

Primljen / Received: 5.2.2014.

Ispravljen / Corrected: 8.5.2014.

Prihvaćen / Accepted: 18.7.2014.

Dostupno online / Available online: 10.9.2014.

Seizmička otpornost zidanih kamenih građevina i utjecaj injektiranja

Autori:



Dr.sc. **Mojmir Uranjek**, dipl.ing.građ.
Građevinski institut ZRMK
Centar za materijale i konstrukcije
mojmir.uranjek@gi-zrmk.si



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



Prof.dr.sc. **Violeta Bokan-Bosiljkov**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Ljubljani
Fakultet građevinarstva i geodezije
violeta.bokan-bosiljkov@fgg.uni-lj.si



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

Znanstveni rad - predhodno priopćenje

Mojmir Uranjek, Roko Žarnič, Violeta Bokan-Bosiljkov, Vlatko Bosiljkov

Seizmička otpornost zidanih kamenih građevina i utjecaj injektiranja

Injektiranje je jedan od najdjelotvornijih, a često i najprikladnijih postupaka za ojačanje zidova starih zidanih građevina. Da bi se ocijenio utjecaj raznih vrsta injekcijskih smjesa na mehanička svojstva zidanih građevina, obavljeno je ispitivanje in situ postojeće zidane građevine. Dobiveni rezultati korišteni su za ocjenu seizmičke otpornosti građevine pomoću metode postupnog potiska, uz primjenu analize katnog mehanizma i mehanizma globalnog odziva. Prihvatljivije vrste injekcijskih smjesa usporedive su s cementnim injekcijskim smjesama. Dobiveno je da se analizom globalnog odziva postižu realniji rezultati čak i kod niskih zidanih građevina.

Ključne riječi:

zidana kamena građevina, ojačanje, mehanička svojstva, injektiranje, vrsta injekcijske smjese, seizmička otpornost

Scientific paper - Preliminary note

Mojmir Uranjek, Roko Žarnič, Violeta Bokan-Bosiljkov, Vlatko Bosiljkov

Seismic resistance of stone masonry building and effect of grouting

Grout injection is one of the most effective and often most appropriate techniques for strengthening of old stone masonry walls. In order to assess the influence of different types of injection grouts on the mechanical properties of masonry, an actual stone masonry building was tested in-situ using various testing methods. The results obtained were used to evaluate seismic resistance of a building using the pushover method, and considering the storey mechanism approach and the global response mechanism. More compatible types of grouts can match cement grouts. The results show that the global response approach provides more realistic results even for low-rise masonry buildings.

Key words:

Stone masonry, strengthening, mechanical properties, grouting, grout type, seismic resistance

Wissenschaftliche Arbeit - Vorherige Mitteilung

Mojmir Uranjek, Roko Žarnič, Violeta Bokan-Bosiljkov, Vlatko Bosiljkov

Erdbebenwiderstand von Steinmauerwerksbauten und Einflüsse der Injektion

Injektionseingriffe gehören zu den wirksamsten und oftmals angemessensten Verfahren zur Verstärkung bestehender Mauerwerksbauten. Um den Einfluss verschiedener Injektionsmittel auf die mechanischen Eigenschaften des Mauerwerks einzuschätzen, sind in-situ Versuche durchgeführt worden. Die Resultate sind zur Beurteilung des Erdbebenwiderstands mittels Pushover Analysen, unter der Berücksichtigung von Stockwerksmechanismen und globaler Antwortmechanismen, angewandt worden. Angemessene Injektionsmittel sind mit Zementmörteln vergleichbar. Durch die auf globalen Antwortmechanismen beruhenden Berechnungen sind, sogar bei niedrigen Mauerwerksbauten, realistischere Resultate erzielt worden.

Schlüsselwörter:

Steinmauerwerksbauten, Verstärkung, mechanische Eigenschaften, Injektion, Injektionsmittelarten, Erdbebenwiderstand

1. Uvod

U Sloveniji se, i to naročito u ruralnim područjima, kamen uglavnom najviše koristio kao materijal za gradnju starijih stambenih kuća, a i značajnijih javnih građevina. Ovisno o geografskom području, za gradnju kamenih zidova koristio se vapnenac, pješčenjak ili škriljac. Bez obzira na povijesno razdoblje kojem pripadaju, tanji zidovi uglavnom su bili građeni u dva sloja, dok su se deblji zidovi izvodili u tri sloja. Općenito uzevši, kao vezivo je korišten vapneni mort niske čvrstoće. Zbog slabe veze između pojedinih redova zida, niske čvrstoće morta te postojanja šupljina između slojeva, posmična ravninska nosivost takvih zidova bila je uglavnom nedostatna [1, 2]. Injektiranje je jedan od najprikladnijih postupaka ojačanja u svrhu poboljšanja nosivosti takvih zidova i to uglavnom zbog osnovne prednosti tog postupka: vanjska površina zida gotovo se uopće ne mijenja, a mehanička se svojstva bitno poboljšavaju. Metoda se temelji na injektiranju injekcijske smjese (tekuća mješavina vode, veziva i aditiva) u kameni zid da bi se zapunile pukotine i uspostavila odgovarajuća veza između kamena i slojeva zida. Gravitacijsko injektiranje primjenjuje se još od vremena starih Rimljana. Taj je postupak bio u široj upotrebi i u novije vrijeme, naročito u prvoj polovini devetnaestog stoljeća. Međutim, već potkraj devetnaestog stoljeća počinju se koristiti i uređaji za injektiranje pod tlakom [3]. Negdje u to vrijeme počela je u Engleskoj i Njemačkoj masovna proizvodnja takvih uređaja [4]. Prve povijesne građevine počinju se ojačavati pomoću cementnih injekcijskih smjesa već u razdoblju prije prvoga svjetskog rata [3]. Povijest injektiranja može se podijeliti na nekoliko faza: u početku su se najviše koristile injekcijske smjese na bazi cementa ali su se kasnije ipak razvile i druge injekcijske smjese, povoljnije za ostvarivanje veze sa zidovima povijesnih građevina, a tome je pogodovalo i uvođenje strogih zahtjeva i ograničenja u pogledu ojačavanja monumentalnih zdanja i građevina koje se ubrajaju u kulturno i povijesno nasljeđe. Kako se za gradnju starijih zidanih građevina uglavnom upotrebljavao vapneni mort, u tom se području razvoj injekcijskih smjesa usmjerio na smanjenje udjela cementa i povećanje udjela vapna u mješavini. U tom kontekstu, postavljeno je pitanje da li stupanj poboljšanja mehaničkih svojstava injektiranog zida ovisi o vrsti injekcijske smjese. Većina istraživanja koja se bave utjecajem injektiranja na mehanička svojstva zidanih kamenih zidova provedena su na uzorcima koji su pripremljeni u laboratorijskim uvjetima. Većina istraživača također je pokušala ocijeniti utjecaj vrste i svojstava injekcijske smjese na stupanj poboljšanja mehaničkih svojstava ispitanih uzoraka. Tomažević i Apih [5] smatraju da se seizmička otpornost zidanih kamenih zidova bitno povećava nakon injektiranja cementne injekcijske mješavine. Vintzileou i Tassios [6] izvještavaju da tlačna čvrstoća uzoraka bitno raste nakon injektiranja pomoću dviju vrsta injekcijskih smjesa (i to čak za 50 do 200 %) ali, zbog malog broja ispitanih

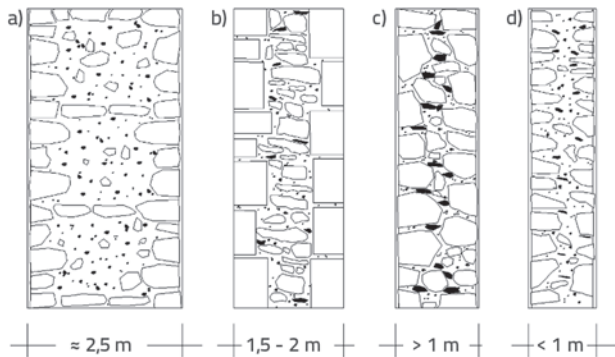
uzoraka, oni nisu mogli pružiti pouzdanije zaključke o utjecaju tlačne čvrstoće injekcijske smjese na tlačnu čvrstoću zidova. Rezultati ispitivanja prikazani u radu [7] pokazuju da nema velike razlike između tlačnih čvrstoća injektiranih zidova, iako su u ispitivanju korištene dvije injekcijske smjese s različitim vrijednostima tlačne čvrstoće. Složenije istraživanje koje također uzima u obzir sposobnost injekcijske smjese da ostvari odgovarajuću vezu s materijalom in situ [8] pokazuje da je posmična čvrstoća prijanjanja između injektirane smjese i materijala korištenog za gradnju zida zapravo parametar koji najznačajnije utječe na djelotvornost injektiranja. Slične rezultate nalazimo i u radu [9] gdje se zaključuje da poboljšanje mehaničkih svojstava zidanih kamenih zidova nakon injektiranja nije proporcionalno tlačnoj ili savojnoj čvrstoći injekcijske smjese, već ovisi o čvrstoći prijanjanja između injekcijske smjese i postojećih materijala. Prema radu [10], razvoj injekcijskih smjesa trebao bi se usmjeriti prema ostvarenju glavne funkcije injekcijske smjese, a to je povezivanje različitih slojeva i dijelova zida, te bi cilj trebao biti poboljšanje vezivne i vlačne čvrstoće injekcijskih smjesa.

U usporedbi s istraživanjima drugih autora, doprinos istraživanja prikazanog u ovom radu sastoji se u trenskoj primjeni i istraživanju utjecaja više vrsta injekcijskih smjesa na mehanička svojstva zida na stvarnoj građevini. Stupanj poboljšanja mehaničkih svojstava zidova, te seizmičke otpornosti građevine, ocijenjen je nakon injektiranja cementnom smjesom i kombiniranom smjesom vapna i cementa. Utjecaj vrste injekcijske smjese na seizmičku otpornost građevine ocijenjen je pomoću nelinearne statičke analize primjenom metode postupnog potiskivanja. Za modeliranje su primijenjena dva pristupa: modeliranje katnog mehanizma pomoću programa SREMB, a to je relativno čest računski model za analizu nearmiranih zidanih građevina, te modeliranje pomoću modernijeg postupka baziranog na globalnom mehanizmu odziva. U tom se pristupu konstrukcija građevine modelira pomoću metode FME, tj. okvira od makroelemenata (na engl. *Frame by Macro Elements*) primjenom programa 3MURI [26]. Da bi se ustanovilo koji pristup bolje odražava stvarno oštećenje potresom pogođene građevine, stanje pukotine na građevini uspoređeno je s proračunskim slomovima pri graničnom stanju nosivosti koji su dobiveni pomoću ta dva pristupa.

2. Tipologija i mehanička svojstva zidanih kamenih zidova

Konstruktivne karakteristike zidanih kamenih građevina variraju ovisno o povijesnom razdoblju, značenju građevine i mjestu na kojem se ona nalazi. Nekoliko presjeka zidanih kamenih zidova karakterističnih za razna povijesna razdoblja prikazano je na slici 1. U starom je Rimu korišten takozvani rimski beton sastavljen od vapna, pucolanskog pepela, pijeska i drobljene cigle. Rimski su zidovi bili dodatno ojačani poprečnim vezama između slojeva vanjskih zidova. Iako se u

razdoblju romanike koristio i tesani kamen, građevine su se uglavnom izvodile od neobrađenog ili nepravilnog kamena povezanog s vapnenim mortom, a ponekad se dodavala i drobljena cigla. U gotičkom su razdoblju zidovi bili tanji, a kao materijal se koristio djelomično obrađeni kamen. Tesani se kamen koristio samo u kutovima, na mjestima prijelaza te na rubovima otvora [11].



Slika 1. Tipični presjeci zidanih kamenih zidova iz raznih povijesnih razdoblja, prema [11]: a) starorimsko razdoblje; b) i c) razdoblje romanike; d) razdoblje gotike

Zidani kameni zidovi mogu se podijeliti na nekoliko tipova prema [12]: jednoslojni zidovi, dvoslojni zidovi bez spoja, dvoslojni zidovi s jednostavnim spojem pomoću preklopnih kamenih veza, dvoslojni zidovi s poprečnim spojem pomoću dugih pravilnih kamenova, troslojni zidovi s vanjskim redovima od klesanog kamena i sa središnjom ispunom od lomljenog kamena te troslojni zidovi s vanjskim slojevima od krupnog lomljenog kamena i sa središnjom ispunom od lomljenog kamena. Svi spomenuti tipovi presjeka uglavnom se mogu naći i u Sloveniji. Različite vrijednosti kohezije u unutarnjoj jezgri između pojedinih slojeva, prisutnost ili nepostojanje poprečnih elemenata, te razni postoci šupljina – sve su to uzroci bitnih razlika u konstrukcijskim svojstvima i mehaničkom ponašanju zidanih kamenih zidova sa šupljinama [13]. U okviru projekta "Perpetuate" predložena

su mehanička svojstva za razne tipologije zidova povijesnih građevina [14]. Referentne vrijednosti iskazane u tablici 1. zapravo su vrijednosti iz talijanske norme [15] koje su modificirane u skladu s rezultatima terenskih istraživanja obavljenih u Sloveniji, Hrvatskoj i Crnoj Gori.

Vrijednosti prikazane u tablici 1. trebaju se korigirati pomoću korekcijskih koeficijenata da bi se tako u obzir uzeli parametri kao što su kakvoća morta, prisutnost poprečnih spojeva, debljina unutarnje jezgre, ojačanje injektiranjem itd. Korekcijski koeficijent za poboljšanje mehaničkih svojstava nakon injektiranja varira od 1,2 do 2,0 ovisno o vrsti kamenog зида. Prikazanim vrijednostima predviđa se radikalno poboljšanje svih mehaničkih svojstava kamenog зида nakon injektiranja, ali se ne uzima u obzir promjena u rezultatu ovisno o vrsti injekcijske smjese. U okviru naših istraživanja, koja su prikazana u nastavku, analizirani su zidovi zidane kamene dvokatne građevine smještene u području Posočja. Analizom teksture i morfologije (slika 2.) ustanovljeno je da su zidovi izrađeni od vapnenog morta i od grubo oblikovanog vapnenca i pješčenjaka te da na nekim mjestima sadrže i umetke od cigle.



Slika 2. Tekstura (lijevo) i morfologija (desno) zidanih kamenih zidova

Tablica 1. Referentne vrijednosti mehaničkih svojstava za razne tipologije zidova povijesnih građevina [14]

| Vrsta gradiva | Tlačna čvrstoća f_c [MPa] | Vlačna čvrstoća f_t [MPa] | Modul elastičnosti E [MPa] | Modul posmika G [MPa] | Specifična težina γ [kN/m ³] |
|---|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------|--|
| Zid od nepravilnog kamena (obluci, nejednak i nepravilan kamen) | 1,00-1,80 | 0,020-0,048 | 200-1050 | 130-350 | 19 |
| Zid od neobrađenog kamena s fasadnim zidom ograničene debljine i središnjom ispunom | 2,00-3,00 | 0,053-0,080 | 1020-1440 | 340-480 | 20 |
| Zid od obrađenog kamena dobrih vezivnih svojstava | 2,60-3,80 | 0,084-0,111 | 1500-1980 | 500-660 | 21 |
| Zid od mekog kamena (tuf, vapnenac itd.) | 1,40-2,40 | 0,042-0,063 | 900-1700 | 300-420 | 16 |
| Zid od pravokutno obrađenog kamena | 4,70-8,00 | 0,135-0,180 | 740-3200 | 200-940 | 22 |
| Zid od pune cigle s vapnenim mortom | 2,00-4,00 | 0,040-0,140 | 240-1800 | 80-600 | 18 |

Tablica 2. Sastav injekcijskih smjesa prema težinskom udjelu

| Vrsta smjese | Portland cement | Hidratizirano vapno | Prah vapnenca | Prah kvarca | Bentonit | Aditiv za ekspanziju |
|--------------|-----------------|---------------------|---------------|-------------|----------|----------------------|
| LC1 | 54 | 15 | 17 | 14 | - | - |
| LC2 | 75 | 25 | - | - | 3 | 0,3 |
| C1 | 100 | - | - | - | 3 | 0,3 |
| C2 | 100 | - | - | - | - | 0,5 |

Tablica 3. Svojstva očvrslih injekcijskih smjesa nakon 90 dana

| Vrsta injekcijske smjese | Promjena volumena ΔV [%] | Prostorna masa ρ_m [kg/m ³] | Savojna čvrstoća f_{fm} [MPa] | Tlačna čvrstoća f_{cm} [MPa] | Vlačna čvrstoća pri cijepanju f_{ctm} [MPa] |
|--------------------------|----------------------------------|--|---------------------------------|--------------------------------|---|
| LP1 | 1,2 (8) | 1356 (1,2) | 0,4 (24) | 12,4 (2) | 0,7 (26) |
| LC1 | 0,9 (16) | 1467 (0,6) | 6,3 (10) | 23,7 (6) | 0,9 (4) |
| LC2 | 0,6 (18) | 1361 (0,4) | 2,8 (7) | 21,7 (5) | 1,4 (21) |
| C1 | 1,2 (26) | 1815 (0,4) | 4,4 (14) | 52,3 (6) | 1,4 (14) |
| C2 | 0,0 (130) | 1683 (1,0) | 4,4 (12) | 47,0 (2) | 1,6 (19) |

Napomena: koeficijent varijacije iskazan je u zagradi (%)

Zidovi su izvedeni u dva sloja bez jako izražene središnje jezgre, ali s jednostavnim spojevima po presjeku pomoću sporadično postavljenih preklopnih kamenova. Analiza poprečnih presjeka pokazala je da se zidovi sastoje od kamena (70-75 %), morta (15-20 %) i šupljina (10 %), te da su stoga izrazito pogodni za injektiranje (prema radu [16], donja granica pogodnosti za injektiranje iznosi 4 %).

Dobivena mehanička svojstva usporediva su s referentnim vrijednostima za prva dva tipa zidanih konstrukcija koji su prikazani u tablici 1. Međutim, u našem su slučaju vrijednosti korekcijskih koeficijenata za poboljšanje mehaničkih svojstava nakon injektiranja bile više, a varirale su ovisno o vrsti i svojstvima injekcijske smjese. Kako su zidani kameni zidovi slične morfologije relativno česti u području Posočja, te kako se takvi zidovi najčešće ojačavaju injektiranjem, dobiveni rezultati mogli bi se smatrati valjanima i za ostale zidane kamene građevine koje se nalaze u tom području. Osim toga, vrijedi napomenuti da se slične morfologije zidova mogu naći i u drugim seoskim područjima u Sloveniji.

3. Laboratorijska i terenska ispitivanja

Postupci i rezultati laboratorijskih ispitivanja materijala i terenskih ispitivanja uzoraka zidova već su prikazani i detaljno opisani u radu [17]. Osnovni rezultati i nalazi daju se u ovom poglavlju da bi se dopunili podaci potrebni za razumijevanje mehaničkog ponašanja uzoraka, te za ocjenu seizmičke otpornosti građevine kako u postojećem tako i u ojačanom stanju.

3.1. Svojstva uzoraka morta i kamena

U laboratoriju su ispitani uzorci vapnenog morta uzeti iz spojeva zidova građevine i uzorci dviju vrsta kamena

(vapnenac i pješčenjak) uzeti iz područja u blizini građevine. Prosječna tlačna čvrstoća dobivena ispitivanjem osam uzoraka morta iznosila je 1,75 MPa (koeficijent varijacije, cov = 17 %). Kako su uzorci morta bili prizmatično nepravilni s duljinom na rubovima od 3,1 do 3,6 cm, i s visinom od 2,1 do 2,5 cm, rezultati su se trebali korigirati pomoću faktora oblika $d = 1,5$ [18] da bi se dobila tlačna čvrstoća kocaka morta veličine 4 cm. Tako je za vapneni mort dobivena srednja tlačna čvrstoća od $f_{cm} = 1,17$ MPa. Tlačna čvrstoća kamenih uzoraka ispitana je prema [19]. Za uzorak vapnenca dobivena je tlačna čvrstoća od $f_{ci} = 120$ MPa (oko 14 %), dok je za uzorak pješčara odgovarajuća vrijednost iznosila $f_{cs} = 209$ MPa (oko 7 %).

3.2. Injekcijske smjese

U laboratoriju je ispitano pet vrsta injekcijskih smjesa: jedna smjesa hidrauličnog vapna i pucolana (LP1), dvije kombinacije smjesa cementa i vapna (LC1 i LC2) te dvije cementne smjese (C1 i C2). Sastav ispitanih injekcijskih smjesa prikazan je u tablici 2. za sve smjese osim smjese LP1. Iako detaljan sastav te smjese nije poznat, prema dostupnim informacijama, ona se sastoji od hidrauličnog vapna, punila i ekopucolana. Srednje vrijednosti svojstava injekcijske smjese u očvrslom stanju prikazane su u tablici 3. Promjena volumena smjesa izmjerena je prema metodi ispitivanja opisanoj u [20], a prostorna masa određena je prema [21]. Vrijednosti savojne i tlačne čvrstoće određene su u skladu s [22], a vrijednost vlačne čvrstoće pri cijepanju određena je prema postupku opisanom u [23]. Za svako ispitivanje i za svaku vrstu injekcijske mase korištena su po tri uzorka.

Kao što se moglo i očekivati, najviše vrijednosti prostorne mase, tlačne čvrstoće, savojne čvrstoće i vlačne čvrstoće pri cijepanju dobivene su za cementne injekcijske smjese C1 i

C2, osim u slučaju savojne čvrstoće gdje je najviša vrijednost postignuta za smjesu LC1. To odstupanje moglo bi se objasniti dodavanjem praha vapnenca i kvarca, koji su djelovali kao punilo. Kod svih ispitanih smjesa zabilježena je mala promjena u volumenu pa je u tom smislu postignuta vršna vrijednost od samo 1,2 %.

3.3. Valjkasti uzorci

Da bi se moglo simulirati stanje u unutarnjoj jezgri ojačanog višeslojnog zidanog kamenog zida, pripremljeni su valjci promjera 15 cm i visine 30 cm, te su u njih injektirane smjese LP1, LC1, LC2, C1 i C2. Valjci su postupno punjeni vapnencem i pješčarom, pri čemu je dodavano 37 % (u težinskom omjeru) frakcija 45/63 mm i 32/45 mm, 25 % frakcije 16/32 mm, te 1 % frakcije 8/16 mm. U valjkaste uzorke injektirane su smjese LP1, LC1, LC2, C1 i C2. Postupak injektiranja valjkastih uzoraka prikazan je na slici 3.



Slika 3. Valjkasti uzorci tijekom injektiranja

Nakon 90 dana, ispitana je tlačna čvrstoća injektiranih valjaka (tri ispitivanja po svakoj vrsti smjese) u skladu s [24], a vlačna čvrstoća pri cijepanju ispitana je prema [23], pri čemu su također provedena tri ispitivanja po svakoj vrsti smjese. Sekantni modul elastičnosti $E_{c(30-60\%)}$, Poissonov koeficijent $\nu_{c(30-60\%)}$ i posmični modul $G_{c(30-60\%)}$ određeni su na temelju dijagrama naprezanja i deformacije koji su izrađeni prema rezultatima ispitivanja tlačne čvrstoće. Kao što se vidi iz indeksa, sve su količine izračunane u rasponu između 30 i 60 % postignute tlačne čvrstoće, jer se u tom području moglo pretpostaviti linearno ponašanje. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.

Kao što se moglo i očekivati, najviše su vrijednosti dobivene kod valjaka injektiranih cementnim smjesama C1 i C2. Nešto niže vrijednosti dobivene su za valjke injektirane smjesama vapna i cementa LC1 i LC2, a najniže su vrijednosti dobivene za valjke injektirane smjesom LP1 koja sadrži vapno i pucolan. Najveće razlike između različitih vrsta smjesa ostvarene su kod rezultata modula elastičnosti i posmičnog modula.

3.4. Određivanje mehaničkih svojstava zidova posmikom *in situ* i ispitivanjem pomoću dvostrukog tlačnog jastuka

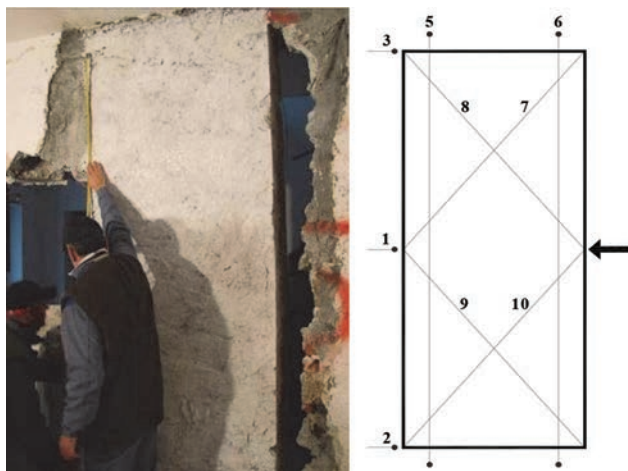
Mehanička svojstva uzoraka zida injektiranih pomoću smjesa LC1, LC2, C1 i C2 određena su 180 dana nakon injektiranja, a jedan uzorak zida ispitivan je u neinjektiranom stanju. Ispitivanje posmika te ispitivanja pomoću dvostrukog tlačnog jastuka, omogućilo je ocjenjivanje mehaničkih svojstava zidova i stupnja djelotvornosti postupka injektiranja. Seizmički odziv zida simuliran je posmičnim ispitivanjem *in situ*, pri čemu je određena ravninska bočna otpornost, efektivna krutost i vlačna (posmična) čvrstoća zida. Zidovi s učvršćenim krajevima, visine 250 cm, širine 100 cm te debljine 40 cm (2-LC1, 3-LC2) i 50 cm (1-C1, 4-C2, 6) pripremljeni su pomoću dijamantne kružne pile, a priprema je uključivala i izvođenje vertikalnih utora (slika 4).

Bočno opterećenje naneseo je pomoću hidrauličnog aktuatora, a pomaci su povećavani u intervalima od 0,25 mm, sve do graničnog stanja. Iako je cilj bio postizanje graničnog stanja u blizini rušenja NC (eng. *near collapse*), zbog sigurnosnih su razloga ispitivanja zaustavljena nakon prekoračenja graničnog stanja znatnog oštećenja SD (eng. *significant damage*).

Tablica 4. Mehanička svojstva injektiranih valjkastih uzoraka nakon 90 dana

| Oznaka valjkastog uzorka | Tlačna čvrstoća f_{cc} [MPa] | Vlačna čvrstoća pri cijepanju f_{tsc} [MPa] | Modul elastičnosti $E_{c(30-60\%)}$ [GPa] | Modul posmikal $G_{c(30-60\%)}$ [GPa] |
|--------------------------|--------------------------------|---|---|---------------------------------------|
| LP1 | 7,21 (2) | 0,84 (15) | 3,17 (17) | 1,11 (21) |
| LC1 | 9,99 (8) | 1,08 (11) | 7,04 (15) | 2,57 (21) |
| LC2 | 9,32 (10) | 1,15 (5) | 7,41 (48) | 2,86 (29) |
| C1 | 15,62 (4) | 1,83 (13) | 13,28 (22) | 5,03 (29) |
| C2 | 13,61 (28) | 1,72 (12) | 13,54 (23) | 4,79 (32) |

Napomena: koeficijent varijacije iskazan je u zagradi (%)



Slika 4. Rezanje i mjerenje uzorka zida i postav ispitivanja

Tijekom ispitivanja mjereni su pomaci na donjim, srednjim i gornjim dijelovima uzorka zida. Također su mjerene i dijagonalne deformacije te mogući vertikalni pomaci. Vrijednosti odnosa između bočnog opterećenja i pomaka (odnosa između relativnog bočnog pomaka d i visine uzorka h u %), te smanjenja krutosti uzorka zida, iskazane su na slici 5. Eksperimentalno dobivene ovojnice histereze idealizirane su bilinearnim ovojnicama koje su definirane efektivnom krutošću i pomakom po završetku ispitivanja. Efektivna krutost injektiranih uzorka zida izračunana je na razini bočnog opterećenja kod kojeg se javljaju prve značajnije pukotine. U prosjeku su se kod injektiranih uzorka pukotine počele javljati pri sili od $H_{cr} = 0,80 \cdot H_{max}$ kod pomaka od 0,10 %. U slučaju neinjektiranog uzorka, značajnije pukotine počele su se pojavljivati pri nižim bočnim silama $H_{cr} = 0,61 \cdot H_{max}$, te pri većem pomaku od 0,14 %. Efektivna krutost K_e definirana je kao odnos između bočnog otpora H_{cr} i pomaka zida d_{cr} pri granici pojave pukotina:

$$K_e = \frac{H_{cr}}{d_{cr}} \tag{1}$$

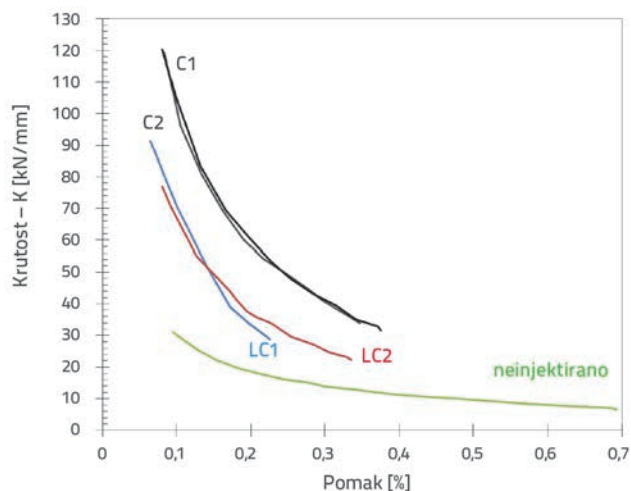
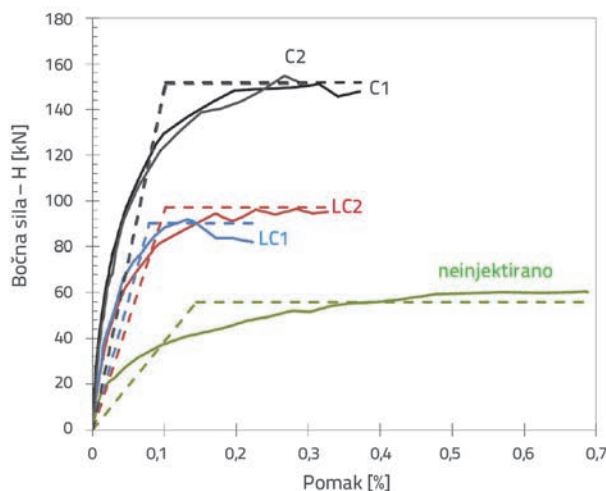
Kao što je vidljivo na slici 5., smanjenje krutosti pri povećanju pomaka bilo je vrlo slično kod svih ispitanih zidova. Nakon pojave prvih značajnijih pukotina, uočeno je značajno smanjenje krutosti i nagli pad krivulje. Kod neinjektiranog uzorka zida, pad krivulje koji pokazuje smanjenje krutosti bio je bitno manji. Iako je krutost uzorka zida nakon injektiranja bitno porasla, pomaci nanoseni u zoni iznad postignute efektivne krutosti izazvali su brže širenje oštećenja te brže smanjenje krutosti, nego što je to bio slučaj kod neinjektiranog uzorka zida. Granična otpornost uzorka zida izračunana je pomoću jednadžbe 2:

$$H_u = K_e \left(d_{max} - \sqrt{d_{max}^2 - \frac{2A_{env}}{K_e}} \right) \tag{2}$$

gdje je d_{max} maksimalni bočni pomak postignut tijekom ispitivanja, dok je A_{env} područje ispod eksperimentalnih ovojnica otpora. Prema [24], vlačna čvrstoća f_{tw} može se dobiti iz jednadžbe 3:

$$f_{tw} = -\frac{\sigma_0}{2} + \sqrt{\frac{\sigma_0^2}{4} + \left(\frac{H_u b}{A_w} \right)^2} \tag{3}$$

gdje σ_0 predstavlja naprezanje zbog vertikalno opterećenja u zidu, A_w je horizontalni poprečni presjek uzorka zida, dok je b varijabla koja predstavlja odnos između visine i širine uzorka zida. Po definiciji, faktor duktilnosti je odnos između graničnog pomaka d_u pri kojem se sila smanjuje na 80 % od maksimalno postignute sile, i pomaka d_e pri idealiziranoj granici elastičnosti. Zbog sigurnosnih razloga ispitivanja su završena prije nego što se sila spustila na 80 % od maksimalne vrijednosti. Stoga je duktilnost određena kao odnos između maksimalnog postignutog pomaka d_{max} i pomaka d_e (jednadžba 4):



Slika 5. Vrijednosti horizontalnog otpora i smanjenja krutosti uzorka zida dobivene ispitivanjem posmika *in situ*

Tablica 5. Mehanička svojstva uzoraka zida dobivena tijekom ispitivanja posmika *in situ* [17]

| Oznaka uzorka zida | Vertikalno opterećenje σ_o [MPa] | Posmični otpor H_u [kN] | Efektivna krutost K_e [kN/mm] | Duktilnost μ [-] | Vlačna čvrstoća f_{tw} [MPa] |
|----------------------|---|---------------------------|---------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| neinjektirani uzorak | 0,14 | 56 | 31 | 4,84 | 0,07 |
| LC1 | 0,17 | 90 | 91 | 2,85 | 0,21 |
| LC2 | 0,19 | 97 | 77 | 3,32 | 0,21 |
| C1 | 0,21 | 152 | 120 | 4,21 | 0,29 |
| C2 | 0,15 | 151 | 119 | 2,99 | 0,30 |

Tablica 6. Mehanička svojstva uzoraka zida nakon pokusa pomoću dvostrukog tlačnog jastuka [17]

| Oznaka uzorka zida | Tlačna čvrstoća f_{cw} [MPa] | Modul elastičnosti E_w [MPa] | Modul posmika G_w [MPa] |
|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| neinjektirani zid | 1,65 | 785 | 113 |
| LC1 | 2,00 | 1347 | 476 |
| LC2 | 2,00 | 1164 | 411 |
| C1 | 2,50 | 1520 | 537 |
| C2 | 2,50 | 1507 | 532 |

$$\mu = \frac{d_{\max}}{d_e} \quad (4)$$

Rezultati dobiveni ispitivanjem posmika *in situ* prikazani su u tablici 5.

Dobiveni rezultati za vlačnu čvrstoću neinjektiranog zida usporedivi su s rezultatima koji su dobiveni tijekom ispitivanja *in situ* na istoj vrsti zida i u istoj regiji u Sloveniji [26]. Nakon injektiranja cementnom smjesom, faktor povećanja vlačne čvrstoće iznosio je 1,8-2,5, što je nešto manje od poboljšanja koje je postignuto u našem slučaju (faktor povećanja iznosio je 3 kod LC1 i LC2, te 4 kod C1 i C2). Faktor povećanja mehaničkih parametara nakon injektiranja, predložen u [14] za sličnu vrstu zida, varira od 1,7 od 2, što je također bitno niže od povećanja koje je zabilježeno tijekom naših ispitivanja. Razlog tome mogla bi biti bolja početna kvaliteta zida koja je ispitana u [14] i [26] (prisutnost poprečnih veznih kamenova, manje površine spajanja mortom, manja količina šupljina te bolja mehanička svojstva sastavnih materijala), što sve ograničava djelotvornost injektiranja. Faktor duktilnosti neinjektiranog uzorka zida iznosio je 4,84 ali je ta vrijednost pala nakon injektiranja, i to bez obzira na vrstu smjese korištene za injektiranje. Faktori duktilnosti injektiranih uzoraka slični su kod svih uzoraka osim uzorka C1, iako se očekivalo duktilnije ponašanje uzorka zida injektiranih smjesom vapna i cementa (LC1 i LC2). Ispitivanje pomoću dvostrukog tlačnog jastuka obavljeno je da bi se odredile vrijednosti modula elastičnosti, posmičnog modula i tlačne čvrstoće. Da bi se omogućilo postavljanje dvostrukog tlačnog jastuka, obavljena su dva horizontalna reza, vertikalno udaljena 50 cm jedan od drugog (slika 6.).

Pritisak ulja u oba tlačna jastuka postupno je povećavan u ispitivanjima koja su obavljena ranije i 180 dana nakon injektiranja smjese C2. Mehaničko ponašanje zida prije i

nakon injektiranja praćeno je pomoću četiri vertikalna i jednog horizontalnog LVDT senzora, koji su bili postavljeni u prostor između dva reza. Rezultati dobiveni pomoću dvostrukog tlačnog jastuka prikazani su u tablici 6.

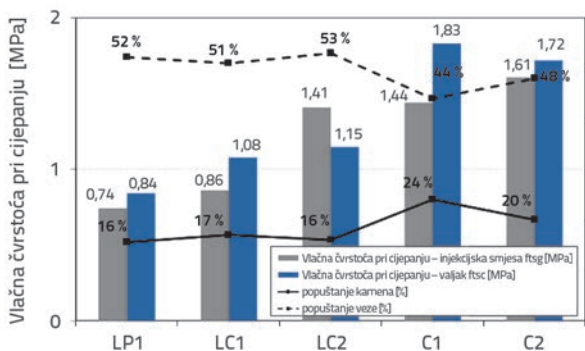


Slika 6. Postav ispitivanja pomoću dvostrukog tlačnog jastuka

4. Utjecaj vrste injekcijske smjese na mehanička svojstva ispitanih uzoraka

Očita razlika između povezanih vrsta injekcijskih smjesa (smjesa s cementom i s cementom i vapnom) uočena je kako u slučaju ispitivanja tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće pri cijepanju injektiranih valjaka, tako i kod ispitivanja posmične čvrstoće zidova. Analiza zone cijepanja, obavljena na valjcima nakon ispitivanja vlačne čvrstoće pri cijepanju (slika 7.),

pokazala je da je do sloma najčešće dolazilo na vezi između kamena i injekcijske smjese, te da je bolja veza postignuta kod cementnih injekcijskih smjesa nego kod smjesa s cementom i vapnom tj. s vapnom i pucolanom.



Slika 7. Prosječne čvrstoće pri cijepanju za valjke i injekcijske smjese, te postotak sloma kamena i veza nakon ispitivanja vlačne čvrstoće valjaka pri cijepanju

Glavni razlozi za znatno poboljšanje mehaničkih svojstava zidova nakon injektiranja, te za različite razine poboljšanja (ovisno o vrsti injekcijske smjese) jesu loša mehanička svojstva zidova u početnom stanju prije injektiranja te relativno visok postotak šupljina (oko 10 %). Nakon injektiranja, ponašanje zidova u velikoj mjeri ovisilo o čvrstoći veze između kamena i slojeva zida koji su poboljšavali mehanička svojstva. Očito je da u slučaju zidova s niskim početnim mehaničkih svojstvima, te s visokim postotkom šupljina, mehanička svojstva zida u velikoj mjeri ovise o vrsti i svojstvima injekcijske smjese (tj. o mogućnosti te smjese da ostvari dobru vezu između kamena i rslajeva zida). Većina istraživača (osim dva [7] i [8]) nisu uočili bitne razlike u mehaničkim svojstvima zidova koji su bili injektirani primjenom različitih vrsta injekcijskih smjesa. To se može objasniti metodom izrade ispitnih uzoraka. Naime, svi ispitni uzorci izrađeni su u laboratorijskim uvjetima, a korišten je mort u kombinacijama vapno-cement, vapno-pucolan, ili hidraulički vapneni mort, s relativno dobrim mehaničkim karakteristikama. Takvi su mortovi korišteni da bi se što vjernije imitirali stvarni uvjeti na terenu ili, što je češći slučaj, zbog vremenskih ograničenja za provedbu istraživačkih projekata, te problema koji se odnose na

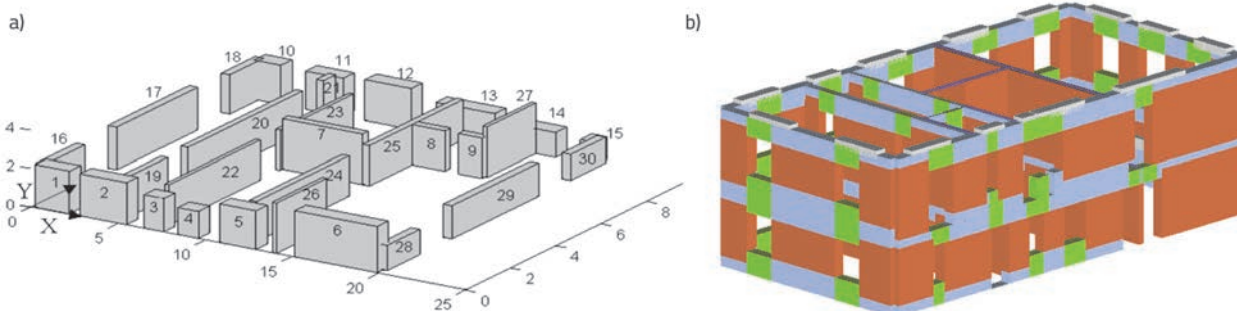
adekvatno povezivanje uzoraka s vapnenim vezivima. Zato su istraživači koristili mortove koji su konačnu čvrstoću postizali brže nego što je to slučaj kod vapnenih mortova, ali i mortove koji se odlikuju višim konačnim vrijednostima čvrstoće. Iako je takva injekcijska smjesa mogla zapuniti pukotine, ponašanje uzoraka uglavnom je ovisilo o osnovnom mortu koji se odlikovao relativno visokim karakteristikama čvrstoće.

5. Seizmički odziv građevine u postojećem stanju bez ojačanja

Seizmički odziv građevine u njenom postojećem tj. neojačanom stanju analiziran je pomoću dva numerička modela, od kojih se oba temelje na nelinearnoj statičkoj analizi primjenom metode postupnog potiska. Građevina je najprije analizirana uzimajući u obzir takozvani katni mehanizam pomoću programa SREMB [29]. Nakon toga je u analizi korišten program 3MURI [27] pomoću kojeg se analizira globalni odziv primjenom metode FME (eng. *Frame by Macro Elements*), tj. okvira od makro-elemenata. Rezultati dobiveni za postojeće neojačano stanje građevine uspoređeni su s mrežom pukotina nakon što je građevina oštećena u potresu 2004. godine. Fasade građevine prikazane su na slici 8., dok su modeli korišteni u seizmičkoj analizi dani na slici 9.



Slika 8. Sjeverna i zapadna fasada zgrade

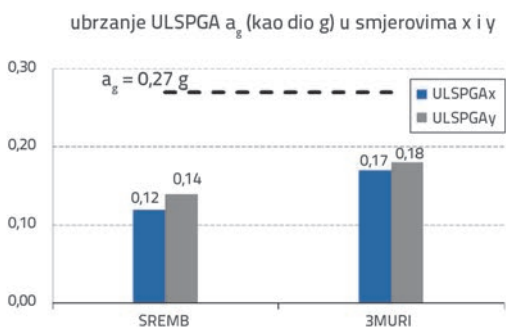


Slika 9. Modeli korišteni u nelinearnoj seizmičkoj analizi: a) SREMB, b) 3MURI

Seizmički odziv izračunan je prema zahtjevima iz EC8-1 [28]. U seizmičkoj su analizi korišteni sljedeći ulazni parametri: faktor značenja $\gamma_1 = 1,0$, proračunsko ubrzanje tla $a_g = 0,225g$, faktor tla $S = 1,2$ i donja granica faktora ponašanja konstrukcije $q = 1,5$. Ako bi se u obzir uzeo stvarni faktor duktilnosti od $\mu = 4,84$, dobiven pomoću ispitivanja posmika *in situ*, tada bi prema jednadžbi (5) predloženoj u [29] faktor ponašanja konstrukcije iznosio $q = 2,95$, što bi dovelo do više razine seizmičke otpornosti.

$$q = \sqrt{2\mu - 1} \quad (5)$$

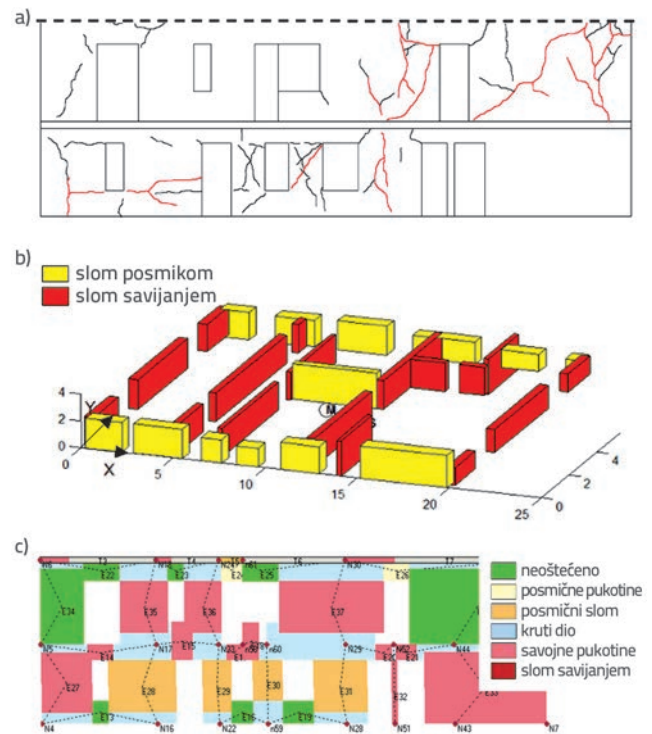
Naša analiza uzima u obzir mehanička svojstva dobivena terenskim ispitivanjima posmika i ispitivanjima pomoću dvostrukog tlačnog jastuka (osim stvarnih vrijednosti duktilnosti). Pretpostavljen je stupanj potpunog poznavanja građevine (KL3) te faktor pouzdanosti od $CF = 1,0$ prema EC8-3 [30]. Stoga su u numeričkoj analizi korištene stvarno dobivene vrijednosti. Da bi se usporedili rezultati dobiveni primjenom dvaju gore spomenutih programa, rezultati dobiveni pomoću SREMB-a pretvoreni su u oblik pogodan za ULSPGA (granično stanje vršnog ubrzanja tla) uzimajući u obzir odnose definirane u metodi N2 [31]. Dobiveni rezultati prikazani su na slici 10. Ako se primijeni faktor tla $S = 1,2$, očekivano vršno ubrzanje tla na mikrolokaciji građevine iznosi $0,27g$, a označeno je crtkanom linijom. Kao što možemo vidjeti, niti jedan od tih program ne omogućuje postizanje seizmičkog odziva građevine u postojećem neinjektiranom stanju.



Slika 10. Seizmička otpornost građevine u postojećem stanju, izračunana pomoću programa SREMB i 3MURI

Oblik pukotina registriran na južnom fasadnom zidu uspoređuje se s načinom sloma u graničnom stanju nosivosti prema programima SREMB i 3MURI za postojeće neinjektirano stanje (vidi sliku 11.). Kao što možemo vidjeti, u oba modela posmični slom prevladava na prizemlju, što je u skladu sa stvarno registriranim oblikom pukotina. Nešto bolja interpretacija postojećeg stanja oštećenja prizemlja dobiva se pomoću modela 3MURI. Na gornjem katu, model 3MURI prije svega predviđa savojne pukotine u srednjem dijelu te izostanak oštećenja na lijevom i desnim dijelovima zidova. U postojećem stanju savojne pukotine postoje, ali se uočavaju

i značajne posmične pukotine uglavnom u krajnje desnim i krajnje lijevim dijelovima zidova.

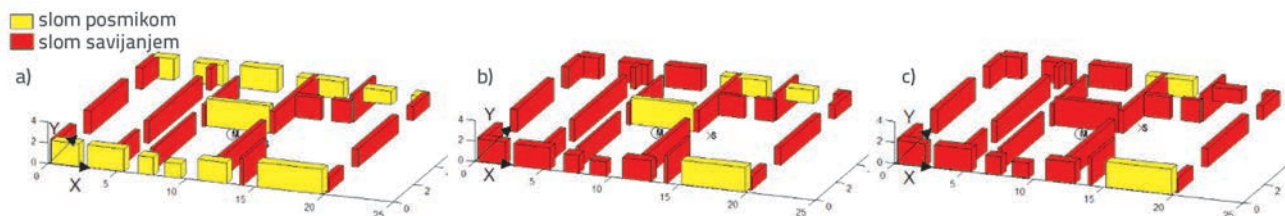


Slika 11. Oblik pukotina registriran na južnoj fasadi: a) usporedba sa slomom u graničnom stanju opterećenja prema modelu SREMB; b) prema modelu 3MURI; c) neamirano stanje

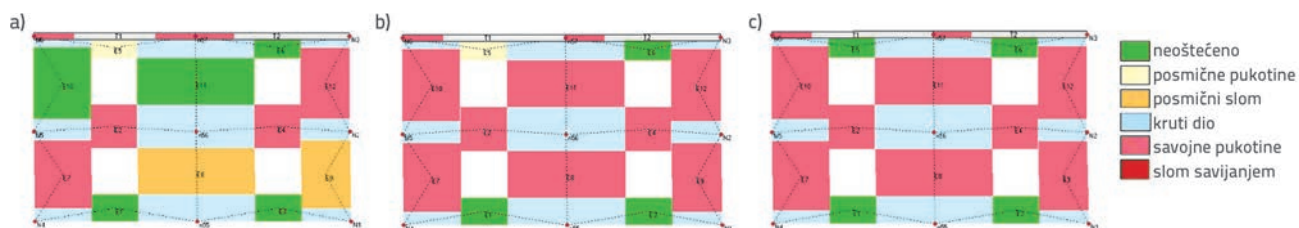
Rezultati istraživanja obrasca pojave pukotina pokazuju da oštećenja nisu koncentrirana samo u stupovima zidova na prizemlju kao što se predviđa u modelu SREMB, već da se pukotine također javljaju i na gornjem katu i u području nadvoja na donjem katu. Iako modelom 3MURI nije postignuta točna interpretacija stvarnog stanja oštećenja, izgleda da kod analizirane građevine taj model omogućuje bolju aproksimaciju stvarnog stanja od modela SREMB.

6. Utjecaj vrste injekcijske smjese na seizmičku otpornost građevine

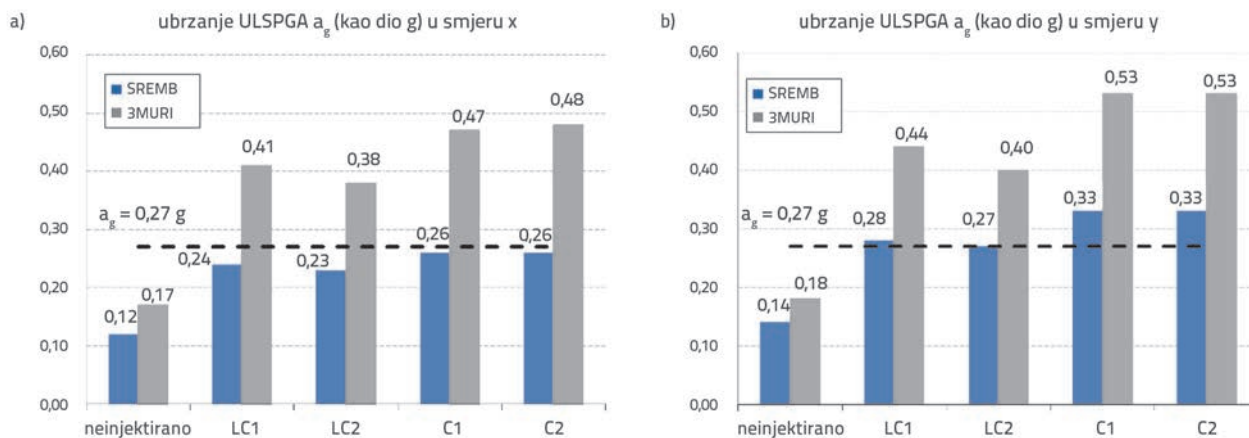
Da bi se odredio utjecaj dobivenih rezultata terenskih ispitivanja na seizmičku otpornost građevine prije i nakon injektiranja pomoću smjesama C1, C2, LC1 i LC2, ponovo je obavljena seizmička analiza i to pomoću oba programa (SREMB i 3MURI). Kao i kod neojačanog stanja, u analizi nakon injektiranja korišten je jednaki faktor ponašanja konstrukcija $q = 1,5$. I u ovom bi se slučaju, da su u obzir uzete stvarne duktilnosti, dobile više razine seizmičke otpornosti (naročito u slučaju smjese C1 gdje je postignuta najviša vrijednost faktora duktilnosti, $\mu = 4,21$). Usporedba slomova u smjeru x, određenih pomoću programa SREMB za stanje prije i nakon injektiranja, prikazana je na slici 12. Kao što na toj



Slika 12. Načini sloma kod graničnog stanja nosivosti u smjeru x, određeni pomoću programa SREMB: a) prije injeckiranja; b) nakon injeckiranja s LC1; c) nakon injeckiranja s C1



Slika 13. Načini sloma kod graničnog stanja nosivosti u smjeru y (zapadni fasadni zid), određeni pomoću programa 3MURI: a) prije injeckiranja; b) nakon injeckiranja pomoću smjese LC1; c) nakon injeckiranja pomoću smjese C1



Slika 14. Ubrzanje ULSPGA a_g (kao dio g) izračunano pomoću programa SREMB i 3MURI za sve razmatrane slučajeve: a) u smjeru x; b) u smjeru y

slici vidimo, u postojećem neinjektiranom stanju prevladava posmični slom. Kako vlačna čvrstoća zidova znatno raste nakon injeckiranja, mehanizam sloma mijenja se s posmičnog na savojni za većinu zidova u smjeru x. S obzirom na to da je povećanje vlačne čvrstoće veće ako se koristi cementna injeckijska smjesa, udio zidova kod kojih dolazi do savojnog sloma nešto je veći nakon injeckiranja pomoću smjesa C1 i C2 nego kod injeckiranja cementnim smjesama LC1 i LC2. U smjeru y, zidovi su uglavnom duži (manji je odnos visine prema dužini), pa je stoga posmik dominantan način sloma, čak i nakon injeckiranja.

Usporedba slomova u smjeru y, dobivenih pomoću programa 3MURI prije i nakon injeckiranja, prikazana je na slici 13. U postojećem neinjektiranom stanju, posmični slom prevladava u stupovima zidova sa savojnim pukotinama u nadvojima donjeg kata. Zidovi gornjeg kata uglavnom su neoštećeni, osim posmične pukotine na lijevom nadvoju, te savojne pukotine na desnom stupu. Nakon injeckiranja, savojne su se pukotine

formirale u većini zidnih elemenata, bez obzira na vrstu injeckijske smjese (LC1 ili C1). Što se tiče duktilnog ponašanja i rasapa energije tijekom seizmičkog opterećenja, savojni mehanizam koji prevladava nakon injeckiranja pogodniji je od posmičnog mehanizma.

Seizmička otpornost konstrukcije, izražena pomoću ULSPGA a određena pomoću programa SREMB i 3MURI prije i nakon injeckiranja, prikazana je na slici 14. Nakon injeckiranja, seizmička otpornost izračunana pomoću oba programa bitno se povećala, ali je nešto veće povećanje zabilježeno kod cementnih injeckijskih smjesa C1 i C2 u odnosu na injeckijske smjese s vapnom i cementom (LC1 i LC2). Kao što možemo vidjeti, vrijednosti dobivene primjenom programa 3MURI bitno su više od vrijednosti dobivenih pomoću programa SREMB. 3MURI uzima u obzir čitavu konstrukciju i dopušta formiranje mehanizama sloma u stupovima i nadvojima, s ravnomjernom raspodjelom po čitavoj visini konstrukcije. Stoga je deformacijska otpornost takve konstrukcije mnogo

veća u usporedbi s jednokatnim mehanizmom koji se koristi u programu SREMB, što dovodi do viših vrijednosti ULSPGA. U neinjektiranom stanju, vrijednost ULSPGA je veća za 41,7 % u smjeru x te za 28,6 % u smjeru y kod globalnog mehanizma u odnosu na katni mehanizam. Nakon injektiranja, usporedba između različitih modela pokazuje povećanje od 70,8 % u smjeru x te od 57,1 % u smjeru y kada se koristi smjesa LC1, te za 80,8 % i 60,6 % u smjeru x tj. y kada se koristi smjesa C1, sve to u korist globalnog mehanizma odziva.

Povećanje seizmičke otpornosti građevine nije izravno proporcionalno poboljšanju mehaničkih svojstava zidova koje je dobiveno tijekom terenskih ispitivanja. To se moglo i očekivati jer je seizmička otpornost građevine također ovisna i o nekim drugima parametrima kao što su geometrija i raspored zidova, stupanj vertikalnog opterećenja, vrsta spoja između zidova i ploča, te numerički model odabran za proračun konstrukcije. Usporedba izračunanih perioda (za idealizirani sustav s jednim stupnjem slobode) pokazuje da krutost konstrukcije bitno raste nakon injektiranja. U smjeru x, osnovni period građevine u njenom postojećem neinjektiranom stanju iznosi 0,21 s (3MURI) tj. 0,16 s (SREMB), a smanjuje se na 0,11 s (3MURI) tj. 0,08 s (SREMB) nakon injektiranja pomoću cementnih injekcijskih smjesa C1 ili C2. Kada se koriste smjese s vapnom i cementom tj. smjese LC1 i LC2, izračunani periodi iznose 0,12 s za smjesu LC1 tj. 0,09 s za smjesu LC2.

7. Zaključak

Ovo je istraživanje provedeno u svrhu određivanja djelotvornosti raznih vrsta injekcijskih smjesa kada se koriste za poboljšanje nosivosti zidanih kamenih zidova, te radi određivanja seizmičke otpornosti građevine promatrane u cjelini. Mehanička svojstva valjaka koji predstavljaju unutarnju jezgru ojačanog zidanog kamenog zida bila su bolja u slučaju injektiranja valjaka cementom, nego u slučaju injektiranja valjaka smjesom vapna i cementa, tj. smjesom vapna i pucolana. Analiza presjeka nakon određivanja vlačne čvrstoće pri cijepanju pokazala je da je najčešći način sloma bio slom na spoju, i to bez obzira na vrstu smjese korištene u postupku injektiranja. To upućuje na važnost čvrstoće prijanjanja između kamena i injekcijske smjese, a i u skladu je s rezultatima koje su dobili neki drugi istraživači [7, 8]. Ispitivanja na valjcima, isto kao i terenska ispitivanja posmika na zidovima, pokazala su da mehanička svojstva ispitanih zidova u velikoj mjeri ovise o vrsti i svojstvima injekcijske smjese korištene za injektiranje.

Dobiveni rezultati pokazuju da bi se vrsta i svojstva injekcijske smjese trebala uzeti u obzir i pri ocjenjivanju djelotvornosti pojedinih injekcijskih smjesa primjenom određenih tipologija za zidane kamene konstrukcije (visok udio šupljina, debeli spojevi s mortom, slaba mehanička svojstva konstitutivnih materijala, nekorištenje poprečnih kamenih veza). Osim toga, korekcijski koeficijenti za mehanička svojstva zidanih kamenih zidova nakon injektiranja trebali bi u takvim slučajevima biti viši, što se u nekim tekstovima i predlaže [14, 26]. Različiti stupnjevi poboljšanja mehaničkih svojstava uzoraka zida očituju se i u različitim razinama poboljšanja seizmičke otpornosti građevine. Usporedba slomova pri graničnim stanjima nosivosti prije injektiranja i registriranog potresnog oštećenja građevine pokazuje da se bolja aproksimacija stvarnog oštećenja može dobiti primjenom globalnog mehanizma odziva (3MURI) nego li kada se primjenjuje katni mehanizam (SREMB). Ova konstatacija najvjerojatnije vrijedi i za situaciju nakon injektiranja. Kada se koristi mehanizam globalnog odziva, tada znatno rastu vrijednosti ULSPGA u odnosu na vrijednosti dobivene primjenom katnog mehanizma. Očito je da se kod primjene katnog mehanizma podcjenjuje seizmička otpornost građevine. U slučaju postojećih građevina, to bi moglo dovesti do suviše invazivnih i neprikladnih mjera ojačanja, a to bi opet moglo biti posebno štetno za povijesne građevine s izuzetno vrijednim arhitektonskim i kulturnim elementima kao što su freske i strukturirana ukrasna žbuka (štuko). S druge strane, čini se da bi se odgovarajuća razina seizmičke otpornosti mogla postići čak i sa smjesom baziranom na hidrauličnom vapnu ako se primjenjuje globalni mehanizam odziva. Bez obzira na numeričku metodu koja se primjenjuje, veća seizmička otpornost građevine postignuta je nakon injektiranja pomoću cementne smjese negoli pomoću smjesa s vapnom i cementom. Nakon injektiranja pomoću bilo koje od tih smjesa, mehanizam sloma zidova s višim odnosom visine prema dužini uglavnom se mijenjao tako da je prelazio s posmičnog na savojni, što je povoljnije u smislu ostvarenja duktilnog ponašanja i rasapa energije tijekom seizmičkog opterećenja.

Zahvale

Ovo istraživanje djelomično je potpomognuto sredstvima iz Kohezijskog fonda Europske unije putem Slovenske agencije za tehnologiju TIA, te kroz projekt PERPETUATE koji financira Europska komisija u sklopu 7. okvirnog programa (FP7/2007-2013) putem ugovora o dodjeli sredstava br. 244229.

LITERATURA

[1] Valluzzi, M.R.: On the vulnerability of historical masonry structures: analysis and mitigation, *Materials and Structures*, 40, 7, pp. 723-743, 2007.

[2] Vasconcelos, G., Lourenço, P.B.: In-plane experimental behavior of stone masonry walls under cyclic loading, *Journal of Structural Engineering*, 135, 10: pp. 1269-1277, 2009.

- [3] Tomažević, M.: Masonry buildings in earthquake prone areas, Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Slovenia, 91 p., 1989. (in Slovenian)
- [4] Van Rickstal, F.: Grout injection of Masonry, scientific approach and modelling, Doctoral Dissertation, Leuven, Katholieke Univ. Leuven, 195 p., 2000.
- [5] Tomažević, M., Apih, V.: Masonry-friendly grouting as a method of improvement of characteristics of stone masonry walls, Informations ZRMK Ljubljana, 306 and 307, Year XXXIV, 12 p., 1993. (in Slovenian).
- [6] Vintzileou, E., Tassios, T.P.: Three-leaf stone masonry strengthened by injecting cement grouts. *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 121(5), pp. 848-856, 1995.
- [7] Toumbakari, E.E., Van Gemert, D., Tassios, T.P., Vintzileou, E.: Experimental investigation and analytical modeling of the effect of injection grouts on the structural behaviour of three-leaf masonry walls, *Structural analysis of Historical Constructions.*, London, Taylor & Francis Group, pp.707-717, 2005.
- [8] Miltiadou-Fezans, A., Vintzileou, E., Papadopoulou, E., Kalagri, A.: Mechanical Properties of Three-Leaf Stone Masonry after Grouting, *Structural analysis of Historical Constructions*, New Delhi, India: pp. 791-798, 2006.
- [9] Binda, L., Baronio, G., Tiraboschi, C.: Repair of brick masonries by injection of grouts: experimental research, *Journal of Structural Engineering* 20, 1, pp. 29-44, 1993.
- [10] Toumbakari, E.E.: Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls, Doctoral Dissertation, Leuven, Katholieke Univ. Leuven, 364 p., 2002.
- [11] Fister, P.: The art of architecture in Slovenia, Ljubljana, Cankarjeva založba, 439 p., 1986. (in Slovenian),
- [12] Binda, L., Saisi, A.: State of the Art of Research on Historic Structures in Italy, http://www.arcchip.cz/w11/w11_binda.pdf (15.08.2008), 51 p., 2001.
- [13] Binda, L., Baronio, G., Mirabella Roberti, G., Penazzi, D.: Caratteristiche morfologiche e meccaniche di alcune murature di Catania, *L'ingegneria sismica in Italia*, 9° Convegno Nazionale, Torino, 1999.
- [14] Bosiljkov, V., Kržan, M.: Results of laboratory and in-situ tests on masonry properties and tables with mechanical parameters to be adopted in numerical modelling, PERPETUATE (ECFP7 project), Deliverable D15 (www.perpetuate.eu), 225 p., 2012.
- [15] Istruzioni per l'applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 Gennaio 2008, G.U.S.O.n.27 of 26.6.2009, No. 47, Ministry of Infrastructures and transportation, Circ. C.S.L1.Pp. No. 617, 2009.
- [16] Penazzi, D., Valluzzi, M.R., Saisi, A., Binda, L., Modena, C.: Repair and strengthening of historic masonry buildings in seismic areas, International congress, more than two thousand years in the history of architecture safeguarding the structure of our architectural heritage, Bethlehem, Palestine, pp. 1-6, 2001.
- [17] Uranjek, M., Bosiljkov, V., Žarnič, R., Bokan-Bosiljkov, V.: In situ tests and seismic assessment of a stone-masonry building, *Materials and Structures*, 45, 6, pp. 861-879, 2012.
- [18] Schickert, G.: Formfaktoren der Betondruckfestigkeit, *Die Bautechnik* 58 (2), pp. 52-57, 1981.
- [19] SIST EN 772-1: 2002: Methods of test for masonry units-part 1: determination of compressive strength, Slovenian Institute for Standardization, Ljubljana, 11 p., 2002.
- [20] EN 445: Grout for prestressing tendons-test methods, European Committee for Standardization, Brussels, 12 p. 1996.
- [21] SIST EN 1015-10: 2001: Methods of test for mortar for masonry-part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar, Slovenian Institute for Standardization, Ljubljana, 7 p., 2001.
- [22] SIST EN 1015-11: 2001: Methods of test for mortar for masonry-part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, Slovenian Institute for Standardization, Ljubljana, 12 p., 2001.
- [23] SIST EN 12390-6: 2001: Testing hardened concrete-part 6: Tensile splitting strength of test specimens, Slovenian Institute for Standardization, Ljubljana, 10 p., 2001.
- [24] SIST EN 12390-3: 2002: Testing hardened concrete-part 3: Compressive strength of test specimens, Slovenian Institute for Standardization, Ljubljana, 15 p., 2002.
- [25] Turnšek, V., Čačovič, F.: Some experimental results on the strength of brick masonry walls, *Proceedings of the 2nd international brick-masonry conference*, Stoke-on-Trent, UK, pp. 149-156, 1971.
- [26] Tomažević, M.: Seismic resistance of masonry buildings in historic urban and rural nuclei: lessons learned in Slovenia, *International Journal of Arhitectural Heritage* 5 (4-5), pp. 436-465, 2011.
- [27] Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., Cattari, S.: TREMURI program: an equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings, *Engineering Structures*, 56, pp. 1787-1799, 2013.
- [28] SIST EN 1998-1 Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings, Slovenian Institute for Standardization, Ljubljana, 229 p., 2005.
- [29] Tomažević, M.: Earthquake-resistant design of masonry buildings, *Series on innovation in structures and construction*, Vol. 1, London, Imperial College Press, 268 p., 1999.
- [30] SIST EN 1998-3 Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance-part 3: assessment and retrofitting of buildings, Slovenian Institute for Standardization, Ljubljana, 89 p., 2005.
- [31] Fajfar, P.: A nonlinear analysis method for performance-based seismic design, *Earthquake spectra*, ISSN 8755-2930, Vol. 16, No.3, pp. 573-592, 2000.