

DRAŽEN ANIČIĆ*

SEIZMIČKA OJAČANJA SPOMENIKA KULTURE U DUBROVNIKU

KRATAK SADRŽAJ

Prikazuje se seizmičko ojačanje spomenika kulture u Dubrovniku. Petnaestogodišnji program obnove i seizmičkog ojačanja iniciran je nakon što je u Crnogorskom potresu 1979. ($M = 7,2$) bilo oštećeno više od hiljadu spomenika kulture na području Dubrovnika.

U članku se prikazuju osnovni seizmološki podaci područja, rezultati seizmičke mikrorajonizacije i principi konstruiranja i proračuna seizmičkih ojačanja starih kamenih zgrada.

Zaključuje se da se predviđenim metodama ojačanja može postići seizmička otpornost spomenika kulture do nivoa kojeg društvo može ekonomski prihvatiti.

UVOD

Potres intenziteta IX° MCS skale, magnitude $M = 7,2$ pogodio je Crnogorsko primorje 15. 4. 1979. Šteta koja je procijenjena na 70 milijardi dinara (1) detaljno je stručno opisana u više izvještaja (2), (3). Oko 80 km od epicentralnog područja nalazi se grad i općina Dubrovnik sa mnogobrojnim spomenicima kulture (preko 1000) od kojih se oko 200 uvrštava u tzv. »nultu« kategoriju. Na području Dubrovnika maksimalna akceleracija registrirana u gore navedenom potresu bila je 0,11 g, dok je maksimalna akceleracija u epicentralnoj zoni bila 0,45 g (4).

* Dr Dražen Aničić, izv. profesor, Građevinski institut, Fakultet građevinskih znanosti Sveučilišta u Zagrebu.

Svi spomenici kulture u Dubrovniku građeni su u kamenu u periodu od 10 — 19 stoljeća. U toku svog dugotrajnog postojanja ovi su spomenici doživeli ne samo mnogobrojne pregradnje i dogradnje o kojima postoji samo nepotpuna dokumentacija u arhivima, već i raznolike elementarne nepogode kao što su požari, eksplozije baruta i potresi. Naročito su potresi djelovali razorno na ove građevine. Za mnoge se od njih zna da nakon potresa nisu niti obnovljene. Druge su podizane na ostacima i ruševinama starih u starom ili novom obliku. One koje su u potresima bile oštećene popravljane su onako kako su to tadašnji građevinski stručnjaci znali. I danas imamo vidljive tragove tih seizmičkih ojačanja.

Spomenici su ogledalo kulture i dokaz postojanja jednog naroda. Svaki narod nastoji da ih održi u što boljem stanju za današnju i buduće generacije. Zbog toga se kod sanacije spomenika kulture (ne samo seizmičke) ne može strogo postaviti pitanje troškova, a nikako se ovi troškovi ne mogu uspoređivati sa troškovima izgradnje suvremenih zgrada. U toku takve rekonstrukcije redovno se osim građevinske rekonstrukcije obnavljaju i interijeri, oprema, objektu se daje nova namjena, a u toku istražnih radova dolazi se do novih saznanja koja mijenjaju prvobitno zamišljenu osnovu rekonstrukcije. Na spomenike kulture ne može se primijeniti niti uobičajena usporedba troškova sanacija i sadašnje vrijednosti zgrade. Jer — sadašnja se vrijednost ne može dobiti da se kao kod nove zgrade početna cijena umanjuje za godišnju stopu amortizacije. Obično je da je kod spomenika kulture stariji spomenik vrijedniji, ali i tu novčani ekvivalent nema svoje pravo značenje jer spomenici nemaju tržišne vrijednosti.

Zato za ocjenu troškova sanacije spomenika ne treba primijeniti samo tehničke već i društvene kriterije. Društvena zajednica treba da ocijeni može li prihvatiti troškove sanacije koji proizlaze iz predloženih tehničkih zahvata imajući u vidu mnogobrojne netehničke kriterije (umjetnički, povijesni i kulturni značaj, važnost na međunarodnom planu, atraktivnost, suvremeno korištenje, itd).

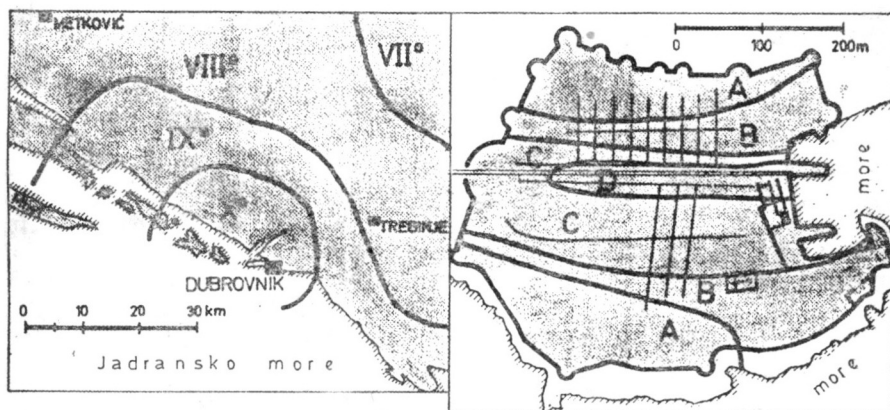
Kada je koncem 1979. osnovan Zavod za obnovu Dubrovnika s namjerom da se saniraju spomenici kulture oštećeni potresom, utvrđen je petnaestogodišnji program obnove. Program obuhvaća niz akcija od urbanističkog plana do građevinskih zahvata. Ovdje se daje samo prikaz onih mjera koje su vezane za probleme seizmičkog ojačanja spomenika.

SIZMIČKA MIKROREJONIZACIJA

Pisani podaci o potresima na dubrovačkom području stari su više od 1300 godina. U proteklom periodu od 550 godina Dubrovnik je bio pogođen jednim potresom intenziteta X° MCS

(1667 g.), sa dva potresa intenziteta IX^o, sa četiri potresa intenziteta VIII^o i sa mnogo slabijih potresa. Potres iz 1667. g. smatra se jednim od nekoliko najsnažnijih potresa registriranih uopće u Evropi i svrstava se u red s potresima u Lisabonu 1755. i Mesini 1906. (sk. 1). Magnituda je procijenjena na $M = 7,0$, a epicentar na udaljenosti 6 km od grada u moru, sa dubinom žarišta od 15 km. Broj žrtava bio je oko 3500, a najveći dio zgrada bio je porušen. Proračun seizmičkog hazarda pokazuje da je 50%-tna vjerojatnost da se takav potres ponovi jednom u 750 godina ili 10%-tna vjerojatnosti da se ponovi jednom u 115 godina.

Geološki podaci pokazuju da su rasjedi u zoni Južnog Jadrana aktivni, te da su potresi uzrokovani ne samo lokalnim tektonskim pojavama već i interkontinentalnim pomacima zbog podvlačenja Afričke pod Evropsku ploču. Rasjedne zone određene su u sklopu regionalnih geofizičkih istraživanja pomoću više suvremenih metoda (aerofotogrametrija, mjerenje geomagnetima, gravimetrijska ispitivanja — Bouguerove anomalije, anomalija »residual gravity« i dr.).



Sk. 1. Karta maksimalnih intenziteta potresa

Sk. 2. Karta seizmičke mikrorajonizacije

Seizmička mikrorajonizacija obuhvatila je uže područje staroga grada Dubrovnika unutar zidina, površine oko 16 ha. Za dobivanje uvida u lokalne uvjete tla korišteno je više geofizičkih metoda (seizmička refrakcija, mjerenje električnog otpora, mjerenje mikrotremeora). Geomehanička ispitivanja obuhvatila su sondiranje tla na 26 sondi, izradu geotehničkih profila, laboratorijska ispitivanja tla s naglaskom na istraživanje potencijala likvefakcije te proračuna dopuštenog opterećenja tla. Rezultat svih ovih kompleksnih istraživanja je karta seizmičke mikrorajonizacije (sk. 2) u kojoj su označene zone povezane sa vršnim akce-

leracijama tla na površini. Za potres intenziteta X° pojava likvefakcije ocijenjena je za manji dio gradske površine kao neminovna.

PRINCIPI SEIZMIČKOG OJAČANJA

Prije pristupa projektiranju seizmičkih ojačanja spomenika kulture bilo je potrebno riješiti niz pitanja, što će se opisati u nastavku. Načinjen je program petnaestogodišnje obnove, a 8 zgrada stavljeno je u prvu grupu prioriteta. Za ove zgrade utvrđena je buduća namjena, a okvirno su utvrđeni i troškovi ojačanja koji nisu smjeli biti znatno veći od troškova izgradnje nove zgrade, računajući za 1 m^2 . Ukupna brutto površina ovih 8 zgrada je oko 15000 m^2 , a obuhvaćeni su objekti različite namjene (katedrala, tvrđava, 2 palače, samostan, poslovna i stambena zgrada, škola). U procesu priprema konsultirani su konzervatori i povjesničari umjetnosti kako bi se njihovi zahtjevi uskladili sa zahtjevima arhitekata i konstruktora (sk. 3, 4, 5, 6). Osim seizmičkog ojačanja obuhvaćeni su i svi radovi da novi prostori postanu suvremeni (grijanje, električne instalacije, sistemi dojava za slučaj požara i provale* kod muzeja i galerija).

Istražni radovi na zgradama potvrdili su pretpostavke o načinu temeljenja, o kvaliteti zidova zidanih u kamenu i vrstama postojećih stropnih i krovnih konstrukcija. Ujedno su uočena izrazito slaba i dotrajala mjesta u zgradama.

Utvrđeno je da se seizmička ojačanja rade za period od 100 godina. Ostavljeno je idućim generacijama da još bolje pojačaju ove zgrade na osnovu naučnih saznanja do kojih će se doći u narednom periodu.

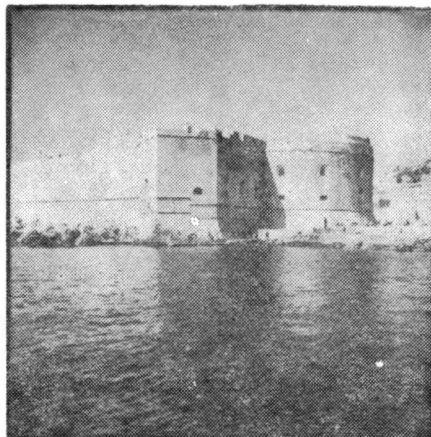
Od raspoloživih metoda ojačanja predviđene su sve tehnički opravdane metode.

Temelji postojećih zgrada sastoje se od kamenih trakastih temelja zidanih u vapnenom ili glinenom mortu. Dio temelja nalazi se u vrlo lošem stanju jer je zbog visokog nivoa podzemne vode ($-1,50 \text{ m}$ od površine tla) kao i propusnosti kanalizacione mreže dio vezivnog materijala ispran. Predviđena su ojačanja temelja u vidu armiranobetonskih traka. Njihova je svrha da se u nivou temelja stvori roštilj koji će osigurati zajedničko djelovanje temelja i biti osnova »krute kutije« u kakvu se sanirana zgrada želi pretvoriti. Na ove temelje nastavljaju se novi nosivi zidovi ili torkret beton kojim se ojačavaju stari kameni zidovi. Armiranobetonske trake vezane su sa kamenim temeljima čeličnim sidrima (sk. 7).

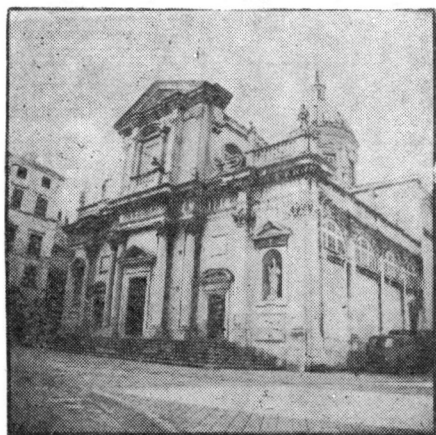
Zidovi zgrada izvedeni su uvijek kao troslojni. Dok su dva vanjska sloja iz klesanog kamena, dobro obrađenog u sljubnica-ma, srednji je sloj od lomljenog kamena povezanog vapnenim



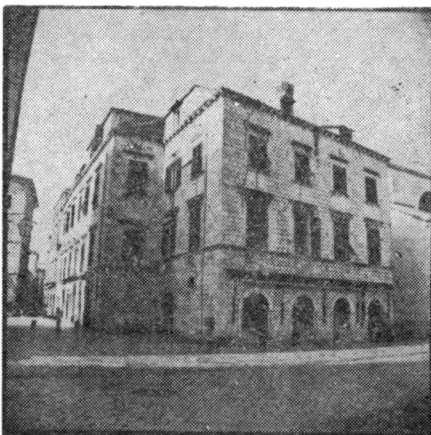
Sk. 3. Knežev dvor



Sk. 4. Tvrđava Sv. Ivana

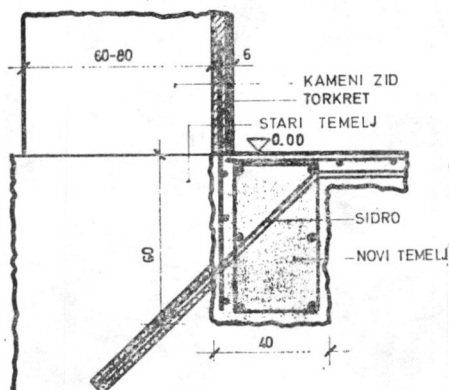


Sk. 5. Katedrala

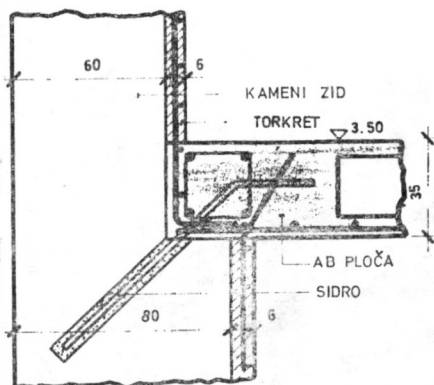


Sk. 6. Blok pred Dvorom

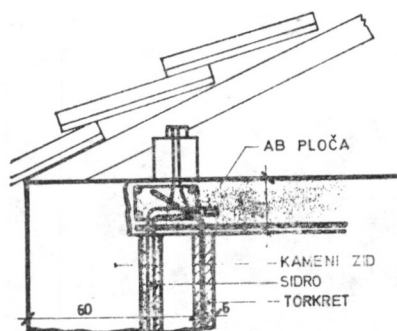
mortom. Nisu poznati slučajevi da je srednji sloj izveden sa otpadnim materijalom (»šutom«). Debljine zidova su od 50—100 cm. Unutarnji zidovi su žbukani. Ojačanje oštećenih zidova tj. onih koji imaju pukotine od ranijih potresa provodi se injektiranjem pukotina cementnim emulzijama. Na mjestima gdje su ranije uklonjeni zidovi, a po koncepciji ojačanja treba uspostaviti kontinuitet u vertikalnom ili horizontalnom smislu izvode se novi zidovi od kamena. Ukoliko je to potrebno svi kameni zidovi ojačavaju se torkretiranjem. Vanjski zidovi zgrade torkretiraju se samo iznutra, a unutarnji zidovi obostrano. Prije torkretiranja odstrani se sloj žbuke, zidovi dobro isperu vodom i za njih pričvrsti armatura u obliku zavarene čelične mreže. Radi osiguranja



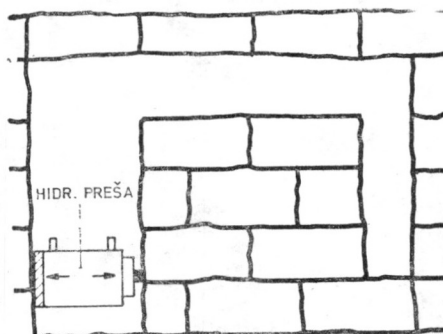
Sk.7. Detalj ojačanja temelja



Sk.8. Detalj veze stropa i zida



Sk.9. Detalj veze stropa i zida



Sk.10. Ispitivanje zida in situ

veze sloja torkreta i troslojnog kamenog zida izvodi se na svaka 2 m^2 jedno čelično sidro. Torkret se nabacuje prvo u finom sloju od 2—4 mm (podloga), a zatim kao nosivi od 5—6 cm. Vidljiva površina se naknadno zaglađuje (sk. 8, 9).

Stropovi su drveni ili kameni. Svi drveni stropovi zamjenjuju se armiranobetonskim pločama. Gdje to nije moguće izvodi se u nivou stropne konstrukcije sistem serklaža, a prostorna krutost postiže se čeličnim sponama koje se mogu napinjati. Nad kamenim stropovima koji imaju oblik križnih, bačvastih ili cilindričnih svodova nakon odstranjivanja slojeva šute izvodi se armiranobetonska ploča. Njena težina približno odgovara težini odstranjenog materijala. Sve stropne konstrukcije imaju na svojim osloncima konsekventno proveden sistem horizontalnih serklaža što osigurava prijenos seizmičkih sila putem stropne dijafragme na zidove. Stropne konstrukcije povezuju se sa svim nosivim zidovima čeličnim sidrima, tipično je $1 \phi 20 \text{ mm/m}^1$.

Krovišta se saniraju tako da na zidove ne daju više horizontalne sile, a u slučaju da su dotrajala zamjenjuju se armiranobetonskim krovištima (kose ploče, siporex ploče postavljene na armiranobetonske okvire) ili novim drvenim krovištima.

Pregradni zidovi koji su do sada građeni iz krtog materijala (opeka) zamjenjuju se suvremenim višeslojnim stijenama.

Čelična sidra višestruko primijenjena u postupku ojačanja imaju za svrhu da povezuju kamene i nove armiranobetonske konstrukcije. Radi osiguranja dugotrajnosti i zaštite od korozije ta se sidra izvode prema posebnom detalju. Dio koji ulazi u kamen zaštićen je od korozije umakanjem u epoksidnu smolu, a prionjivost sa slojem injektiranog maltera osigurava se kvarcnim pijeskom kojim je obložen sloj epoksidne smole.

Ojačanje zgrade kao cjeline postiže se prostornim povezivanjem pojedinih konstruktivnih elemenata. Poznato je da su rušenja najvećeg broja kamenih zgrada uzrokovana savijanjem izvan ravnine i prevrtanjem zidova nedovoljno povezanih sa stropnim konstrukcijama. Prostornim povezivanjem postiže se prisilni prijenos seizmičkih sila od mjesta gdje nastaju (u pojedinim konstruktivnim elementima) do mjesta gdje se mogu preuzeti. Tako se nosivi zidovi prisiljavaju da preuzimaju sile u vlastitoj ravnini, a ne okomito na nju, pa se jednom preuzete sile prenose do temelja. Tako se putem deformacije zida iskorištava njegov kapacitet za prijenos poprečnih sila i momenata savijanja.

PRINCIPI SEIZMIČKOG PRORAČUNA

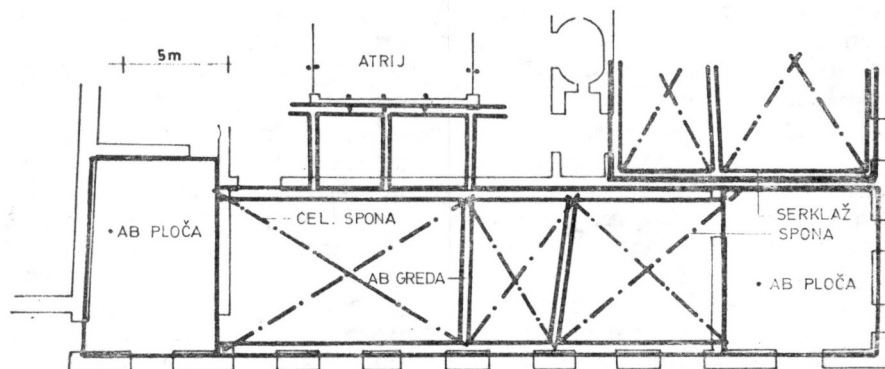
S obzirom da potres intenziteta X° nije u narednih stotinu godina vjerojatan, kao projektni intezitet usvojen je IX stupanj. Za osnovnu stijenu taj intenzitet povezan je sa akceleracijom od $a = 0,375$ g, a za sloj nasutog tla čija debljina varira od 15—25 m sa akceleracijom $a = 0,45$ g.

Ojačanja bez torkretiranja zidova

Za zgrade kod kojih zbog konzervatorskih uvjeta nije moglo da se izvede torkretiranje kamenih zidova nego je samo u nivou stropnih konstrukcija izvršeno povezivanje zidova izvršen je proračun granične nosivosti zidova (sk. 11). Prethodno je računom utvrđeno vertikalno naprezanje u zidovima (R_0) koje je kod 3—4 katnih zgrada iznosilo 30—40 N/cm². Radi određivanja čvrstoće zida za djelovanje kosih glavnih vlačnih sila (R_1), izvršeno je eksperimentalno utvrđivanje čiste posmične čvrstoće zida (sk. 10) kao i vizuelna procjena čvrstoće maltera. Zaključeno je da se može računati sa čvrstoćom maltera na pritisak od 250 N/cm², pa je vrijednost uzeta za proračune iznosila $R_1 = 18$ N/cm².

Granični kapacitet nosivosti zgrade kao cjeline za djelovanje poprečnih sila jednak je zbroju granične nosivosti pojedinih zidova postavljenih u smjeru djelovanja sile: $H = \sum \tau_0 \cdot F^i$, gdje je F — površina zida. Vrijednost τ_0 određuje se po izrazu

$$\tau_0 = \frac{R_1}{1,5} \cdot \sqrt{1 + \frac{R_0}{R_1}}$$



Sk. 11. Ojačanje glavnog pročelja Kneževa Dvora

i predstavlja napon kod kojeg dolazi do pucanja zida po kosim dijagonalama. Za $R_0 = 30 \text{ N/cm}^2$ i $R_1 = 18 \text{ N/cm}^2$ dobiva se zaokruženo $\tau_0 = 20 \text{ N/cm}^2$.

Zbog malenog duktiliteta zidova i djelovanja suhog trenja u sljubnicama za potpuni slom zida ovaj se napon može povećati. S druge strane zbog zanemarivanja torzionih oscilacija i reducirane posmične površine zida granična nosivost zida se smanjuje. Zato je za proračun nosivosti zida usvojena navedena jednostavna formula.

Iz odnosa granične horizontalne sile koju zgrada može preuzeti i vertikalnog opterećenja (H/W) dobiven je ukupni seizmički koeficijent kod kojeg nastupa slom zidova. Ovaj je iznosio za pojedine zgrade od 0,23 — 0,33. Imajući u vidu da su maksimalne akceleracije iznosile za temeljenje na mekom tlu 0,45 g za IX°, a 0,225 za VIII stupanj, mogao se donijeti zaključak o otpornosti saniranih zgrada u jednom od budućih potresa: zgrade bi potres VIII° trebale izdržati bez oštećenja (uz veći ili manji koeficijent sigurnosti, no uvijek veći od 1,0). U potresu IX° valja očekivati znatnija oštećenja. Kako su mogućnosti ojačanja ovih zgrada razumnim sredstvima iscrpljene, korisnici se moraju pomiriti s činjenicom da imaju nedovoljno sigurne konstrukcije.

Detaljnija dinamička analiza trebala bi pokazati postoje li još kakve unutarnje rezerve.

Ojačanja sa torkretiranjem zidova

Zgrada koja je ojačana torkretiranjem zidova tretira se kao armiranobetonska konstrukcija. Kompozitni zid kamen — beton pretvara se za proračun u jedinstveni armiranobetonski zid tako da se uzme 1/4 debljine kamenog zida i doda puna debljina torkreta.

S obzirom da se radi o niskim i širokim zgradama (tipično je $B \times H \times \mathring{S} = 15 \times 15 \times 15$ m) ukupna se seizmička sila raspodjeljuje srazmjerno površinama zidova. Cjelokupna se poprečna sila u pojedinom zidu zatim preuzima armaturom. Armatura je zavarena mreža sa kvadratnim poljima i jednakim profilom vertikalnih i horizontalnih šipki. U proračun se uzima dopušteni napon u armaturi povećan za 50%. Zbog očekivanog krtog loma kod djelovanja poprečnih sila zidova moraju preuzeti maksimalno očekivane seizmičke sile, pa su projektne sile jednake maksimalno očekivanim ($S = 0,45 W$). Vrlo dobra veza stropnih konstrukcija i zidova mora da omogući zajedničko djelovanje svih nosivih elemenata, a dopunsku rezervu pruža posmična otpornost kompozitnog zida kamen — torkret.

ZAKLJUČAK

Nakon što je dovršeno 8 glavnih projekata za seizmička ojačanja kapitalnih spomenika kulture u Dubrovniku zaključeno je da se predviđenim mjerama može postići seizmička otpornost spomenika kulture do nivoa kojeg društvo može prihvatiti. Iako se sve zgrade ne mogu osigurati u potpunosti i zauvijek, ipak ta ojačanja predstavljaju doprinos ove generacije očuvanju trajnih vrijednosti svoga naroda.

ZAHVALA

Mnogobrojne institucije i pojedinci angažirali su se da otpočne spašavanje i ojačanje spomenika u Dubrovniku. Istraživački rad koji je prethodio početku radova na ojačanju ne bi se mogao sprovesti bez pomoći i suradnje S. Manestra, S. Šuvara, B. Letunića, J. Jelovca i V. Steinmana te Građevinskog instituta, Zagreb, SIZ-III za znanstveni rad SRH, Jugoslavensko-američkog odbora za naučnu i tehnološku suradnju, Beograd i Zavoda za obnovu Dubrovnika.

BIBLIOGRAFIJA

1. Izvještaj o procjeni šteta od katastrofalnog zemljotresa u SR Crnoj Gori, Rep. komisija za procjenu šteta od katastrofalnog zemljotresa, Titograd, sep. 1979.
2. Evropska ekonomska komisija UN, Drugi seminar za gradnju u seizmičkim područjima, Lisabon, Portugal 12.—16. 10. 1981.
3. Zemljotres od 15. aprila 1979. g. u Crnoj Gori, Jugoslavija, IZIIS, 80—85, Skopje, Nov. 1981.
4. Izvještaj o šteti od potresa 15. 4. 1979. na spomenicima kulture na području općine Dubrovnik, Dubrovnik 1979.
5. Geotehnički istražni radovi i seizmička mikrorejonizacija stare gradske jezgre Dubrovnika, Građevinski institut, Zagreb, 1981., Report RN 2210-1-15314/81, Vol 1—4.
6. Jadrijević A., Petrak I., 1981, Tehnički uvjeti za ukrućenje nosivih kamenih zidova metodom sidrenja, Građevinski institut, Zagreb, Report 2113-1-11938/81.

Dražen ANIČIĆ¹

EARTHQUAKE STRENGTHENING OF HISTORICAL MONUMENTS IN
DUBROVNIK, YUGOSLAVIA

S u m m a r y

Earthquake strengthening of historical monuments in Dubrovnik is presented. The fifteen years program of revitalisation and earthquake strengthening was initiated when more than one thousand monuments in the Dubrovnik region were damaged in the Montenegro earthquake in 1979 ($M = 7.2$).

The paper presents basic seismological data of the region, results of seismic microregionalisation and the principles of design and calculation for the earthquake strengthening of ancient stone buildings.

It was concluded that by the proposed strengthening methods one can achieve the earthquake resistance of historical monuments in the degree which is economically acceptable for the society.

¹ Associate Professor, Institute of Civil Engineering, Faculty of C.E. Sciences, University of Zagreb, P.O. Box 165, 41000 Zagreb, Yugoslavia.