij smo uporabili utež, ki je udarila na zgornjo etažno AB-ploščo.

Merilna mesta zidnih slopov in večetažnega preizkušanca so shematsko prikazana na slikah 7 in 8.

4.3 Potek preiskav

V prvem delu smo najprej opravili ciklične strižne preiskave zidov v njihovem osnovnem

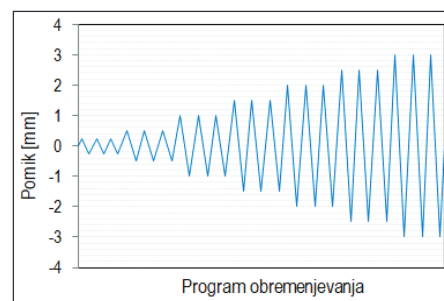
(tj. nepoškodovanem oz. neutrjenem) stanju do porušitve. Zatem smo preizkusili utrjene zidove. Tehnika utrjevanja je podrobneje predstavljena v poglavju 5. Trietažni model smo najprej preizkusili v neutrjenem stanju do poškodb, ki bi jih bilo še smiselno sanirati. Zatem smo model utrdili in ga ponovno preizkusili. Tokrat do porušitve.

Napetostno stanje zaradi lastne teže, ki smo ga simulirali v preiskavah zidov in modela, je ustrezalo napetostnemu stanju v večetažnih zidanih stavbah, ki so značilne za obdobje pred uvedbo prvih jugoslovanskih potresnih predpisov leta 1964. Ocenjena vrednost vertikalnih napetosti v zidovih spodnje etaže takšne stavbe znaša 0,90 MPa. Obtežba je bila ves čas preiskave konstantna.

Delovanje potresa v preiskavah simuliramo z vsiljevanjem vodoravnih pomikov v obliki cikličnega vzorca. Določeno vrednost pomika nanesimo trikrat izmenično v pozitivni in negativni smeri ter postopek ponavljamo z vedno večjimi pomiki vse

do konca preizkusa (slika 11). V primeru preizkusa večetažne konstrukcije na nivoju spodnje etažne plošče vsiljujemo pomike, na nivoju zgornjih dveh etažnih plošč pa v batih vnašamo obtežbo s silami tako, da je porazdelitev sil po višini modela linearna oz. trikotna.

Pri preiskavah zidov so bili na vrhu zidu ves čas preiskave preprečeni zasuki (ob konstantni vertikalni obtežbi).



Slika 11 • Shematični prikaz poteka vsiljenih pomikov ciklične strižne preiskave zidu.

no približno 10 mm. Zatem so bili na zidove položeni trakovi iz steklenih mrež. Načrt postavitve mrež je prikazan v preglednici 3. Kjer je bilo mogoče, smo z mrežami zidove ovili ali pa učinek ovijanja poskusili doseči z dodatnimi sidri. Mreže so bile zatem prekrte z zaključno plastjo malte.

Potek utrjevanja zidnih slopov je bil podoben, le da so bila tokrat sidra z epoksidnim lepilom sidrana spodaj v temelj, zgoraj pa v AB-preklado. Potek utrjevanja posameznega zidu je prikazan na sliki 12.

5 • TEHNIKA UTRJEVANJA

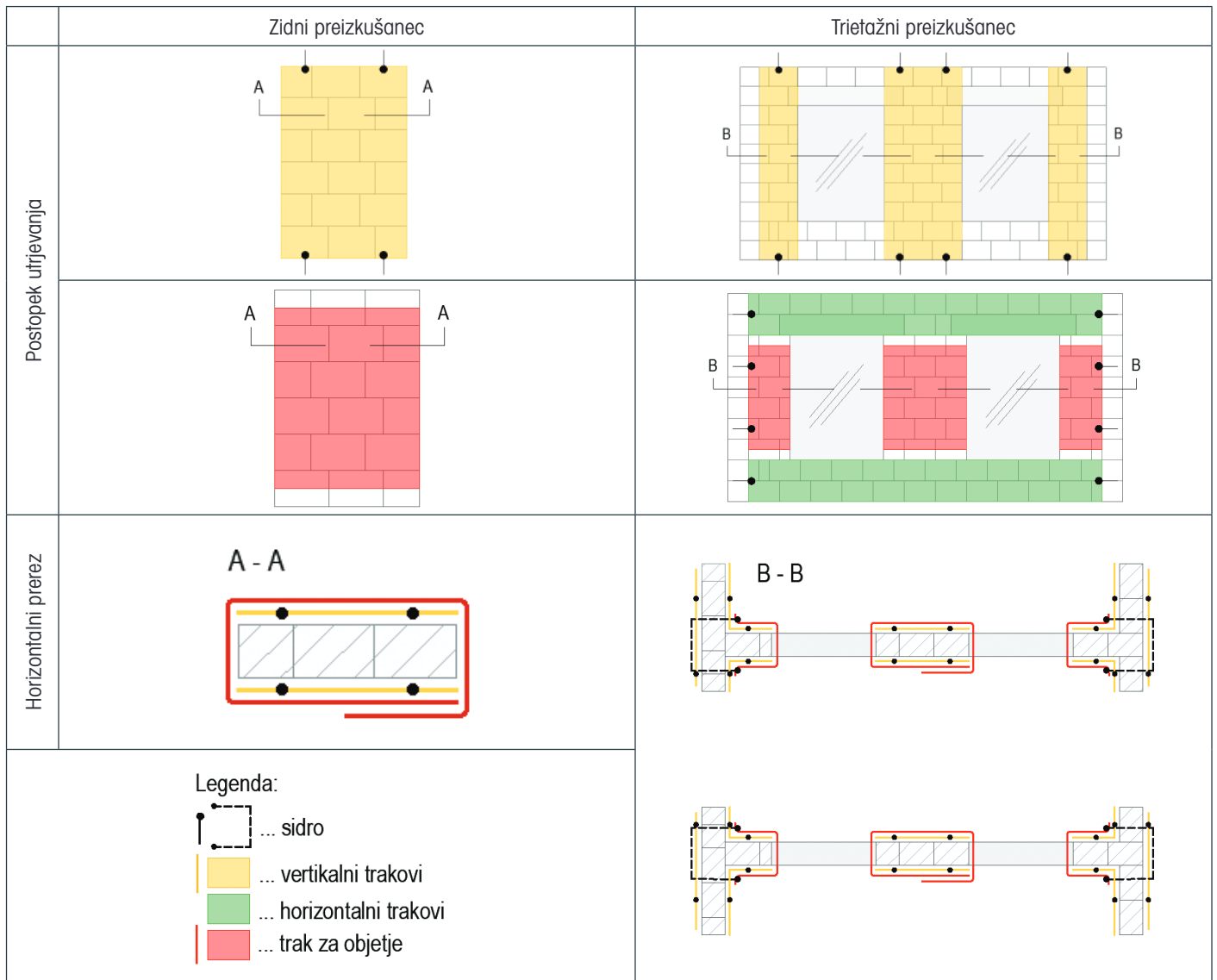
Vsi preizkušanci, tako zidovi kot tudi večetažna konstrukcija, so bili utrjeni na soroden način. Najprej so bila vgrajena sidra dolžine približno 50 cm. Sidra iz steklenih vlaken so služila trem namenom, in sicer za pritrjevanje kompozitne mreže v AB-temelj oziroma AB-ploščo, za povezovanje oblog med dvema etažama ter za sidranje oblog. Povezava med sidri in oblogo je bila zagotovljena

s tem, da so bila sidra razdeljena na več pramen, ki so bila pahljačasto razprostrta v oblogo. Le v primeru sidranja v temeljno ploščo so bila sidra v AB-ploščo prilepljena z epoksidnim lepilom.

V naslednjem koraku smo površine, za katere je bila predvidena utrditev, poškopili z vodo in nanje nanесли malto za utrjevanje z debeli-



Slika 12 • a) Vgradnja sider iz steklenih vlaken; b) nanos malte in razprostiranje sidrskih vlaken; c) nanos plasti malte čez vertikalni trak in izvedba ojetja zidu; d) zidni preizkušalec v utrjenem stanju.



Preglednica 3 • Shematski prikaz utrjevanja posameznega zidu in večetažnega preizkušane.

6 • REZULTATI CIKLIČNIH STRIŽNIH PREISKAV ZIDOV V OSNOVNEM IN UTRJENEM STANJU

6.1 Poškodbe in mehanizem porušitve

Referenčna (neutrjena) zidova W3 in W4 sta se na potresno obtežbo odzvala strižno. Prve vidne poškodbe so bile diagonalne razpoke, ki so se pojavile pri 0,04-% rotaciji zidu. Zasuk oz. rotacija zidu (Φ) je definirana kot razmerje med horizontalnim pomikom zidu na vrhu zaključne vezi (d) in višino zidu (h). S povečanjem obtežbe so se širile obstoječe in nastajale nove poševne razpoke, na stikih zidu s temeljem in z AB-preklado pa so se pojavile manjše horizontalne razpoke. Večina razpok je potekala po maltnih stikih, nekaj pa jih je potekalo diagonalno prek

zidakov. Proti koncu testov so se pričele stene zidakov krušiti in odpadati z zidu (slika 13a).

V primeru utrjenih zidov smo pri zasuku 0,04 % opazili horizontalne razpoke na vrhu in na dnu zidu ob stiku z AB-elementoma. Pri zidu W12 so se v nadaljevanju pojavile razpoke v osrednjem delu zidu, medtem ko jih pri zidu W11 nismo zaznali. V nadaljnjih fazah preiskave (in povečevanju zasuka zidu) je začela odstopati obloga na vogalih zidov. Sledilo je slično pokanje v zidu in pojav značilnih poševnih razpok po celotni osrednji površini zidov. Diagonalnim razpokam je

sledil odstop obloge na tem predelu in ob nadaljnjem povečanju obtežbe vertikalne razpoke na obeh stranskih delih zidov. V zadnjih fazah preiskav so se iz zidov trgala in pulila sidrna vlakna, obloge na vrhu oziroma na dnu zidu pa so odstopile in se uklonile (slika 13b). Napredovanje razslojevanja obloge in povečevanje poškodb v zidovju sta privedla do izgube sposobnosti zidu za prenašanje vertikalnih obremenitev oz. porušitve.

Treba je poudariti, da so poškodbe v primeru utrjenih zidov nastale za oblogo in jih med preiskavo nismo videli. Na podlagi meritev polja deformacij z optičnim sistemom smo lahko sklepali o razvoju in vzorcu poškodb pod oblogo. Dejanske poškodbe zidu smo si lahko ogledali šele, ko smo po preiskavi odstranili oblogo (slika 13c).



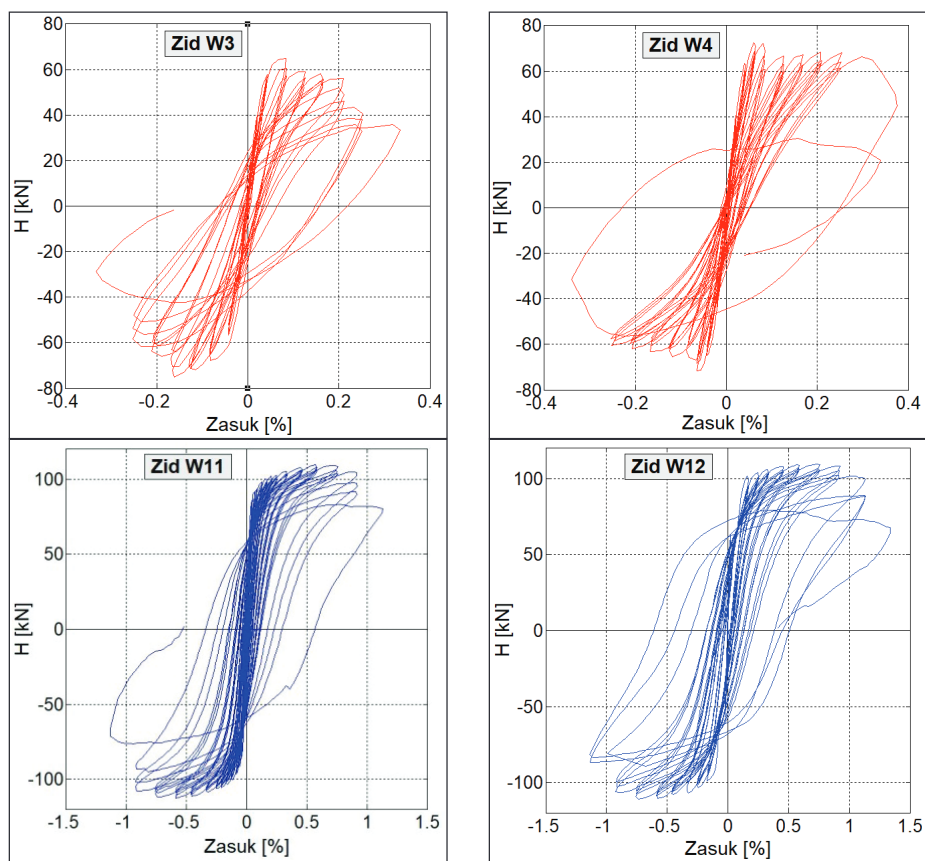
Slika 13 • a) Zid W4 po koncu preiskave; b) razslojevanje in uklon obloge zidu W12; c) poškodbe zidu pod oblogo (po odstranitvi obloge).

6.2 Strižna odpornost in sposobnost deformiranja

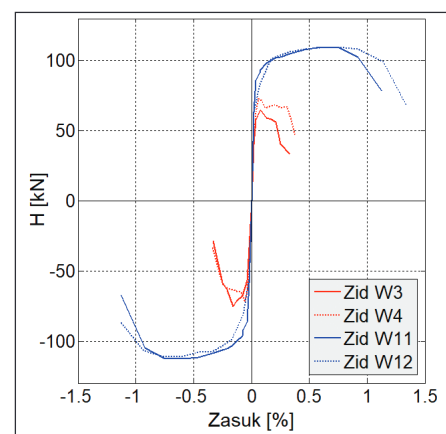
Ekspirimentalno dobljene histerezne odvisnosti med vodoravno obtežbo H in zasukom

Φ so za referenčna in utrjena zidova prikazane na sliki 14. Primerjava strižne odpornosti

in deformacijske kapacitete je razvidna iz ovojnic obravnavanih zidov na sliki 15.



Slika 14 • Histerezne krivulje odvisnosti med strižno odpornostjo in zasukom za referenčna (W3 in W4) ter utrjena zidova (W11 in W12).



Slika 15 • Histerezne ovojnice odvisnosti med strižno odpornostjo in zasukom za referenčna (W3 in W4) ter utrjena zidova (W11 in W12).

Potresni odziv zidov v smislu odpornosti H , pomika d in zasuka Φ smo izvednotili pri treh značilnih mejnih stanjih (MS), ki smo jih definirali takole:

- mejno stanje nastanka razpok, pri katerem je dosežena meja elastičnosti, oz. ob pojavu prvih vidnih razpok;
- mejno stanje maksimalne odpornosti, pri katerem je dosežena maksimalna odpornost preizkušanca;
- mejno stanje blizu porušitve oz. ob zaključku preiskave.

Rezultati omenjenih količin pri opisanih mejnih stanjih in učinek utrjevanja so prikazani v preglednicah 4 in 5. Vrednosti kažejo, da sta se z utrjevanjem zidov odpornost pri nastanku prvih razpok in maksimalna strižna odpornost povečali za več kot 50 %.

Deformacijska kapaciteta v smislu največjega doseženega pomika se je z utrjevanjem potrojila, prav tako se je znatno povečala vrednost pomika, pri katerem je bila dosežena maksimalna odpornost zidov – faktor povečave je v povprečju znašal 7. Efektivna togost vzorcev se je z utrjevanjem povečala približno za tretjino.

Zid	MS nastanka razpok			MS maksimalne odpornosti			MS blizu porušitve		
	H_e (kN)	d_e (mm)	θ_e (%)	H_{max} (kN)	d_{max} (mm)	θ_{max} (%)	$H_{poruš}$ (kN)	$d_{poruš}$ (mm)	$\theta_{poruš}$ (%)
W3	57,24	0,50	0,04	70,05	1,46	0,12	31,04	3,97	0,33
W4	64,15	0,49	0,04	72,61	0,72	0,06	40,29	4,25	0,36
W11	85,95	0,50	0,04	111,08	7,00	0,59	72,72	13,47	1,13
W12	119,36	0,75	0,06	110,33	9,03	0,76	77,26	14,72	1,24

Preglednica 4 • Rezultati preiskav: odpornost H , pomiki d in zasuki Φ pri izbranih mejnih stanjih.

Zid	Efektivna togost		Odpornost		Mejni pomik	
	K_e (kN/mm)	U/R	H_{max} (kN)	U/R	d_u (mm)	U/R
W3	114,2	1,36	70,05	1,55	3,79	3,51
W4	129,7		72,61			
W11	171,2		111,08			
W12	159,5		110,33			

Preglednica 5 • Učinek utrjevanja (U = utrjeni, R = referenčni).

7 • REZULTATI PREISKAV VEČETAŽNEGA MODELA V OSNOVNEM IN UTRJENEM STANJU

7.1 Poškodbe in mehanizem porušitve

Prve vidne poškodbe po začetku preiskave so bile diagonalne razpoke, ki so se pojavile simetrično na obeh vzdolžnih stenah in v vseh zidnih slopih prve in druge etaže. Nastale so pri zasuku prve etaže v vrednosti 0,10 % (etažnem zamiku 2 mm) in so občutno spremenile togost prve etaže preizkušanca. V tej fazi je zgornja (tretja) etaža ostala nepoškodovana.

Z naraščanjem horizontalne obtežbe so se diagonalne razpoke širile in bilo jih je vedno več. Večinoma so potekale po vertikalnih in horizontalnih regah. Pri zasuku prve etaže za 0,20 % je bila dosežena maksimalna odpornost spodnje etaže in celotnega preizkušanca. Strižna odpornost modela je znašala 285 kN. V nadaljevanju so se poškodbe pričele izrazito koncentrirati v spodnji etaži, ob tem pa sta se višji etaži razbremenili in tam ni bilo novih poškodb. Preiskavo osnovnega preizkušanca smo prekinili pri 0,24-% zasuku prve etaže. Detajlni pregled modela po koncu preiskave je pokazal, da so v spodnji in srednji etaži nastale strižne diagonalne razpoke, v

srednji etaži pa so se pojavile tudi manjše razpoke v parapetih. Prečne stene preizkušanca in celotna zgornja etaža so ostale v celoti nepoškodovane (oz. v elastičnem območju). Vrtenja zidov ni bilo in posledično ni bilo niti horizontalnih razpok v vogalih zidnih slopov.

Po prekinitvi testa smo preizkušavec utrdili po postopku, opisanem v poglavju 5. Med preiskavo so se prve vidne razpoke pojavile pri isti stopnji potresne obtežbe kot v primeru osnovnega preizkušanca, tj. v fazi, ko je zasuk prve etaže znašal 0,10 %. Nastale so drobne diagonalne razpoke v zidnih slopih spodnje etaže ter manjše razpoke na stikih zidnih slopov in okenskih odprtih vseh etaž. V nadaljevanju so skladno s povečano potresno obtežbo nastajale nove diagonalno orientirane razpoke tudi v drugi etaži, medtem ko je bila zgornja etaža še vedno nepoškodovana. Pri zasuku spodnje etaže za 0,18 % so nastale vertikalne razpoke na stikih vzdolžnih in prečnih sten. Nadaljnje povečevanje horizontalnih pomikov je povzročilo nastanek horizontalnih razpok na stikih sten prve etaže in AB-plošče nad njimi.

Pri zasuku prve etaže za 0,44 % so nastale razpoke na robovih kompozitnih polimernih oblog. Na stikih prečnih in strižnih sten so nastale vertikalne razpoke. S povečevanjem obtežbe so se vse razpoke širile, nastale so nove poškodbe nad okenskimi odprtinami prve etaže in pod njimi, prav tako so bile v tej etaži opažene razpoke na mestu sidranja vertikalnega kompozitnega traku v zgornjo ploščo. Kljub raznolikim poškodbam so med celotno preiskavo prevladovali diagonalne strižne razpoke v medokenskih slopih.

Maksimalna odpornost (412 kN) je bila dosežena pri 0,60 % zasuku spodnje etaže. V tej fazi je prišlo do razslojevanja kompozitne obloge (odstopanje obloge od zidu) v slopih spodnje etaže. Preiskavo smo zaradi nevarnosti porušitve celotnega preizkušanca prekinili, ko je zasuk spodnje etaže znašal 1,39 %. V tej fazi sta bila medokenska zidna slopa prve etaže preprejena z diagonalnimi razpokami, medtem ko je bil obseg takšnih poškodb v drugi etaži znatno manjši. Zgornja etaža praktično ni bila poškodovana, opažene so bile le manjše razpoke v vogalih okenskih odprtih.

Med obema preiskavama večetažnega preizkušanca smo označevali vidne razpoke in opravljali meritve optičnega sistema za merjenje deformacij. V preglednici 6 je prikaza-

na primerjava markiranih razpok in posnetih največjih izmerjenih deformacij pri fazah, v katerih je bila dosežena maksimalna odpornost preizkušancev. Lokacije razpok se ujemajo z mesti, kjer so bile glavne deformacije največje.

Opazimo, da je sila v spodnji etaži utrjenega preizkušanca pri mejnem stanju razpok že presegla horizontalno odpornost osnovnega preizkušanca. Utrjevanje je povečalo tudi maksimalno odpornost etaž utrjenega preizkušanca, ki

etaže. V drugi etaži je poškodb že bistveno manj, medtem ko je odziv zgornje etaže praktično elastičen.

	Osnovni preizkušanec $\Phi = 0,20 \%$	Utrjeni preizkušanec $\Phi = 0,60 \%$
Razpoke na srednjem zidnem stolu spodnje etaže		
Potek glavnih deformacij		

Preglednica 6 • Poškodbe medokenskega zidnega stola in rezultati optičnih meritev osnovnega in utrjenega preizkušanca v fazah, v katerih je prišlo do dosega maksimalne odpornosti posameznega preizkušanca (oznaka Φ predstavlja zasuk spodnje etaže).

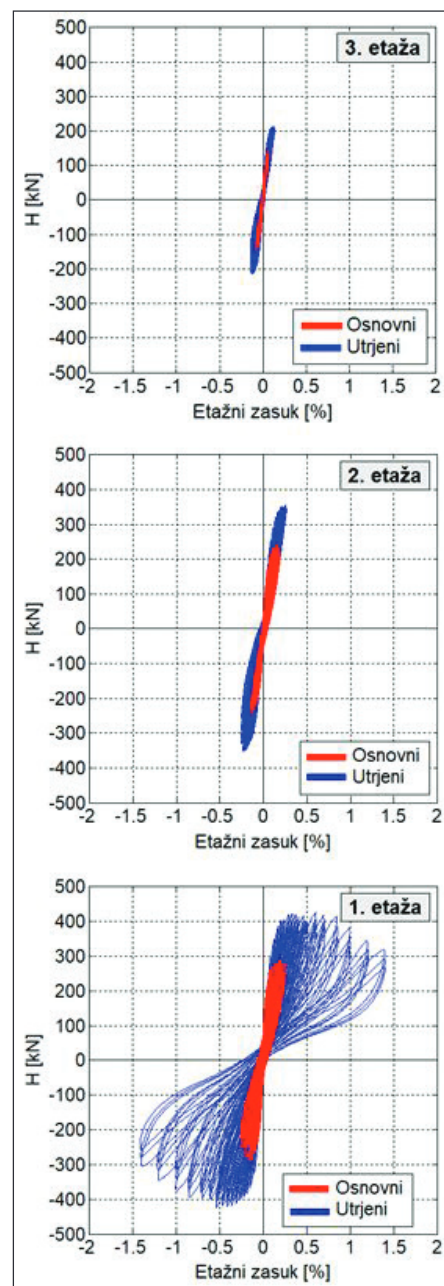
7.2 Strižna odpornost in sposobnost deformiranja

Histerezne krivulje v obliki horizontalna sila (H) – etažni zasuk (Φ) po posameznih etažah so za oba preizkušanca prikazane na sliki 16. Z rdečo barvo je prikazan odziv osnovnega modela, z modro pa utrjenega.

Za primerjavo potresnega odziva osnovnega in utrjenega preizkušanca smo definirali tri značilna mejna stanja, ki so bila določena analogno, kot za zidove. Prikazana so v preglednici 7.

se je v vseh etažah povečala za 45 %. Pomik pri maksimalni odpornosti utrjene konstrukcije je bil 3-krat večji kot pri neutrjeni konstrukciji.

Histerezne zanke kažejo, da so poškodbe in disipacija energije skoncentrirane v spodnji etaži. Vse do dosežene maksimalne odpornosti preizkušanca je bil stik med zidovjem in kompozitno oblogo popoln. Zatem sta sledili razslojevanje obloge in zidu ter širjenje razpok, ki je zmanjšalo horizontalno odpornost v spodnji etaži. Obnašanje utrjene konstrukcije ni bilo krhko, kar potrjujejo histerezne zanke prve



Slika 16 • Histerezne krivulje odvisnosti med strižno odpornostjo in zasukom po posameznih etažah za osnovni in utrjeni preizkušanec.

Začetna togost preizkušanca se je z utrjevanjem povečala manj (+12 %) kot v primeru referenčnih zidov (+36 %). Razlog za relativno manjše izboljšanje je verjetno to, da je bil model pred utrjevanjem že poškodovan, medtem ko so bili posamezni zidovi utrjeni v nepoškodovanem stanju.

Etraža	Preizkušaneec	MS nastanka razpok						MS maksimalne odpornosti				MS blizu porušitve	
		H_e	U/O	Φ_e	U/O	K_e	U/O	H_{max}	U/O	Φ_{max}	U/O	H_u	Φ_u
		(kN)	(/)	(%)	(/)	(kN/mm)	(/)	(kN)	(/)	(%)	(/)	(kN)	(%)
3	U	151	1,13	0,05	0,83	150,2	1,35	206	1,45	0,12	1,50	151	0,11
	O	134		0,06		111,1		142		0,08		-	-
2	U	251	1,13	0,08	0,80	156,1	1,41	344	1,45	0,24	1,60	351	0,23
	O	223		0,10		110,9		237		0,15		-	-
1	U	300	1,12	0,10	1,00	149,3	1,12	412	1,45	0,60	3,00	301	1,39
	O	268		0,10		133,3		285		0,20		-	-

Preglednica 7 • Rezultati preiskav za osnovni in utrjeni večetažni preizkušaneec: odpornost H , pomiki d in zasuki Φ pri izbranih mejnih stanjih ter učinek utrjevanja (oznaka »O« pomeni osnovni, »U« pa utrjeni preizkušaneec).

8 • SKLEPI

V prispevku smo raziskovali potresno obnašanje večetažne zidane konstrukcije in učinkovitost protipotresnega utrjevanja takšnih konstrukcij z oblogami iz malte, ki je armirana z mrežicami iz steklenih vlaken (GFRP). V prvem delu smo opravili ciklične strižne preiskave neutrjenih in utrjenih zidov, v nadaljevanju pa smo preizkusili neutrjeni in utrjeni večetažni model v naravni velikosti. Model večetažne konstrukcije smo najprej preiskali do večjih poškodb, zatem smo ga utrdili in ponovno preizkusili praktično vse do njegove porušitve.

Način utrditve je temeljil na ovijanju zidov, kjer je bilo to mogoče, oziroma uporabi sider in

trakov za zagotavljanje ovijanju podobnega učinka in izboljšanja stika med oblogo in zidom.

Poškodbe med preiskavo in rezultati optičnega sistema so pokazali, da je v vseh primerih prevladoval strižni odziv modelov z diagonalnimi razpokami. Drugih pojavov, kot sta vrtenje zidovja ali drobljenje vogalov, nismo opazili. Porušni mehanizem je bil v vseh primerih strižni z diagonalnimi razpokami.

Preiskave posameznih zidov kot tudi večetažnega modela so pokazale, da je z utrjevanjem mogoče občutno izboljšati potresno obnašanje zidovja iz modularnih zidakov in šibke malte. V vseh primerih se

je maksimalna odpornost preizkušanca z utrjevanjem povečala za približno 50 %, prav tako je bilo opazno znatno izboljšanje deformacijske kapacitete – mejni pomik se je v vseh primerih potrojil. Obnašanje referenčnih preizkušancev je bilo relativno krhko, medtem ko se je z utrjevanjem bistveno povečala njihova duktilnost.

Kljub ovijanju in drugim ukrepom sta bila ključna mehanizma razpadanja utrjenih zidov še vedno razslojevanje in uklon obloge. Da bi preprečili hipen upad odpornosti in togosti v fazi rušenja konstrukcije, je zelo pomembno zasnovati pravilne detajle sidranja in ovijanja, ki povzročijo bolj postopno razslojevanje med oblogo in zidom. To lahko dosežemo z ustreznimi izbiri materialov za utrjevanje ter gostote in mest vgradnje sider.

9 • ZAHVALA

Raziskava je nastala v okviru raziskovalnih projektov J2-6749 in ARRS-MR-496, ki ju je

financirala Agencija Republike Slovenije za raziskovalno dejavnost (ARRS).

10 • LITERATURA

- Calvi, G. M., Kingsley, G. R., Magenes, G., Testing masonry structures for seismic assessment, *Earthquake spectra* 12, 1: 145–162, 1996.
- Gams, M., Kwiecień, A., Zajac, B., Tomažević, M., Seismic strengthening of brick masonry walls with flexible polymer coating, *Proceedings of the 9th International Masonry Conference*, 7-9 July 2014, Guimarães, Portugal, 2014.
- Heerema, P., Shedid, M., El-Dakhkhni, W., Seismic response analysis of a reinforced masonry asymmetric building, *Journal of Structural Engineering*, 2014.
- Hollaway, L. C., Leeming, M., *Strengthening of reinforced concrete structures*, Woodhead Publishing, 1999.
- Leiva, G. H., *Seismic resistance of two-storey masonry walls with openings*, PhD Dissertation, University of Texas, Austin, Texas, 1991.
- Lutman, M. Seismic resistance assessment of heritage masonry buildings in Ljubljana, *International Journal of Architectural Heritage*, 4(3), 198–221, 2010.

Paparo, A., Beyer, K., Seismic behaviour of mixed RC URM wall structures: comparison between numerical results and experimental evidence, Vienna congress on recent advances in earthquake engineering and structural dynamics, 2013.

Mayes, R.L., Clough, R.W., State-of-the-art in seismic shear strength of masonry – an evaluation and review, Berkley, University of California, Earthquake engineering research center, 1975.

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 1015-11:2001. Metode preskušanja zidarских malt – 11. del: Določevanje upogibne in tlačne trdnosti strjene malte, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2001.

SIST EN 1052-1:1999: Metode preskušanja za zidovje - 1. del: Ugotavljanje tlačne trdnosti, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 1999.

SIST EN 1052-3:2004. Metode preskušanja zidovine – 3. del: Določevanje začetne strižne trdnosti, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2004.

SIST EN 12390-3:2009. Preskušanje strjenega betona – 3. del: Tlačna trdnost preskušancev, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2009.

SIST EN 13412:2006. Proizvodi in sistemi za zaščito in popravilo betonskih konstrukcij, Preskusne metode, Ugotavljanje modula elastičnosti pri tlačni obremenitvi, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2006.

SIST EN 1996-1-1: 2006, Evrokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcij – 1. del: Splošna pravila za armirano in nearmirano zidovje, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2006.

SIST EN 1998-1: 2005, Evrokod 8, Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij – 1. del, Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe, 2005.

SIST EN 771-1: 2011+A1:2015, Specifikacija za zidake – 1. del: Opečni zidaki, Ljubljana, Slovenski inštitut za standardizacijo, 2011.

Tomažević, M., Nekaj premislekov o laboratorijskih preiskavah obnašanja zidov in zidanih konstrukcij pri potresni obtežbi, Gradbeni vestnik, 65, 9, 2016.

Triantafyllou, T. C., Fardis, M. N., Strengthening of historic masonry structures with composite materials, Materials and Structures 30, 486–496, 1997.

Van Vliet, M. R. A., TNO report CI-R0171: Shear tests on masonry panels; Literature survey and proposal for experiments. ESECMaSE project, 2004, esecmase.com/doc/deliverables_public/D_6.1_TNO.pdf, pridobljeno 25. 8. 2015.