

STAVBE KULTURNE DEDIŠČINE IN POTRESNA ODPORNOST: KAJ SMO SE NAUČILI?

HERITAGE MASONRY BUILDINGS AND SEISMIC RESISTANCE: WHAT DID WE LEARN?

akad. prof. dr. Miha Tomaževič, univ. dipl. inž. grad.

Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana
e-pošta: miha.tomazevic@zag.si

Strokovni članek

UDK: 699.841:719

Povzetek | V zadnjih treh desetletjih so bili raziskani vzroki za neustrezno obnašanje zidanih stavb arhitekturne kulturne dediščine v mestih in na podeželju med potresi, na podlagi ugotovljenih pomanjkljivosti pa razviti ukrepi za izboljšanje potresne odpornosti. Poleg klasičnih so na razpolago tehnološke rešitve, ki uporabljajo najsodobnejše materiale, med njimi tudi ukrepi, ki so v skladu z zahtevami za ohranitev kulturne dediščine. Razvite so bile nove terenske in laboratorijske metode za ugotavljanje stanja konstrukcije in mehanskih lastnosti zidovja ter izdelani različni računski modeli za oceno potresne ranljivosti in vrednotenje potresne odpornosti. Izdelan je bil tudi evropski standard za oceno in prenovo stavb, ki predpisuje postopke in podaja vrednosti parametrov za preprojektiranje. V standardu so žal določene nedoslednosti in za stavbe arhitekturne kulturne dediščine nedosegljive zahteve, o katerih na podlagi dolgoletnih izkušenj, raziskav in analiz obnašanja teh stavb med potresi razpravljamo v prispevku. Čeprav bi morali na podlagi računskih analiz, dosledno izdelanih po zahtevah novega standarda, pričakovati porušitev oziroma vsaj hujše poškodbe, so potresi, ki so v zadnjem času že drugič v nekaj desetletjih prizadeli stara mestna in podeželska jedra, pokazali, da so že razmeroma enostavni ukrepi za izboljšanje potresne odpornosti uspešno preprečili prehude poškodbe in porušitve, če so le bili dosledno izvedeni.

Summary | In the last three decades, the causes of inadequate seismic behavior of heritage masonry buildings in urban and rural settlements have been investigated. On the basis of the observed mechanisms, technical measures for the improvement of seismic resistance have been developed. Besides traditional techniques, contemporary strengthening measures, based on the use of modern materials are available, including methods in accordance with the requirements of restoration and preservation of architectural cultural heritage. In-situ and laboratory non-destructive and semi destructive methods for structural assessment have been developed and mathematical models for structural evaluation proposed. European standard for structural assessment and retrofit of buildings has been recently implemented, where procedures are recommended and values of parameters needed in redesign are specified. However, the standard includes inconsistencies and unacceptable requirements regarding the architectural heritage buildings, which are discussed in this paper. If the requirements of the new standard are taken into consideration literally, inevitable heavy damage or collapse of the strengthened buildings should have been expected. However, as indicated by the recent strong earthquakes which for the second time in just a few decades affected historic towns and villages, relatively simple strengthening measures prevent excessive damage and collapse of such buildings, if adequately applied.

1 • UVOD

Nedavni potres v deželi Abruzzo v sosednji Italiji, ki je najbolj poškodoval ravno stari del mesta L'Aquila (slika 1), je ponovno pokazal, da so stare zidane hiše v zgodovinskih mestnih in podeželskih jedrih zelo ranljive na potres. O potresu in njegovih posledicah bodo pisali tisti, ki so prizadeto območje obiskali. Na tem mestu lahko na podlagi znanih podatkov samo ugotovimo, da je bil potres po moči le nekoliko močnejši od potresa leta 1998 v Posočju (magnituda $M = 5,8$ v primerjavi z $M = 5,6$ na Bovškem), žarišče je bilo plitvo, pa tudi trajal ni dolgo. Največji izmerjeni pospeški gibanja tal so bili v L'Aquili sicer večji (nekaj več kot $0,6\text{ g}$ v primerjavi z $0,5\text{ g}$ na Bovškem leta 2004 z močno navpično komponento v obeh primerih), vendar sta bila spektra odziva podobna. Čeprav sta potresa po fizikalnih parametri primerljiva, so bile posledice prvega precej hujše od posledic drugega. Zakaj je bilo tako, tudi ne bomo analizirali. Po mnenju italijanskih kolegov, ki so območje obiskali, posledice zadnjega potresa niso bile nepričakovane. Kakovost kamnitega zidovja porušeni hiš je bila izredno slaba, med poskusi prenove pa so bile storjene tipične napake (porezane zidne vezi, oslabeitev nosilnega zidovja, nestrokovna zamenjava lesenih stropov z masivnimi betonskimi ploščami brez sidranja v zidove in podobno).

O raziskavah, tehničnih ukrepih in drugih postopkih v zvezi s protipotresnim utrjevanjem starih zidanih hiš je bilo tekom let v Gradbenem vestniku objavljenih že lepo število prispevkov. Na tem mestu že napisanega ne bomo ponavljali. Da pa bi bilo podobnih posledic kot po aprilskem potresu v L'Aquili čim manj, bomo poskušali povzeti, kaj smo se naučili, odkar smo pred petintridesetimi leti morali prvič resneje odgovoriti na vprašanje, kako starim hišam, sezidanim iz kamna, izboljšati potresno odpornost.

Čeprav so navadne zidane hiše v mestih in na podeželju lahko stare tudi več sto let, kot posamezni objekti večinoma niso nič posebnega. Če bi stale na samem, bi med njimi le redko našli katero, ki bi jo ohranili kot kulturni spomenik. Kot skupina stavb v mestnih in podeželskih jedrih pa stare hiše postanejo arhitekturna kulturna dediščina največje vrednosti. Sodobnim mestom in podeželju dajejo prepoznavnost in dodano vrednost, saj predstavljajo jedro kulturnega, družabnega in turističnega dogajanja. Če ne bi imela starih

jeder, bi bila sodobna naselja pusta in brez življenja. Zaradi njihove zgodovinske vrednosti in pomembnosti v današnjem času jih želimo ohraniti tudi za prihodnost. Ker leži večina evropskih mest v Sredozemlju na območjih, ki so izpostavljena potresni nevarnosti, moramo med

prenovitvenimi posegi zmanjšati tudi potresno ranljivost stavb in se tako izogniti posledicam, ki smo jim priča po vsakem močnejšem potresu. To pa oteži prenovo mestne arhitekturne kulturne dediščine v primerjavi z območji, kjer potresne nevarnosti ni.

Zgodovinske hiše v naseljih, ki so sezidane iz lokalnega materiala, večinoma kamna, so se stoletja razvijale, dograjevale, nadgrajevale in prilagajale vsakokratnim potrebam časa.



Slika 1 • L'Aquila, april 2009: po potresu prizadete stavbe (foto P. Weiss)



Slika 2 • Hiša, ki jo je po majskem potresu leta 1976 v Benečiji utrdila ekipa ZRMK, je septembrski potres istega leta prestala brez poškodb (arhiv ZAG, foto E. Vugrinec)

Čeprav jih imamo za spomenike arhitekturne kulturne dediščine in jih želimo kot take ohraniti, pri tem ne smemo ustaviti njihovega razvoja. Če želimo, da ohranijo svojo vlogo in ostanejo najpomembnejši del urbanih struktur, zgodovinskim jedrom ne smemo preprečiti njihovega prilagajanja sodobnim bivalnim in varnostnim standardom. Ne smemo tega obstati pri načelih konservatorske in restavratorske stroke, pač pa moramo najti kompromis oziroma ta načela skrbno uskladiti s potrebami stanovalcev, tehničnimi možnostmi in stroški prenove. Da je tak kompromis nujen, bi nas moral naučil že primer Breginja leta 1976, ko se po majskem potresu nismo mogli zediniti, kako

ukrepati. Žal smo zelo krut odgovor dobili septembra istega leta: močno poškodovani Breginj, po mnenju marsikaterega strokovnjaka biser slovenske arhitekturne kulturne dediščine, je nov potres skoraj do konca porušil. Ne samo pri nas tudi v sosednji Italiji in nasploh v Evropi je bil furlanski potres tisti, ki je sprožil začetek raziskav za protipotresno utrđitev stavb arhitekturne kulturne dediščine. Takrat je bil nekdanji Zavod za raziskavo materiala in konstrukcij (ZRMK) v prednosti, saj se je s kamnitimi hišami prvič srečal nekaj let prej. Po potresu na Kozjanskem junija leta 1974 so Viktor Turnšek, Stane Terčelj, Jože Boštjančič, Smiljan Umek in Edo Vugrinec

predlagali povezovanje zidov z armaturnim jeklom in injektiranje kamnitega zidovja s cementnimi injekcijami. Enostavna in ne draga metoda, katere učinki so bili preverjeni z laboratorijskimi preiskavami ((Terčelj in sod., 1976), (Boštjančič in sod., 1976), (Vugrinec, 1977)), se je izkazala za izredno učinkovito tudi med septembrskim potresom v Furlaniji leta 1976 (slika 2). Od takrat pa vse do danes raziskovalci na Zavodu na tem področju uživajo mednarodni sloves: niso več v prednosti kot v pionirskih časih pred tridesetimi leti, vendar kljub vsemu držijo korak s kolegi iz držav, kjer so za raziskave na razpolago precej večja sredstva.

2 • POTRESNA RANLJIVOST ZIDANIH STAVB KULTURNE DEDIŠČINE IN UKREPI ZA IZBOLJŠANJE POTRESNE ODPORNOSTI

Zakaj so stare zidane stavbe v mestnih in podeželskih jedrih tako ranljive na potres? Večinoma zato, ker je konstrukcija grajena za prevzem težnostnih obtežb in z njimi povezanih navpičnih obremenitev. Osnovni nosilni elementi stare zidane stavbe – zidovi, oboki in leseni stropi – so med seboj povezani tako, da zagotavljajo prevzem navpičnih obremenitev, medtem ko graditelji niso mislili na ukrepe, ki bi izboljšali obnašanje stavbe med potresom. Tudi nosilni material – kamnito, opečno ali mešano zidovje, ki razmeroma dobro prenaša tlačne obremenitve – ni sposoben prevzeti nategov in strigov, ki jih povzročijo vodoravne sile, nastale zaradi nihanja stavbe med potresom. Nosilna konstrukcija takšne stavbe se med potresom poškoduje. Če so poškodbe prehude, izgubi sposobnost prenašanja navpičnih obremenitev in se poruši. V tem pogledu je še posebej kritično kamnito zidovje, ki se zaradi svoje strukture – po navadi je sestavljeno iz dveh med seboj praktično nepovezanih nosilnih slojev kamna večjih dimenzij, z vmesnim slojem zasutja z malto povezanega drobnejšega materiala z obilo votlavosti – med potresom razsloji in, če je potres dovolj dolg, celo razpade.

Povrh vsega so stare stavbe večkrat tudi slabo vzdrževane. Zamakanje zaradi slabih streh, dolgotrajna izpostavljenost zidovja atmosferskim vplivom zaradi odpadlega ometa oziroma vlaga, ki jo zidovje vsrka zaradi nevzdrževanega odvodnjavanja, vse to zelo hitro povzroči oslabitev ali celo delno razpadanje že sicer šibkega zidovja. Nevzdrževana, vplivom atmosfere in okolja iz-

postavljena stara stavba lahko že v nekaj letih izgubi precejšen del nosilnosti, kar dodatno zmanjšuje njeno potresno odpornost. Pomanjkljivosti se razkrijejo med potresi. Od zidane stavbe, ki je konstrukcija škatlastega tipa, se pričakuje, da bo tudi med potresom delovala celovito. Če zidovi niso povezani med seboj, odziva konstrukcije, pri katerem vsi elementi sodelujejo pri prevzemu vodoravnih sil, seveda ne moremo pričakovati. Zidovi se ob navpičnih stikih ločijo med seboj, začnejo



Slika 3 • Posočje, 1998: navpične razpoke so nastale zaradi nihanja zidu pravokotno na ravnino



Slika 4 • Budva, 1979: porušitev zidu zaradi nihanja pravokotno na ravnino

med močnim potresom so v takšnih primerih skoraj neizogibne.

Seveda stari stavbi niti dobra povezanost zidov, ki zagotavlja celovito delovanje med potresom, niti dobra zasnova ne pomagata prevzeti nastalih potresnih sil, če zidovje ni dovolj močno, da bi te sile prevzelo. Ker je zaradi mehanskih lastnosti zidovja strižna odpornost navadno odločilna, v prešibkih zidovih nastanejo značilne poševne razpoke, kamnito zidovje slabše kakovosti pa se lahko tudi razsloji (sliki 5 in 6). Čeprav so stare hiše navadno brez posebnih temeljev, so poškodbe, ki jih lahko pripišemo temeljem,

redke, razen če so stavbe temeljene na fleh, ki med potresom izgubijo stabilnost (zdrs pobočja, likvefakcija).

Da bi starim stavbam izboljšali potresno odpornost, moramo opisane pomanjkljivosti odpraviti. Celovitost delovanja konstrukcije med potresom ustvarimo z medsebojno povezavo zidov in ukrepi, s katerimi utrdimo stropne konstrukcije. Da bi zagotovili porazdelitev potresnih sil po zidovih, morajo biti stropi dovolj togi, hkrati pa učinkovito sidrani in povezani z zidovi. Zasnovo po potrebi izboljšamo z zazidavanjem odprtín oziroma vgrajevanjem novih zidov, pri čemer uporab-

ljamo zidovje, ki je po mehanskih lastnostih podobno obstoječemu, staro in novo zidovje pa med seboj dobro povežemo.

Potresno odpornost zidov izboljšamo z različnimi tehnologijami, ki so prilagojene vrsti zidovja in zahtevani stopnji utrditve, nosilnost temeljev in temeljnih tal pa preverimo predvsem v primeru, ko z utrditvijo zidovja močno povečamo potresno odpornost konstrukcije. Po končani utrditvi stavbe bodo morali njeni temelji v primeru potresa prenašati precej večje obremenitve kot pred njo.



Slika 5 • Umbrija, 1997: tipične strižne razpoke v kamnitem zidovju



Slika 6 • Posočje, 1998: razslojevanje kamnitega zidovja

3 • PREPROJEKTIRANJE

Stavbe večinoma protipotresno utrjujemo šele potem, ko jih je potres že prizadel. Le redko jih utrjujemo preventivno, z namenom, da jih morebitni, vendar pričakovani potres ne bo prizadel. Tehnično gledano, med utrditvijo pred potresom ali po njem ni bistvene razlike. Glede na to, da je potres že pokazal, kje so kritična mesta, po potresu poškodovano stavbo morda utrdimo celo zanesljiveje, kot bi jo, kadar kritična mesta za nastanek poškodb predvidimo sami.

Kot že beseda pove, pomeni preprojektiranje (angl. redesign) ponovno projektiranje konstrukcije, ki je pred gradnjo že bila projektirana po tehničnih standardih takratnega časa, vendar jo želimo toliko

izboljšati, da bo ustrezala tudi današnjim zahtevam. Ukrepe za izboljšanje stanja predvidimo s projektom, katerega ključni del je tudi računsko preverjanje odpornosti konstrukcije. Pri preprojektiranju to storimo dvakrat: pred utrditvijo konstrukcije in po njej. Stare stavbe kulturne dediščine pa sploh niso bile projektirane. Sezidane so bile na podlagi tradicije in izkušenj, brez kakršnega koli računskega dokaza o stabilnosti in potresni odpornosti. Seveda je postopek enak postopku pri stavbah, ki so bile projektirane že kot nove, le da moramo zaradi tega, ker projekta obstoječega stanja ni, vse podatke za obstoječe stanje konstrukcije pridobiti na novo, medtem ko pri enkrat

že projektirani konstrukciji samo preverimo točnost podatkov v projektu.

Preprojektiranje oziroma projektiranje utrditvenih ukrepov je sklop postopkov, s katerimi:

- najprej ugotovimo stanje in ocenimo potresno odpornost obstoječe konstrukcije. Temeljiteje bomo raziskali stanje konstrukcije, zanesljivejši bo rezultat analize potresne odpornosti in lažja bo odločitev za morebitne utrditvene ukrepe;
- izberemo ustrezne utrditvene ukrepe, katerih učinkovitost po potrebi preverimo;
- konstrukcijo preprojektiramo, računsko analizo pa ponovimo z upoštevanjem sprememb zaradi utrditvenih ukrepov;
- izvedemo in spremljamo izvedbo utrditvenih ukrepov. Če se pokaže, prilagodimo na začetku predvidene ukrepe dejanskemu stanju.



Slika 7 • Ugotavljanje homogenosti kamnitega zidovja z radarjem (arhiv ZAG, foto V. Bosiljkov)

3.1 Ocena stanja konstrukcije in določanje mehanskih lastnosti materialov

Da bi zanesljivo ocenili potresno odpornost, moramo kar največ podatkov o konstrukciji, ki jih potrebujemo za analizo, ugotoviti ne samo z vizualnim pregledom, pač pa tudi s pregledom morebitno razpoložljive tehnične dokumentacije oziroma standardov in tehničnih predpisov, ki so veljali v času njene gradnje, ter z opazovanji in meritvami na terenu. V večini primerov ne bo šlo brez terenskih preiskav za ugotavljanje stanja zidovja ter terenskih in laboratorijskih preiskav materialov na vzorcih, ki jih odvzamemo s konstrukcije. Z medsebojno primerjavo podatkov, ki jih dobimo na različne načine, omejimo negotovosti. Včasih pa moramo pred odločitvijo o posegih konstrukcijo tudi opazovati v daljšem časovnem obdobju.

Da bi lahko ocenili potresno odpornost obstoječe zidane konstrukcije, moramo razen njenega stanja poznati predvsem:

- geometrijo konstrukcijskega sistema in tistih nekonstrukcijskih elementov, ki lahko vplivajo na odziv konstrukcije na potres (na primer predelnih sten in zidanih polnil);
- način stikanja med stropnimi konstrukcijami in elementi, ki prevzemajo potresno obtežbo, ter način povezovanja elementov (zidne vezi, sidra);
- mehanske lastnosti sestavnih materialov in zidovja v celoti.

Med nedavno uveljavljenimi standardi za projektiranje konstrukcij – evrokodi, standard SIST EN 1998-3 (Evrokod 8-3, 2005) glede na obseg podatkov o konstrukciji, s katerimi razpolagamo, ko konstrukcijo ocenjujemo, loči tri ravni (nivoje) poznavanja konstrukcije (angl. knowledge level – KL), ki so podlaga za določitev nekaterih projektnih parametrov:

- raven KL1: omejeno poznavanje,
- raven KL2: normalno poznavanje,
- raven KL3: popolno poznavanje konstrukcije.

Pri ugotavljanju stanja konstrukcije so nam danes poleg klasičnih ročnih načinov odpiranja zidov s kladivom in sekačem ali strojnim vrtnjem v pomoč številne sodobne nedestruktivne metode, s katerimi lahko ugotavljamo strukturo in homogenost sestave materialov in elementov konstrukcije, vlažnost v zidovju, vsebnost škodljivih snovi, korozijske potenciale, porazdelitev in vsebnost armature in vse drugo, kar potrebujemo pri projektiranju ((Suprenant in Schuller, 1994), (Onsiteformasonry, 2006)).

Radarska tomografija je metoda, osnovana na meritvah prehoda in odboja kratkih elektromagnetnih impulzov, ki jih seva visokofrekvenčna (1,5- do 1,8-gigaherčna) antena. Impulzi se na površinah materialov z različnimi dielektričnimi lastnostmi odbijajo, s čimer lahko odkrijemo nehomogenosti, kot so npr. votline v zidovju ali kovine v drugih materialih (slika 7). Radarska tomografija je zelo primerna metoda tudi za ugotavljanje uspešnosti injektiranja kamnitega zidovja: s primerjavo stanja pred injektiranjem

in po njem lahko sklepamo na uspešnost zalitja votlin.

Mikroseizmična tomografija temelji na prehodu akustičnih valov v frekvenčnem območju med 4 in 20.000 Hz skozi material. Serija senzorjev registrira val, medtem ko se širi po materialu, z analizo hitrosti širjenja pa ugotavljamo nehomogenosti v materialu (slika 8).

Pri metodi z odmevom na udarec (angl. impact echo) povzročimo akustični val s točkovnim mehanskim udarcem po materialu (posebno kladivo). Val se širi po materialu, večkratni odboji nizkofrekvenčnih valov med zunanjo površino in notranjimi deli, nezveznostmi in napakami v materialu pa se uporabijo za določanje resonančnih frekvenc in oceno celovitosti materiala (slika 9).

Z omenjenimi metodami pri zidanih konstrukcijah ugotavljamo le strukturo in homogenost zidovja, za ugotavljanje mehanskih lastnosti pa moramo uporabiti destruktivne ali poldestruktivne metode. Da lahko na podlagi rezultatov laboratorijskih preiskav vzorcev kamna, opeke in malte, ki smo jih odvzeli med pregledom konstrukcije, ugotovimo tudi mehanske lastnosti zidovja, je mogoče le v primeru, če že imamo na razpolago rezultate preiskav nosilnosti zidovja, sezidanega na podoben način in z materiali enakih mehanskih lastnosti, kot jih imajo materiali, ki smo jih odvzeli za preiskavo. Če podatkov nimamo, se preiskavam lastnosti zidovja ne moremo izogniti, še posebej, če gre za večjo skupino stavb (stara mestna jedra), ki jih nameravamo utrditi. Preiskave navadno



Slika 8 • Ugotavljanje homogenosti kamnitega zidovja z mikroseizmično tomografijo (arhiv ZAG, foto V. Bosiljkov)



Slika 9 • Ugotavljanje homogenosti kamnitega zidovja z odmevom na udarec (arhiv ZAG, foto V. Bosiljkov)



Slika 10 • Preiskava potresne odpornosti kamnitega zidu na terenu

izvedemo na sami stavbi (slika 10), saj je odvzem ustreznega kosa zidu in prenos v laboratorij po navadi zahtevnejši kot sama preiskava na stavbi.

Če želimo ugotoviti lokalno tlačno napetostno stanje v zidu, uporabimo t. i. ploščate bate (angl. flat jack), dve med seboj po robovih zvarjeni tanki jekleni pločevini poljubne oblike, ki ju prilagodimo obliki izreza v naležne rege med zidaki in na katerih sta na dveh mestih privarjeni šobi za vtiskanje olja (sliki

11 in 12). Če je izrez napravljen z izpraskanjem malte, uporabimo bate pravokotne oblike, če pa malto izrežemo s krožno žago, je del bata, ki ga vložimo v zid, krožne oblike. Širina bata navadno odgovarja širini sloja zidu, ki ga preiskujemo, medtem ko dolžina ni predpisana. Pri običajni preiskavi v zid na primerni medsebojni razdalji (ki je približno enaka dolžini bata) izrežemo tanka utora, v katera namestimo napravi. V enaki medsebojni razdalji na ustreznih

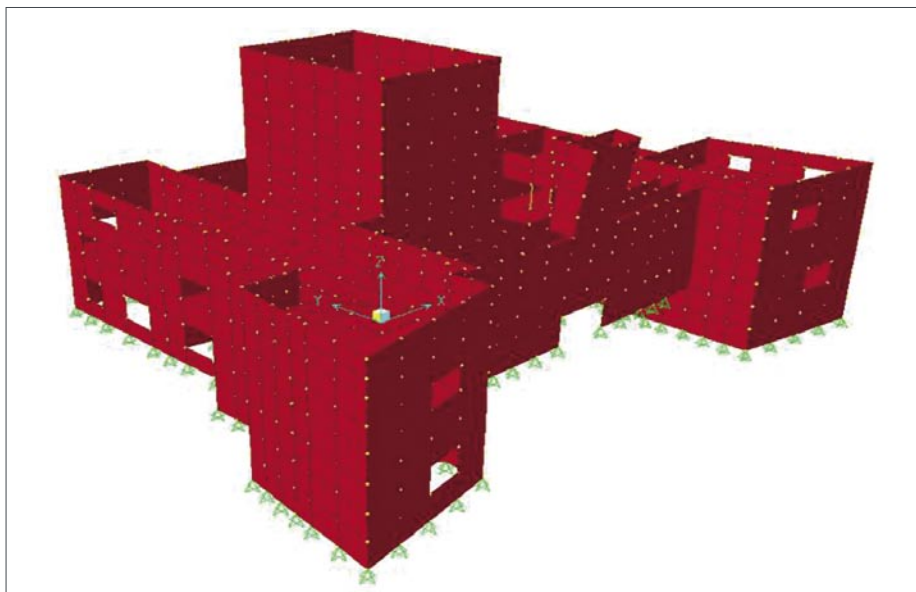
mestih pod zgornjim in nad spodnjim rezom pritrdimo baze za tri do štiri dilatometre ter izmerimo razdaljo pred rezanjem utorov v rege in po tem. V utoru vstavimo bata in vanju s hidravlično črpalko vtiskamo olje. Med večanjem tlaka spremljamo spremembo razdalje med bazami dilatometrov. Lahko sklepamo, da je v trenutku, ko dosežemo razdaljo, izmerjeno pred rezanjem utorov, tlak olja v batu enak tlačnim napetostim



Slika 11 • Meritve tlačnih napetosti v zidu s ploščatimi bati (arhiv ZAG, foto V. Bosiljkov)



Slika 12 • Ploščati bat po končani preiskavi



Slika 13 • Oblika nihanja monumentalne stavbe, izračunana z metodo končnih elementov

v zidu. Če s preiskavo nadaljujemo do nastanka navpičnih razpok v vmesnem zidovju, lahko ocenimo tudi tlačno trdnost zidovja. Ploščati bati se pri ponovljenih preiskavah deformirajo in zmehčajo (slika 12), zato jih je treba večkrat kalibrirati.

3.2 Računski modeli in analiza potresne odpornosti

Računski model, s katerim analiziramo konstrukcijo, mora odražati njeno dejansko

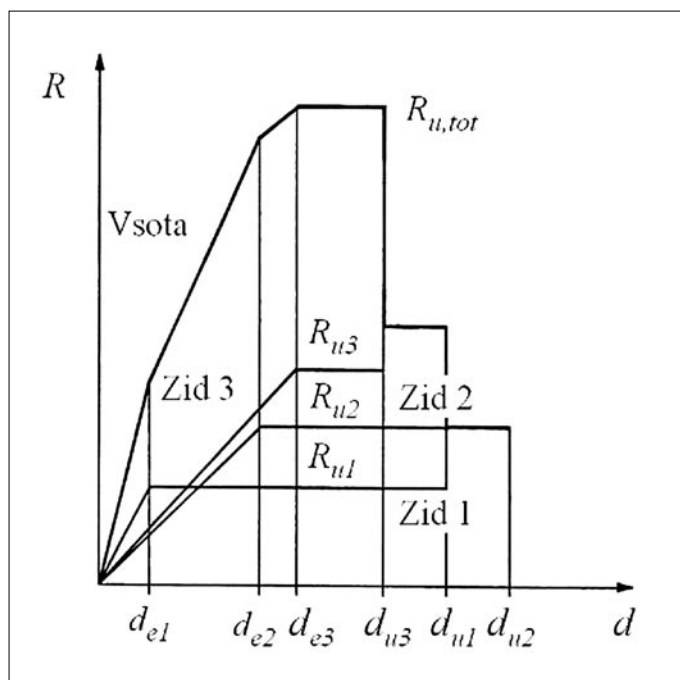
obnašanje med delovanjem potresne obtežbe. Za običajne stavbe pravilne zasnove uporabimo modele, ki jih tudi sicer uporabljamo za preverjanje potresne odpornosti zidanih konstrukcij, sicer pa modele prilagodimo namenu analize in dejanskemu obnašanju.

Pri monumentalnih stavbah, ki imajo komplicirano zasnovo konstrukcije, lahko uporabimo modele s končnimi elementi (slika 13). Glede na zasnovo in sestavo konstrukcije (zidovi, stebri, loki, oboki itd.) lahko izberemo

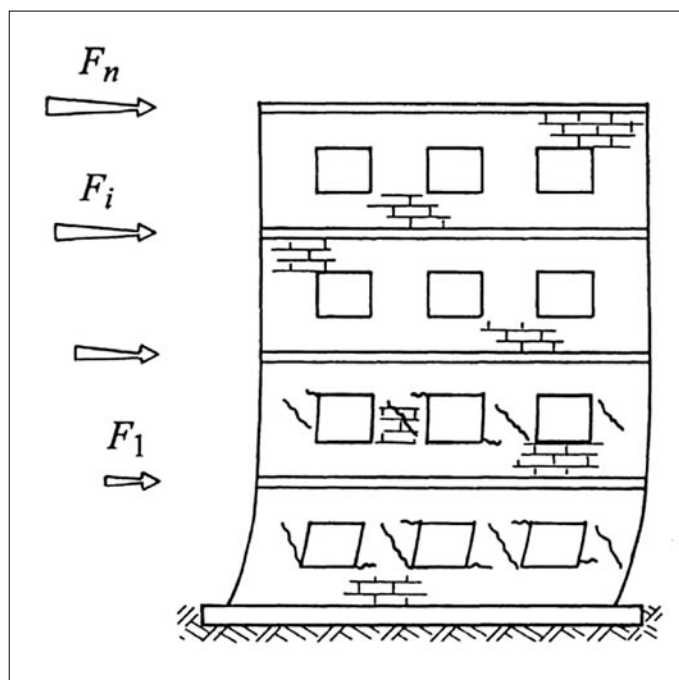
bolj ali manj zapletene prostorske, ravninske ali linijske končne elemente, ki jih med sabo ustrezno povežemo v model, ki mora odražati dejansko obnašanje konstrukcije med potresom. Programske opreme, ki nam omogoča bolj ali manj »natančno« analizo, je dovolj. Če stare zidane konstrukcije analiziramo z metodami končnih elementov, se moramo zavedati, da nam elastični modeli s končnimi elementi navadno le nakažejo kritična mesta, kjer bodo nastale koncentracije napetosti in poškodbe konstrukcije, z njimi pa ne dobimo realne slike o dejanski potresni odpornosti konstrukcije. Nelinearni modeli so zahtevni in jih uporabljamo le izjemoma.

Pri starih zidanih hišah, ki izpolnjujejo pogoj celovitosti delovanja konstrukcije med potresom, kar pomeni, da smo med prenovo poskrbeli za učinkovito povezanost zidov in stropov, in ki imajo pravilno zasnovo v florisu in po višini, dobimo dobre rezultate z modelom etažnega mehanizma. V tem primeru prevladuje strižni mehanizem obnašanja zidov (slika 5), zato je tudi strižna nosilnost zidov odločilna.

To računski postopek močno poenostavi, saj v računu naredimo le zanemarljivo napako, če upogibne vplive zanemarimo. Ker prevladujejo vplivi striga, je tudi togost posameznih zidov premo sorazmerna površini vodoravnega prereza. Nanjo vpliva predvsem višina zidu in je le manj odvisna od vpetostnih pogojev. Ta model je bil podlaga za računsko metodo, izdelano po potresih v Furlaniji in Posočju leta



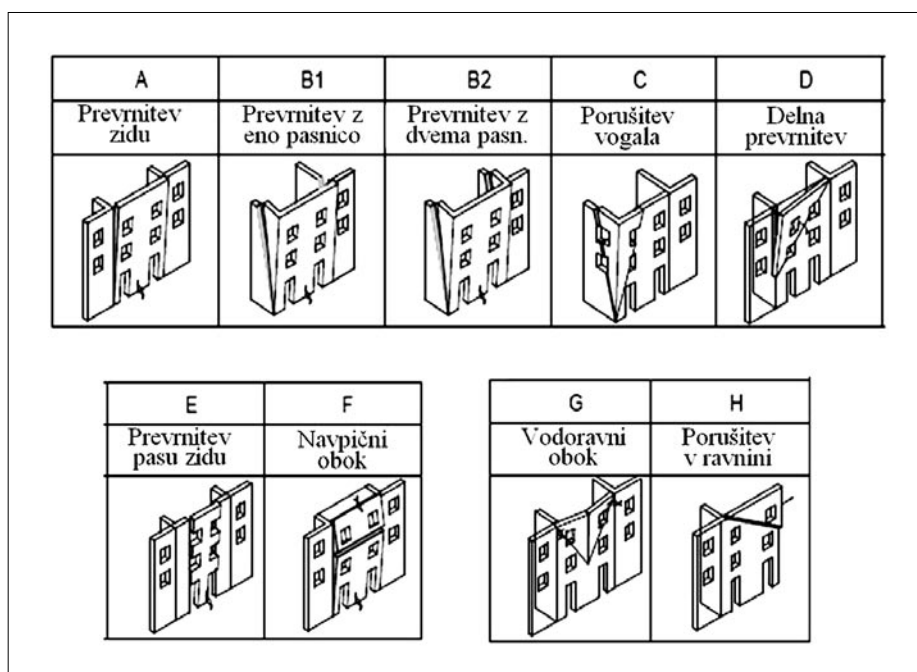
Slika 14 • Konstrukcija ovojnice odpornosti etaž



Slika 15 • Shematični prikaz etažnega strižnega mehanizma

1976 (Tomaževič, 1978), namenjeno predvsem preverjanju potresne odpornosti enostavnih hiš iz nearmiranega zidovja. Metoda, ena prvih danes imenovanih »push-over« metod, ki temelji na izračunu ovojnice odpornosti kritične etaže (slika 14), je bila v Italiji med popotresno obnovo predpisana kot obvezna za preverjanje potresne odpornosti hiš (Raccomandazioni, 1977). Čeprav je vključevala tudi preverjanje upogibne odpornosti zidov, je bil v osnovni različici upoštevan etažni strižni mehanizem (slika 15) oziroma predpostavka, da so zidovi simetrično vpeti zgoraj in spodaj v prekladno konstrukcijo. V današnji različici metode je v originalu upoštevani mehanizem le ena od možnosti.

Če želimo analizirati potresno odpornost zgodovinskih hiš v obstoječem stanju, kjer zidovi niso povezani, potresne odpornosti ne moremo zadovoljivo oceniti z etažnim strižnim mehanizmom. V primeru, ko zidovje med seboj ni ustrezno povezano, je upogib pravokotno na ravnino največkrat kritični mehanizem, zaradi katerega pride do ločevanja zidov in lokalnih porušitev, s tem pa tudi do občutnega zmanjšanja potresne odpornosti stavbe kot celote. Nekatere značilne oblike mehanizmov porušitev zaradi upogiba pravokotno na ravnino so prikazane na sliki 16. V takih primerih potresno odpornost konstrukcije ocenimo tako, da na podlagi trdnostnih lastnosti zidovja izračunamo velikost pospeškov, ki povzročijo analizirani lokalni mehanizem porušitve ((Giuffrè, 1989),



Slika 16 • Delni mehanizmi porušitve, ki jih upoštevamo v analizi potresne odpornosti stavb v obstoječem stanju (D'Ayala in Speranza, 2002)

(D'Ayala in Speranza, 2002)). Preizkusimo več možnosti, kot kritično, ki določa potresno odpornost, pa izberemo tisto, kjer je indeks ekvivalentne strižne odpornosti, ki ga izrazimo z deležem pospeška prostega pada (razmerjem med pospeškom, ki povzroči mehanizem, in pospeškom prostega pada), najmanjši.

Tovrstni modeli se največ uporabljajo za oceno potresne ranljivosti zgodovinskih mestnih jeder, kjer ocenjujemo odpornost stavb v obstoječem stanju, in ne za oceno potresne odpornosti med preprojektiranjem, ko smo s tehničnimi ukrepi že preprečili nastanek lokalnih porušnih mehanizmov.

4 • RAVEN UTRDITVE: ZAHTEVE STANDARDA IN MOŽNOSTI

Da bi izbrali ustrezen poseg v obstoječo konstrukcijo, moramo pri prenovi zgodovinskih stavb poznati tudi raven potresne odpornosti, do katere moramo utrditi konstrukcijo stavbe. Standard SIST EN 1998-3, ki določa zahteve, ki jih moramo upoštevati pri prenovi in utrjevanju obstoječih stavb, je odločen: obstoječim stavbam je treba med prenovo zagotoviti enako stopnjo potresne varnosti kot pri novi gradnji. Žal za stavbe kulturne dediščine postavlja zahteve, ki jih brez grobega kršenja osnovnih načel varstva arhitekturne kulturne dediščine največkrat ni možno izpolniti.

Dosledno izpolnjevanje zahtev standarda bo predstavljalo še posebej velike težave pri obnovi monumentalnih stavb, ki jih že sicer obravnavamo ločeno, od primera do primera posebej. Pri njih moramo zaradi številnih arhitekturnih posebnosti in umetniške vred-

nosti (način in materiali gradnje, poslikave sten ipd.) še veliko bolj kot pri stanovanjskih stavbah v mestnih in podeželskih starih jedrih spoštovati omejitve, ki jih za posege v konstrukcijo postavlja konzervatorska in restavratska stroka in ki so zapisani v številnih dokumentih, ki obravnavajo načela varstva arhitekturne kulturne dediščine.

Tako kot pri konstrukcijah, ki jih projektiramo na novo, pri preverjanju potresne odpornosti utrjenih obstoječih stavb upoštevamo dve zahtevi:

- zahtevo za preprečitev porušitve in
- zahtevo za omejitev poškodb.

4.1 Projektna potresna obtežba

Pri projektiranju novih oziroma preprojektiranju obstoječih konstrukcij govorimo o preverjanju končnega mejnega stanja in mejnega stanja

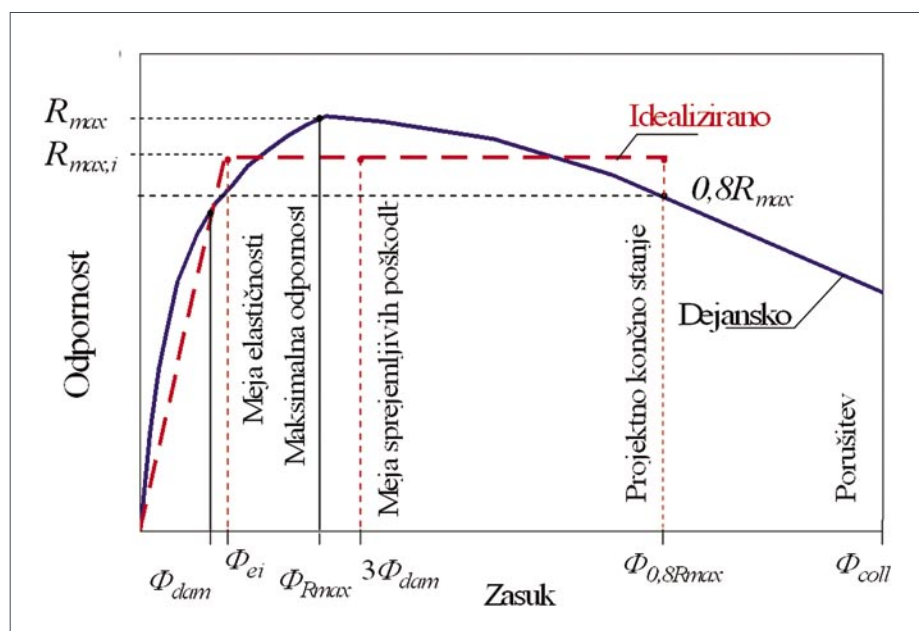
uporabnosti. V skladu z načeli SIST EN 1998-1 (Evrokod 8-1, 2005) velja, da mora konstrukcija vzdržati potres s povratno dobo 475 let in 10 % verjetnostjo prekoračitve v 50 letih (ti. projektni potres), ne da bi se lokalno ali v celoti porušila. Med najmočnejšim pričakovanim potresom mora ostati celovita, po potresu pa obdržati sposobnost prenašanja obtežbe, na katero je bila projektirana (zahteva za preprečitev porušitve). Konstrukcija mora biti projektirana tudi tako, da bo vzdržala šibkejši potres z večjo verjetnostjo nastanka, tj. potres s povratno dobo 95 let in 10 % verjetnostjo prekoračitve v 10 letih, ne da bi se poškodovala oziroma da bi bila njena uporabnost omejena v tolikšni meri, da bi bila škoda nesorazmerna ceni konstrukcije. Tudi pri projektnem potresu morajo poškodbe ostati v mejah, da jih lahko popravimo (zahteva za omejitev poškodb).

Raziskave so pokazale, da pri zidanih konstrukcijah preverjanje mejnega stanja uporabnosti lahko opustimo, saj bo konstrukcija

avtomatično izpolnila zahteve, če jo bomo preverili na končno mejno stanje, pri tem pa omejili razpoložljivo kapaciteto deformacij (duktilnost). Analiza večjega števila rezultatov eksperimentalnih preiskav zidov in modelov zidanih stavb je pokazala, da obstaja zanesljiva korelacija med stopnjo poškodb in deformacijo zidovja pri mejnih stanjih, ki jih moramo upoštevati pri preverjanju potresne odpornosti (Tomažević, 2007). Pri tem se lahko navežemo na uveljavljeno klasifikacijo poškodb, ki jo uporablja evropska makroseizmična lestvica EMS-98 (European, 1998). Iz definicije same izhaja, da poškodbe 1.–2. (neznatne do lažje poškodbe) oziroma 5. stopnje (porušitev) določajo mejno stanje nastanka poškodb oziroma porušitev konstrukcije. Če poskušamo na podlagi eksperimentalnih rezultatov obnašanja zidov in modelov zidanih konstrukcij raziskati, pri katerih deformacijah (etažnih pomikih oziroma zasukih) nastanejo poškodbe 3. in 4. stopnje, lahko ugotovimo, da poškodbe 3. stopnje (zmerne poškodbe) nastanejo, ko doseže konstrukcija največjo odpornost ali pa kmalu za tem. Lahko tudi ugotovimo, da sta velikostna reda deformacij, pri katerih zidane konstrukcije dosežejo mejno stanje nastanka poškodb in največjo odpornost, razmeroma blizu skupaj.

Odpornost med potresno odpornostjo kritične etaže, R , in etažnim zasukom, ki predstavlja razmerje med relativnim etažnim pomikom, d , in etažno višino, h : $\Phi = d/h$ (običajno ga izrazimo kar v % etažne višine), je shematično prikazana na sliki 17.

Evrokod 8 projektno končno mejno stanje definira s točko, pri kateri odpornost konstrukcije pade na 80 % največje vrednosti. Izkaže se, da poškodbe 3. stopnje, ki pri zidanih konstrukcijah predstavljajo še sprejemljivo mejo (hude poškodbe), navadno nastanejo že pred tem. Analiza eksperimentalnih rezultatov je pokazala, da takšne poškodbe navadno nastanejo pri etažnem pomiku (zasuku), ki je približno enak 3-kratni vrednosti etažnega pomika (zasuka) pri nastanku prvih poškodb. Zato pri zidanih konstrukcijah kot merilo za definicijo projektnega končnega mejnega stanja uporabimo vrednost etažne deformacije, pri kateri nastanejo v zidovju poškodbe 3. stopnje. Etažni pomik (zasuk) pri projektnem končnem mejnem stanju je torej bodisi pomik (zasuk), kjer odpornost pade na 80 % največje vrednosti, bodisi pomik (zasuk) v velikosti 3-kratnega pomika (zasuka) na meji nastanka poškodb, kar je manj:



Slika 17 • Odvisnost etažne odpornosti od zasuka z vrisanimi mejnimi stanji

$$\Phi_{du} = \min \{ \Phi_{0,8R_{max}}; 3\Phi_{dam} \}, \quad (1)$$

kjer je:

- Φ_{du} – etažni zasuk pri projektnem končnem mejnem stanju,
- $\Phi_{0,8R_{max}}$ – etažni zasuk, pri katerem potresna odpornost pade na 80 % največje vrednosti,
- Φ_{dam} – etažni zasuk na meji nastanka poškodb.

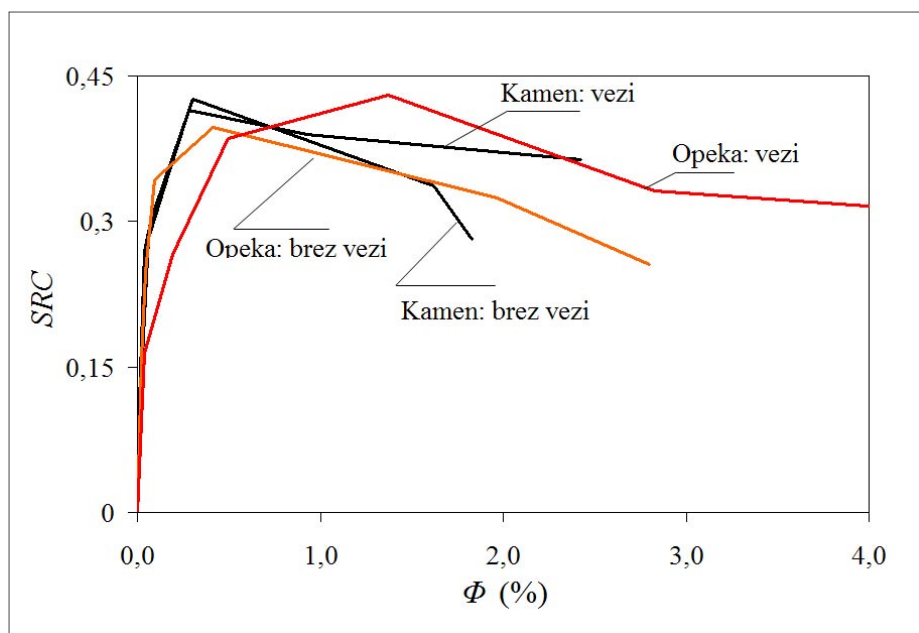
Raziskave so pokazale, da je velikostni red etažnih zasukov pri odločilnih mejnih stanjih, ne glede na vrsto zidovja in sistem gradnje, zelo podoben. Povprečne vrednosti izmerjenih zasukov in standardni odkloni pri posameznih mejnih stanjih so navedeni v preglednici 1. Med preiskavo modelov starih kamnitih in opečnih stavb s povezanimi in z nepovezanimi zidovi izmerjene odvisnosti med koeficientom potresne odpornosti pritličja, $SRC = R/W$ (razmerjem med izmerjeno prečno silo v pritličju, R , in teži stavbe, W) in etažnim zasukom,

$\Phi = d/h$, prikazuje slika 18 (Tomažević in sod., 1993). Podobne odvisnosti so, ravno tako s preiskavami modelov na potresni mizi, ugotovili tudi drugi raziskovalci (Benedetti, 1996).

Če na podlagi tako definiranih mejnih stanj in omejitev razpoložljive sposobnosti deformacij oziroma duktilnosti zidane konstrukcije izvednotimo parametre, ki jih rabimo za določanje projektno potresne obtežbe (faktor obnašanja, q), bo zidana konstrukcija v primeru, da ustreza kriterijem odpornosti, avtomatično izpolnila pogoje pri mejnem stanju uporabnosti. To velja tudi za zidane stavbe arhitekturne kulturne dediščine. Eksperimentalne raziskave obnašanja modelov starih kamnitih in opečnih zidanih stavb na potresni mizi so pokazale, da je sposobnost prevzemanja deformacij stavb s povezanimi zidovi sicer razmeroma velika (glej sliko 18), vendar pri projektnem končnem mejnem stanju, kjer odpornost pade na 80 % maksimalne, povezana s prehudimi poškodbami. Zato sposobnost deformacij pri

Mejno stanje	Stopnja poškodb	Etažni zasuk $\Phi = d/h$ (v %)	Standardni odklon σ_Φ (v %)
Meja poškodb	2. stopnja	0,3	0,15
Največja odpornost	3. stopnja	0,61	0,41
Projektno končno mejno stanje	3.–4. stopnja	1,0–1,2	–
Porušitev	5. stopnja	3,29	2,09

Preglednica 1 • Povprečne vrednosti etažnega zasuka pri mejnih stanjih (Tomažević, 2007)



Slika 18 • Med preiskavo modelov starih stavb na potresni mizi izmerjene odvisnosti etažne odpornosti od etažnega zasuka (po (Tomaževič in sod., 1993))

preverjanju potresne odpornosti izkoristimo le do trikratne vrednosti deformacije pri meji nastanka prvih poškodb.

Projektna potresna odpornost zgodovinskih stavb večje etažnosti (3–4 etaže), kjer upoštevamo v praksi splošno uveljavljeno redukcijo elastičnih sil za tovrstne konstrukcije (faktor $q = 1,5$), težko doseže projektne potresne sile, ki jih za preverjanje potresne odpornosti zidanih konstrukcij na območjih s povečano seizmičnostjo predpisuje SIST

EN 1998-1. Zato je predstandard SIST ENV 1998-1-4 (Evrokod 8-1-4, 2000) dopuščal, da se projektna potresna obtežba izjemoma lahko zmanjša za največ $1/3$, če predvideni stroški obnove celotnega gradbenega fonda na posameznem območju presežejo sprejemljive okvire oziroma če bi upoštevanje projektne obtežbe potresnih sil zahtevalo za načela varstva kulturne dediščine nesprejemljive tehnične ukrepe. Evrokod 8-3 ne govori več o možnosti zmanjšanja projektne potresne

obtežbe v opravičljivih primerih, priporoča pa ocenjevanje potresne odpornosti konstrukcije glede na sposobnost prevzemanja deformacij (glede na sprejemljivo raven poškodovanosti). Na podlagi eksperimentalnih analiz in analize poškodb po potresu poškodovanih, vendar predhodno s povezovanjem zidov utrjenih hiš lahko ugotovimo, da je njihova sposobnost prevzemanja deformacij razmeroma velika (glej sliko 18) in dopušča upoštevanje faktorja obnašanja q na zgornji meji območja, ki ga za zidane konstrukcije iz nearmiranega zidovja priporoča SIST EN 1998-1 ($q = 1,5$ – $2,5$). Da to brez zadržkov lahko storimo, kažejo analize potresne odpornosti po potresih poškodovanih kamnitih hiš, ki smo jih na Zavodu izdelali v preteklosti npr. ((Tomaževič in sod., 1979), (Tomaževič in sod., 1980), (Lutman in sod., 2000)).

Zato pri stavbah kulturne dediščine, kjer za preverjanje potresne odpornosti pri določanju projektna potresna obtežba uporabljamo metodo s q faktorjem, zmanjšanje projektne potresne obtežbe argumentiramo z nekoliko povečano vrednostjo faktorja q , vendar ne čez v Evrokodu 8-1 priporočeno zgornjo mejo za zidane konstrukcije z nearmiranim zidovjem. Povečanje nikakor ne gre na račun varnosti stavb proti porušitvi, pač pa le na račun nekoliko povečanega obsega poškodb pri projektnem potresu, ki še vedno ne presega sprejemljive meje. Da je res tako, so pokazale analize nelinearnega odziva več kamnitih zidanih stavb na registracijo potresa v Posočju leta 2004 (Tomaževič in sod., 2005). Primerjava med projektnimi potresnimi silami, ki jih zahteva standard (BSC_d), in oceno, do kolikšne mere bi se sile z upoštevanjem sposobnosti prevzemanja deformacij lahko zmanjšale ($BSC_{d,R}$), je prikazana v preglednici 2. Projektne potresne sile so izražene z razmerjem med projektno potresno prečno silo v pritličju, BS_d , in težbo stavbe, W , ti. projektnim koeficientom prečne sile v pritličju ($BSC_d = BS_d/W$).

(Se nadaljuje v oktobrski številki)

Projektni pospešek tal a_g	0,05	0,10	0,20	0,25
Faktor obnašanja q	1,5	1,5	1,5	1,5
BSC_d	0,08	0,17	0,33	0,42
Faktor obnašanja q_R	1,5	1,5	1,8	2,0
$BSC_{d,R}$	0,08	0,17	0,28	0,31

Preglednica 2 • Predlog za povečanje vrednosti faktorja obnašanja pri preverjanju potresne odpornosti objektov kulturne dediščine na različnih območjih seizmičnosti