

Protupotresna obnova postojećih zidanih građevina

Miha Tomažević

Ključne riječi

postojeće zidane zgrade, otpornost na potres, protupotresna obnova, zidana konstrukcija, seizmička opterećenja, svojstva materijala

M. Tomažević

Pregledni rad

Protupotresna obnova postojećih zidanih građevina

Razmatraju se osnovni kriteriji za protupotresnu obnovu zidanih zgrada u potresnim područjima. Za poboljšanje otpornosti potrebno je osigurati cjelovitost zidane konstrukcije, te poboljšati postojeće zide. Iako se obično zahtijeva primjena istih kriterija seizmičke otpornosti za obnovu postojećih i gradnju novih građevina, ipak se u nekim slučajevima proračunsko seizmičko opterećenje može smanjiti. Daju se preporuke za određivanje karakterističnih vrijednosti svojstava materijala.

Key words

existing masonry buildings, seismic resistance, seismic rehabilitation, masonry structure, seismic load, material properties

M. Tomažević

Subject review

Seismic rehabilitation of existing masonry structures

Basic criteria for seismic rehabilitation of masonry buildings in earthquake-prone areas are considered. To increase resistance, uniform behavior of the masonry structure must be ensured and the existing masonry walls must be improved. Although similar seismic resistance criteria are usually applied for renewal of the existing and construction of new structures, there are cases in which design seismic load may be reduced. Recommendations for determining typical values for material properties are given.

Mots clés

maçonneries existantes, résistance au séisme, rénovation parasismique, maçonnerie, charge sismique, propriétés des matériaux

M. Tomažević

Ouvrage de synthèse

Rénovation parasismique des maçonneries existantes

L'article étudie les principaux critères de la rénovation parasismique des maçonneries dans des régions sismiques. Pour améliorer la résistance il est nécessaire d'assurer l'intégrité de la maçonnerie et de renforcer les murs existants. Bien que les mêmes critères de la résistance aux séismes soient généralement requis pour la rénovation des constructions existantes et pour les nouvelles constructions, dans certains cas la charge sismique de calcul peut être réduite. On donne des recommandations pour la détermination des valeurs caractéristiques des propriétés des matériaux.

Schlüsselworte:

bestehende Mauerbauwerke, seismische Widerstandsfähigkeit, antiseismische Erneuerung, gemauerte Konstruktion, seismische Belastungen, Baustoffeigenschaften

M. Tomažević

Übersichtsarbeit

Antiseismische Erneuerung bestehender Mauerbauwerke

Es werden Grundkriterien betrachtet für die antiseismische Erneuerung von Mauerbauwerken in seismischen Gebieten. Zwecks Erhöhung der Widerstandsfähigkeit muss die Kompaktheit der gemauerten Konstruktion sichergestellt, sowie das bestehende Mauerwerk verbessert werden. Obwohl man meistens die Anwendung von gleichen Kriterien der seismischen Widerstandsfähigkeit für die Erneuerung von bestehenden und den Bau von neuen Bauwerken verlangt, kann doch in einigen Fällen die seismische Berechnungsbelastung reduziert werden. Es sind Empfehlungen für die Bestimmung der charakteristischen Werte der Baustoffeigenschaften angeführt.

Autor: **Miha Tomažević**, Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija

1 Uvod

Iako možemo očekivati da će se u slučaju potresa zgrade koje su projektirane i izvedene u skladu s modernim seizmičkim propisima ponašati na zadovoljavajući način, to ipak nije uvijek slučaj kod raznovrsnih starih zidanih zgrada, uključujući i povijesne spomenike, koji su još uvijek bitno zastupljeni u postojećem graditeljskom fondu u mnogim seizmičkim područjima. Kako se tu radi o tradicionalnom i neinženjerskom građenju, oštećljivost takvih zgrada na djelovanje potresa relativno je velika. Stoga ne začuđuje činjenica da je u nedavnim potresima najčešći uzrok šteta i ljudskih žrtava baš neadekvatno ponašanje zidanih zgrada koje su izvedene primjenom tradicionalnih metoda građenja.

Da bi se kod takvih zgrada umanjio rizik od oštećenja zbog potresa, posljednjih su se desetljeća provodila opsežna ispitivanja, što uključuje i analizu uočenih seizmičkih oštećenja te eksperimentalna istraživanja. Kao rezultat tih nastojanja razvijene su eksperimentalno provjerenе metode za aseizmičko pojačanje zida i čitavih zgrada. Izrađene su odgovarajuće preporuke i propisi za pojačanje i popravljane, pa u tom smislu vrijedi istaknuti novi Eurokod 8, Dio 1-4 "Pojačavanje i popravak zgrada" (EC 8-1-4). Dokument EC 8-1-4 "izrađen je naročito zbog sljedećih razloga:

- U vrijeme izvođenja većine starih građevina projektiranje radi zaštite od potresa uopće nije postojalo, iako su se u obzir uzimala uobičajena djelovanja - barem u skladu s tradicionalnim pravilima građenja
- Ocjena seizmičke opasnosti na temelju sadašnjih spoznaja može upozoriti na potrebu obavljanja radova pojačanja
- Pojava potresa može dovesti do stanja koje zahtijeva obavljanje značajnih popravaka."

U ovom se radu prikazuju iskustva koja su stečena u Zavodu za gradbeništvo Slovenije (ZAG) u vezi sa seizmičkom obnovom postojećih zidanih zgrada. Razmatraju se osnovni kriteriji za biranje tehničkih mjera seizmičke obnove, te se daju eksperimentalno dobivene vrijednosti nekih od najznačajnijih parametara za provjeru seizmičke otpornosti i za ponovno projektiranje.

2 Ugrožene zgrade i seizmičko ponašanje

Slovenija je smještena u potresnom području gdje se mogu očekivati potresi intenziteta od 7° prema ljestvici intenziteta potresa EMS (europska makroseizmička ljestvica) s povratnim razdobljem od 475 godina. Prema klasifikaciji EMS potres sedmog stupnja smatra se jakim potresom koji može dovesti do oštećenja tradicionalnih i modernih građevina koje nisu projektirane i izvedene tako da budu otporne na potresno opterećenje. U Ljub-

ljani je opasnost od potresa izuzetno velika. Prema novim još uvijek neslužbenim seizmičkim kartama, očekivano povratno razdoblje za potres sedmog stupnja iznosi 100 godina, a proračunsko ubrzanje tla koje treba uzeti u obzir pri provjeri seizmičke otpornosti jest 0,25 g.

U Sloveniji se stoljećima kao tradicionalni građevni materijal rabio lokalno dostupni kamen, a ponekad, iako prilično rijetko, i cigla. Zgrade čija visina doseže i do pet katova (slika 1.) sastavljene su od dvoslojnih zidova od lomljenog kamena s ispunom od manjih komada kamena, dok se kao vezivo rabio vapneni mort. Stropne su konstrukcije sastavljene od drvenih greda, a iznad podruma i prizemlja, ili pak iznad prolaza, često su se izvodili svodovi i lukovi od cigla. Stoljećima su drvene i/ili željezne sponе služile za pojačanje konstrukcijske cjelovitosti zidanih zgrada i za sprječavanje bočne nestabilnosti zida zbog horizontalnih seizmičkih opterećenja koja se javljaju izvan ravnine konstrukcije. Međutim, iako je ideja o povezivanju zidova prilično stara, ipak treba napomenuti da mnoge postojeće zidane zgrade koje nalazimo u seizmičkim područjima nisu pojačane na odgovarajući način sponama.



Slika 1. Tipične zgrade u povijesnoj jezgri Ljubljane

Cigla je zamijenila kamen u 19. stoljeću. Nakon velikog potresa u Ljubljani 1895. godine, mnoge su se stambene i javne zidane zgrade počele graditi u skladu s uredbom o protupotresnoj otpornosti zgrada koja je donesena u

godinama nakon tog potresa, te koja je zapravo jedan od prvih seizmičkih propisa u svijetu. Tim je preporukama ograničena visina zgrada na 5 katova (20 m), propisana je kakvoća cigle i morta te je uvedeno povezivanje zidova čeličnim sponama na razini katova.

Cigla se upotrebljavala češće od armiranog betona u gradnji stambenih zgrada u razdoblju između dva svjetska rata i neposredno nakon Drugog svjetskog rata. Međutim, iako je kakvoća predratne gradnje u mnogim slučajevima prihvatljiva unatoč ponekad neadekvatnom rasporedu nosive konstrukcije, to se često ne može reći za gradnje koje su nastale u poslijeratnom razdoblju. Česte su grube pogreške u rasporedu nosive konstrukcije. Nosivi zidovi predviđeni su samo u jednom smjeru što može dovesti do rušenja, kao što to možemo vidjeti na primjeru potresa 1963. godine u Skoplju. Tu također trebamo napomenuti da je visina zidanih građevina izvedenih tijekom pedesetih godina (12-14 katova) znatno premašivala granične vrijednosti koje se primjenjuju na obične zidane građevine. Naknadne su eksperimentalne i analitičke studije pokazale da je oštetljivost takvih zgrada na utjecaj potresa izuzetno velika.



Slika 2. Podbela, 1976: srušena zidana kuća od kamena

Stare zidane zgrade u urbanim i ruralnim jezgrama trpe velika oštećenja u slučaju jakog potresa. Neki tipični primjeri takvih oštećenja prikazani su na slikama 2. i 3. Na temelju uočenih oštećenja možemo definirati osnovne konstrukcijske manjkavosti postojećih zidanih zgrada:

- Nedovoljna cjelovitost konstrukcije, nedostatna veza između međusobno okomitih zidova i nepostojanje veze između zidova i stropnih konstrukcija, zbog čega dolazi do odjeljivanja nosivih zidova u kutovima i na spojevima zidova te do naknadnog rušenja zabata ili zidova položenih okomito u odnosu prema dominantnom smjeru seizmičkog gibanja tla okomito na njihovu ravninu.

- Loša kakvoća materijala pa stoga i neodgovarajuća bočna otpornost nosivih zidova što dovodi do pojave dijagonalnih pukotina u zidovima, do odvajanja te do konačnog rušenja.
- Uzrok teškim oštećenjima i rušenju ponekad je i neodgovarajući raspored opterećenja, pretjerana visina, veliki otvori i nedostatak nosivih zidova u nekom smjeru. Isto tako loše ponašanje uočeno je i kod rekonstruiranih zgrada, naročito u slučaju uklanjanja zidova u prizemlju ili dogradnje novih katova.



Slika 3. Drežniške Ravne, 1998: vertikalne pukotine u zidu prouzročene savijanjem izvan ravnine

Neadekvatno ponašanje temelja rijetko se pojavljuje, uglavnom samo kod poremećaja u tlu kao što su klizišta ili likvefakcija.

3 Kriteriji i tehničke mjere

Popravak oštećenja nakon potresa obuhvaća poboljšavanje seizmičke građevine samo do razine otpornosti koja je postojala prije potresa. S druge strane pojačanje (seizmičko poboljšanje) uključuje tehničke intervencije koje se obavljaju radi poboljšanja konstrukcijskog sustava, a tako se poboljšava otpornost povećanjem čvrstoće i duktilnosti konstrukcijskih elemenata. Kad se pojačanje obavlja prije potresa, tada govorimo da se radi o obnovi građevine.

3.1 Kriteriji

Seizmička otpornost postojeće zgrade osnovni je kriterij za donošenje odluke o pojačanju građevine. Ako se tijekom provjere seizmičke otpornosti ustanovi da neka zgrada neće moći izdržati očekivano seizmičko opterećenje uz prihvatljivu razinu sigurnosti, tada treba pojačati konstrukciju te zgrade.

Kako vrsta i opseg intervencije u konstrukcijski sustav ovisi o vrsti zgrade i njezinoj stvarnoj seizmičkoj otpornosti, logično je da su i gotovo svi ostali kriteriji također tehničke naravi. Izvedivost i djelotvornost tehničkih mjera za poboljšanje seizmičke otpornosti također ovisi o kakvoći konstrukcijskog materijala, o vrsti građevine te o njezinu stanju prije same intervencije. Ipak, prije donošenja konačne odluke u obzir valja uzeti neke opće kriterije koji se odnose na troškove intervencije i značenje zgrade, dostupnost odgovarajuće tehnologije i kvalificirane radne snage za provedbu tih mjera, trajanje radova i probleme namjene. Osim toga, u slučaju povijesnih zgrada treba uzeti u obzir i načelo očuvanja povijesne vrijednosti graditeljskog naslijeđa.

Da bi se dobili podaci potrebni za ponovno projektiranje, potrebno je obaviti odgovarajuća istraživanja i ispitivanja. Detaljna dijagnoza konstrukcije osnova je za donošenje odluke o tome koja su tehnološka rješenja najprikladnija za postizanje veće otpornosti građevine, te za realnu procjenu troškova potrebnih intervencija, koja je u velikom broju slučajeva najznačajniji kriterij za pojačanje i popravak.

3.2 Tehničke mjere

Treba osigurati dobro seizmičko ponašanje cjelokupnoga konstrukcijskog sustava. Stoga nije dovoljno pojačati pojedine elemente konstrukcije ili konstrukcijske sklopove kao što bismo radili u slučaju da se pojačanje obavlja zbog gravitacijskog opterećenja. Da bi bila otporna na seizmička opterećenja, čitava građevina treba posjedovati odgovarajuću otpornost, duktilnost i sposobnost raspršivanja energije.

Tehničke mjere za poboljšanje seizmičke otpornosti postojećih zidanih zgrada temelje se na sljedećem:

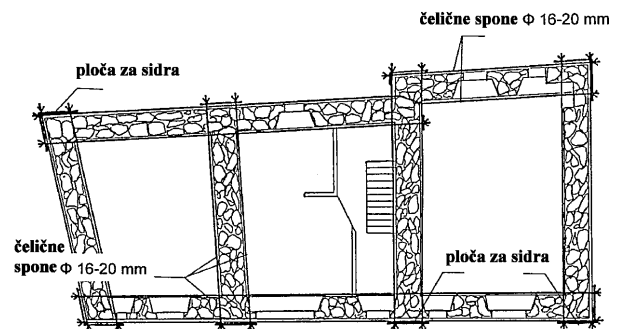
- Zidovi moraju biti adekvatno povezani; stropne konstrukcije trebaju biti usidrene u zidove a njihova krutost treba udovoljavati zahtjevima za raspoređivanje seizmičkih opterećenja na zidove. Tako će se očuvati cjelovitost konstrukcije i spriječiti pretjerano izvanravinsko vibriranje zidova za potresa.
- Konstrukcijski zidovi trebaju biti ravnomjerno raspoređeni u dva ortogonalna smjera zgrade. Treba ih biti dovoljno a njihova čvrstoća treba biti dostatna za uspješno pružanje otpora očekivanim seizmičkim opterećenjima. Ako su potrebni novi konstruk-

cijski elementi, njih valja ravnomjerno rasporediti tlocrtno i po visini zgrade da ne bi došlo do neželjenih torzijskih učinaka.

- Temelji moraju imati takve karakteristike da mogu u tlo prenositi povećana granična opterećenja koja se pojavljuju zbog pojačanja konstrukcije.

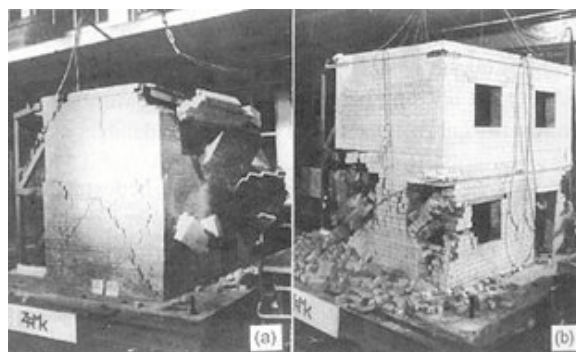
3.2.1 Osiguranje cjelovitosti konstrukcije

Da bi se osigurala cjelovitost konstrukcije te tako iskoristila otpornost nosivih zidova, postojeće drvene stropne konstrukcije zamjenjuju se armiranobetonskim pločama koje trebaju biti dobro oslonjene i usidrene u zidove, ili se pak zidovi povezuju čeličnim sponama dok se grednici postojećih drvenih stropnih konstrukcija sidre u zidove. Ako su rasponi veliki, drvene stropne konstrukcije ukrćuju se i dijagonalnim sponama. Zidne se spono postavljaju simetrično s obje strane zidova odmah ispod stropnih konstrukcija a navoji se urezuju na krajevima koji se sidre na čelične ploče s pomoću matica (slika 4.). Obično se upotrebljavaju glatke armaturne šipke.



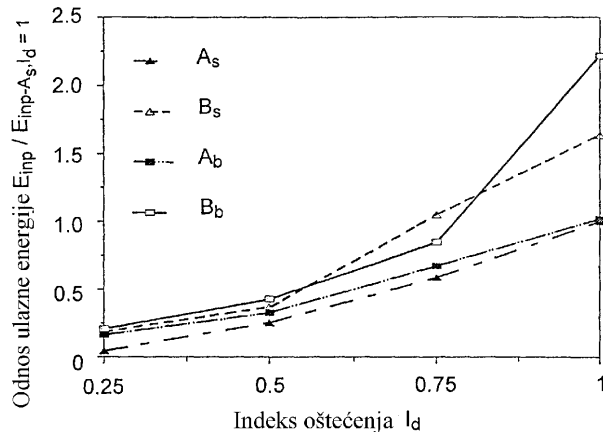
Slika 4. Tlocrtni raspored čeličnih spona u tipičnoj kamenoj zidanoj kući

Osnovni podaci o djelotvornosti postupaka za povezivanje zidova dobiveni su još 1974. godine [1]. Novija eksperimentalna istraživanja [6, 7] pokazuju da stropne podne konstrukcije s grednicima koji su samo oslonjeni na zidove ne mogu spriječiti odvajanje zidova. To može rezultirati djelomičnim rušenjem gornjih katova (slika 5.a).



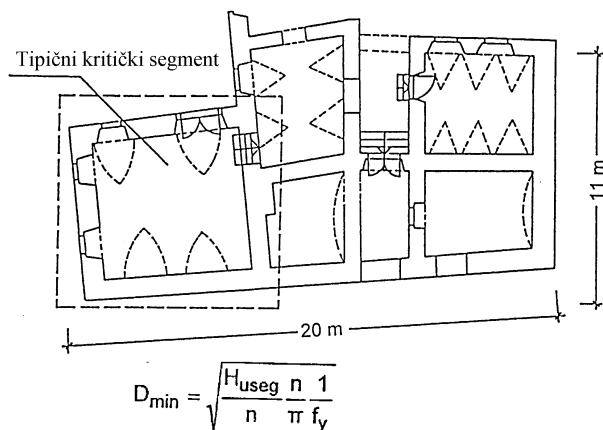
Slika 5. Mehanizam rušenja modela zidanih građevina od opeke bez spona zidova (a) bez zidnih spona (b) sa zidnim sponama

Međutim, ako se zidovi povežu čeličnim sponama, cjelovitost konstrukcije neće biti ugrožena i potpuno će se iskoristiti otpornost zidova (slika 5.b). Očuvanjem cjelovitosti konstrukcije poboljšava se seizmička otpornost zgrade i bitno se povećava sposobnost raspršivanja energije (slika 6.).



Slika 6. Oštećenje modela ovisno o ukupnoj ulaznoj energiji. A_s, A_b - zidane kuće od kamena i cigle bez spona; B_s, B_b - zidane kuće od kamena i cigle sa zidnim sponama

Na temelju tih istraživanja izvedene su preporuke koje se odnose na proračun spona. Spone zidova koje su ortogonalne u odnosu na seizmičko djelovanje, treba proračunati na momente savijanja koji nastaju u ekvivalentnom horizontalnom serklažu, tj. u dijelu zida između spona, a zbog izvanravninskog vibriranja zida. Međutim, one bi se u smjeru djelovanja trebale proračunati tako da budu otporne na sile koje se u sponama pojavljuju u graničnom stanju (slika 7.). Te su sile istog reda



D_{min} - minimalni promjer šipke
 n - broj šipaka
 f_y - granica popuštanja čelika
 H_{useg} - otpornost kritičnog segmenta

Slika 7. Definicija kritičnog segmenta građevine koja se rabi pri proračunu zidnih spona

veličine kao i granična seizmička poprečna sila u zidovima iznad njih. Stečena iskustva i eksperimenti pokazuju da su šipke promjera 16 mm u većini slučajeva sasvim dovoljne za zidane obiteljske kuće obične veličine.

Rezultati eksperimenata i podaci dobiveni praćenjem oštećenja nastalih tijekom potresa također pokazuju da sama zamjena drvenih stropnih konstrukcija armiranobetonskim pločama koje su oslonjene na unutarnjem sloju kamenog zida nije odgovarajuće rješenje za očuvanje cjelovitosti građevine. To je u novije vrijeme potvrđeno na dva primjera gdje je u oba slučaja zabilježen snažan potres koji je ponovljen dvadesetak godina kasnije (Posočje, Slovenija, 1976. i 1998. godine i Umbrija u Italiji, 1979. i 1997. godine). U zgradama u kojima je nakon prvog potresa drvena stropna konstrukcija zamijenjena armiranobetonskim pločama, a zidovi nisu istodobno bili pojačani injektiranjem cementa, teške i krute armiranobetonske ploče uzrokovale su pojavu horizontalnih pukotina odmah ispod ploča, izbacivanje ugaonih područja te naknadno odvajanje (delaminaciju) i ispadanje vanjskog dijela zida u tim područjima (slika 8.).



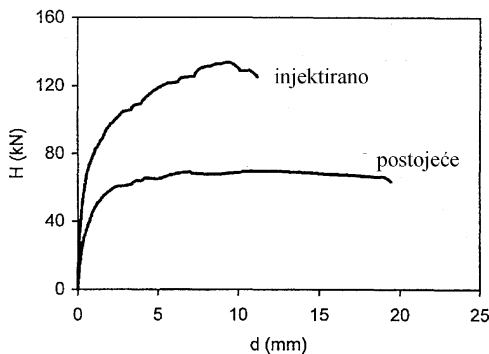
Slika 8. Sellano, Umbrija: posmik zida i izguravanje ugla zbog krute armiranobetonske ploče

3.2.2 Pojačanje zida

Razne se metode mogu upotrijebiti za pojačavanje različitih vrsta zidova. Izbor konačnog rješenja ne ovisi samo o traženom stupnju poboljšanja otpornosti, već također i o vrsti i kvaliteti materijala koji se rabi za izradu zidova.

U slučaju zidanih konstrukcija od kamena, tj. od mješavine kamena i cigle, pokazalo se da je sustavno ispunjavanje pukotina cementnom injekcijskom smjesom očita i vrlo djelotvorna metoda pojačavanja. Mogu se projektirati i posebne injekcijske smjese u kojima se dio cementa zamjenjuje inertnim agregatom, te se dodaju aditivi da bi se spriječile negativne posljedice koje proizlaze iz širenja vlage [5]. Sprečavanjem delaminacije i ispučavanja očuvat će se cjelovitost zida tijekom potresa, a to će znatno poboljšati otpornost građevine. Stupanj poboljša-

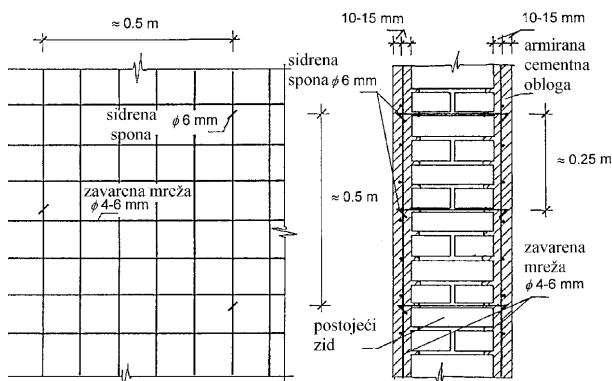
nja ovisi o kakvoći postojećeg zida. Ako se radi o zidu loše kakvoće, poboljšanje će biti znatno, dok u slučaju kvalitetnog zida poboljšanje neće biti tako veliko. Kao što je prikazano na slici 9. cementno injektiranje povećava bočnu krutost zida. Stoga se može preporučiti ravnomjerna ugradba cementne injekcijske smjese po čitavoj površini zida zgrade. Ako se to ne napravi, u slučaju potresa može doći do neočekivanog ponašanja djelomično pojačane zgrade.



Slika 9. Tipični odnosi bočnog opterećenja i pomaka za postojeći i cementom injektirani kameni zid

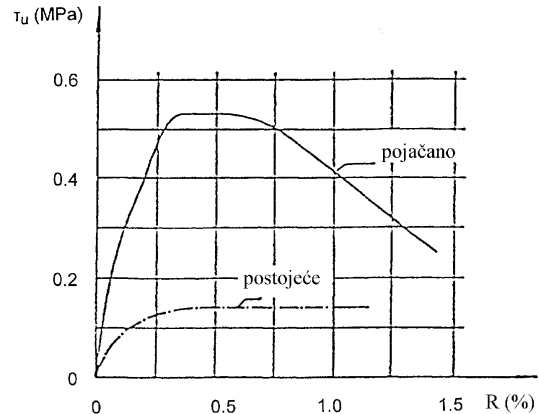
Iako se djelotvorne intervencije u slučaju zidanih konstrukcija od kamena mogu zapravo svesti na injektiranje smjese, ipak treba napomenuti da se za popravljivanje i pojačavanje tradicionalnih zidanih konstrukcija od cigle mogu upotrijebiti razne tehnologije. Ti se postupci mogu svrstati kako slijedi:

- Zatvaranje pukotina oštećenih zidova injektiranjem pukotina cementom ili epoksidnom smjesom.
- Nanošenje armiranih cementnih ili epoksidnih obloga na jednu ili obje strane zida. Rabi se armaturna mreža, ferocement i obloge od ugljičnih vlakana (slika 10.).
- Ponovno ispunjavanje sljubnica (fugiranje).
- Prednapinjanje zidova u horizontalnom ili vertikalnom smjeru.



Slika 10. Pojačanje opečnih zidova s pomoću armiranobetonske obloge

Zatvaranjem pukotina cementnom ili epoksidnom smjesom - a to je uobičajen način popravka - vraća se prvobitna nosivost zida, ali se krutost u većini slučajeva ne može dovesti u prvobitno stanje. Za pojačanje se upotrebljuje postupak oblaganja. Razne se tehnologije primjenjuju za učvršćivanje armature na zid te za nanošenje cementne žbuke ili betonske obloge. Rezultati ovise o otpornosti prvobitnog zida: ako je kvaliteta zida bila loša, otpornost zida može se više nego udvostručiti. Međutim stupanj poboljšanja nije tako značajan kada se radi o kvalitetnim zidovima (slika 11.).



Slika 11. Učinak pojačanja opečnog zida s pomoću armiranobetonske obloge

4 Provjera seizmičke otpornosti i ponovno projektiranje

Seizmička otpornost postojeće zidane zgrade provjerava se proračunom. Slabi elementi u konstrukciji, tj. mjesta na kojima treba obaviti pojačanje, određuju se primjenom odgovarajućih matematičkih modela. Ti su postupci relativno jednostavni kada se radi o starim urbanim ili ruralnim kućama. S druge strane, modeli trebaju biti prilično sofisticirani kada treba obraditi monumentalne povijesne građevine.

4.1 Proračunska seizmička opterećenja

Obično se pri ponovnom projektiranju postojećih građevina primjenjuje ista razina proračunskih seizmičkih opterećenja kao i za nove građevine. Prema EC8, proračunsko seizmičko opterećenje izraženo koeficijentom granične proračunske poprečne sile $BCS_{d,u}$, tj. odnosom između proračunskoga seizmičkog opterećenja i težine zgrade, određuje se s pomoću izraza:

$$BCS_{d,u} = \frac{a_g S \eta \beta_o}{q} \tag{1}$$

gdje je:

a_g - proračunsko ubrzanje tla

S - parametar tla

η - faktor za korekciju prigušenja,

β_0 - najveća spektralna vrijednost koja se smatra nepromjenljivom za vlastite periode prvog oblika vibracija u intervalu od $T = 0,1$ s do $T = 0,4$ s,

q - faktor ponašanja konstrukcije.

Ako pretpostavimo da je $S = 1,0$ (dobri uvjeti tla), $\eta = 1$, $\beta_0 = 2,5$ (što je uglavnom točno za zidane konstrukcije), te da je $q = 1,5$ (obične zidane zgrade), tada za ponovno projektiranje zidanih građevina smještenih u raznim seizmičkim područjima dobivamo vrijednosti $BCS_{d,u}$ koje su prikazane u tablici 1.

Tablica 1. Predložene vrijednosti smanjenja koeficijenta granične poprečne sile za provjeravanje seizmičke otpornosti starih zidanih zgrada

Veličina	Vrijednosti za različite intenzitete potresa prema EMS			
	VI	VII	VIII	IX
a_g	0,05	0,10	0,20	0,30*
$BCS_{d,u}$	0,08	0,17	0,33	0,50
γ_n	1,00	1,00	0,84	0,67
$BCS_{d,ur}$	0,08	0,17	0,25	0,33

* vrijednost iskazana u Slovenskom nacionalnom provedbenom dokumentu za EC 8

Iskustva nam pokazuju da se vrijednosti $BCS_{d,u}$, veće od 0,3 teško mogu postići primjenom uobičajenih tehničkih mjera na stare zidane zgrade. To se naročito odnosi na građevine koje imaju više od 3 kata. Bez dodavanja novih konstrukcijskih elementa bilo bi praktički nemoguće postići otpornost koja se zahtijeva za gradnju novih građevina. S druge strane, ipak trebamo naglasiti da su zabilježeni brojni slučajevi u kojima su građevine izdržale potres, iako su proračunane vrijednosti $BCS_{d,u}$ bile niže od traženih za dano potresno područje. To ide u prilog ideji da se pri ponovnom projektiranju starih zidanih građevina proračunska seizmička opterećenja mogu smanjiti u slučajevima kada se seizmička obnova obavlja u područjima visoke i srednje seizmičnosti, i to bez opasnosti da će se te građevine loše ponašati kada dođe do potresa [9].

Prema EC 8-1-4, proračunsko se ubrzanje tla može smanjiti u slučajevima kada bi se ukupni predvidivi troškovi pojačanja čitavog skupa zgrada koje se obnavlja u određenom urbanom području naglo povećali radi podizanja vrijednosti a_g prema razini koja se traži u eurokodu, isto kao i kada bi se trebale obaviti potpuno neprihvatljive arhitektonske modifikacije radi postizanja vrijednosti a_g koje se u eurokodu traže za ponovno projektiranje nekog spomenika.

Uzimajući u obzir preporuke koje se daju u EC-1-4, može se predložiti redukcijfski faktor od $\gamma_n = 0,67$ za proračunska seizmička opterećenja u području devetog stupnja te redukcijfski faktor $\gamma_n = 0,84$ u području osmog stupnja

prema EMS ljestvici [10]. Nikakvo se reduciranje ne preporučuje za područje sedmog stupnja i za područja slabijih potresa. U područjima male opasnosti od potresa, donosi se samo odluka o tome je li uopće potrebno obaviti pojačanje postojećih zidova. U svakom je slučaju potrebno predvidjeti povezivanje zidova.

U tablici 1. prikazane su rezultirajuće vrijednosti koeficijenta granične proračunske poprečne sile $BCS_{d,ur}$ koje treba usvojiti u postupku ponovnog projektiranja građevina. Analizom seizmičke otpornosti velikog broja pojačanih kuća ustanovljeno je da se te vrijednosti mogu postići čak i kada se radi o višim zgradama. Kao što pokazuje nedavna analiza oštećenja na zidanim zgradama od kamena koje su pojačane nakon potresa koji su se dogodili prije 20 godina, te koje su nedavno ponovno pretrpjele potrese istog intenziteta, ti su zahtjevi sasvim realni, pa možemo zaključiti da ih treba poštivati pri ponovnom projektiranju takvih građevina [9]. Potrebno je međutim istaknuti da se provjera seizmičke otpornosti postojećih zidanih zgrada koja se daje u tablici 1. može smatrati razumnom samo u slučajevima kada je osigurana seizmička cjelovitost konstrukcijskog sustava, i to povezivanjem zidova na razini pojedinačnih stropnih konstrukcija. Samo se tako može iskoristiti sposobnost raspršivanja energije koja je pretpostavljena faktorom ponašanja konstrukcije q .

4.2 Mehanička svojstva zidanih konstrukcija

Uzorci kamena, cigle i morta uzimaju se iz zida i ispituju u laboratoriju da bi se odredila mehanička svojstva postojećeg zida. Međutim, kako je zide neelastično, nehomogeno i anizotropno, njegova se mehanička svojstva ne mogu uvijek odrediti na temelju ispitivanja sastavnih materijala. Stoga treba ispitati i same konstrukcije, naročito u slučajevima kada je potrebno obnoviti veliki broj građevina iste tipologije. U takvim se slučajevima ispitivanja obavljaju *in situ* jer izrezivanje uzoraka na odgovarajuću veličinu i prijevoz do laboratorija obično dugo traje i povećava troškove.

Potrebno je napomenuti da za zide od cigle i kamena nema mnogo eksperimentalnih podataka o mehaničkim svojstvima kao što su tlačna čvrstoća f_c , vlačna čvrstoća f_t , modul elastičnosti E i modul posmika G . U Sloveniji su prvi uzorci ruralnog zida loše kvalitete izrađeni i ispitani u laboratoriju [12]. Iako su dobivene relativno niske vrijednosti, one su iskorištene kao preporuke pri provjeri seizmičke otpornosti zidanih kuća od kamena u propisima i preporukama donesenima nakon potresa zabilježenih u Furlaniji (1976.) i u Crnoj Gori (1979.).

Laboratorijskim i terenskim ispitivanjima koja su obavljena osamdesetih godina dobivene su mnogo veće vrijednosti. Te su vrijednosti uporabljene pri provjeri seiz-

mičke otpornosti i obnove kuća u povijesnoj jezgri Ljubljane [3]. Ustanovljeno je da mehanička svojstva kamena zida uvelike ovise o konstrukciji zida i o načinu gradnje. Također je ustanovljeno da vrijednosti variraju od područja do područja, te da se stoga ne mogu odrediti vrijednosti koje bi bile primjenjive u svim slučajevima. Isti je zaključak donesen pošto su *in situ* ispitani zidovi od kamena u području Boveca, koje je 1998. godine stradalo u potresu [9]. S druge strane, treba reći da je do sada ispitano samo jedan uzorak stare zgrade od cigle jer su u povijesnim gradovima koji su smješteni u područjima visoke seizmičnosti dominantne zidane zgrade od kamena.

Iako postoje podaci o seizmičkoj otpornosti, treba naglasiti da nema mnogo podataka o tlačnoj čvrstoći i o modulu elastičnosti. Naročito se to odnosi na rezultate ispitivanja *in situ* jer se takva ispitivanja teško mogu obaviti zato što su za ispitivanje dovoljno velikih uzoraka potrebne relativno velike sile. Kao što pokazuju rezultati ispitivanja, tlačna čvrstoća zida od kamena relativno je niska. Kako čak i u postojećem stanju zidovi kamenih kuća nemaju običnu rezervu vertikalne nosivosti, odstranjivanje dijelova zida radi proširenja postojećih otvora, ili za probijanje otvora za nova vrata ili prozore, može prouzročiti ozbiljne probleme, i to ne samo što se tiče seizmičke otpornosti i ponašanja, nego i u vezi s vertikalnom nosivošću.

4.3 Karakteristične vrijednosti

U skladu s načelima iz EC 8, za provjeru seizmičke otpornosti upotrebljavaju se karakteristične vrijednosti čvrstoće materijala, koje se umanjuju s pomoću parcijalnog koeficijenta sigurnosti za materijal zida γ_M . Prema normi EN 1052-1 u kojoj se definira postupak ispitivanja tlačne čvrstoće zida, ispitivanje se obavlja na tri uzorka nakon čega se određuje srednja vrijednost tlačne čvrstoće f . Karakteristična tlačna čvrstoća zida f_k definira se kao manja od sljedeće dvije vrijednosti: $f/1,2$ i minimalna vrijednost f_{min} :

$$f_k = \min(f/1,2; f_{min}) \quad (2)$$

Kako postupak za ispitivanja zida *in situ* nije normiran, načela za ocjenjivanje karakterističnih vrijednosti tlačne čvrstoće u laboratoriju rabljena su i za određivanje karakterističnih vrijednosti tlačne i vlačne čvrstoće zida, dobivenih ispitivanjem *in situ*. Predlaže se da se kao karakteristična vrijednost usvoji prosječna vrijednost od dva rezultata ispitivanja ili samo jedan rezultat umanjnjen za 1,2. U tablicama 2. i 3. daju se karakteristične vrijednosti svojstava materijala za razne vrste ispitanog zida za koje se predlaže ponovno projektiranje.

Tablica 2. Karakteristične vrijednosti vlačne čvrstoće f_{ik} i proračunske vrijednosti posmičnog modula G za kameno zide

Vrsta zida	Stanje	f_{ik} (MPa)	G (MPa)
vapnenac, vapneni mort s muljevitim pijeskom; nehomogeno; normirane vrijednosti	postojeće injektirano	0,02 0,06	60 100
mješavina kvarcnog pješčara, glinenog škriljevca i vapnenca; vapneni mort, muljeviti pijesak; relativno homogeno	postojeće injektirano	0,08 0,12	- 100
mješavina kvarcnog pješčara, glinenog škriljevca, vapnenca i opeke; vapneni mort, muljeviti pijesak; relativno homogeno	postojeće injektirano	0,12 0,16	40 450
vapnenac, vapneni mort, muljeviti pijesak; nehomogeni zid; stambene kuće	postojeće injektirano	0,05 0,09	80 170
vapnenac, vapneni mort, muljeviti pijesak; nehomogeni zid; javne zgrade	postojeće injektirano	0,07 0,17	170 400

Tablica 3. Karakteristične vrijednosti tlačne čvrstoće f_k i proračunske vrijednosti modula elastičnosti E za kameno zide

Vrsta zida	Stanje	f_k (MPa)	E (MPa)
vapnenac, vapneni mort, muljeviti pijesak; nehomogeni zid; normirane vrijednosti	postojeće injektirano	0,40 0,80	1950 8200
vapnenac, vapneni mort, čisti pijesak; relativno homogeni zid	postojeće injektirano	0,28 1,67	390 2600
vapnenac, vapneni mort, muljeviti pijesak; nehomogeni zid; stambene kuće	postojeće injektirano	0,82 -	2600 -

4.3.2 Parcijalni koeficijenti sigurnosti

Prema EC 8, vrijednosti parcijalnih koeficijenata sigurnosti za zide, γ_M , određuju se u skladu s kategorijom kontrole izvedbe i kontrole proizvodnje. U slučaju novih građevina i najstrože kontrole proizvodnje i izvedbe vrijednost je koeficijenta $\gamma_M = 1,2$. U prosječnoj situaciji taj koeficijent iznosi $\gamma_M = 1,7$, dok u slučaju slabe kontrole imamo $\gamma_M = 2,0$. Kako se u slučaju postojećih konstrukcija svojstva materijala određuju ispitivanjem stvarnih materijala *in situ*, vrijednosti γ_M mogu se - u skladu s EC 8-1-4 - umanjiti kada se radi o novim građevinama.

Uzimajući u obzir vezu između rezultata dobivenih proračunom seizmičke otpornosti i podataka o oštećenjima koja su zabilježena tijekom potresa, mogu se dati sljedeće preporuke o vrijednosti parcijalnog koeficijenta sigurnosti γ_M koje bi trebalo uzeti u obzir pri ponovnom projektiranju starih zidanih zgrada:

- vrijednost parcijalnog koeficijenta sigurnosti $\gamma_M = 1,0$ može se uzeti u obzir pri provjeravanju seizmičke otpornosti u slučajevima kada se u danom području i za dani tip zida mehanička svojstva određuju ispitivanjima *in situ* ili u laboratoriju na uzorcima koji su uzeti iz postojeće zidane konstrukcije
- parcijalni koeficijent sigurnosti $\gamma_M = 1,2$ može se uzeti u obzir kada su karakteristične vrijednosti dobivene na temelju podataka iz literature, kao što je to npr. slučaj kod vrijednosti koje su prikazane u tablicama 2. i 3., te kada se identifikacija tipa zida obavlja uklanjanjem žbuke i otvaranjem zidova
- u slučajevima kada se karakteristične vrijednosti određuju na temelju podataka iz literature ali bez obavljanja identifikacijskih ispitivanja, tada pri određivanju seizmičke otpornosti treba uzeti u obzir parcijalni koeficijent sigurnosti $\gamma_M = 1,7$.

Srednje vrijednosti rezultata dobivenih ispitivanjem *in situ* uzimaju se kao karakteristične vrijednosti posmičnog modula G i modula elastičnosti E .

4.4 Proračunske metode

Prema EC8, svaki konstrukcijski element, a i čitava konstrukcija, treba zadovoljavati zahtjev:

$$E_d \leq R_d \quad (3)$$

gdje je:

E_d - proračunsko seizmičko opterećenje koje djeluje na konstrukcijski element ili na čitavu zgradu,

R_d - proračunska otpornost analiziranoga konstrukcijskog elementa ili zgrade.

Mehanizam posmika prevladava u slučaju starih zidanih zgrada od kamena i cigle koje ispunjavaju zahtjeve s obzirom na cjelovitost konstrukcije, pa tako posmična otpornost zidova određuje seizmičku otpornost zgrade. Kako su vrijednosti posmičnog modula G zida od cigle i kamena bitno niže od vrijednosti modula elastičnosti E , krutost pojedinačnih zidova gotovo je proporcionalna površini horizontalnoga poprečnog presjeka pojedinog zida u odnosu prema svim zidovima. Ona ne ovisi o rubnim uvjetima, već o proračunskoj duljini zidova. Stoga su pogreške koje nastaju zbog izostavljanja učinaka savijanja praktički zanemarive, a prednost je pojednostavnjenje proračuna.

Posmična otpornost zida može se izračunati prema jednadžbi koja je predložena u [11]:

$$H_u = A_w \frac{f_t}{b} \sqrt{\frac{\sigma_o}{f_t} + 1} \quad (4)$$

gdje je:

H_u - granična otpornost,

A_w - površina horizontalnog poprečnog presjeka zida,

f_t - vlačna čvrstoća,

σ_o - je prosječno tlačno naprezanje u zidu zbog gravitacijskog opterećenja.

Ako se seizmička otpornost provjerava u skladu s EC8, tada treba proračunati graničnu proračunsku otpornost $H_{u,d}$. Za to se rabi jednadžba (4), ali se u nju uvodi i karakteristična vrijednost vlačne čvrstoće f_{tk} umanjena za parcijalni koeficijent sigurnosti zida γ_M :

$$H_{u,d} = A_w \frac{f_{tk}}{\gamma_M b} \sqrt{\frac{\sigma_o \gamma_M}{f_{tk}} + 1} \quad (4a)$$

Početna proračunska krutost zida K_e , prema kojoj se seizmička opterećenja raspoređuju na zidove, proračunava se kako slijedi:

$$K_e = \frac{G A_w}{1.2 h \left[1 + \alpha \frac{G}{E} \left(\frac{h}{l} \right)^2 \right]} \quad (5)$$

gdje je:

G - posmični modul zida

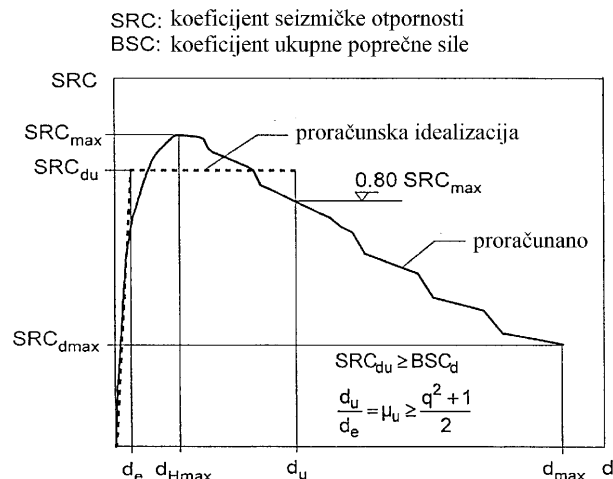
E - modul elastičnosti

h i l - visina i duljina zida.

Koeficijent α ovisi o graničnim uvjetima i iznosi $\alpha = 0,83$ u slučaju zida upetog na krajevima, dok je $\alpha = 3,33$ kada se radi o konzolnom zidu.

Prvobitna metoda za određivanje seizmičke otpornosti razvijena je na bazi posmičnog mehanizma zidova zidanih konstrukcija [4]. Posljednjih je godina ova metoda poboljšana tako da se mogu proračunati svi tipovi zidanih konstrukcija. Ovom metodom, tj. proračunom s postupnim povećavanjem horizontalne sile (engl. *push-over analysis*), izračunava se anvelopa otpornosti kritičnog kata i to nanošenjem rastućih bočnih pomaka na čitavu konstrukciju u koracima [8]. Na temelju proračunane anvelope otpornosti, izmjereni koeficijent seizmičke otpornosti i koeficijent raspoložive globalne duktilnosti uspoređuju se s proračunskim koeficijentom ukupne poprečne sile i faktorom ponašanja konstrukcije, koji

ovisi o globalnoj duktilnosti (slika 12.). Ova je metoda provjerena na seizmičkoj platformi na kojoj su ispitani modeli raznih vrsta zidanih konstrukcija. Postignuta je dobra podudarnost između eksperimentalnih i proračunanih vrijednosti u slučaju kada su se kao ulazni parametri za proračun primjenjivale stvarne vrijednosti karakteristika zida. Ustanovljeno je da je podudarnost prihvatljiva kada se radi o otpornosti ali da to baš i nije slučaj kada se analizira bočna krutost. Tome su razlog granični uvjeti koji se dosta teško mogu modelirati kada se ispituju tradicionalni sustavi zidanih konstrukcija.



Slika 12. Provjera seizmičke otpornosti na temelju proračunavanja anvelope katne otpornosti

5 Zaključak

Na temelju analize oštećenja nastalih djelovanjem potresa, eksperimentalnih istraživanja ponašanja zabilježeno tijekom potresa, te ispitivanja mehaničkih karakte-

ristika zida i djelotvornosti mjera za njegovo pojačavanje i naknadnih parametarskih analiza, u radu se daju preporuke za aseizmično pojačanje i ponovno projektiranje starih zidanih kuća. Seizmička otpornost može se znatno povećati povezivanjem zidova na pojedinačnim stropnim konstrukcijama s pomoću čeličnih spona, isto kao i pojačavanjem samih zidova. Iako su raspored nosivih sustava u starim zidanim građevinama i kakvoća ugrađenih materijala ograničavajući faktori u težnjama da se mjerama pojačanja postigne što viša razina seizmičke otpornosti, opažanja nakon potresa i eksperimentalna istraživanja pokazuju da se može očekivati da će seizmičko ponašanje tako pojačanih građevina biti prihvatljivo čak i u slučaju jakih potresa.

Prema EC 8-1-4, vrijednosti proračunskih ubrzanja tla mogu se smanjiti u slučajevima kada se pojačava čitav graditeljski fond u nekoj urbanoj sredini. Pri određivanju prihvatljive razine takvog smanjenja, u obzir su uzeti ograničeni rezultati koji se danas mogu postići pri obnovi starih zidanih zgrada, te uočeno dobro seizmičko ponašanje građevina iako su proračunane vrijednosti koeficijenta granične poprečne sile bile niže od zahtjeva za jake i srednje jake potrese. Stoga se predlaže da se pri ponovnom projektiranju starih zidanih građevina rabe faktori za umanjenje seizmičkog opterećenja $\gamma_n = 0,67$ i $\gamma_n = 0,84$ u područjima devetog i osmog stupnja intenziteta prema EMS ljestvici. Kako se pouzdani rezultati postižu samo ispitivanjima *in situ*, daju se i preporuke za odabir karakterističnih vrijednosti čvrstoće i parcijalnih koeficijenata sigurnosti za materijal zida, koji se upotrebljavaju kao ulazni podaci za provjeru seizmičke otpornosti obnovljenih građevina.

NAPOMENA

Ovaj se članak temelji na rezultatima istraživanja prikazanim u mnogim prethodno objavljenim radovima koje su napisali autor i njegovi kolege te koji se spominju u popisu literature. Čitatelj se upućuje da pročita te radove radi boljeg upoznavanja ove tematike.

LITERATURA

- [1] Boštjančič, J.; Sheppard, P.; Terčelj, S.; Turnšek, V.: *Use of a modeling approach in the analysis of the effects of repairs to earthquake-damaged stone-masonry buildings*, Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata, Part 2, 19 (1976) 72, Udine, 1976., 1091.-1116.
- [2] Eurocode 8: *Design provisions for earthquake resistance of structures - Part 1-4: General rules - Strengthening and repair of buildings*, ENV 1998-1-4:1996. CEN, Brussels, 1996.
- [3] Sheppard, P.; Tomažević, M.: *In-situ tests of load-bearing capacity of walls of old masonry buildings*, Proceedings, 4th National Congress on Earthquake Engineering, Vol. 2 (1986), Cavtat, 85.-92.
- [4] Tomažević, M.; Turnšek, V.; Terčelj, S.: *Computation of the shear resistance of masonry buildings*, Report ZRMK-IK, Ljubljana, 1978.
- [5] Tomažević, M.; Apih, V.: *The strengthening of stone-masonry walls by injecting the masonry friendly grouts*, European Earthquake Engineering, 7 (1993) 2, Patron, Bologna, 10.-20.
- [6] Tomažević, M.; Lutman, M.; Velechovsky, T.: *Aseismic strengthening of old stone-masonry buildings: is the replacement of wooden floors always necessary?* European Earthquake Engineering, 7 (1993) 2, Patron, Bologna, 34.-46.

-
- [7] Tomažević, M.; Lutman, M.; Weiss, P.: *Seismic upgrading of old brick-masonry urban houses: tying of walls with steel ties*, Earthquake Spectra 12 (1996) 3, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, 599.-622.
- [8] Tomažević, M.: *Seismic resistance verification of masonry buildings: following the new trends*, Seismic design methodologies for the next generation of seismic codes, Fajfar, P.; Krawinkler, H.: Eds., Balkema, Rotterdam, 1997, 323.-334.
- [9] Tomažević, M.; Klemenc, I.; Lutman, M.: *Strengthening of existing stone-masonry houses: lessons from the earthquake of Bovec of April 12, 1998*, European Earthquake Engineering 14 (2000) 1, Patron, Bologna, 13.-22.
- [10] Tomažević, M.: *Seismic redesign of existing stone-masonry buildings*, European Earthquake Engineering 14 (2000) 3, Patron, Bologna, 59.-66.
- [11] Turnšek, V.; Čačovič, F.: *Some experimental results on the strength of brick-masonry walls*, Proceedings of the 2nd International Brick-masonry Conference (1971), Stoke-on-Trent, 149.-156.
- [12] Turnšek, V.; Terčelj, S.; Sheppard, P.; Tomažević, M.: *The seismic resistance of stone-masonry walls and buildings*, Proceedings of the 6th European Conference on Earthquake Engineering, Vol.3 (1978), Dubrovnik, 275.-282.
-