

MIHA TOMAŽEVIČ i PETER SHEPPARD\*

## REVITALIZACIJA KAMENIH ZIDANIH ZGRADA SA ASPEKTA NJIHOVE SEIZMIČKE ZAŠTITE

### 1.0 UVOD

Prilikom jakih zemljotresa koji su zadesili našu zemlju u poslednjih nekoliko godina (Kozjansko — 1974, Furlanija — 1976 i Crna Gora — 1979) najveća oštećenja pretrpele su kamene zgrade, sazidane bilo u historiskim starim centrima gradova bilo u seoskim predelima zemlje. To se moglo i očekivati pošto su stare zgrade konstruisane samo za nošenje vertikalnog opterećenja, praktički bez ikakvih posebnih mera za preuzimanje horizontalnog, zemljotresnog opterećenja. Kao posledica pojavilo se pitanje da li postoji mogućnost sanacije takvih zgrada, oštećenih zemljotresom, odnosno njihovog ojačanja, naročito u historijskim starim centrima gradova koji su predviđeni za revitalizaciju. Ti centri predstavljaju kulturnu baštinu velike vrednosti, no, nažalost, u većini slučajeva oni se nalaze u područjima jake seizmičke aktivnosti.

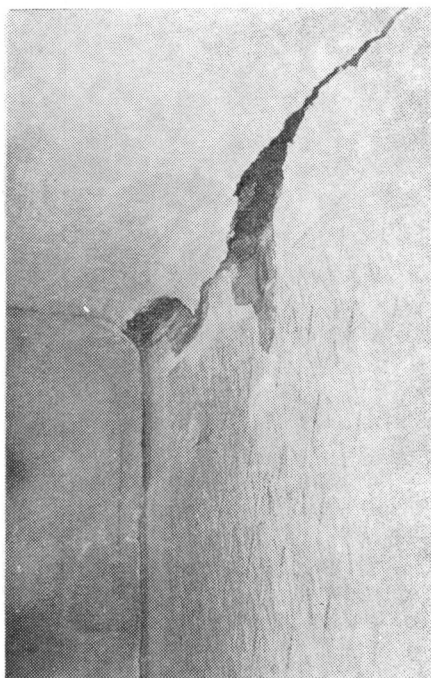
Pošto praktički nije bilo podataka o otpornosnim karakteristikama ovakve vrste zgrada, u poslednjih nekoliko godina na Zavodu za raziskavo materiala in konstrukcij u Ljubljani izvršili smo obimnu seriju ispitivanja zidnih elemenata i modela zgrada, kako u postojećem, tako i u saniranom stanju. Istraživački rad bio je finansiran sa strane Republičke zajednice za istraživanje SR Slovenije, Samoupravne interesne zajednice za školstvo i obrazovanje Cetinje, Samoupravne interesne zajednice stanovanja Trebinje, i Zavoda za raziskavo materiala in konstrukcij Ljubljana.

---

\* Autori: mag. Miha Tomažević, dipl. ing., Peter Sheppard, dipl. ing.,  
Zavod za raziskavo materiala in konstrukcij, Ljubljana.

## 2.0 PARAMETRI SEIZMIČKE OTPORNOSTI KAMENIH ZGRADA

Analize oštećenja zidanih zgrada pokazale su da se mogu posledice zemljotresa u svim analiziranim područjima klasificirati na jedinstven način. Na osnovu takvih analiza može se ustanoviti koji sve parametri utiču na mehanizam ponašanja, odnosno rušenja, bilo pojedinih zidova, bilo zgrade kao celine. Na žalost, analiza oštećenja ne može dati kvantitativnih podataka o uticaju zemljotresa. U tu svrhu potrebno je uključiti laboratorijska ispitivanja kako zidnih elemenata tako i modela zgrada, sa kojima se reproduciraju pojave zapažene prilikom zemljotresa.



Sl. 1: Pukotine između zida i stropne konstrukcije

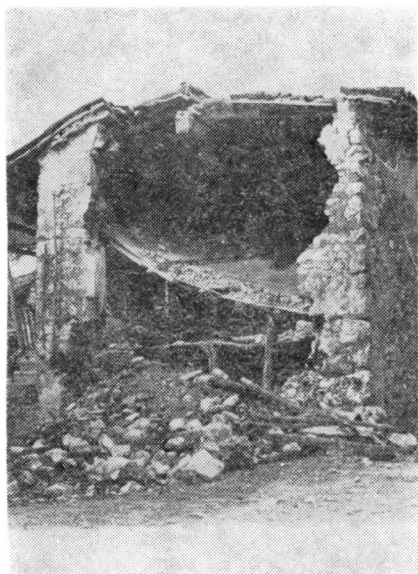


Sl. 2: Odvajanje zida, ortogonalnog na pravac seizmičkog dejstva

S obzirom na intenzitet seizmičkog dejstva kojem su zidane zgrade bile izložene, oštećenja se mogu klasificirati prema sledećem sistemu:

- a) pukotine između zidova i stropnih konstrukcija, pukotine na spojevima zidova (slika 1);
- b) odvajanje zidova ortogonalnih na pravac seizmičkog dejstva (slika 2);

- c) rušenje zidova ortogonalnih na pravac seizmičkog dejstva (slika 3);
- d) oštećenja zidova u pravcu seizmičkog dejstva (slika 4);
- e) rušenje zidova u pravcu seizmičkog dejstva;
- f) rušenje zgrade kao celine.



Sl. 3: Rušenje zida, ortogonalnog na pravac seizmičkog dejstva



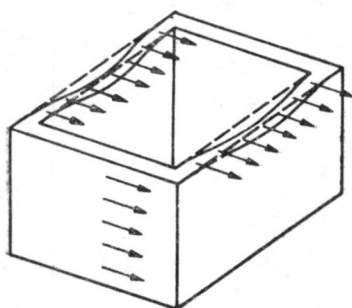
Sl. 4: Delimično rušenje zida u pravcu seizmičkog dejstva

Na osnovu analize oštećenja možemo zaključiti da postoje dva osnovna elementa koja utiču na ponašanje zidane zgrade prilikom zemljotresa:

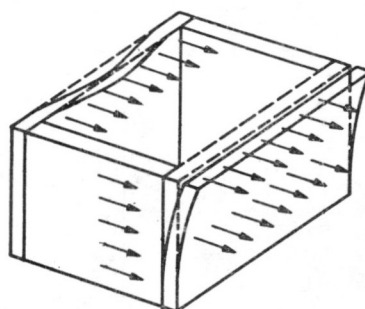
- dispozicija konstrukcije zgrade: raspored zidova u oba ortogonalna pravca kao i njihova međusobna povezanost u visini stropnih konstrukcija. U slučaju starih zgrada, sazidanih od kamena, raspored zidova uglavnom je povoljan, na nepovezanost zidova (drvene stropne konstrukcije bez horizontalnih serklaža) već kod umjerenih zemljotresa prouzrokuju oštećenja tipa a, b i c.
- kvalitet upotrebljenih materila, naročito maltera. U slučaju starih kamenih zgrada, ni taj uslov nije ispunjen, što prouz-

rokuje teža oštećenja odnosno rušenje takvih zgrada kod jakih zemljotresa, to jest oštećenja tipa d, e i f.

Mehanizam ponašanja zidanih zgrada prilikom seizmičkog opterećenja vidi se na slici 5: u slučaju da zidovi nisu međusobno povezani krutom međuspratnom konstrukcijom, zidovi se odvoje jedan od drugoga. Seizmičko opterećenje prouzrokuje nesinhronizirane vibracije zidova, što ima za posledicu bitno smanjenje seizmičke otpornosti zgrade, pa i rušenje odnosno prevrtanje zidova ortogonalnih na pravac seizmičkog dejstva. U slučaju, pak, dobre povezanosti zidova sa krutom međuspratnom konstrukcijom i horizontalnim serklažima, vibracije zidova su sinhronizirane, pa i zidovi, koji su ortogonalni na pravac seizmičkog dejstva, doprinose ka celokupnoj seizmičkoj otpornosti zgrade.



Povezani zidovi



Nepovezani zidovi

Sl. 5: Mehanizam ponašanja kamenih zgrada kod seizmičkog dejstva

Na osnovu analize mehanizma ponašanja zgrada, u vezi sa stabilnošću zidova, možemo zaključiti sledeće:

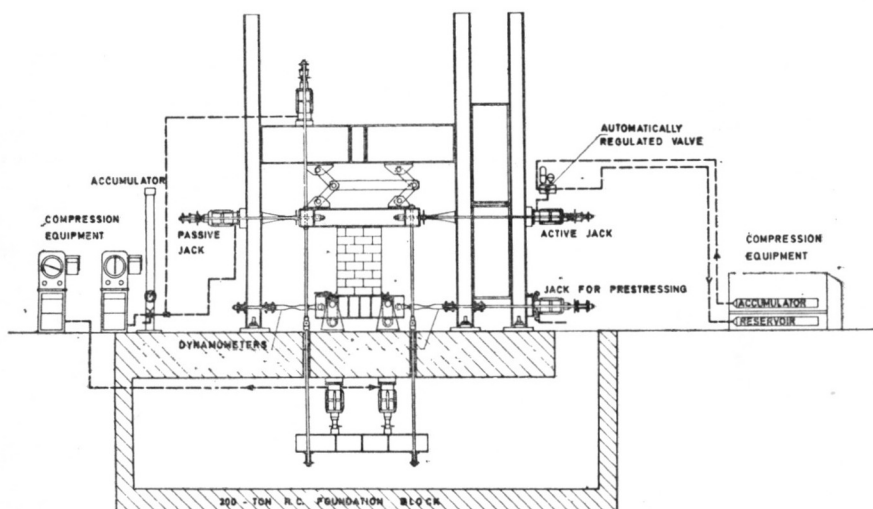
- zidovi koji stoje ortogonalno na pravac seizmičkog dejstva sami za sebe nisu stabilni, a isto važi i za zgrade sa zidovima samo u jednom pravcu. U slučaju starih kamenih zgrada obično postoje zidovi u oba ortogonalna pravca zgrade, što je veoma povoljno prilikom njihovog ojačanja, pošto nije potrebno ubacivanje novih zidnih elemenata.
- zidovi u pravcu seizmičkog dejstva mogu preuzeti seizmičko opterećenje koje naravno ne može preći otpornosti zidova na horizontalno opterećenje.

Sa laboratorijskim ispitivanjima, koja će biti opisana u daljem, na Zavodu za raziskavo materiala in konstrukcij potvrdili smo kvalitativne analize mehanizma ponašanja zgrada kod zemljotresnog dejstva, a istovremeno dobili smo i kvantitativne podatke parametara koji definišu njihovu seizmičku otpornost te potvrdili mogućnost aseizmičkog ojačanja ovakvih vrsta zgrada.

## 3.0 LABORATORISKA ISPITIVANJA

## 3.1 Povezivanje zidova zgrada sa čeličnim zategama

Zgrade sa zidane od kamena uglavnom nemaju krute međuspratne konstrukcije sa horizontalnim serklažima, koje bi mogle osigurati zajednički rad zidova kod zemljotresnih opterećenja. Zbog toga se već kod umjerenih zemljotresa pojave pukotine na spojevima uzdužnih i poprečnih zidova, koje vode do odvajanja zidova ortogonalnih na pravac seizmičkog dejstva, pa i do njihovog rušenja odnosno prevrtanja (slika 3).

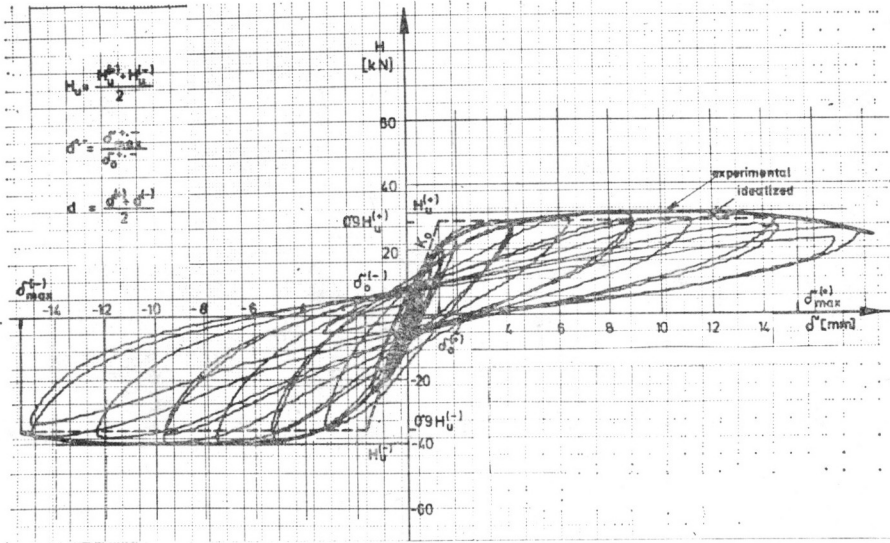


Sl. 6: Šema sprave za ispitivanje otpornosti zidnih elemenata na seizmičko opterećenje

Da bi kvantificirali gore pomenute pojave, na seizmičkoj platformi, instaliranoj u ZRMK izvršili smo ispitivanje modela prizemne kamene zgrade u razmeri 1:5. Ispitivanjem modela sa simuliranim zemljotresnim opterećenjem dobili smo identične pojave oštećenja i rušenja zidova (slika 6) kao što je to bio slučaj kod stvarnih zemljotresa (slika 3). Posle izvršenih ispitivanja modela do rušenja čeonog zida u postojećem stanju, zidovi modela su sanirani sa prezidivanjem te povezani u visini drvene stropne konstrukcije sa obostrano ugrađenim čeličnim zategama. Ponovna ispitivanja modela su pokazala, da se već samim povezivanjem zidova sa čeličnim zategama bitno poveća otpornost zgrade na zemljotresno opterećenje. Iako su se i u tom slučaju pojavile pukotine na spojevima uzdužnih i poprečnih zidova, čelične zatege sprečile su odvajanje i rušenje poprečnih, čeonih zidova. Na zavr-

šetku ispitivali smo uzdužni noseći zid modela (slika 7). Njegovo rušenje ima mnogo ozbiljnije posledice nego rušenje čeonog, nenosećeg zida, no do njega je došlo kod mnogo većeg horizontalnog opterećenja.

Rezultati ispitivanja dati su u tabeli 1, gde je zemljotresno opterećenje u pojedinim kritičkim fazama ispitivanja izraženo u procentima gravitacionog ubrzanja. Rezultati ispitivanja su preračunati na prototip prizemne zgrade sa zidovima, čija čvrstoća na zatezanje iznosi  $\sigma_n = 0,2 \text{ N/mm}^2$ .



Sl. 7: Tipične histerezisne petlje, dobijene ispitivanjem neojačanog kamenog zida. Idealizacije histerezisne envelope

Tabela 1: Rezultati modelskog ispitivanja efekta povezivanja kamene zgrade sa čeličnim zategama

Opis oštećenja	Ubrzanje tla		Napomena
	Nepovezana zgrada	Povezana zgrada	
Pukotina na spoju poprečnog i uzdužnog zida	0,04 g	0,05 g	
Odvajanje poprečnog od uzdužnog zida	0,06 g	—	Nema odvajanja zidova kod povezane zgrade
Rušenje poprečnog zida	0,17 g	—	Nema rušenja poprečnog zida kod povezane zgrade
Rušenje uzdužnog zida	—	0,42 g	

### 3.2 Ispitivanje otpornosti zidova na horizontalno opterećenje

#### 3.2.1 Opis zidova

Konstrukcija kamenih zidova je više manje jednaka u svim analiziranim područjima: zidovi su sazidani u dva sloja lomljenog, uglavnom neobrađenog kamena većih dimenzija, sa međuprostorom ispunjenim manjim komadima. Kao vezivo upotrebljen je krečni malter sa čistim ili glinenim peskom i zemljom, dosta različitog kvaliteta. U većini slučajeva, debljina zidova iznosi 50 cm ili više.

Pošto je uzimanje uzoraka zidova iz postojećih zgrada, zbog lošeg kvaliteta zidova u postojećem stanju, bilo klinički nemoguće, zidni elementi bili su sazidani u laboratoriju sa upotrebom materijala i radne snage iz originalnih područja. Na taj način mogli smo dosta uspješno reproducirati kvalitet zidova u postojećem stanju.

Do sada ispitani zidovi mogu se klasificirati u četiri kategorije, s obzirom na područje i kvalitet zidanja:

- I. kategorija: dvoslojni zid iz neobrađenog kamena sa ispunom, u krečnom malteru sa glinenim peskom i zemljom veoma lošeg kvaliteta. Zid nije ožbukani, a odgovara starim seoskim stambenim zgradama na područjima Kozjanskog, Posočja i Furlanije.
- II. kategorija: dvoslojni zid iz neobrađenog kamena sa ispunom, u krečnom malteru sa čistim peskom (čvrstoća na pritisak 0.5 — 1.0 N/mm<sup>2</sup>). Zid nije ožbukani, a odgovara starim seoskim stambenim zgradama u Crnogorskom Primorju.
- III. kategorija: dvoslojni zid iz delimično obrađenog kamena sa ispunom, u krečnom malteru sa čistim peskom (čvrstoća na pritisak 1.0 N/mm<sup>2</sup>). Zid je ožbukani sa produžnim malterom i odgovara javnim zgradama (školama) u Crnoj Gori.
- IV. kategorija: dvoslojni zid iz delimično obrađenog kamena sa ispunom, u krečnom malteru sa čistim peskom (čvrstoća na pritisak 0.5 — 0.7 N/mm<sup>2</sup>). Zid je ožbukani sa produžnim malterom i u celini injektiran. Zid odgovara injektiranim zidovima u Furlaniji, Italiji.

Posle ispitivanja u postojećem stanju, zidovi su sanirani i ojačani. Pošto su ispitani zidovi sazidani u malteru lošeg kvaliteta, sa mnogo šupljina između kamena, materijala ispune i maltera, za najefikasniji i najodgovarajući metod ojačanja izabrano je injektiranje zidova sa cementnom suspenzijom.

U tu svrhu pukotine u zidovima i spojnice među vanjskim kamenima (u slučaju neožbukanih zidova) zatvorene su brzovezućim

malterom. Cevčice za injektiranje ugrađene su ravnomerno po celoj površini zidova u međusobnom razmaku 50 — 60 cm, da bi masa za injektiranje mogla ispuniti sve šupljine u zidu. Suvi deo mešavine za injektiranje bio je sastavljen od 90% Portland cementa i 10% opalske breče, koja je upotrebljena zbog povećanja plastičnosti i produžetka suspenzivnosti mešavine. Suvom delu bila je dodata voda u tolikoj meri da je omjer suve mase prema vodi iznosio od 1:1 do 1:0.8. Pre injektiranja sa cementnom suspenzijom, koje se izvodilo pod pritiskom od 3—4 bar, celokupna zapremina zidova bila je ovlažena vodom.

Karakteristike uzoraka zidova, kao i upotrebljena količina suve mase za injektiranje, date su u tabeli 2.

Tabela 2: Karakteristike ispitanih zidova

Kategorija zida	Dimenzije uzoraka $h \times w \times t$ (vis. $\times$ šir. $\times$ deb.)	Upotrebljena količina suve mase za injektiranje	Specifična težina		Napomena
			Postojeći zidovi	Injektirani zidovi	
I. kat.	2.65×1.00×0.60	—	22.0	—	Pritisak
	2.65×1.00×0.60	115	22.0	23.0	
	1.50×1.00×0.60	—	22.0	—	Smicanje
	1.50×1.00×0.60	185	22.0	24.0	
II. kat.	2.47×1.00×0.50	178	26.2	28.0	Pritisak
	2.60×1.02×0.50	183	24.3	26.1	
	2.54×1.00×0.51	153	25.2	26.7	
	1.50×1.00×0.50	—	22.5	—	Smicanje
	1.50×1.00×0.50	—	23.1	—	postojeći zidovi
	2.55×1.05×0.57	108	20.9	22.0	Pritisak
III. kat.	2.50×1.05×0.55	137	22.1	23.4	
	1.50×1.00×0.55	200	24.1	26.1	
	1.50×1.00×0.55	133	24.1	25.4	
	1.50×1.00×0.55	160	24.4	25.9	
	1.50×1.05×0.55	127	23.2	24.5	Smicanje
	1.50×1.05×0.55	152	23.0	24.5	
	1.50×1.05×0.55	165	23.3	25.0	
	1.82×1.25×0.55 (4 zidova)	175	—	24.4	Pritisak, injektirani zidovi
	IV. kat.	1.82×1.25×0.55 (8 zidova)	175	—	24.4



### 3.2.2 Opis i rezultati ispitivanja

Osnovni parametri, koji definišu otpornostne i deformabilnostne karakteristike zidova su sledeći:

- referentna čvrstoća zida na pritisak » $\beta$ «,
- referentna čvrstoća zida na zatezanje » $\sigma_n$ «,
- deformabilnosni modul kod pritiska »D«,
- modul smicanja »G«,
- koeficijent duktilnosti »d«.

Vrednosti čvrstoće na pritisak » $\beta$ « i deformabilnosnog modula »D« dobijene su sa ispitivanjem zidova na vertikalno opterećenje (pritisak). U tom slučaju zidovi su opterećivani sa postepeno povećavajućom vertikalnom silom (odnosno deformacijom posle postignute maksimalne nosivosti zidova na pritisak), a merene su bile odgovarajuće vertikalne specifične deformacije.

Vrednosti čvrstoće na zatezanje » $\sigma_n$ «, modula smicanja »G« i koeficijenta duktilnosti »d« dobijene su ispitivanjem zidova na kombinirano vertikalno i horizontalno opterećenje. U tom slučaju zidovi su bili opterećeni konstantnom vertikalnom silom te istovremeno izloženi horizontalnom opterećenju u vidu programiranih, povećavajućih cikličnih horizontalnih pomeranja. Za ispitivanje upotrebljena je specijalna konstruisana sprava (slika 6), koja zadržava gornju i donju ivicu zida paralelnu za vreme ispitivanja. Relativne deformacije između gornje i donje ivice zida te odgovarajuća sila smicanja bile su merene pomoću induktivnih merača pomaka odnosno dinamometra, te registrirane u vidu histerezisnih petlji na magnetofonsku traku odnosno direktno na papir (slika 7).

Pošto je otpornost na smicanje zidova IV. kategorije (koji su bili ispitani samo u ojačanom stanju) premašila kapacitet sprave za ispitivanje na kombinirano vertikalno i horizontalno opterećenje, ti su zidovi ispitani sa jednostavnim dijagonalnim opterećenjem na pritisak. Takvim načinom ispitivanja bilo je moguće utvrditi samo vrednosti njihove čvrstoće na zatezanje, a ne i vrednosti modula smicanja i koeficijenta duktilnosti.

Rezultati ispitivanja dati su u tabelama 3 i 4 kako za ispitivanja na vertikalno opterećenje (pritisak) tako i za ispitivanje na kombinirano vertikalno i horizontalno opterećenje (smicanje i dijagonalni pritisak). U tabelama 3 i 4 izvršeno je i upoređenje izmerenih vrednosti parametara za zidove u postojećem i ojačanom, injektiranom stanju.

Vrednosti referentne čvrstoće zida na zatezanje » $\sigma_n$ « i modula smicanja »G« bile su izračunate na osnovu rezultata ispitivanja, upotrebljavajući sledeće formule:

— u slučaju ispitivanja sa kombiniranim vertikalnim i horizontalnim opterećenjem:

$$\sigma_n = \frac{V}{F} \left[ \sqrt{\left(\frac{15 H_u}{V}\right)^2 + 0.25} - 0.5 \right];$$

$$G = K_o \cdot \frac{1.2 h}{F} \cdot \frac{1}{\alpha}, \alpha = 1 - K_o \cdot \frac{1.2 h}{F} \left[ \frac{1}{D} \cdot \frac{1}{1.2} \left(\frac{h}{w}\right)^2 \right]$$

Tabela 3: Rezultati ispitivanja na vertikalno opterećenje

Kate- gorija zidova	Postojeće stanje			Ojačano stanje			$\frac{\beta^s}{\beta^b}$	$\frac{D^s}{D^b}$
	Maksimalna vertikalna sila $V_u$	Čvrstoća na pri- tisk $\beta^b$	Deforma- bilnosni modul* $D^b$	Maksimalna vertikalna sila $V_u$	Čvrstoća na pri- tisk $\beta^s$	Deforma- bilnosni modul* $D^s$		
	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]		
I. kat.	277	0.46	215	—	—	—	—	—
	323	0.54	190	569	0.95	840	1.8	4.4
II. kat.	153	0.31	—	1000	2.00	2020	6.5	—
	165	0.32	305	1019	2.00	2780	6.3	9.1
	189	0.37	475	1031	2.02	3035	5.5	6.4
III. kat.	491	0.82	3550	1657	2.77	3275	3.4	0.9
	410	0.71	2870	1097	1.90	2610	2.7	0.9
IV. kat.	—	—	—	2305	3.69	8070	—	—
	—	—	—	2708	4.33	9230	—	—
	—	—	—	2413	3.86	5670	—	—
	—	—	—	2325	3.72	7860	—	—

— u slučaju ispitivanja na dijagonalni pritisak:

$$\sigma_n = 0.30 V_u/F,$$

gde je:

$\sigma_o$  — prosečni napon u zidu na pritisak zbog vertikalne sile »V«,

$H_u$  — maksimalna horizontalna sila (odpornost zida na smicanje),

$V_u$  — maksimalna sila pritiska,

F — površina horizontalnog preseka zida,

h — visina zida,

w — širina zida,

$K_o$  — početna, elastična krutost zida.

\* Vrednosti deformabilnosnog modula »D« bile su određene kod 1/3 maksimalne vertikalne sile »V<sub>u</sub>« iz registriranog  $\sigma$  — e dijagrama.

Tabela 4: Rezultati ispitivanja na kombinirano vertikalno i horizontalno opterećenje

Kategorija zida	Postojeće stanje					Ojačano stanje							
	Maks. horiz. sila [kN] $H_u$	Vert. sila [kN] $V$	Čvrstoća na zatezanje $\sigma_{b_n}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Modul smicanja $G_b$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Koef. duktilnosti $d_b$	Maks. horiz. sila [kN] $H_u$	Vert. sila [kN] $V$	Čvrstoća na zatezanje $\sigma_{s_n}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Modul smicanja $G_s$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Koef. duktilnosti $d_s$	$\frac{\sigma_{s_n}}{\sigma_{b_n}}$	$\frac{G_s}{G_b}$	$\frac{d_s}{d_b}$
I. kat.	21	80	0.02	65	8.2	69	80	0.12	100	4.8	5.2	1.5	0.6
II. kat.	36	138	0.04	85	10.7	—	—	—	—	—	—	—	—
III. kat.	40	138	0.04	85	9.0	—	—	—	—	—	—	—	—
	71	140	0.11	73	4.7	184	510	0.22	125	3.1	2.1	1.7	0.7
	78	140	0.12	81	5.9	188	544	0.22	165	4.7	1.8	2.0	0.8
	62	140	0.08	94	5.8	198	524	0.25	—	—	2.9	—	—
IV. kat.	63	140	0.08	87	7.3	230	544	0.29	163	5.4	3.5	1.9	0.7
	63	140	0.08	78	6.0	194	510	0.23	173	5.4	2.7	2.2	0.9
	80	140	0.12	109	6.9	222	552	0.27	143	4.7	2.3	1.3	0.7
IV. kat.	—	—	—	—	—	1015*	0.49*	430	—	—	—	—	—

\*) Dobijeno ispitivanjem na dijagonalni pritisak!

Da bi se mogle utvrditi vrednosti početne krutosti zida »K<sub>0</sub>« kao i koeficijent duktilnosti »d«, envelope eksperimentalno registriranih histerezisnih petlji bile su idealizirane kao što je to prikazano na slici 7.

Kao što su pokazali rezultati ispitivanja, otpornosne karakteristike zidova (čvrstoća na pritisak »β« i čvrstoća na zatezanje »σ<sub>n</sub>«) u njihovom postojećem stanju se za pojedine kategorije zidova međusobno dosta razlikuju. Uopšte rečeno, otpornost zidova na smicanje, izražena sa referentnom čvrstoćom zida na zatezanje, je u svim slučajevima mala, no ona se može bitno povećati injektiranjem zidova cementnom suspenzijom. U slučaju ojačenih zidova, otpornosne karakteristike prilično su jednake, bez obzira na kategoriju zidova. Što se tiče deformabilnosnih karakteristika (deformabilnosnog modula »D« i modula smicanja »G«) važe isti zaključci kao za otpornosne karakteristike. Jedino je kod koeficijenta duktilnosti »d« bilo zapaženo nebitno smanjenje njegove vrednosti u primeru ojačenih zidova.

Tabela 5: Predložene računске vrednosti otpornosnih i deformabilnosnih karakteristika kamenih zidova

Kategorija zida	Postojeće stanje				Ojačano stanje			
	Čvrstoća na pritisak β [N/mm <sup>2</sup> ]	Čvrstoća na zatezanje σ <sub>n</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Deformabilnosni modul D [N/mm <sup>2</sup> ]	Modul smicanja G [N/mm <sup>2</sup> ]	Čvrstoća na pritisak β [N/mm <sup>2</sup> ]	Čvrstoća na zatezanje σ <sub>n</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Deformabilnosni modul D [N/mm <sup>2</sup> ]	Modul smicanja G [N/mm <sup>2</sup> ]
I. kat.	0.3	0.02	200	65	0.6	0.08	800	100
II. kat.	0.2	0.03	400	85	1.2	0.16	2600	160
III. kat.	0.5	0.08	3000	90	1.4	0.18	3000	160
IV. kat.	—	—	—	—	2.5	0.35	7500	400

#### 4.0 OCENA SEIZMIČKE OTPORNOSTI KAMENIH ZGRADA

Na osnovu rezultata izvršenih ispitivanja, uvažavajući statističke zakone disperzije rezultata i broja ispitanih elemenata, za proveru seizmičke otpornosti kamenih zgrada predložene su sledeće vrednosti parametara otpornosti i deformabilnosti zidova:

Sa uvažavanjem gore navedenih vrednosti parametara otpornosti zidova, izvršili smo ocenu seizmičke otpornosti kamenih zgrada, upotrebljavajući pri tom parametričku metodu računa otpornosti zidanih zgrada na smicanje [3]. Rezultati ove računске analize, koja izražava seizmičku otpornost zgrade sa graničnim

koeficijentom smicanja koji zgrada može da izdrži (ultimate base shear coefficient), dati su u tabeli 6 kako za zgrade u postojećem tako i u ojačanom stanju. Rezultati ove analize naravno važe pod pretpostavkom da su zajedno sa ojačanjem zidova injektiranjem izvršene i tehničke mere za ukrućenje međuspratnih konstrukcija, odnosno povezivanja zidova zgrada koje će omogućiti zajednički rad zidova zgrade izložene zemljotresnom dejstvu.

Kao što se vidi iz rezultata ocene seizmičke otpornosti zgrada, datih u tabeli 6, oštećenja ili čak rušenja postojećih kamenih zgrada mogu se očekivati već kod dejstva umjerenih zemljotresa, dok će se ovakve zgrade prilikom jakih zemljotresa masovno rušiti.

Tabela 6: Seizmička otpornost kamenih zgrada, izražena sa graničnim koeficijentom smicanja (BSC)

Kategorija zidova	Postojeće stanje		Ojačano stanje		
	Broj etaža	Dobra dispozicija zidova	Loša dispozicija zidova	Dobra dispozicija zidova	Loša dispozicija zidova
I. kat.	1	0.16	0.12	0.41	0.30
	2	0.10	0.08	0.25	0.18
	3	0.08	0.06	0.19	0.14
II. kat.	1	0.20	0.15	0.72	0.53
	2	0.13	0.10	0.41	0.30
	3	0.10	0.08	0.30	0.22
III. kat.	1	0.41	0.30	0.80	0.59
	2	0.25	0.18	0.45	0.33
	3	0.19	0.14	0.33	0.24
IV. kat.	1	—	—	1.45	1.08
	2	—	—	0.78	0.58
	3	—	—	0.56	0.41

Međutim, ojačanjem zidova kamenih zgrada injektiranjem cementnom suspenzijom te istovremenim ukrućenjem međuspratnih konstrukcija i povezivanjem zidova, seizmička otpornost kamenih zgrada bitno se povećava. Ako se, uzimajući u obzir dinamičke karakteristike ovakvih zgrada, izvrši upoređenje ocenjenih vrednosti graničnog koeficijenta smicanja sa vrednostima efektivnih ubrzanja tla, navedenih u MSK-64 skali intenziteta seizmičnosti, može se očekivati dosta dobro ponašanje ojačanih kamenih zgrada čak i kod dejstva zemljotresa IX stupnja intenziteta seizmičnosti.

Da se to opravdano može očekivati, dokazao je i primer dvospratne kamene zidane zgrade u Luseveri kod Tarcenta u Furlaniji, Italija. Zgradu, koja je bila nakon zemljotresa u maju 1976. godine tako teško oštećena, da su je italijanske vlasti predvidele za ru-

šenje, tehnička ekipa Zavoda za raziskavo materiala in konstrukcij sanirala je injektiranjem zidova sa cementnom suspenzijom i povezivanjem zidova sa obostranim čeličnim zategama u visini međuspratnih konstrukcija (slika 8). Na ovakav način sanirana i ojačana zgrada, koja se nalazila u samom epicentralnom području zemljotresa u Furlaniji 1976. godine, pretrpela je septembarske udare intenziteta VIII i IX stupnja po MCS skali bez ikakvih oštećenja. U septembru, maksimalna ubrzanja tla, registrirana u Breginju koje se nalazi cca 12 km istočno od lokacije sanirane zgrade, iznosila su čak između 0.40 — 0.50 g.

## 5.0 ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata izvršenih ispitivanja možemo zaključiti da su otpornosne karakteristike zidova kamenih zgrada, sazidanih na različitim područjima te sa različitom namenom, u osnovnom stanju dosta različite. Uopšte rečeno, njihova otpornost na horizontalno, zemljotresno opterećenje je nedovoljna, pa se mogu očekivati oštećenja ili čak rušenja ovakvih zgrada već kod zemljotresa umjerenih intenziteta, dok će se one masovno rušiti kod dejstva jakih zemljotresa.

Sa injektiranjem kamenih zidova sa cementnom suspenzijom (u proseku, upotrebljena količina suve mešavine cementa i opalske breče iznosila je  $150 \text{ kg/m}^3$  zida), otpornosne karakteristike zidova se izjednače, bez obzira na područje porekla i namenu zgrada. Ukoliko su istovremeno sa ojačanjem zidova poduzete i potrebne tehničke mere za ukrućivanje spratnih konstrukcija i povezivanje zidova, bitno povećana otpornost zidova na horizontalno opterećenje omogućiće dosta dobro ponašanje ovakvih zgrada i kod dejstva jakih zemljotresa.

U slučaju revitalizacije starih gradskih centara, pa i seoskih predela, neophodno je prethodnim laboratorijskim ispitivanjima utvrditi vrednosti materijalno-tehničkih karakteristika zidova, zavisno od različitih tipova zidova. Isto tako, pre šire upotrebe potrebno je eksperimentalno proveriti i ustanoviti efekat predloženih metoda sanacije i ojačanja.



Sl. 8: Sanirana i ojačana kamena zgrada u Luseveri, Italija, posle zemljotresa u septembru 1976. godine

## 6. LITERATURA

1. V. Turnšek, S. Terčelj, P. Sheppard, M. Tomažević: »The Seismic Resistance of Stone-masonry Walls and Buildings«, Proceedings, VI. ECEE, Dubrovnik, 1978, Vol. 3, pp. 255—262.

2. M. Tomažević, P. Sheppard: »The Strengthening of Stone-Masonry Buildings for Revitalization in Seismic Regions«, Paper submitted to the VII. ECEE, Athens, 1982.

3. V. Turnšek, M. Tomažević: »Parametric Analysis of the Shear Resistance of Masonry Buildings«, Proceedings, VII. WCEE, Istanbul, 1980, Vol. 4, pp. 577—584.

M. TOMAŽEVIČ,\* P. SHEPPARD\*\*

REVITALIZATION OF STONE BUILDINGS FROM THE POINT OF VIEW  
OF THEIR SEISMOLOGICAL PROTECTION

S u m m a r y

In the paper the results of extensive series of tests carried out on stone-masonry building models and stone-masonry walls are presented. The tests were carried out at the Institute for Testing and Research in Materials and Structures in Ljubljana, Yugoslavia in order to define the effect of repair and strengthening of stone-masonry buildings, damaged by earthquakes or intended to be revitalized.

Different types of stone-masonry walls constructed in the laboratory and representing the walls of rural dwelling-houses have been tested, as well as the walls of historical (old town-centre) public buildings in the Friuli and Montenegro regions, which were recently hit by strong earthquakes. The effect of strengthening the walls by means of cementgrouting has been investigated, too.

On the basis of the tests the following conclusions can be drawn: the quality of walls in their original state varies widely. For an estimate of the seismic resistance of existing buildings in the case of revitalization projects, tests must be carried out in order to obtain adequate values of the technical characteristics of materials in walls of different types. By means of cement-grouting, the quality of such walls can be significantly improved. With the use of other structural measures (e.g. the tying together of walls) the seismic resistance of stonemasonry buildings can be increased to meet the requirements of modern earthquake-resistant design.

---

\*) Research engineer, M. Sc., \*\*) Research engineer; Institute for Testing and Research in Materials and Structures, (ZRMK), Dimičeva 12, 61000 Ljubljana, Yugoslavia.