

LABORATORIJ ZA KONSTRUKCIJE ZAG IN RAZISKAVE ZA POTRESNO ODPORNE ZIDANE STAVBE

LABORATORY FOR STRUCTURES AT ZAG AND RESEARCH FOR EARTHQUAKE RESISTANT MASONRY CONSTRUCTION

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

miha.tomazevic@zag.si

Zavod za gradbeništvo Slovenije, Ljubljana

Strokovni članek

UDK 001.891.53:624.042.7(497.4)

Povzetek | V članku je podan pregled raziskovalnega dela na področju potresne odpornosti zidanih konstrukcij, ki so ga v zadnji polovici stoletja opravili raziskovalci Zavoda za gradbeništvo Slovenije (v nadaljevanju: Zavod) ob pomoči laboratorija za konstrukcije. Opisan je razvoj laboratorija ter povzeti rezultati pomembnejših eksperimentalnih raziskav.

Gljučne besede: eksperimentalne raziskave, zidane konstrukcije, laboratorij, oprema

Summary | In the paper, the research work in the field of earthquake resistant masonry structures, carried out by Slovenian National Building and Civil Engineering Institute in the past half-century, is summarized. The development of the Laboratory of structures and the results of the most significant experimental research projects are briefly presented.

Key words: experimental research, masonry structures, structural laboratory, testing facilities

1 • UVOD

Raziskovanja na področju potresnega inženirstva si ne moremo predstavljati brez eksperimentov, s katerimi ponazorimo obnašanje gradbenih konstrukcij med potresi. Seveda ne eksperimentov, pri katerih konstrukcija ostane cela, pač pa eksperimentov, pri katerih obnašanje konstrukcije spremljamo vse do porušitve. Vrsta poškodb in potek njihovega nastanka sta podlaga za ugotovitev, kaj je bilo s konstrukcijo narobe, da ni vzdržala potresa. Če poznamo zasnovo konstrukcije, lastnosti vgrajenih materialov in odpornost posameznih elementov oziroma sklopov konstrukcije, lahko na podlagi analize poškodb ugotovimo, kakšne in kako so bile razporejene sile, ki so delovale na konstrukcijo med potre-

som. Poškodbe nam pokažejo šibka mesta konstrukcije, ki jih pri projektiranju podobnih novih konstrukcij odpravimo, pri obstoječih, po potresu že poškodovanih, pa utrdimo. Kako to storimo, nam pove vrsta poškodb.

Ustrezno opremljen laboratorij je ključni element potresno odpornega projektiranja konstrukcij. Z eksperimenti zasnujemo in preverjamo računske modele, s katerimi ocenjujemo potresno odpornost konstrukcij in njihovih elementov. Z eksperimenti preverjamo tudi učinkovitost tehnoloških rešitev za protipotresno utrjevanje obstoječih konstrukcij. Tako tistih, ki jih je potres že poškodoval, kot tudi potresno ranljivih, pri katerih je velika verjetnost, da jih v bližnji prihodnosti bo. Z

drugimi besedami, brez ustreznega laboratorija ni projektiranja potresno odpornih (novih) konstrukcij niti ni preprojektiranja oziroma utrjevanja potresno ranljivih obstoječih stavb. Danes se prihajajoča, že četrta generacija raziskovalcev pri Zavodu zaveda pomena laboratorija ravno tako kot prva, ki je pred šestdesetimi leti postavila temelje eksperimentalnega raziskovanja za učinkovito potresno odporno gradnjo pri nas in ključno pripomogla, da je današnji Zavod za gradbeništvo Slovenije (ZAG) na tem področju poznan ne le doma in v Evropi, pač pa tudi drugod po svetu. Zato prispevek ni toliko zgodba o Laboratoriju za konstrukcije, temveč predvsem o raziskovalcih, ki so znali izkoristiti njegove na začetku še zelo skromne zmogljivosti, da bi s svojimi raziskavami pripomogli, da bo življenje na območjih, ki jih ogrožajo potresi, varnejše.

2 • ZAČETKI IN MEDNARODNA UVELJAVITEV

Čeprav so se raziskovalci pri Zavodu za raziskavo materiala in konstrukcij (ZRMK) že v času njegove ustanovitve pred več kot šestdesetimi leti zavedali, da potresno odporna gradnja kljub potresni nevarnosti v nekdanji Jugoslaviji ni ustrezno urejena s predpisi, in so po lokalnem potresu leta 1956 v Ilirski Bistrici sodelovali pri pripravi ustrezne slovenske tehnične regulative, je resnejši mejnik v dejavnosti pomenil potres leta 1963, ki je porušil Skopje, glavno mesto Makedonije. Mimogrede, slovenska priporočila za projektiranje (Odredba, 1963), ki so izšla tik pred skopskim potresom, so leta 1964 z nekaterimi spremembami in dopolnitvami postala jugoslovanski začasni tehnični predpis za projektiranje na potresnih območjih. Sloveniji – in s tem ZRMK kot njeni takrat edini raziskovalni instituciji za gradbeništvo, ki je imela na področju sanacij gradbenih konstrukcij že nekaj izkušenj – je bila po potresu leta 1963 zaupana skrb za zidane stavbe.

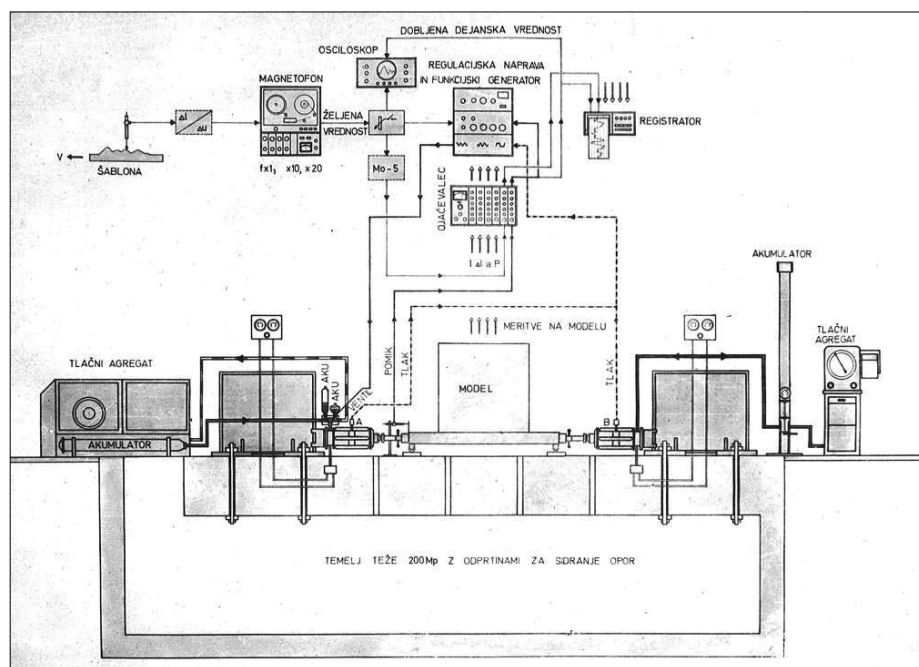
Zvezna država (takratni jugoslovanski Zvezni fond za znanstvena raziskovanja) je po potresu v Skopju financirala obsežen program raziskav obnašanja zidov pri potresni obtežbi in učinkovitosti nekaterih metod utrjevanja opečnih zidov (injektiranje razpok, prednapetje, oblaganje z armiranocementno oblogo), uporabljenih pri sanaciji poškodovanih stavb, ki so ostale ohranjene po potresu. Najpomembnejši rezultat teh raziskav, pri katerih je bila za ugotavljanje poteka napetosti v zidu pri kombinaciji navpične in vodoravne obtežbe poleg preiskav zidov uporabljena tudi fotoelastična metoda, je bila t. i. Turnškova enačba, ki za osnovni parameter za račun strižne odpornosti zidu uvaja natezno trdnost zidovja ((Turnšek, 1970a), (Turnšek, 1971)). Enačba se zaradi enostavnosti in inženirske vrednosti v posodobljeni obliki še danes uporablja, z modifikacijami pa je bila vpeljana v kasnejše jugoslovanske in nekatere tuje predpise. Pomembnost enačbe kaže citiranost članka (Turnšek, 1971), v katerem je bila enačba predstavljena v tujini, do danes pa z nobeno slovensko objavo na področju zidanih konstrukcij še ni bila presežena. Tudi drugače je število citatov (246 po Harzing's Publish or Perish, večinoma v zadnjih 15 letih) za 45 let staro objavo na tem področju spoštljivo.

2.1 Razvoj raziskovalne opreme

Za eksperimentalne raziskave, s katerimi naj bi se poznali vplivi potresnih sil, je bilo

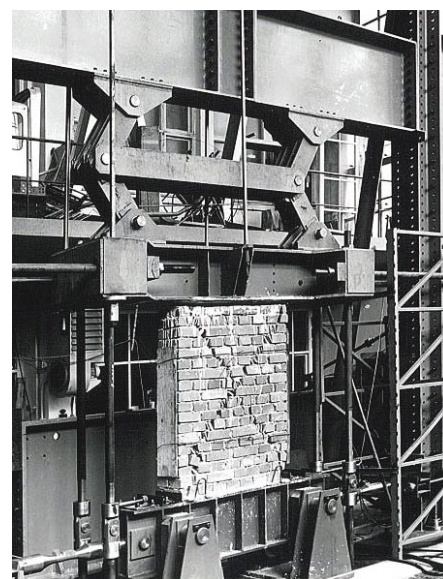
treba prirediti tudi preizkuševalno opremo. Zato so že na koncu 60. let prejšnjega stoletja raziskovalci Zavoda skupaj s švicarskim podjetjem Amsler, ki je do takrat dobavilo večino hidravlične preizkuševalne opreme, zasnovali eno prvih potresnih miz v Evropi, pri čemer so za osnovno idejo uporabili princip delovanja pulzatorja (Turnšek, 1970b). Potresno mizo,

tal pa merilni magnetofon z magnetnim trakom, na katerem je bil zapisan časovni potek pomikov izbranega potresa. Potres na traku je bil zapisan v obliki sprememb električne napetosti, induciranih v induktivnem merilniku pomikov, katerega tipalo je drselo po zgornjem robu šablone, izrezane v obliki pomikov tal med izbranim potresom, in ki se je med snemanjem pomikala z enakomerno hitrostjo. Način krmiljenja je omogočal v okviru zmogljivosti naprave poljubno nastavitvev intenzitete gibanja tal.



Slika 1 • Shema delovanja prve potresne mize (Arhiv ZAG)

jekleno ploščad, zaradi zmanjšanja mase izdelano kot paličje, na katero se je pritrtil preizkušanelec, sta premikala dva v nasprotnih smereh delujoča hidravlična bata (slika 1). Bata sta bila na eni strani povezana z mizo, na drugi strani pa pritrjena na jekleni podporni steni, vpeti v preizkuševalni temelj. Prvi od obeh batov je bil priključen na pulzator (aktivni bat), drugi, pasivni bat pa na oljni akumulator pod tlakom. Pasivni bat je po analogiji s povratno elastično silo konstrukcije, preizkušane med pulziranjem, pri razbremenitvi vračal aktivni bat in z njim potresno mizo v izhodiščni položaj oziroma ga je preko izhodišča potisnil v nasprotno smer. Pasivni bat je bil ustrezno »prednapet«, delovanje aktivnega bata pa so po posebnem programu regulirali dotok olja v bat. Za krmiljenje pravičnega, po navadi sinusnega gibanja je služil kar vgrajeni funkcijski generator, za krmiljenje potresnega gibanja



Slika 2 • Preiskava zidu v napravi za ciklične strižne preiskave (Arhiv ZAG)

Raziskovalci pri ZRMK so hkrati zasnovali tudi posebno napravo za preiskave zidov, s katero naj bi se ponazorilo obnašanje tipičnega zidnega slopa v zidani stavbi med potresom. Naprava je omogočala preizkušanje zidu z dinamično, izmenično delujočo strižno silo pri konstantni navpični obremenitvi ter enakih vpetostnih pogojih na spodnjem in zgornjem robu zidu. Tudi ta naprava je bila sestavljiva: na togo prečko med dvema stebroma, po potrebi podprtima z diagonalama, je bil pritrjen ključni element naprave, paralelogram, poimenovan škarje, ki je zagotavljal, da sta zgornji in spodnji rob zidu med preiskavo ostala vzporedna. Drugi, ne dosti manj pomemben element naprave je bil jekleni podporni nosilec, na katerega je bil postavljen preizkusni zid. Da ne bi služil samo za podstavek, temveč tudi za merilnik vodoravne sile, ki jo je paralelogram med preiskavo vnašal v zid, je nosilec členkasto visel na dveh stebričih, vpetih v podporni temelj, tako da bi se v smeri delovanja vodoravne sile lahko prosto premikal, če ne bi bili njegovi pomiki blokirani z bočnima prednapetima dinamometroma na vsaki strani podpornega nosilca (slika 2). Vodoravno silo, ki je delovala v višini zgornjega roba zidu, sta povzročala aktivni in pasivni bat, ki sta bila priključena na zunanji strani stebrov okvira, silo oziroma pomik pa prenašala na spodnji del paralelograma z nateznim drogovjem (paralelogram sta vlekla vsak na svojo stran). Bata sta delovala na enak način kot pri potresni mizi. Navpično obtežbo sta prav tako povzročala dva hidravlična bata, oba priključena na oljni akumulator, ki je skrbel, da je sila ostajala nespremenjena kljub navpičnim pomikom spodnjega dela paralelograma oziroma stisnjenju zidu med preiskavo. Da se ne bi zgodil neželeni izklon oziroma poškodba batov pri porušitvi preizkušanca, sta bila bata pritrjena na strop preizkuševalnega temelja, sila pa se je na paralelogram prenašala z jeklenim drogovjem. Palice so na obeh koncih členkasto priključene, da ne bi ovirale vodoravnih deformacij zidu.

Krmiljeni so bili pomiki na zgornjem robu zidu. Ker so obremenitve med potresom ciklične, je bila preiskava programirana tako, da so bili cikli z enako amplitudo pomikov trikrat ponovljeni, amplitude programiranih pomikov pa so se stopenjsko povečevale do največje, vnaprej izbrane vrednosti. Obremenjevanje s tako programiranim sklopom pomikov (imevanim blok program) se je ponavljalo v več zaporednih fazah, pri katerih se je velikost zadnje amplitude pomikov bloka povečevala vse do porušitve zidu. Ker je bil za programiranje

pomikov uporabljen funkcijski generator, je bila preiskava dinamična. Izbrana frekvenca cikla (1 Hz) naj bi ustrezala prvi lastni frekvenci nihanja 10-nadstropne stavbe. Čeprav so kasnejše raziskave pokazale, da frekvenca vzbujanja vpliva na rezultate, saj je odpornost pri višjih frekvencah večja, deformabilnost pa manjša (Sheppard, 1976), se je frekvenca 1 Hz uporabljala kot standardna, vse dokler se je naprava uporabljala v opisani konfiguraciji.

Potresna miza in naprava za ciklične strižne preiskave zidov nista bili fiksni napravi, saj je laboratorij za konstrukcije opremo želel izkoristiti tudi za druge namene. Za svojo postavitve pa sta potrebovali poseben temelj, ki je danes del preizkuševalne ploščadi laboratorija, 110 cm debelo, s stenami podprto močno armiranobetonsko ploščo, ki ima v rastru 120 x 120 cm predvidena pritržišča za jekleno oporno konstrukcijo. Kletni prostor, v katerem so danes in po razširitvi temelja v sredini 80. let nameščeni hidravlični agregati za pogon programskih batov, je dovolj visok, da se na strop temelja po potrebi lahko pritrjuje bati za vnos navpično delujočih sil.

Zmogljivost potresne mize je bila skromna, omejena na skupno maso premikajočih se delov v velikosti 2500 kg, zato se na njej raziskuje obnašanje konstrukcij v zmanjšanem merilu – modelov, in ne konstrukcij v naravni velikosti. Da bi bili rezultati modelnih preiskav zanesljivi, je bilo treba usvojiti tehniko fizičnega modeliranja konstrukcij in obtežbe ter razviti ustrezne materiale za modeliranje betona, armature in zidovja ((Boštjančič, 1968), (Čačovič, 1970)). Tudi zmogljivost naprave za strižne preiskave zidov je bila omejena. Dimenzionirana je bila za preiskave nearmiranih zidov s strižno odpornostjo, ki ne presega 250 kN. To silo sta pri cikličnem dinamičnem obremenjevanju zagotavljala hidravlična bata zmogljivost 500 kN.

Velik zadržek za izvedbo dinamičnih preiskav je v tistem obdobju predstavljal zelo skromen analogni merilni sistem in sistem za zajemanje podatkov. Poleg 4-kanalnega merilnega magnetofona so raziskovalci imeli na razpolago le še 5-kanalni optični vizikorder (optični zapis na fotografsko občutljiv papir) in grafični risalnik x-y, tako da je bilo treba merilna mesta pred preiskavo skrbno izbrati. Težavna je bila tudi obdelava rezultatov, saj je bilo treba vse zapise pred resnejšo analizo ročno digitalizirati. Zato je potresna miza po poskusnih preiskavah obnašanja modelov armiranobetonskih okvirjev v celotnem desletju le redko služila svojemu namenu.

Tudi meritve fizikalnih veličin med cikličnimi preiskavami zidov so bile v tem obdobju večinoma omejene na meritve ključnih pomikov in sil. Časovni potek je bil po potrebi zapisan z vizikorderjem, histerezna odvisnost pa z grafičnim risalnikom x-y. Da bi opazovali potek poškodb v odvisnosti od amplitud pomikov, je bila na paralelogram pritrjena ura, ki je na fotografskih posnetkih preiskave v značilnih trenutkih prikazovala čas (sekunde), merjen od začetka posamezne faze preiskave.

2.2 Raziskave in začetki mednarodnega povezovanja

Skopskemu potresu je leta 1969 sledil rušilni potres v Banjaluki, kjer je ZRMK ponovno odigral ključno vlogo pri sanaciji in ugotovitvi nekaterih pomembnejših zidanih pa tudi armiranobetonskih stavb. V okviru obnove mesta je Zavod za obnovo Banjaluke, ki je upravljal tudi sredstva zvezne pomoči, financiral obsežne raziskave, s katerimi so bile raziskane mehanske lastnosti tipičnega zidovja. Zato so bili v nekaterih stavbah v mestu izrezani zidovi v velikosti običajnih preizkušancev, ki so bili varno prepeljani v Ljubljano in preiskani v novi napravi laboratorija. Podatki so bili uporabljeni pri projektiranju ugotovitve, kjer je bil na podlagi analiz poškodb po potresu in rezultatov laboratorijskih raziskav predlagan nov način razporeditve potresnih sil po zidovih, ki je temeljil na strižnem in ne na upogibnem obnašanju zidov, kot je bilo do takrat v navadi (Turnšek, 1972).

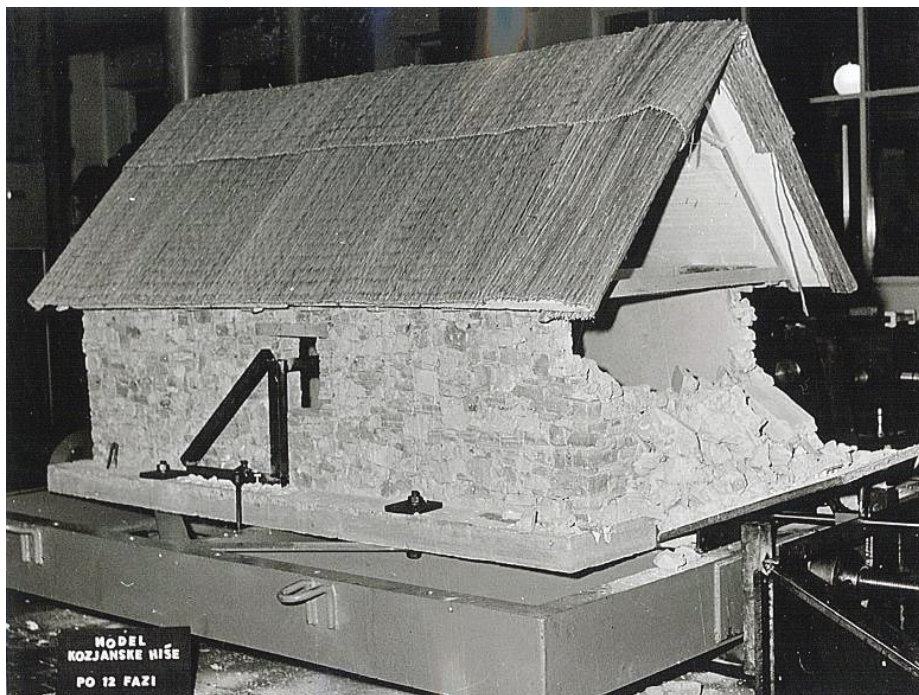
Po potresih v Skopju in Banjaluki je bilo razvitih nekaj inovativnih protipotresnih sistemov zidanja, predvsem za različne načine armiranega zidovja (sistem Čigon, sistem PRSF – protipotresni racionalizirani sistem Ferjan). Učinkovitost armature in osnovne značilnosti obnašanja teh sistemov je bilo treba preveriti, zato je Zavod v tistem obdobju obnašanje armiranega zidovja, predvsem vpliv vodoravne armature v naležnih regah zidovja, raziskoval tudi na splošno (Terčelj, 1975). Predpisi so na območjih z najvišjo stopnjo seizmičnosti uvedli obvezno vgradnjo navpičnih zidnih vezi (sistem povezanega zidovja). Ker navpičnih vezi do takrat pri nas nismo poznali, je bilo treba raziskati, ali in v kolikšni meri izboljšajo potresno odpornost zidanih stavb (Umek, 1971). Raziskave, ki sta jih financirali država in industrija, so ponudile nekaj pomembnih podatkov in izhodišč za nadaljevanje v kasnejšem obdobju.

Potresa v Skopju in Banjaluki sta vzbudila zanimanje tuje strokovne javnosti. Obenem

je s pomočjo prizadetih območjem iz tujine prišla tudi pobuda za znanstvenoraziskovalno sodelovanje. Da bi se seznanili z Zavodovimi raziskavami zidanih konstrukcij, so na začetku 70. let Zavod obiskali predstavniki Univerze v Kaliforniji, Berkeley. Poznavanje problematike in opravljeno raziskovalno delo je naredilo dober vtis. Zavodove raziskave so bile vključene v poročilo berkeleyjske univerze o stanju stroke na tem področju, čeprav takrat še ni bilo omembe vrednega števila objav v angleščini, da bi se poročilo nanje lahko sklicevalo (Mayes, 1975). Ker je bil vodja delegacije, prof. Jack Bouwkamp, čeprav specialist za jeklene konstrukcije, tudi koordinator raziskav s področja potresnega inženirstva v okviru ameriško-jugoslovanskega znanstvenotehnološkega sodelovanja, je vključil Zavod v program sodelovanja pod okriljem National Science Foundationa (NSF). To je dalo Zavodim raziskavam obnašanja zidanih konstrukcij dodaten ugled.

Leta 1974 se je zgodil potres na Kozjanskem, sicer manjši potres, ki je resneje prizadel eno takrat najbolj revnih območij v Sloveniji z večinoma kamnitimi zidanimi hišami. Zavodu je bilo zaupano strokovno vodenje ugotavljanja uporabnosti prizadetih stavb in skrb za tehnične rešitve pri popotresni obnovi. Na podlagi stanja na terenu in izkušenj pri sanaciji kamnitih mostov so Zavodovi raziskovalci za najustreznejšo rešitev predlagali injektiranje kamnitega zidovja s cementnimi injekcijami in povezovanje zidovja z jeklenimi armaturnimi palicami. Učinke preproste in ne drage metode so preverili s preiskavo obnašanja modela enostavne povezane hiše na potresni mizi (slika 3) in s preiskavami odpornosti injektiranih zidov ((Terčelj, 1976), (Boštjančič, 1976)). Pripravili so tudi navodila, kako vgrajevati zidne vezi (Vugrinec, 1977).

Po furlanskem potresu leta 1976, pravzaprav vrsti treh potresov, ki so prizadeli tudi Posočje in porušili oziroma poškodovali večinoma stare kamnite hiše, so bile izkušnje, pridobljene po potresu na Kozjanskem, zelo dragocene. Na žalost v Posočju po majskem potresu na slovenski strani ni bilo resne akcije. Po maju 1976 je Zavod vodil popis poškodovanosti in s sodelavci fakultete za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo pripravil vprašalnik, ki je služil za podlogo oziroma nadomestilo za projekt utrditve. Zavod je šele po septembrskih potresih prevzel strokovno vodenje obnove poškodovanih hiš. Skrbel je za izobraževanje projektantov in usposabljanje izvajalcev, njegove operativne skupine pa so izvajale demonstracije tehničnih ukrepov.



Slika 3 • Preiskava modela enostavne kamnite hiše na potresni mizi po potresu na Kozjanskem (Arhiv ZAG)

Takratna slovenska vlada se je po majskem potresu odločila priskočiti na pomoč slovenski manjšini v Italiji. Med drugim je zadolžila Zavod, naj s svojim znanjem usposobi za obnovitvena dela manjše slovensko podjetje Benedil, S. p. a., iz Čedadada (Cividale). Zato se je operativna ekipa Zavoda že poleti, po majskem potresu, lotila dela. V vasi Bardo

(Lusevera) blizu Tarčenta (Tarcento) je za primer, kaj se da narediti, utrdila hišo, ki so jo italijanske oblasti predvidele za rušenje. Groba dela (injektiranje in povezovanje zidov) so bila končana pred septembrskim potresom, utrjena hiša pa je septembrski potres podobne intenzitete, kot jo je imel majski, prestala brez novih poškodb (slika 4).



Slika 4 • Hiša, ki jo je po majskem potresu leta 1976 v Benečiji utrdila ekipa ZRMK, je septembrski potres istega leta prestala brez poškodb. (Fotografija: E. Vugrinec)

Eksperiment v naravi je še bolj kot predhodni v laboratoriju pokazal, da je metoda utrjevanja učinkovita, zato so se italijanski kolegi iz Vidma (Udine) odločili, da Zavodove strokovnjake pokličejo na pomoč pri obnovi prizadetega območja. Glede na to, da je bil obseg prizadetosti bistveno večji kot v Posočju, bili pa so brez izkušenj, so se na obnovo želeli najprej pripraviti. Tako je Zavod ob pomoči Inženirske zbornice iz Vidma v začetku leta 1977 za italijanske inženirje pripravil dva dobro obiskana seminarja in zanje pripravil tudi učni material, ki je, mimogrede, danes razstavljen v posebni sobi potresnega muzeja *Tiere Motus* (<http://www.tieremotus.it/index.html>) v obnovljeni Pušji vasi (Venzone). Da bi Zavodove izkušnje bolje izkoristili, je predsednik deželne vlade Furlanija–Julijska krajina v centralno interdisciplinarno komisijo, katere naloga je bila med drugim pripraviti tehnično in drugo regulativo za uspešen potek obnove, imenoval tudi Zavodovega predstavnika. Tako večino določil osnovnega tehničnega dokumenta – priporočil za obnovo hiš (*Raccomandazioni*, 1977) – predstavljajo Zavodove izkušnje. Dokument je predpisal tudi uporabo na Zavodu razvitih računskih metod.

Ena izmed njih zasluži omembo. Temelji na oceni potresne odpornosti zidane konstrukcije s krivuljo odpornosti kritične etaže in je bila ena prvih na svetu, ki je za račun krivulje uporabila metodo, ki se danes imenuje potisna (*push-over*) metoda (Tomažević, 1978). Še zlasti velja omeniti, da se krivulja računa s povečevanjem vsiljenih pomikov in ne sil, kot je še danes v navadi. Metoda je tipična metoda porušnega mehanizma, zato je bil računalniški program za račun krivulje odpornosti imenovan *POR* (*POR*ušna metoda), po programu pa z istimi kraticami tudi sama metoda. V Italiji se to ime v različnih verzijah še danes uporablja, pri nas pa smo metodo v 80. letih, dopolnjeno in izboljšano, preimenovali v *SREMB* (*Seismic Resistance of Masonry Buildings*).

Vloga ZRMK in slovenske stroke med obnovo po potresu prizadete sosednje Italije je imela

velik vpliv na izboljšanje položaja takrat precej zapostavljene slovenske manjšine, živeče v tamkajšnjih krajih (Beneška Slovenija). Povečala je ugled Slovenije, odprla pa je tudi vrata za Zavodovo sodelovanje s številnimi univerzami v severni Italiji, ki traja še danes. Še posebno velja omeniti sodelovanje z Univerzo v Padovi, s katero je Zavod že kmalu po potresu skupaj raziskal lastnosti z injektiranjem utrjenega kamnitega zidovja, kasneje pa tudi vpliv različnih metod preskušanja zidov na vrednosti parametrov, ki določajo strižno odpornost (Bernardini, 1980), in Politehniko iz Milana, katere profesorji so razumeli pomen Zavodovih raziskav in pripomogli, da so bila Zavodova priporočila dobro sprejeta v Italiji (Benedetti, 1984).

Leta 1979 je močan potres prizadel Črno goro. Zavod je bil ponovno vključen v popotresne dejavnosti: zaupani sta mu bili strokovno svetovanje slovenskim ekipam, ki so priskočile Črni gori na pomoč in sodelovale pri ugotavljanju posledic, pa tudi sodelovanje v strokovni koordinaciji dejavnosti obnove in pri pripravi tehnične regulative po zgledu iz Furlanije. Zaradi izkušenj pri obnovi Posočja in podobne tipologije stavb (kamnito zidovje) je bilo Zavodu zaupano tudi projektiranje utrditvenih ukrepov večjega števila javnih objektov, šol in upravnih stavb. Pri utrditvi večine od njih so sodelovale Zavodove tehnične ekipe. Kot po potresih na Kozjanskem in v Posočju je Zavod z državnim financiranjem preiskal večje število zidov v obstoječem in utrjenem (injektiranjem) stanju, sezidanih v laboratoriju iz materiala, odvzetega iz porušenihiš. Da bi jih lahko pri svojem delu uporabljali projektanti, so bile s preiskavami zidov ugotovljene vrednosti ključnih trdnostnih parametrov privzete v predpisih za sanacijo in utrditev. O rezultatih raziskav in možnostih za utrditev je Zavod poročal domači in tuji strokovni javnosti (Turnšek, 1978).

Če je furlanski potres leta 1976 pripomogel k ugledu in prepoznavnosti Zavoda na področju potresnega inženirstva v sosednji Italiji, pa

je bila afirmacija Zavoda v svetovnem merilu povezana z že omenjenim bilateralnim ameriško-jugoslovanskim sodelovanjem. O rezultatih svojih raziskav smo lahko zelo podrobno poročali na mednarodnih delavnicah in konferencah v Cavtatu leta 1977, Skopju leta 1980 in na Bledu 1981., kjer so s predavanji sodelovali takrat najbolj ugledni raziskovalci s širokega področja potresnega inženirstva z vsega sveta. Zavodovi raziskovalci so vse svoje dotedanje raziskave obnašanja zidanih konstrukcij in iz njih izhajajoče metode preverjanja potresne odpornosti povzeli v dveh daljših prispevkih na konferenci v Skopju (Turnšek, 1980), (Tomažević, 1980)). Obdobje smo želeli zaključiti z eksperimentom, s katerim bi dokazali pravilnost predpostavk pri preverjanju potresne odpornosti zidanih stavb, vendar se je poskus ponesrečil.

Konferenco na Bledu je organiziral ZRMK pod pokroviteljstvom NSF iz ZDA. Konferenca ni bila posvečena potresno odpornim konstrukcijam, ampak socialnim in ekonomskim vidikom potresov in načrtovanju za ublažitev njihovih posledic (*Social and economic aspects of earthquakes and planning to mitigate their impacts*). Izredno odmevna konferenca je bila prva te vrste na svetu, nanjo pa so bili povabljeni svetovno znani sociologi, ekonomisti in drugi, ki so se ukvarjali s problematiko. Konferenca je pokazala, kako pomembno je, da zaradi hudih posledic in posredne škode, ki jih po potresih povzročijo neustrezna odpornost gradbenega fonda in infrastrukture, potresni odpornosti objektom posvetimo ustrezno pozornost.

Zbornik konference (*Social*, 1982) je posvečen spominu na prof. Viktorja Turnška, idejnemu vodji, gonilni sili in nesebičnemu mentorju raziskovalcem potresnega inženirstva, ki je po hudi bolezni umrl kmalu po konferenci. Z njegovo smrtjo se je končalo obdobje doseganja mednarodne uveljavitve Zavoda na področju raziskav potresne odpornosti zidanih konstrukcij. Kasneje je bilo treba doseženo raven le še vzdrževati in nadgrajevati.

3 • OBDOBJE 1981–1995

Že na začetku 80. let prejšnjega stoletja so se začeli pojavljati zametki evrokodov, sodoben predpis za gradnjo na potresnih območjih, ki je v Sloveniji veljal vse do uradne uveljavitve evrokodov leta 2008, pa je leta 1981 spre-

jela tudi Jugoslavija. Predpisi so kot običajno povzeli stanje stroke, vendar so bili v njih tudi določila in vrednosti projektnih parametrov brez eksperimentalne podlage, še posebno v poglavjih, ki so obravnavala zidane konstruk-

cije. Zidane stavbe so se gradile na podlagi izkušenj in z upoštevanjem pravil dobre obrti, zato je bila uvedba inženirskega pristopa z računskim dokazom odpornosti največkrat osnovana na nekritičnem privzemu analogije z obnašanjem betonskih in armiranobetonskih konstrukcij. Eksperimentalnih podlag, na podlagi katerih bi lahko preverili zanesljivost in uporabnost enačb za projektiranje oziroma

številnih parametrov za projektiranje, je bilo zelo malo ali pa jih niti ni bilo. Ker je potrebno odporno projektiranje zidanih konstrukcij tipično eksperimentalno podprto projektiranje (experiment aided design), so bile potrebe po eksperimentalnem raziskovanju velike. Neraziskana področja so predstavljala raziskovalno nišo in možnost za širšo prepoznavnost Zavodovih raziskovalcev.

Potresi, ki so v drugi polovici 70. let prejšnjega stoletja prizadeli številne regije v Sredozemlju, so vsi po vrsti pokazali na potresno ranljivost kamnitih hiš v starih mestnih in podeželskih jedrih. Večina škode in smrtnih žrtev po potresih je bila posledica hudih poškodb in porušitev starih stavb. Izguba stavb in celih naselij je bila razlog, da so se na prizadetih območjih začeli zavedati potresne ranljivosti in pomembnosti. Ne kot posamezni objekti, ampak kot skupina stavb 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. Zato so se prav po potresih pred 40 leti, ki so pokazali njihovo ranljivost, začeli zavedati, da je stara jedra treba ohraniti tudi v modernem okolju. Začeli so iskati načine, kako jih, po potresih prizadete, obnoviti ali pa jih utrditi, še preden jih prizadene potres.

Tudi na tem področju so bili raziskovalci Zavoda pionirji, ki so z utrditvijo stavb arhitekturne dediščine že imeli izkušnje pa tudi izdelane postopke, kako konstrukcije zgodovinskih stavb podrobneje spoznati in raziskati razloge za njihovo neustrezno obnašanje med potresi. Zavodovi raziskovalci so bili med prvimi, ki so razvili ukrepe za utrjevanje, preverili njihovo učinkovitost z laboratorijskimi in terenskimi eksperimenti ter poskušali tehnološke rešitve prilagoditi zahtevam varstva arhitekturne dediščine.

Ker je vodstvo Zavoda podpiralo mednarodno sodelovanje, so bili njegovi raziskovalci seznanjeni z raziskavami drugje po svetu. Po svojih močeh in zmožnostih so marsikaj dodali v svetovno zakladnico znanja, s svojimi sugestijami pa svetovali kolegom raziskovalcem iz tujine, ki so imeli na razpolago neprimerno večja finančna sredstva in boljše raziskovalno opremo, kaj v prihodnje raziskati. Sredstva za svoje raziskave so pridobili od države (po uvedbi samoupravnega sistema je bila glavni financer Raziskovalna skupnost Slovenije) ali od domače in tuje opekarne industrije. Dokazali so, da je mogoče re-

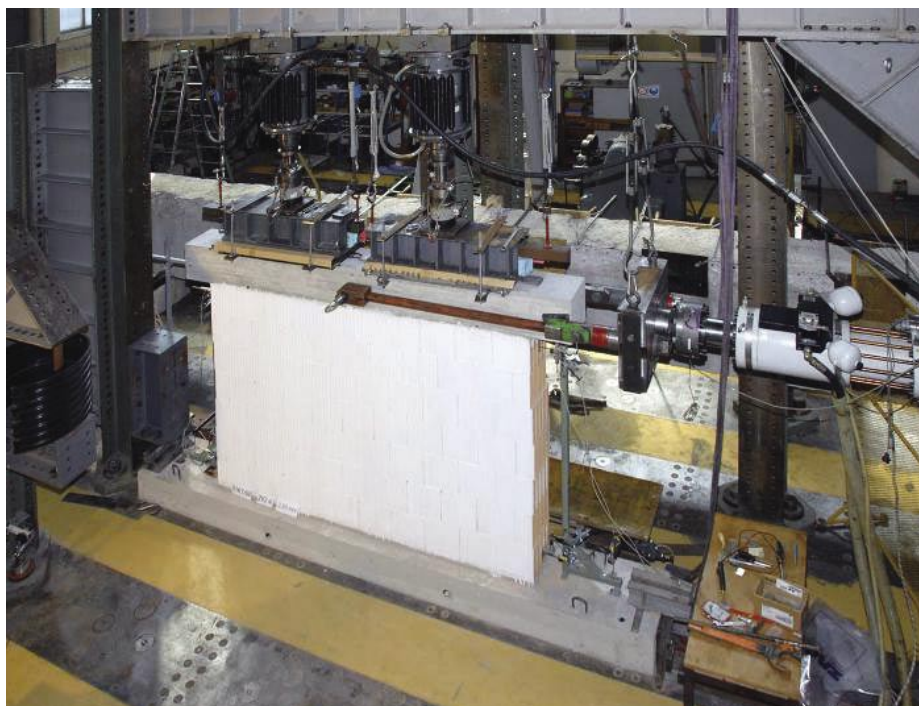
zultate pridobiti tudi z razmeroma skromno preizkuševalno opremo. To je sicer zahtevalo več inovativnosti, prilagodljivosti in vloženega truda, seveda pa tudi zavedanja, da se vsega pa le ne da poenostaviti. Zavodove izkušnje so spodbudile eksperimentalno raziskovanje v številnih inštitutih manj razvitih držav na Kitajskem, v Indiji, na Srednjem vzhodu in v Latinski Ameriki, kjer se tipologija zidanih stavb do neke mere lahko primerja s stavbami pri nas.

Z raziskavami obnašanja zidanih konstrukcij, ki jih je v osnovi financirala Raziskovalna skupnost Slovenije, je bil Zavod še skoraj celo desetletje tudi formalno vključen v ameriško-jugoslovansko sodelovanje. Najprej pod okriljem NSF, nato pa pod okriljem nekdanjega National Bureau of Standards (NBS), današnjega National Institute of Standards and Technology (NIST). Del raziskav je financirala domača industrija, gradbena podjetja, pomemben del raziskav, ki jih je Zavod opravil v okviru sodelovanja z Univerzo v Padovi, pa italijanska opekarne industrija. Leta 1985 je bil podpisan protokol o znanstveno-tehničnem sodelovanju med Kitajsko in Jugoslavijo. Kitajska delegacija, ki je istega leta obiskala gradbene inštitute v Jugoslaviji, je Zavod povabila k sodelovanju na področju raziskav zidanih konstrukcij. V projekt je bilo kasneje vključeno gradbeno podjetje SCT, za katero je Zavod takrat opravljal zanimive preiskave potresne

odpornosti novorazvitega velikopanelnega montažnega sistema, ki so zanimale tudi kitajsko stran. Zanimivo in uspešno sodelovanje je trajalo vse do razpada Jugoslavije, po njem pa je potekalo le občasno v okviru ameriško-kitajskega programa o sodelovanju. V drugi polovici 80. let in po osamosvojitvi Slovenije je Zavodovo raziskovanje uživalo že tolikšen ugled, da je bilo predstavljeno v okviru študijskih programov na nekaterih tujih univerzah.

3.1 Posodobitev raziskovalne opreme

Eksperimentalne raziskave je močno olajšala posodobitev infrastrukture in raziskovalne opreme. Tako je laboratorij oziroma oddelek (takratna temeljna organizacija združenega dela, TOZD) z lastnimi sredstvi na začetku 80. let razširil preizkuševalni temelj, namenjen potresni mizi in napravi za preizkušanje zidov, v preizkuševalno ploščad na četrtini površine laboratorijske dvorane. Utrdil je tudi žerjavno progo in kupil zmogljivejši mostni žerjav. Še posebno pa velja omeniti prvi nakup sodobne raziskovalne opreme, ki je omogočila prehod iz analognega načina krmiljenja preiskav in zajemanja podatkov v digitalnega. V okviru t. i. paketov nabav raziskovalne opreme, ki jih je takrat uvedla Raziskovalna skupnost Slovenije, je Zavod z lastnim sofinanciranjem že v začetnem paketu prišel do prvega programskega, dvosmerno delujočega hidravličnega



Slika 5 • Preiskava zidu kot navpične konzole s programskim batom za simulacijo cikličnih potresnih obremenitev (Fotografija: Arhiv ZAG)

bata s pogonskim hidravličnim agregatom in krmiljenjem, merilnega sistema in sistema za zajemanje podatkov z računalnikom. Število priključkov oziroma kanalov je bilo dovolj veliko, da meritve pri dinamičnih in statičnih preiskavah niso več povzročale težav. Z nakupi v kasnejših letih je bil nabor batov dopolnjen, dopolnjena in posodobljena pa sta bila tudi merilni sistem in sistem za zajemanje podatkov.

Prvi programski dvosmerno delujoči bat razmeroma skromne zmogljivosti (250 kN) je poenostavil način pogona potresne mize. Dva hidravlična bata, pasivnega in aktivnega, je zamenjal en sam, s čimer opora na pasivni strani mize ni bila več potrebna. Ker tega tovarniško prirejeno krmiljenje bata ni dopuščalo, so sodelavci laboratorija sami izdelali vso potrebno programsko opremo za simulacijo poljubnega potresnega gibanja tal.

Programska hidravlična oprema je omogočila tudi posodobitev strižnih preiskav zidov z vsiljenimi pomiki. Namesto z zaporedjem posameznih blokov cikličnih pomikov s frekvenco 1 Hz je bilo zidove mogoče preiskati v eni sami fazi s cikli poljubnih amplitud pomikov in s poljubno hitrostjo obremenjevanja. Počasno opravljanje preiskave je omogočilo opazovanje in dokumentiranje nastanka poškodb in porušnega mehanizma. Ker takrat nabavljeni programski bat ni bil namenjen za tovrstne preiskave, ni imel členkastih priključkov na oporo in preizkušance, ki bi preprečevali poškodbe bata v primeru prevelikih navpičnih ali bočnih deformacij oziroma nenadne porušitve preizkušanca. Zato je njegova uporaba zahtevala izdelavo dodatnega kardanskega, členkastega priključka.

V primerih preiskav zidov, za katere se je izkazalo, da je njihova odpornost večja od zmogljivosti prej opisane naprave (slika 2), so se zidovi preizkušali kot navpične konzole na temeljih, neposredno vpetih v preizkuševalno ploščad. Takšno preiskavo prikazuje slika 5, na kateri se vidi tudi sistem za vnos vodoravnih sil.

3.2 Raziskave za eksperimentalno podprto projektiranje

Večina raziskav je potekala na treh ožjih področjih:

- raziskave dinamičnega obnašanja različnih sistemov zidanih konstrukcij;
- raziskave obnašanja zidovja, armiranega z armaturo v naležnih regah, in
- raziskave obnašanja armiranobetonskih konstrukcij z zidanimi polnili.

Dinamično obnašanje zidanih konstrukcij smo raziskovali na modelih. Eden prvih je bil model 4-etažne stavbe iz nearmiranega zidovja v merilu 1 : 7, ki je bil sezidan iz modelnih zidakov, ki so bili izdelani po recepturi, pripravljeni na podlagi dolgotrajnih raziskav materialov, primernih za izdelavo popolnih modelov zidanih stavb, že v preteklosti (Boštjančič, 1975). Kljub nekaterim težavam s potresno mizo in z meritvami je preiskava na mizi uspela in podala pričakovane rezultate (slika 6). Obdelava podatkov je bila sicer omejena, saj takrat Zavodov računalnik še ni imel grafične periferne enote in digitalnega merilnega sistema. Kljub temu je raziskava omogočila preverjanje ustreznosti računskega modela za račun nelinearnega dinamičnega odziva večetažne nearmirane zidane stavbe na potresno vzbujanje tal, ki temelji na etažnem strižnem porušnem mehanizmu (Tomaževič, 1987a). Primerjava je pokazala, da računski model, ki za vhodne podatke upošteva etažno histerezno ovojnico, izračunano po metodi, omenjeni v predhodnem poglavju (Tomaževič, 1978), in enostavna etažna histerezna pravila zadovoljivo dobro ponazori odziv nearmirane zidane stavbe na potres.



Slika 6 • Model zidane stavbe v merilu 1 : 7 v porušni fazi preiskave na potresni mizi (Fotografija: M. Tomaževič)

S preiskavami modelov enake zasnove po tlorisu in višini smo na potresni mizi raziskovali tudi vpliv armiranja zidovja na obnašanje zidanih stavb pri potresni obtežbi. Ker je hkrati italijanska opekarska industrija želela

raziskati možnosti gradnje mešanih zidanih armiranobetonskih konstrukcijskih sistemov tudi na potresnih območjih (periferno zidovje in vmesni armiranobetonski stebri), kjer to ni dopustno, smo v okviru projekta reševali tudi problem zidanih stavb z mešano konstrukcijo. Da bi imela primerjava širši značaj, so se poenotili gabariti vseh tipov modelov, pri raziskavah, ki jih je sofinancirala italijanska opekarska industrija, pa je sodelovala tudi Univerza v Padovi.

Ker bi bila izdelava modelnih votlakov, s katerimi bi sezidali popolni model, predraga, so bili modeli izdelani na enostaven način iz prototipnih materialov. S tem tudi mehanskih lastnosti armature ni bilo treba modelirati. Seveda je bilo treba prilagoditi simulirano potresno gibanje tal, rezultate preiskav na potresni mizi pa interpretirati po ustrezno spremenjenih pravilih. Izkazalo se je, da bi bilo najenostavneje razrezati prave votlake na dimenzijsko ustrezne kose (slika 7) in z njimi sezidati modele. Tehnika modeliranja je v tem primeru zahtevala poseben aranžma za brezmasni vnos tlačnih napetosti v zidove, kar je zagotovilo pravilno simulacijo porušnih mehanizmov. Preiskava na potresni mizi je pokazala, da se je nearmirani model klasične zasnove obnašal strižno, medtem ko je bil pri armiranem modelu z zidovjem, armiranim z navpično in vodoravno armaturo, ugotovljen prevladujoči upogibni mehanizem porušitve (slika 8). Pri prevzemu potresnih sil so sodelovali tudi vodoravni nosilni elementi konstrukcije, plošče in preklade. Obnašanje nearmiranega modela z vmesnim stebrom ni bilo ugodno, medtem ko se je armirani model z vmesnim stebrom obnašal zadovoljivo (Tomaževič, 1989a), (Tomaževič, 1994).



Slika 7 • Izdelava modelnih zidakov z razrezom prototipnega votlaka (Fotografija: M. Tomaževič)

Stališča o učinkih armiranobetonskih navpičnih zidnih vezi in njihovem upoštevanju pri vrednotenju potresne odpornosti zidanih stavb,



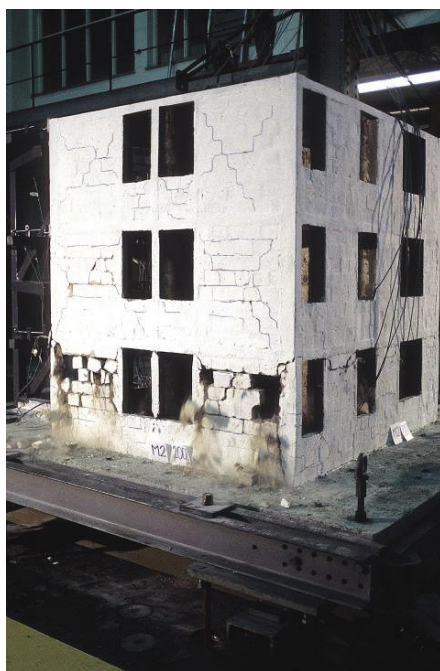
Slika 8 • **Upogibni mehanizem obnašanja modela hiše z armiranim zidovjem (Fotografija: M. Tomažević)**

sezidanih v sistemu povezanega zidovja, so bila vedno različna. Tudi Zavodove raziskave v preteklosti so pokazale, da navpične vezi ne povečajo toliko odpornosti, temveč deformabilnost (duktilnost) nearmirane zidane konstrukcije (Umek, 1971). Povezovalna vloga je bila nedvomna, medtem ko so pri načinu dimenzioniranja in računanju prispevka navpičnih vezi k odpornosti konstrukcije, ki so ga dopuščali nekateri predpisi, nastajale velike razlike. Da bi podrobneje raziskali, kako deluje sistem povezanega zidovja v konstrukciji med potresom, je bil financiran in izpeljan raziskovalni projekt, v katerem sta bila na potresni mizi preiskana dva modela trietažne zidane stavbe enake zasnove in gabaritov, prvi sezidan v sistemu nearmiranega, drugi pa v sistemu povezanega zidovja. Za izdelavo modelov je bila usvojena nova tehnika priprave modelnih materialov, in sicer izdelava zidakov z vlivanjem posebej projektirane malte v kalupe ustreznih dimenzij (slika 9). Tako so bili z mešanico agregata ustrezne gostote in ustreznega veziva izdelani zidaki za izdelavo popolnih modelov (več o modelnih preiskavah na potresni mizi in tehniki modeliranja lahko najdete v (Tomažević, 1998a)). Eksperimenti so pokazali, da povezovalne nearmirane zidane konstrukcije z armiranobetonskimi vezmi na način, ki ga predpisuje osnutek evropskih predpisov za projektiranje stavb na potresnih območjih, povzročijo, da se poškodbe med

potresom razširijo po celi višini stavbe (slika 10). To poveča tako duktilnost in sposobnost sipanja energije kot tudi odpornost konstrukcije. Ugotovitev je v nasprotju s predpisom, ki pravi, da so navpične vezi samo konstrukcijskega pomena in se njihovega vpliva proti potresni odpornosti v računskih dokazih ne sme upoštevati. Na podlagi ugotovljenega mehanizma obnašanja in meritev med preiskavo je bil razvit računski model, s katerim se ugodni vplivi navpičnih zidnih vezi lahko izrednotijo ((Tomažević, 1997a), (Tomažević, 1997b)).



Slika 9 • **Izdelava modelnih zidakov z vlivanjem malte v jekleni kalup (Fotografija: M. Tomažević)**



Slika 10 • **Model povezane zidane stavbe v porušni fazi preiskave na potresni mizi (Fotografija: M. Tomažević)**

Po analogiji z armiranobetonskimi konstrukcijami se je tudi pri zidanih uveljavila ideja, da se materialu, ki je sposoben prenašati tlačne obremenitve, nateznih in strižnih pa ne, na

ustrezen način v konstrukcijskih elementih doda material, ki bo natezne in strižne obremenitve lahko prevzel. Z drugimi besedami, da se zidani elementi ojačijo, armirajo z jekleno armaturo ali z drugim materialom, ki bo prevzel natege. Da bi se to doseglo, so bili razviti številne rešitve in sistemi zidanja. Ker se zidovje in beton v tlaku obnašata podobno (deformacija pri doseganju trdnosti in pri porušitvi ni pomembno odvisna od trdnosti materiala in je enaka kot pri betonu), so bile vse enačbe, izpeljane za dimenzioniranje oziroma preverjanje odpornosti prereзов in elementov iz armiranega zidovja, izpeljane na podlagi analogije z armiranim betonom. Uporaba takšnih enačb je v marsikaterem predpisu določena, predpisana pa je tudi minimalna količina strižne in upogibne armature, s katero mora biti zid armiran, da bo izpolnjeval pogoje za tovrstno zidovje in da se mu lahko pripišejo lastnosti, ki so bistveno boljše od lastnosti nearmiranega zidu.

S preiskavami, opravljenimi za posamezne naročnike, ki jih je zanimal učinek armiranja z navpično armaturo, položeno in zalito v luknje posebej prirejenih votlakov in z vodoravno armaturo v naležnih regah, se je pokazalo, da so predpostavke predpisov po navadi zelo oddaljene od resnice. Pri upogibnem in pri strižnem mehanizmu so bile razlike med dejansko in računsko odpornostjo velike v škodo dejanske odpornosti konstrukcije. Ker so te preiskave pokazale, da bi bilo zanašanje na računsko vrednost lahko usodno za konstrukcijo, je bil izpeljan obsežen eksperimentalni raziskovalni program, v katerem je bil raziskan mehanizem delovanja navpične armature, vložene v luknje ob robovih zidu, in vodoravne, strižne armature v naležnih regah. Ker ni šlo za konkreten sistem zidanja in vrsto zidakov, so bile raziskave opravljene na pomanjšanih zidovih, ki pa so bili še vedno dovolj veliki, da so ugotovitve dopuščale posplošitev. Preiskano je bilo večje število zidov, sezidanih iz dveh vrst zidakov, opečnih polnih zidakov in betonskih votlakov. Da bi lahko nedvoumno raziskali vpliv armiranja pri upogibnem in strižnem načinu porušitve, je bil del zidov sezidan v geometrijskih proporcijah, tipičnih za prevladujoče strižno obnašanje, del pa v proporcijah, ki so predvideli upogibno obnašanje. Pri obeh vrstah je bil del zidov armiran samo z navpično armaturo ob robovih, pri delu zidov pa je bila navpični dodana še vodoravna, strižna armatura v naležnih regah.

Meritve deformacij na armaturi so pokazale, da le-ta v vsakem primeru deluje tako, kot predvidevajo predpostavke. Navpična arma-



Slika 11 • Vpliv vodoravne armature v naležnih regah na porušni mehanizem: odpornost zidu, armiranega z navpično in vodoravno armaturo, je bila vmes med upogibno in strižno (levo), medtem ko se je zid, armiran samo z navpično armaturo, porušil strižno, kot da sploh ne bi bil armiran (desno). (Fotografiji: M. Tomažević)

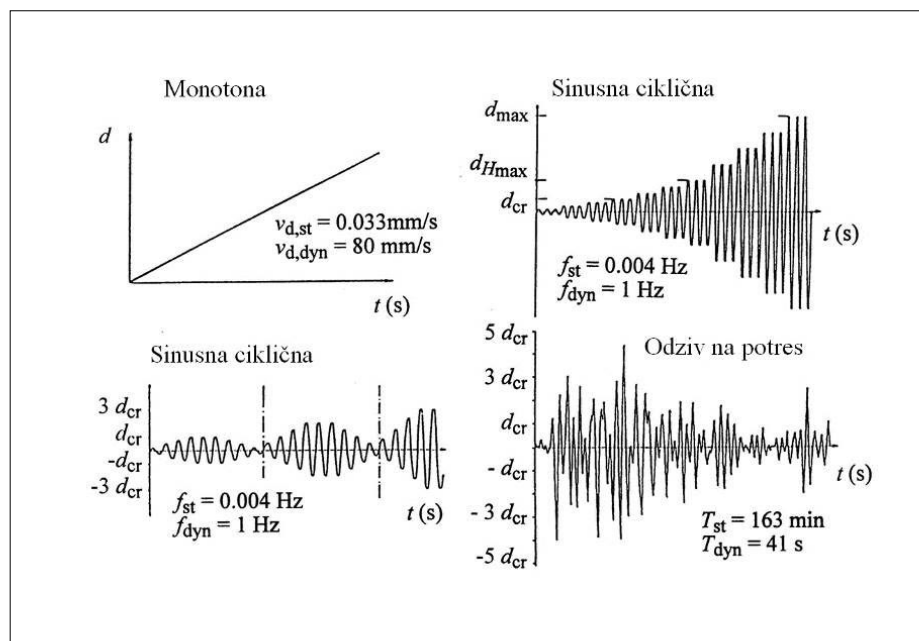
tura prevzema upogibne momente in zato pri cikličnih obremenitvah deluje enkrat v tlaku, drugič v nategu, medtem ko vodoravna armatura, ki prevzema strižne sile, v obeh smereh obremenjevanja deluje v nategu. Vodoravna armatura je sicer v vseh primerih izboljšala deformacijske lastnosti zidov (izboljšala je duktilnost in povečala sposobnost sipanja energije), vendar to ni imelo bistvenega vpliva na odpornost. Meritve deformacij armature so pokazale, da so ugotovljene razlike med računskimi predpostavkami in dejanskim stanjem nastale zato, ker vodoravna armatura ne more prevzeti obremenitev, ki jih ji je pripisal račun. Še pred doseganjem njene računske nosilnosti je popustila sprjemnost med armaturo in malto oziroma malto in zidaki ali zidaki niso mogli prenašati nastalih tlačnih in strižnih obremenitev in so se zdobili. Izkazalo se je, da je izkoriščenost vodoravne armature pri strigu močno odvisna od količine armature: celo tisti odstotek armiranja, ki ga predpis predpisuje za minimalnega, je običajno preveč. Izkoriščena je bila le tista količina armature, katere nosilnost v nategu je bila približno enaka strižni odpornosti zidov. Obnašanje zidov je bilo še bolj oddaljeno od pričakovanj v primeru, ko so bili zidovi armirani z navpično armaturo ob robovih, vendar brez vodoravne armature v naležnih regah. Tako visoki kot nizki zidovi so se porušili strižno. Na sliki 11 se lepo vidi, kako vodoravna armatura

vpliva na porušni mehanizem nizkega zidu, ki naj bi se po računski predpostavki porušil zaradi upogiba. Čeprav je tak zid armiran z robno, navpično in ustrezno sidrano vodoravno, strižno armaturo, ne bo dosegel svoje teoretično dosegljive upogibne odpornosti, pač pa bo njegova odpornost nekje vmes med upogibno in strižno (slika 11, levo). Če vodo-

ravne armature ni, tudi prispevka navpične armature ne bo. Zid se bo porušil strižno, kot da ni armiran (slika 11, desno). Vpliv vodoravne armature je še bolj očitno pri podobno armiranih visokih zidovih. Na podlagi rezultatov meritev deformacij v armaturi so bila ugotovljena razmerja med deležem, ki ga k odpornosti zidu prinese armatura, in deležem osnovnega zidu. Na podlagi ugotovljenega izkoristka armature so bili v enačbo za preverjanje odpornosti uvedeni faktorji korekcije nosilnosti s predlogom, naj se njihova velikosti eksperimentalno oceni za vsako vrsto zidovja posebej. Podano je bilo tudi priporočilo, naj se za armirano zidovje uporabljajo zidaki in malta visoke trdnosti, armatura pa naj se ustrezno sidra in zalije s cementno malto ((Tomažević, 1985), (Tomažević, 1987b)).

Z eksperimentalnimi rezultati obnašanja armiranega zidovja je bil preverjen in dopolnjen računski model na podlagi paličnega mehanizma, ki so ga razvili japonski raziskovalci. Ugotovljeno je bilo, da se z njim razmeroma dobro ponazori stanje pri strižni porušitvi zidov, armiranih na ta način (Tomažević, 1989b).

Pri večjem številu enakih armiranih zidov, ki so bili preiskani pri dveh ravneh tlačne predobremenitve, je bil raziskan vpliv časovnega poteka obremenjevanja z vodoravno obtežbo na rezultat preiskave. Primerjava je zajela več vrst časovnih potekov vsiljenih pomikov, od monotonega poteka do poteka, ki odgovarja dejanskemu potresnemu odzivu, vsaka vrsta pomika pa je bila nanesena tako statično kot



Slika 12 • Različne oblike časovnih potekov pomikov, ki se uporabljajo za preiskavo strižne odpornosti zidov

dinamično s frekvenco, ki ustreza frekvenci odziva tipične zidane stavbe na potres (slika 12). Namen raziskave je bil ugotoviti možnost in način, kako bi na podlagi rezultatov cenejše monotone preiskave sklepali na velikost parametrov, ki določajo potresno odpornost in ki se ugotavljajo z dražjo ciklično preiskavo (odvisnost med odpornostjo in deformacijo, upadanje nosilnosti in togosti pri cikličnih obremenitvah, duktilnost in sposobnost sipanja energije).

Ugotovljeno je bilo, da realne podatke dajejo le ciklične preiskave, rezultati pa niso v pomembni meri odvisni od vrste cikličnega poteka obremenitev. Razlike med rezultati, dobljenimi s statično ali z dinamično preiskavo, prav tako niso ključne za realno oceno potresne odpornosti. Po pričakovanjih je imela velik vpliv na rezultate predobremenitev, tj. razmerje med tlačnimi napetostmi v zidu, ki jih je povzročala konstantna navpična sila, in tlačno trdnostjo zidovja. S tlačnimi obremenitvami se je povečala odpornost, zmanjšali pa sta se duktilnost in sposobnost sipanja energije. Na podlagi ugotovljenega obnašanja zidov je bil izdelan računski model histereznega obnašanja zidu pri ciklični obtežbi, pri čemer so bila podana navodila, kako se parametri, ki opisujejo histerezo, določijo na podlagi eksperimentalnih rezultatov preiskav zidov (Tomažević, 1996a in b).

Potres v Črni gori leta 1979 in drugi potresi na začetku 80. let so ponovno opozorili na problem zidanih polnil v armiranobetonskih konstrukcijah. Polnila, ki se še danes večinoma obravnavajo kot sekundarni, nekonstrukcijski elementi armiranobetonske okvirne konstrukcije, so v resnici med potresom sestavni del konstrukcije. Resda ne prenašajo navpičnih obtežb, ki jo v celoti prevzame okvirni sistem, vendar zaradi delne ali polne povezanosti z glavno konstrukcijo ovirajo njene deformacije med potresnim nihanjem, zato pa tudi prevzamejo potresne sile. Od tega, kako so povezana z glavno konstrukcijo, je odvisna njihova vloga: pri delni povezanosti po višini stebrov ali dolžini prečk je njihova vloga po navadi izrazito negativna. Z delnim oviranjem deformacij spremenijo deformabilnostne razmere in povzročijo, da na mestih, kjer tega projektant ni pričakoval, nastanejo velike obremenitve, ki povzročijo kritične poškodbe konstrukcije. Če so vmesna polja med stebri okvirjev pravilno zapolnjena, pa je vpliv polnil lahko pozitiven, tudi če v računu ni bil predviden. Čeprav spremenijo dinamične lastnosti konstrukcije in v začetni fazi odziva na potres povzročijo tudi nastanek velikih sil, ki jih projektant ni pričakoval, ko se poškodujejo, delujejo kot nekakšni disipatorji energije. Če med potresom ne izpadejo zaradi

vplivov sil, ki delujejo pravokotno na njihovo ravnino, trenje med posameznimi deli po navadi strižno poškodovanega polnila zmanjšuje intenziteto nihanja konstrukcije.



Slika 13 • Fotogrametrične meritve deformacij med preiskavo okvirja s polnilom (Fotografija: M. Tomažević)



Slika 14 • Porušni mehanizem okvirja z zidanim polnilom. Na preizkušancu so vidne tarče, nalepljene za fotogrametrične meritve. (Fotografija: M. Tomažević)

Da bi raziskali mehanizme obnašanja in ocenili sovplivne sile med armiranobetonskim okvirjem in zidanim polnilom, so bile tudi na Zavodu opravljene obsežne eksperimentalne raziskave. Okvirji s polnili so bili preiskani podobno kot zidovi, pri meritvah deformacij pa je bila uporabljena tudi fotogrametrična metoda (Boštjančič, 1971), s katero so bili izmerjeni vektorji pomikov okvirja in polnila na večjem številu mest (slika 13). Danes je fotogrametrično metodo zamenjala digitalno-optična, precej bolj natančna in učinkovita metoda meritev deformacij. Ob nastalih poškodbah je poznavanje deformacijske slike omogočilo ponazoriti mehanizem obnašanja in s tem potek in velikost sovplivnih sil, nastalih med polnilom in okvirjem. Med prvo serijo preiskav okvirjev z opečnimi polnili je bil ugotovljen mehanizem, ki je sicer le eden od mnogih možnih (slika 14), podlaga za izpeljavo enostavnega računskega modela, s katerim se pri določenih pogojih lahko oceni potresna odpornost okvirja z zidanim polnilom (Žarnić, 1984). Postopek in razmišljanje, na podlagi katerega je bil računski model izpeljan, lahko

služila kot vzorec za modeliranje drugih vrst mehanizmov.

V drugi fazi raziskav so bili preizkusni vzorci manjši, polnila pa sezidana z betonskimi bloki. Da bi raziskali vpliv stika med osnovno konstrukcijo in polnilom, niso bile simulirane le osne sile v stebrih, ampak z navpičnim prednapetjem tudi obtežba stropov na prečke okvirja. Raziskan je bil vpliv vratnih odprtin v polnilu (Žarnić, 1988). Pozitivna vloga zidanih polnil v armiranobetonskih okvirnih konstrukcijah med potresi je stroko navedla na to, da se z naknadno vgraditvijo ali s popravilom oziroma utrditvijo po potresu poškodovanih polnil obnašanje osnovne konstrukcije bistveno izboljša. Poleg tega da polnila bistveno zmanjšajo neugodne velike deformacije vitkih skeletnih konstrukcij med potresom, povezana z glavno konstrukcijo in ustrezno močna, lahko tudi prevzamejo velik del potresnih obremenitev. Zato je bila na Zavodu v nadaljevanju izdelana tudi eksperimentalna študija obnašanja armiranobetonskih okvirjev z na različne načine utrjenimi zidanimi polnili (Žarnić, 1986), ki je pokazala, da vse rešitve povečajo odpornost. Pri načinu utrditve polnil z oblaganjem z armiranocementno oblogo je učinek na strani povečanja bistveno večji, je pa zato padec odpornosti po nastanku poškodb zelo velik, celo na raven osnovne okvirne konstrukcije. Raziskave so opozorile, da je treba učinkovitost vsake rešitve pred uporabo eksperimentalno preveriti.

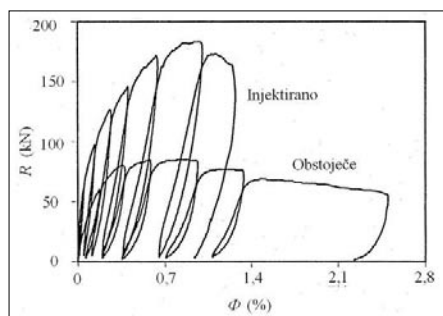
3.3 Raziskave za utrditev stavb arhitekturne dediščine

Po žalostnih izkušnjah s potresi in možnostih za pravočasno protipotresno utrditev, ki so jo nakazale eksperimentalne raziskave (Tomažević, 1983), je v začetku 80. let prejšnjega stoletja tudi takratna Stanovanjska skupnost mesta Ljubljana sprožila in financirala obsežno zastavljen program prenove Stare Ljubljane. Program prenove je v prvi fazi predvidel tudi vse potrebne raziskave za ugotavljanje obstoječega stanja stavb, predvidenih za prenovo. Zavod je tako prvič dobil možnost, da mehanske lastnosti obstoječega zidovja ugotovi s preiskavo zidov v samih stavbah. Zidovi, ki so bili sezidani in preiskani v laboratoriju, so bili sicer sezidani z materialom, odvzetim na terenu, in z malto, ki je bila po laboratorijskih analizah sestavin enaka kot malta zidovja stavb. Čeprav so bila tudi pri zidanju upoštevana tradicionalna pravila, so bile zaradi različnih vplivov trdnostne in deformabilnostne lastnosti zidovja lahko le približno ponazorjene. Preiskave na terenu

imajo to veliko prednost, da se preiskujejo dejanski elementi konstrukcije z dejanskimi materiali v dejanskih obtežbenih in vpetostnih pogojih. Ker so terenske preiskave dražje in težje izvedljive kot tiste v laboratoriju, žal le redkokdaj pridejo v poštev. V stavbi je treba mesto preizkušanja skrbno izbrati, ločiti preizkušanece od preostalega zidovja, zavarovati konstrukcijo pred morebitnimi poškodbami, ki bi lahko nastale med preiskavo, pripeljati ustrezno preizkuševalno opremo ter opremiti preizkuševališče. Zato običajno tudi ni mogoče preiskati tako velikega števila vzorcev kot v laboratoriju, preiskava enega ali dveh vzorcev pa postavlja pod vprašaj predpostavke statističnega vrednotenja rezultatov. Pomanjkljivost terenske preiskave je običajno tudi to, da je zaradi nevarnosti nastanka poškodb na okoliški konstrukciji navadno ni mogoče izpeljati do porušitve vzorca.



Slika 15 • Ena prvih terenskih preiskav strižne odpornosti kamnitih zidov v Stari Ljubljani (Fotografija: M. Tomaževič)



Slika 16 • Učinek injektiranja kamnitega zidu s cementno mešanico

Rezultati terenskih preiskav (slika 15) so pokazali, da se vrednosti mehanskih lastnosti zidovja ne da posplošiti, saj so odvisne od kakovosti zidanja in strukture zidovja. So pa rezultati terenskih preiskav pokazali, da so na terenu ugotovljene vrednosti praviloma precej višje od vrednosti, dobljenih s preiskavo v laboratoriju sezidanih zidov podobne strukture. Ker so terenske preiskave razmeroma zahtevne, se zidovi po končani preiskavi navadno utrdijo in ponovno preiščejo, saj so tako dobljeni rezultati bolj zanesljivi od laboratorijskih. Tipično povečanje odpornosti injektiranega kamnitega zidu prikazuje diagrama odvisnosti med prečno silo in deformacijami preiskanega zidu na sliki 16. Iz meritev je tudi razvidno, da se utrjenim zidovom precej poveča tudi togost. Rezultati terenskih preiskav, ki jih je opravil Zavod ((Sheppard, 1985), (Tomaževič, 1986)), so bili podlaga za projektiranje prenov večjega števila hiš v Stari Ljubljani, kjer je Zavod v sodelovanju s projektanti izdelal potresni del projektov.

Čeprav je bil vpliv vodoravnih zidnih vezi, ki zagotovijo celovitost delovanja zidane konstrukcije med potresom, že ugotovljen s preiskavo ((Terčelj, 1976), (Boštjančič, 1976)) in potrjen z obnašanjem dejanske, že utrjene stavbe med močnim potresom, je bil mehanizem delovanja vezi podrobneje raziskan. Preiskani sta bili dve seriji modelov dvoetažnih kamnitih in opečnih hiš z lesenimi stropi. Modeli, ki so bili sezidani kot popolni modeli v merilu 1 : 4, so imeli v zidovih, ki so stali pravo-

kotno na smer delovanja potresa, okenske in vratne odprtine. V vsaki seriji je bil najprej preiskan referenčni model z lesenimi stropi brez vezi, nato pa še po dva modela, od katerih je imel eden zidove povezane z vezmi, drugi pa namesto vezi in lesenih stropov armiranobetonske plošče ((Tomaževič, 1993a), (Tomaževič, 1996c)).

Za izdelavo modelov kamnitih hiš je bil uporabljen kar naravni kamen, odvzet iz dejanske hiše in zdobljen na primerno majhne kose, medtem ko so bili modeli opečnih hiš sezidani iz opek, izdelanih iz malte ustrezne sestave. Za jeklene vezi, vgrajene enako kot v prototipnih hišah, je bila uporabljena žgana žica ustrezno zmanjšane premera. Da bi raziskali, kakšne sile nastanejo med potresom v vezeh, so bile zidne vezi opremljene z merilnimi lističi.

Ugotovljeno je bilo, da leseni stropi, ki niso sidrani v zidovje, ne morejo preprečiti ločevanja zidov, zaradi česar se lahko zgornja nadstropja porušijo (slika 17 levo). Če se zidovi povežejo, se stavba odzove na potres kot celovita konstrukcija, čeprav leseni stropi niso zamenjani s togimi armiranobetonskimi diafragmami (slika 17 desno). Rezultati raziskav so dali tudi podatke za dimenzioniranje jeklenih zidnih vezi. Ugotovljeno je bilo, da se pri nihanju zidu pravokotno na ravnino lahko uporabi analogija z armiranobetonsko zidno vezjo (upogib). Profil zidne vezi se izračuna na podlagi predpostavke, da se med nihanjem ustvari armirani upogibni nosilec, katerega statična višina je enaka debelini zidu, obremenitev pa predstavljajo



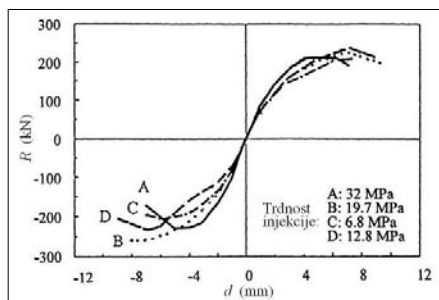
Slika 17 • Porušna faza preiskave modelov kamnitih hiš na potresni mizi: model brez zidnih vezi (levo) in model s povezanim zidovjem (desno) (Fotografiji: M. Tomaževič)

enakomerno porazdeljene vztrajnostne sile, ki nastanejo v višini stropa, kjer leži vez. Za oceno obtežbe se upoštevata pospešek v višini stropa in pripadajoča masa zidu (polovica višine etaže pod vezo in polovica nad njo).

Če vez povezuje zidove v ravnini delovanja potresa, se jo lahko dimenzionira na podlagi predpostavke, da se v končnem mejnem stanju ustvari mehanizem paličja, kjer končno prečno silo, ki nastane pri doseženi strižni nosilnosti dela povezanega dela stavbe, prevzame vez. Meritve deformacij v zidnih vezeh med preiskavo modelov na potresni mizi so namreč pokazale, da v vezeh nastane sila, enaka prečni sili v nadstropju nad vezmi, v trenutku, ko doseže zidovje svojo strižno odpornost.



Slika 18 • Ciklična strižna preiskava kamnitega zidu v laboratoriju (Fotografija: M. Tomažević)



Slika 19 • Vpliv različnih trdnosti injekcijskih mešanic na potresno odpornost kamnitega zidu

Laboratorijske preiskave in potresi so že dokazali učinkovitost utrjevanja kamnitih zidov z injektiranjem. Pri prvih posegih je bil suhi del injekcijske mešanice sestavljen iz 90 % portlandskega cementa in 10 % opalske breče, dodane za doseganje ustrezne plastičnosti med injektiranjem (injektibilnosti). Kmalu se je izkazalo, da se po injektiranju s takšno mešanico neprijetno poveča vlažnost zidovja, kar je posledica kapilarne aktivnosti otrdele cementne mase. Medtem ko so razpoke in votline v osnovnem zidu delovale kot pregrada in preprečevale širjenje vlage po zidovju, predstavlja otrdeli cement kapilarno močno aktivno snov. Da bi se preprečilo kasnejše nabiranje vlage na površini injektiranega zidu, se mešanici dodajajo različni dodatki za higrofobiranje, kar pa precej zmanjša trdnost osnovne cementne mase. Za ugotovitev, v kolikšni meri zmanjšana trdnost injekcijske mase vpliva na potresno odpornost zainjektiranega zidu, je Raziskovalna skupnost Slovenije financirala raziskovalni projekt, v okviru katerega je Zavod primerjal obnašanje večjega števila kamnitih zidov, sezidanih v laboratoriju in utrjenih z injektiranjem mešanic različne sestave in trdnosti. Preiskave so bile opravljene z napravo za ciklično strižno preiskavo

(slika 18), njihovi rezultati preiskav pa so bili presenetljivi. Niso pokazali praktično nobenega vpliva trdnosti injekcijske mase na potresno odpornost injektiranih zidov (slika 19). Izid preiskav lahko razložimo s tem, da injekcijska masa zagotavlja samo homogeno delovanje zidovja, s tem da zlepi posamezne, z votlinami med seboj ločene dele zidu in prepreči razslojevanje. Njena vloga je podobna kot vloga zidnih vezi pri zidani konstrukciji. Injekcijska masa ne more utrditi obstoječega materiala, preko katerega se sicer prenašajo strižne obremenitve, nastale med potresom.

Raziskava je pokazala, da je mogoče večji ali manjši del cementa v injekcijski mešanici zamenjati z inertnimi materiali, lahko tudi z apnom, in tako sprojektirati mešanico, ki po injektiranju ne bo imela neugodnih stranskih učinkov (povečanje vlažnosti, izločanje soli iz zidovja), ne da bi pri tem trpela dosegljiva nosilnost zidovja. Tako se lahko sprojektira tudi takšna sestava mešanice, ki bo ustrezala zahtevam spomeniškega varstva in s katero se bo lahko injektiralo tudi poslikano zidovje (Tomažević, 1993b). Seveda je treba mešanico prilagoditi sestavi zidovja in ji zagotoviti injektibilnost, tj. sposobnost, da med vtiskanjem vezivo zalije vse votline in da se delci veziva ne odfiltrirajo na začetku vstopanja v zid, v globino pa se izcedi samo voda. Ustrezno sestavo je treba vedno preveriti s preiskavami.

4 • OBDOBJE OD LETA 1996 DO DANES

Krizni časi gradbeništva, obenem pa reorganizacija in prestrukturiranje ZRMK niso toliko posegli v delo in kadre laboratorija in oddelka, ampak so za nekaj časa ustavili posodabljanje raziskovalne opreme. To je ponovno zaživelo šele z ustanovitvijo in samostojnostjo ZAG. Čeprav je bilo na uresničitev nekaterih pobud strateškega značaja tudi v novem Zavodu treba čakati skoraj 20 let

(prva resna ideja o izgradnji prizidka je bila znanstvenemu svetu podana pred skoraj dvajsetimi leti, deset let pa je minilo, odkar je bila izdelana prva projektna dokumentacija in pridobljeno gradbeno dovoljenje), je ZAG z velikim razumevanjem upravnega odbora in ustanovitelja uspešno nadoknadil zamujeno. Tako se tudi Laboratorij za konstrukcije danes lahko pohvali z najsodobnejšo

raziskovalno in preizkuševalno opremo. Popolnoma nova potresna miza (slika 20) omogoča zelo natančno ponazoritev poljubnega gibanja tal (slika 21). Zmogljivost mize je sicer podvojena, a je še vedno skromna, natančnost vodenja pa omogočajo predvsem zmogljivejši hidravlični agregati in doma razvita programska oprema za krmiljenje. Nakup palete programskih batov različnih zmogljivosti, povečanje moči tlačnih agregatov in izgradnja sistema za povežovanje omogočajo izvedbo več preiskav hkrati. Medtem ko je potresna miza kljub večji

zmogljivosti še vedno primerna le za preiskave modelov konstrukcij, pa oporna stena, ki je sestavni del laboratorijskega prizidka, omogoča preizkušanje manjših konstrukcij celo v naravnem merilu (slika 22). Z novo opremo se lahko strižne ciklične preiskave zidov izvedejo pri poljubno kontroliranih robnih pogojih. Najsodobnejša merilna oprema z digitalnim optičnim merilnim sistemom omogoča brezkontaktno meritve pomikov na poljubnih mestih. Če je bila pred leti težava v tem, na katere dele preiskane konstrukcije namestiti merilnike, je danes večji problem, katere podatke izmed množice izmerjenih ovrednotiti in analizirati. Visoki tehnologiji današnje opreme se je prilagodila tudi struktura kadrov v laboratoriju.



Slika 20 • Nova potresna miza z modelom, pripravljenim na preiskavo (Fotografija: M. Tomažević)

Spremenil se je sistem financiranja raziskovalne dejavnosti, ki je javnim raziskovalnim zavodom omogočil, da pomemben del sredstev pridobijo preko večletnih raziskovalnih programov, preostalo pa s financiranjem raziskovalnih projektov. Žal je obeh primerih, predvsem pri kandidiranju za raziskovalne projekte, konkurenca močna in možnost za uspeh majhna, za pridobitev sredstev za raziskovanje pa so bolj kot vsebina predloga pomembne reference iz preteklega obdobja.



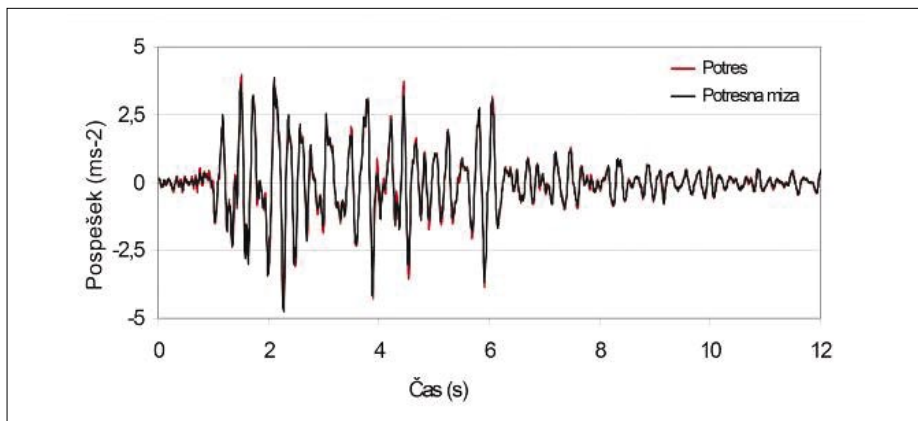
Slika 22 • Proslavitev uspešnega zaključka prve faze preiskave enostavne večetažne zidane konstrukcije, ki sta jo omogočila nova oporna stena in zmogljiv sistem hidravličnih programskih batov (Fotografija: Arhiv ZAG)

S približevanjem Slovenije Evropski uniji in kasnejšim članstvom v Uniji se je tudi mednarodno sodelovanje na področju potresnega inženirstva v veliki meri preselilo v Evropo, predvsem v sosednjo Italijo. Z usmeritvijo evropskih okvirnih programov v visoko tehnologijo je bilo čedalje manj prostora in sredstev za financiranje klasičnih gradbeniških problemov potresnega inženirstva. Če so se pred leti raziskave, financirane z evropskimi sredstvi, dale »pobarvati« z varstvom in ohranitvijo kulturne dediščine, danes niti raziskave z možnostjo uporabe sodobnih sintetičnih materialov v potresnem inženirstvu niso dovolj zanimive. Še manj so seveda zanimive »starodobne« zidane konstrukcije, čeprav problemov, ki bi jih še morali raziskati, in vprašanj, ki še čakajo na odgovor, nikoli ne zmanjka.

K sreči se je v zadnjem obdobju, še posebno pred zadnjo gospodarsko krizo, povečala pripravljenost opekarne in druge industrije gradbenih materialov, da pred prodorom na trg razišče, kako se konstrukcije, zgrajene z njihovimi materiali, obnašajo med potresom. K raziskavam so jih spodbudili tudi na novo uveljavljeni evrokodi, standardi za projektiranje stavb, katerih uporaba je bila v Sloveniji kot prvi državi EU predpisana kot obvezna v začetku leta 2008. Na podlagi referenc in ugleda Zavodovih raziskovalcev je bilo v zadnjem obdobju kar nekaj pomembnih raziskav, financiranih od tuje oziroma domače industrije v tuji lasti. Pri pogoju, da so bile raziskave zasnovane tako, da so bili rezultati lahko vključeni v domače raziskovalne programe in projekte, je bila tudi cena za financiranje sprejemljiva.

Kot da bi vedela, da Slovenijo v bližnji prihodnosti čakajo novi potresi, je Uprava za zaščito in reševanje med letoma 1995 in 1997 financirala raziskovalni projekt *Potresna ogroženost in varstvo pred potresi*, katerega koordinacijo je zaupala Zavodu. V okviru projekta, v katerem so sodelovali ZAG, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo ter Geografski inštitut Antona Melika pri Znanstvenoraziskovalnem centru SAZU, je ZAG pripravil osnutek strategije varstva in priporočila za ocenjevanje uporabnosti po potresu poškodovanih stavb. Na podlagi priporočil je pripravil tudi priročnik (Tomažević, 1998b), ki je bil po naključju pripravljen za tisk prav na dan potresa, ki je prizadel Posočje leta 1998. Prva od sodelujočih inštitucij je pripravila orodja za hitro oceno potresne ranljivosti stavb in mostov, druga pa katalog objektov in preliminarno oceno ogroženosti.

Zaradi statusa javnega raziskovalnega zavoda ZAG pri odpravi posledic potresa ni mogel sodelovati v enakem obsegu kot v



Slika 21 • Ujemanje med programiranimi pomiki, izračunanimi z dvojno integracijo časovnega poteka pospeškov potresa, in dejanskimi pomiki mize pri polni obremenitvi. Popolni model, merilo 1 : 4, masa 3000 kg

preteklem obdobju. Zato je sodeloval le pri izobraževanju projektantov in opravil nekatere eksperimentalne raziskave, s katerimi je ugotovil projektne parametre, k so jih pri projektih utrditve hiš uporabljali projektanti. Po ponovljenem potresu leta 2004 je za ministrstvo za okolje in prostor izdelal analizo vzrokov za nastanek ponovnih poškodb, kasneje pa opravljal neodvisni strokovni nadzor nad obnovo območja. Ironično je, da danes slovenske strokovnjake izobražujejo italijanski, ki vodijo evropski projekt, ki naj bi v EU poenotil metodologijo in postopke ukrepov po potresih in pri katerem med drugimi sodeluje slovenska Civilna zaščita.

Čeprav je bilo že v preteklem obdobju osvetljenih nekaj problemov potresno odpornega projektiranja zidanih konstrukcij, so priprava na uvajanje evrokodov, popravki nekaterih zgrešenih določil in izbira nacionalnih parametrov zahtevali dodatne raziskave. Bolj kot raziskave za eksperimentalno podprto projektiranje lahko raziskave na področju potresne odpornosti zidanih konstrukcij v zadnjem obdobju s skupnim imenom imenujemo raziskave za uvajanje evrokodov. Eksperimentalno preverjanje obnašanja pri potresu zahtevajo tudi številni novi materiali in tehnologije zidanja, ki so bile razvite predvsem za doseganje energetske učinkovitosti stavb. Ker so bile te tehnologije razvite večinoma na območjih, kjer ni pričakovati potresov, je bilo treba njihovo uporabnost na potresnih območjih še preveriti. Evrokod 6 (SIST EN 1996-1: 2006) kot osnovni standard za projektiranje zidanih konstrukcij njihove uporabe ne omejuje, Evrokod 8 (SIST EN 1998-1: 2005), ki dopolnjuje osnovni standard z dodatnimi določili, pa za kredibilno omejitev nima vedno eksperimentalne podlage.

Tudi pri varstvu arhitekturne dediščine in protipotresnega utrjevanja starih zidanih stavb se uvajajo nove tehnološke rešitve, ki temeljijo na uporabi sodobnih sintetičnih materialov, predvsem epoksidov in z vlakni ojačenih polimerov. Če se je primernost rešitev pri armiranobetonskih konstrukcijah že izkazala, pa je bilo eksperimentalnih raziskav za možnost uporabe teh rešitev pri zidanih konstrukcijah še zelo malo. Tudi na tem področju je Zavod v zadnjem obdobju opravil pomembno delo.

4.1 Eksperimentalne raziskave za uvajanje evrokodov

Najpomembnejša vprašanja, na katera je bilo treba podati odgovor z eksperimentalnimi raziskavami in s katerimi so se raziskovalci ZAG ukvarjali v zadnjem obdobju, so bila:

- Kakšne zapolnitve navpičnih reg so primerne za zidanje na potresnih območjih?
- Kako definirati oziroma izbrati parameter, ki bo določal mejo za ustrezno robustnost zidaka?
- Raziskati obnašanje stavb, sezidanih iz lahkega aeriranega betona nizke trdnosti, pri potresni obtežbi in ugotoviti, ali je material, ki ima trdnost nižjo od splošne omejitve, primeren za gradnjo na potresnih območjih.
- Katere vrednosti faktorja obnašanja konstrukcije upoštevati pri preverjanju potresne odpornosti posameznih sistemov zidanja?
- Kako računati strižno odpornost zidu?

Novi sistemi zaradi poenostavitve zidanja in energetske učinkovitosti zidovja (povečanje izolativnosti, zmanjšanje možnosti nastanka toplotnih mostov) opuščajo zidanje s klasično malto, ki jo evrokodi imenujejo »malta za splošno uporabo«. Danes se zida z zidaki z brušeno naležno površino, v naležnih regah se uporabljajo tankoslojna malta ali druga veziva, npr. poliuretansko lepilo, navpične rege pa so le delno zapolnjene ali pa se zidaki suho stikujejo na pero in utor. Ker Evrokod 6 takšne zidarske zveze dopušča, na potresnih območjih pa je veljalo, da se ne sme zidati, ne da bi bile navpične rege zapolnjene v celoti, so združenja opekarske industrije iz Slovenije, Avstrije, Švice, Nemčije in Italije sofinancirala obsežen program raziskav, katerega cilj je bil raziskati, koliko in če različni načini zapolnitev navpičnih reg vplivajo na obnašanje zidov pri cikličnih obtežbah. Zidovi so bili zaradi primerjave sezidani s sicer enakimi zidaki, ki pa so imeli navpične stične površine prilagojene različnim tipom stikovanja. Naročniki so želeli imeti podatke o tem, če in v kolikšni meri vrsta stika vpliva na obnašanje zidov pri potresni obtežbi. Da bi bili rezultati raziskave čim bližje realnemu stanju, so bili zidovi sezidani z zidaki, ki so ustrezali neki povprečni obliki in kakovosti zidakov, ki so dosegljivi na tržišču, čeprav so obstajali pomisleki o njihovi robustnosti. Da bi zmanjšali vrtenje, so bili zidovi preiskani z razmeroma visoko tlačno predobremenitvijo, od 15 % do 28 % tlačne trdnosti zidovja, kar bi ustrezalo napetostnim pogojem v zidovih tudi večnadstropnih stavb. Preiskave so pokazale, da je bila porušitev zidov sicer tipična strižna z nastankom diagonalnih razpok, vendar je do nje prišlo zaradi krhke porušitve zidakov. Zato sta bili tudi duktilnost zidov in sposobnost sipanja energije razmeroma majhni. Raziskave niso pokazale bistvenih razlik pri obnašanju, ki bi jih lahko pripisali

različnim načinom zapolnitve navpičnih reg. Kljub posebnosti ugotovljenega mehanizma porušitve so preiskave zidov dale vedeti, da zadržki glede zapolnitve navpičnih reg pri sodobnem načinu zidanja niso potrebni. So pa ponovno opozorile na problem robustnosti tlačno obremenjenih sodobnih opečnih votlakov (Bosiljkov, 2004).

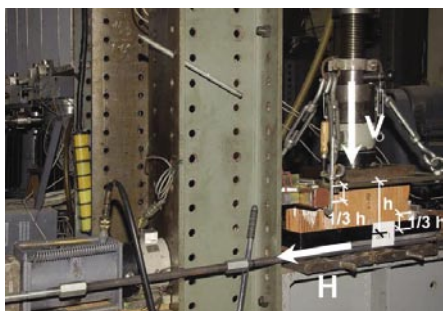
Zakaj so sodobni opečni votlaki krhki? Da bi se izboljšale toplotnoizolativne lastnosti zidovja, je opekarska industrija njihovo obliko in material zidakov zasnovala predvsem z željo, da bi zidovje ob izkoriščenih nosilnosti ustrezalo tudi današnjim strogim zahtevam za varčevanje z energijo. Zato so votlaki navadno izdelani iz poroziranih glinenih materialov, ki so že sami po sebi bolj krhki kot navadna opeka, za zadrževanje prehoda toplote pa so izoblikovani z veliko količino votlin, s tanko lupino in tankimi vmesnimi stenami. Medtem ko je nosilnost zidovja iz takšnih votlakov na navpično obtežbo navadno ustrezna, se v primeru, če so zidovi ob hkratnih visokih tlačnih obremenitvah izpostavljeni dodatnim upogibom in strigom, ki nastanejo zaradi vodoravnih sil med potresom, votlaki v najbolj obremenjenih delih zidu lahko zdrobijo. Raziskave so pokazale, da je ustrezna robustnost še posebno pomembna v primeru armiranega zidovja, kjer morajo zidaki prevzemati dodatne strižne in tlačne obremenitve, ki so posledica nastalih nateznih sil v armaturi. Lokalna krhka porušitev votlakov zelo neugodno vpliva na kapaciteto duktilnosti in sipanja energije, ki jo mora potresno odporna zidana konstrukcija zagotavljati med potresom (slika 23). To seveda postavlja pod vprašaj uporabo marsikaterega votlaka, razvitega za zidanje na območjih brez potresne nevarnosti, na območjih, kjer lahko pričakujemo tudi močne potrese (Tomažević, 2006).

Da se lokalno krhki votlaki ne bi porušili, evropski standard za projektiranje potresno odpornih konstrukcij Evrokod 8 zahteva, da »morajo biti zidaki dovolj robustni, da se prepreči lokalna krhka porušitev«. Kaj pomeni »dovolj robustni«, evrokod ne pove, prepušča pa nacionalnim dodatkom, da »lahko izbere tip zidakov po preglednici iz Evrokoda 6 (ta zidake razvršča v skupine po obliki, materialih in namenu), ki ustrezajo zahtevi, da so dovolj robustni«. Takšna odločitev pa nikakor ni enostavna, saj so v preglednici zidaki, ki se uporabljajo za zidanje nosilnih zidov, razvrščeni v dve skupini, pri čemer so v drugi votlaki, pri katerih je območje med najmanjšo in največjo votlikavostjo ter največjo in najmanjšo debelino sten zelo veliko.

Da bi ugotovili, kaj vpliva na robustnost, in določili merila za »dovolj robustni«, je bilo pri dveh stopnjah tlačne obremenitve s simulirano potresno obtežbo preiskano večje število zidov, sezidanih iz šestih vrst zidakov, ki jih je najpogosteje najti na domačem tržišču. Na različne načine, s katerimi so bile ponazorjene obremenitve v zidakah med potresom, so bili preiskani tudi zidaki (slika 24). Čeprav so bile opravljene zelo obsežne preiskave, posebnih mehanskih lastnosti oziroma razmerij med njimi, s katerimi bi lahko določili merilo za »dovolj robustni«, ni bilo mogoče najti. Raziskave so pokazale, da je velikost razmerja med tlačnimi napetostmi, s katerimi je obremenjen zid, in tlačno trdnostjo zidovja, ključni parameter, od katerega je odvisna robustnost zidakov. Zato je bil podan predlog, naj evrokod tlačno obremenitev na potresnih območjih omeji podobno kot pri armiranobetonskih elementih (Tomaževič, 2012a).



Slika 23 • **Drobljenje krhkih zidakov je imelo za posledico tudi krhko strižno porušitev zidu.**
(Fotografija: Arhiv ZAG)



Slika 24 • **Prestrižna preiskava opečnega votlaka (Fotografija: Arhiv ZAG)**

Evrokod 8 priporoča vrednost 5 MPa za minimalno tlačno trdnost, ki jo morajo dosegati zidaki za zidanje stavb na potresnih območjih ne glede na material, iz katerega so izdelani. To vrednost je za minimalno dopustno privzel tudi slovenski nacionalni dodatek, zato zidanje z zidaki, ki imajo manjšo trdnost, pri nas na potresnih območjih ni dopustno. Aerirani celični beton, porobetonec, je lahek gradbeni material, ki ima zelo dobre toplotno- in zvočnoizolativne lastnosti ter veliko požarno odpornost, vendar je tlačna trdnost zidakov praviloma manjša od 5 MPa. Kljub temu je dovolj visoka, da se s porobetonom gradijo tudi večnadstropne stavbe, ki so se, kot so že pokazali nekateri primeri, tudi med močnimi potresi dobro obnašale. Raziskave kažejo, da natezna trdnost zidovja iz porobetona skoraj ni odvisna od tlačne trdnosti zidakov. Zato je korporacija Xella, lastnica tovarn, ki proizvajajo porobetonec pri nas, financirala raziskave, s katerimi bi se dokazalo, da tudi zidanje s porobetonskimi zidaki, ki imajo trdnost manjšo od pri nas dopustne, zagotavlja zahtevano potresno odpornost. Z ugodnimi rezultati raziskav bi podprli predlog za spremembo ustreznega določila v ustreznem nacionalnem dodatku. V okviru projekta so bili na potresni mizi preiskani trije modeli, dva modela s po tremi etažami in en štirietažni model, sezidani pa so bili v merilu 1 : 4 (slika 25). Vsi modeli so bili sezidani v sistemu povezanega zidovja, vendar s prilagojeno zasnovo porazdelitve in dimenzij navpičnih zidnih vezi.



Slika 25 • **Preiskava modela 4-etažne hiše iz porobetona na potresni mizi**
(Fotografija: Arhiv ZAG)

Raziskave so pokazale, da je pri potresni obtežbi obnašanje stavb, sezidanih iz porobetona, enakovredno obnašanju stavb iz opečnega zidovja. Po eni strani zaradi majhne mase materiala zidovja v stavbi med projektnim potresom nastanejo manjše potresne sile, po drugi pa strižna odpornost zidov, sezidanih iz porobetona, ni bistveno manjša od strižne odpornosti zidov iz opečnih votlakov. Kot kažejo preiskave, opravljene v okviru te študije, so pri majhnih tlačnih trdnostih zidovja navpične zidne vezi ključni element, ki zagotavlja ustrezno potresno odpornost konstrukcije stavb iz porobetona (Tomaževič, 2012b). Ponovitev preiskav za češko podružnico iste korporacije, za katero je bil poleg večjega števila zidov večjih zidov na potresni mizi preiskan tudi model sicer nižje hiše, vendar v večjem merilu, je podala podobne rezultate. Z njimi je proizvajalec porobetona lahko dodatno argumentiral spremembo zahteve evrokoda glede minimalne dopustne trdnosti zidakov.

Oblika potresne obtežbe in način, kako se preverja potresna odpornost konstrukcije, sta odvisna od pomembnosti in kompleksnosti konstrukcije. Če je zasnova konstrukcije pravilna in po pomembnosti ni uvrščena v najvišjo kategorijo, kar velja tudi za večino zidanih stavb, se račun lahko poenostavi. Naenkrat se upošteva le ena komponenta potresnega gibanja tal in se konstrukcija analizira v vsaki od obeh med seboj pravokotnih smereh posebej. Analiza nelinearnega dinamičnega odziva se nadomesti z ekvivalentno elastično statično analizo, kjer se projektna potresna obtežba izvednoti na podlagi projektnega spektra odziva z upoštevanjem konstrukcije kot ekvivalentnega sistema z eno prostostno stopnjo. Projektni spekter se dobi tako, da se ordinat elastičnega spektra zmanjšajo s faktorjem, ki ga evrokod imenuje »faktor obnašanja konstrukcije q«. Po današnji definiciji je v faktorju q zajeta sposobnost deformacij in sipanja energije, ki konstrukciji kljub pričakovanim poškodbam omejenega obsega še zagotavlja dogovorjeno raven varnosti. Ker je dopustna redukcija elastičnih sil odvisna od materialov in vrste konstrukcije, se lahko vrednosti faktorji obnašanja q med konstrukcijami precej razlikujejo.

Eksperimentalnih podatkov za oceno faktorjev q za različne sisteme zidanja je zelo malo, zato Evrokod 8 za vsak sistem (nearmirano, povezano in armirano zidovje) podaja vrednosti v določenem intervalu. Evrokod priporoča privzem vrednosti na spodnji meji intervala, če ni dokazov, ki bi argumentirali uporabo vrednosti na zgornji meji. Da bi argumentirali uporabo večjih vrednosti, je Zavod s financiranjem

Nemškega združenja za zidano gradnjo (Deutsche Gesellschaft für Mauerwerksbau) opravil serijo preiskav šestih modelov stavb različnih zasnov na potresni mizi, ki so bil sezidani z različnimi materiali kot navadne ali delno oziroma polno povezane konstrukcije. Raziskave so potrdile predvidevanja, da bi v odvisnosti od sistema zidanja in pravilnosti zasnove ter pri preverjanju potresne odpornosti s potisno metodo, pri kateri se ne pričakuje pomembne rezervne nosilnosti (overstrength), lahko upoštevale vrednosti, ki jih evrokod navaja na zgornji meji priporočenih. Pri tem bi seveda morali preveriti, ali pomiki oziroma poškodbe zidov pri teh silah ne sežejo čez določeno mejo. Rezultati raziskav tudi kažejo, da so pri uporabi elastičnih metod preverjanja potresne odpornosti, pri katerih se lahko pričakuje večja rezervna nosilnost konstrukcije, vrednosti na zgornji meji lahko konservativne (Tomažević, 2010). Žal ta argument ni zadoščal, da bi slovenski nacionalni dodatek priporočil uporabo vrednosti faktorja q na zgornji meji intervala priporočenih vrednosti.

Odpornost zidu pri delovanju vodoravne strižne (prečne) sile v ravnini zidu se po Evrokodu 6, evrokodu za projektiranje zidanih konstrukcij, izračuna z enačbo, izpeljano po analogiji trenja, zato je primerna le za prestrižni mehanizem porušitve. Pri tem je treba vedeti, da izraz »strižna odpornost« (shear resistance) v evrokodu pomeni splošni izraz za odpornost zidu pri delovanju vodoravne sile v ravnini zidu (prečne sile, strižne sile), medtem ko izraz »strižna odpornost« v potresnem inženirstvu pomeni odpornost zidu v primeru, ko se zid poruši zaradi strižnega mehanizma. Ta se odraža z diagonalno usmerjenimi razpokami, ki nastanejo, ko diagonalne natezne napetosti v zidu prekoračijo natezno trdnost zidovja. Tako definirana strižna porušitev je najbolj pogost oziroma značilen način mehanizem porušitve nearmiranih in povezanih zidov, na katere v ravnini zidu deluje potresna obtežba. Da bi se argumentirala zahteva, da se pri preverjanju potresne odpornosti preverijo tudi drugi možni porušni mehanizmi, in ocenila primernost predpisane metode, so bili analizirani rezultati cikličnih strižnih preiskav večjega števila zidov različnih geometrijskih proporcev, ki se bili preiskani pri različnih tlačnih predobremenitvah. Primerjava je pokazala, da tipične enačbe, osnovane bodisi na podlagi prestrižnega mehanizma bodisi na podlagi porušitve zaradi natega v diagonalni smeri, niso kar splošno veljavne. Rezultati računa z enačbo, osnovano na mehanizmu porušitve zaradi natega v diagonalni smeri, se pri opečnih

slopih običajnih geometrijskih razmerij dobro ujemajo z eksperimentalnimi vrednostmi. Ujemanje je vprašljivo le pri dolgih zidovih, obremenjenih z zelo nizkimi tlačnimi napetostmi. Nasprotno pa izračuni z enačbami, osnovanimi na podlagi strižnega trenja, v primeru zidov, obremenjenih z običajnimi tlačnimi obremenitvami, precenijo dejansko strižno odpornost zidov. Z njo se boljše ujemajo pri nizkih tlačnih napetostih (Tomažević, 2009). Nelogičnosti se pojavijo tudi pri izračunu potresne odpornosti, ki z upoštevanje enačbe strižnega trenja ni konstanta veličina, temveč se zmanjšuje z večanjem računske potresne obtežbe. Predlog, da bi se vsaj v nacionalni dodatek k Evrokodu 6 uvedlo določilo, po katerem bi se odpornost zidu na vodoravne sile v njihovi ravnini ocenila z upoštevanjem vseh možnih porušnih mehanizmov, pri čemer bi se za analizo odpornosti konstrukcije upoštevala najnižja, kritična vrednost, kljub argumentom še ni bil sprejet.

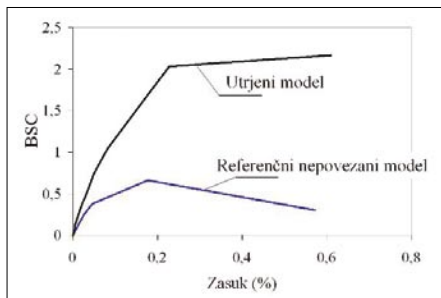
4.2 Preprojektiranje konstrukcij in eksperimentalne raziskave učinkov utrjevanja stavb in zidov s sintetičnimi materiali

Tretji del Evrokoda 8 določa zahteve, ki jih je treba upoštevati pri prenovi in utrjevanju obstoječih stavb. Med drugim zahteva, da je treba obstoječim stavbam med prenovo zagotoviti enako stopnjo potresne varnosti kot pri novogradnji. Pri tem predpiše, kako določiti ključne projektne parametre oziroma katere vrednosti upoštevati v računskem preverjanju potresne odpornosti. Po določitih standarda se morajo vrednosti, ki se na konkretni stavbi določijo s preiskavo, zmanjšati s t. i. faktorjem zaupanja, ki je odvisen od obsega preiskav (ravni poznavanja konstrukcije), obenem pa je treba upoštevati tudi delni faktor varnosti za materiale, ki je pri sodobnih zidnih materialih odvisen od kontrole kakovosti med proizvodnjo in strogosti nadzora nad samo gradnjo, njegova vrednost pa se giblje v precej širokem razponu. Velja določilo, da se, če podatkov o kontroli ni, privzame največja vrednost, kar v primeru starih stavb pomeni, da se s preiskavo ugotovljene vrednosti zmanjšajo za polovico. Eksperimentalne in parametrične raziskave (primerjava računske odpornosti z dejanskim stanjem po potresih) so pokazale, da tolikšno zmanjšanje računske odpornosti ni z ničimer utemeljeno. Zaradi prenizke izračunane potresne odpornosti bi morali stavbo po nepotrebem dodatno utrditi, verjetno z večjimi posegi v konstrukcijo, ki bi pri stavbah arhitekturne kulturne dediščine pomenili grobo kršitev osnovnih načel spomeniškega varstva. Že omenjene pre-

iskave modelov, katerih rezultati so bili kasneje analizirani tudi v ta namen, ter analize stavb, ki so jih prizadeli potresi v zadnjem času, so pokazale, da je tudi pri starih hišah kapaciteta deformacij in sipanja energije tolikšna, da se lahko pri določanju računskih potresnih sil upoštevajo običajni redukcijski faktorji, ne da bi njihova ogroženost bistveno odstopala od ogroženosti novih stavb. Analize so tudi pokazale, da je stanje poškodb, ocenjeno brez nepotrebne redukcije vrednosti mehanskih lastnosti materialov, določenih s preiskavo na stavbah, povsem primerljivo s stanjem dejanskih poškodb po potresu (Tomažević, 2007). To opravičuje predlog, da se pri preverjanju potresne odpornosti obstoječih hiš opusti nepotrebna redukcija s preiskavo ugotovljenih vrednosti mehanskih lastnosti z delnim faktorjem varnosti. Zadostuje redukcija s faktorjem zaupanja na podlagi obsega opravljenih preiskav, tj. redukcija v odvisnosti od poznavanja konstrukcije. V zadnjem obdobju številni proizvajalci ponujajo različne inovativne rešitve utrjevanja starih zidanih stavb, ki večinoma temeljijo na uporabi sintetičnih materialov. Resnejši proizvajalci svoje predloge poskušajo preveriti tudi z eksperimentalnimi raziskavami. Večinoma gre za utrjevanje z naknadnim armiranjem zidovja po vzgladu utrjevanja armiranobetonskih konstrukcij, kjer je eksperimentalnih dokazov o učinkovitosti uporabe z vlakni ojačenih polimerov že precej.



Slika 26 • S karbonskimi lamelami povezan model je prenesel trikrat močnejšo potresno obtežbo kot referenčni, nepovezani model. (Fotografija: M. Tomažević)



Slika 27 • **Primerjava krivulj potresne odpornosti s karbonskimi lamelami povezanega in nepovezanega modela**

Nedavne eksperimentalne raziskave so pokazale, da bi se dalo jeklene vezi nadomestiti s trakovi iz polimernih laminatov, ojačenih z ogljikovimi vlakni. Na modelih, ki so bili preiskani na potresni mizi (slika 26), je bilo ugotovljeno, da tak način utrditve ne le samo poveže stavbo, ampak jo tudi utrdi (Tomažević, 2009). Ker polimerni trakovi niso bili ustrezno modelirani, rezultati preiskave še ne dokazujejo, ampak le nakazujejo, da bi bila takšna tehnična rešitev lahko zelo učinkovita (slika 27). Pred uporabo v praksi bo treba predvsem pri kamnitih hišah rešiti še marsikateri tehnološki problem, povezan s sprijemnostjo in učinkovitim sidranjem materialov, ki se po mehanskih lastnostih med seboj močno razlikujejo. Po rezultatih preiskave sodeč, bi



Slika 28 • **Izbočenje obloge opečnega zidu, armirane s tkanino iz s steklenimi vlakni ojačenih polimerov v epoksidni matriki, pri porušitvi (Fotografija: M. Tomažević)**



Slika 29 • **Izbočenje obloge in razslojitev kamnitega zidu v porušni fazi preiskave (Fotografija: M. Tomažević)**

bilo mogoče potresno odpornost tako utrjene stavbe tudi več kot podvojiti. V sodelovanju in s sofinanciranjem korporacije Sika iz Švice je bil v zadnjih letih izpeljan tudi obsežen program eksperimentalnih raziskav o možnosti utrjevanja opečnih in kamnitih zidov z oblogami, armiranih s polimeri, ojačenih s karbonskimi ali steklenimi vlakni (Tomažević, 2013, 2015). Del preiskav zunaj programa je bil opravljen tudi na zidovih opečne zidane stavbe, sezidane med obema svetovnjima vojnoma, vendar je bila ta kasneje porušena (Lutman, 2012).

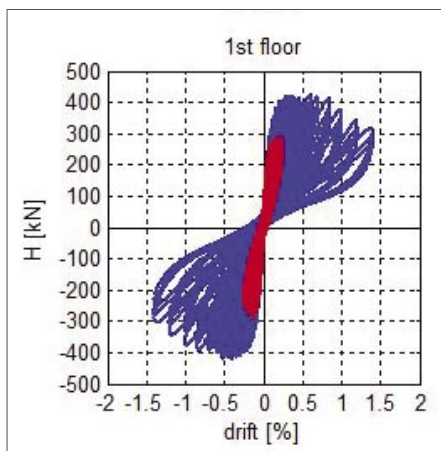
Kot matrični material je bila pri armiranju z mrežo uporabljena je vlakni ojačena cementna malta z nizkim modulom elastičnosti, pri armiranju s tkanino pa epoksidna smola. Na opečnih zidovih je bil preverjen tudi učinek karbonskih lamel, nalepljenih na zid z epoksidno smolo, ki so se izkazale za možno učinkovito rešitev pri povezovanju zidovja. Pri opečnih zidovih je bil porušni mehanizem v vseh primerih strižnega tipa, njegova značilnost pa je bila delaminacija obloge, ki se je odtrgala od zidovja in izklonila takoj po nastanku poškodb v zidovju in skrčenju zidovja pri ponovljenih obremenitvah z vodoravno obtežbo (slika 28). Zaradi delaminacije obloge se je zgodilo hipno upadanje odpornosti in togosti, kar je praktično pomenilo porušitev zidov. Preiskave so pokazale, da obloge s kompozitnimi materiali v večini primerov povečajo togost in odpornost,

le malo pa izboljšajo deformacijsko kapaciteto zidov. Preiskave so tudi pokazale, da je za učinkovitost oblog, katerih mehanske lastnosti so bistveno boljše od lastnosti zidovja, ključno ustrezno sidranje oblog v zidovje (Tomažević, 2013). Čeprav po priporočilih RILEM opravljene preiskave sprijemnosti med oblogo in opečnim zidovjem ne kažejo tako, saj se prej strga polimerna armatura kot pa poruši sprijemnost med oblogo in zidaki, je pri zidovih pri cikličnem obremenjevanju z vodoravno obtežbo drugače. Pri potresu se od zidu obenem z oblogo odtrga tudi del zidu. Kako se bo v prihodnje ugotavljala dejanska, učinkovita sprijemnost obloge z zidovjem pri cikličnih obremenitvah, da bi se v računskih modelih lahko upoštevale pravilne vrednosti, je na podlagi teh ugotovitev še del razprave in raziskav v prihodnosti.

Proti pričakovanjem je bil učinek utrjevanja na podoben način utrjenih kamnitih zidov večji. Preiskave so pokazale opazno, tudi štirikratno povečanje odpornosti utrjenih zidov v primerjavi z referenčnimi, neutrjenimi zidovi. Stopnja povečanja odpornosti ni bila toliko odvisna od tipa obloge kot od tehnologije nanašanja. Kot so pokazali rezultati preiskav, je oblaganje izboljšalo tudi sposobnost deformiranja in sipanja energije, vendar je hkrati povečalo togost zidov. Tudi v tem primeru je ustrezno sidranje obloge ključno, mehanizem porušitve, pri kateri je, podobno kot pri neutrjenih zidovih, nastalo razslojevanje zidov (slika 29), pa kaže, da bi se učinek oblaganja verjetno še povečal, če bi bili oblogi na obeh straneh zidov medsebojno povezani (Tomažević, 2014).



Slika 30 • **Terenska preiskava učinka utrditve opečnega zidu s CFRP-tkanino (Fotografija: Arhiv ZAG)**



Slika 31 • Primerjava obnašanja utrjene (rdeče) in s polimernimi oblogami utrjene (modro) konstrukcije s slike 22 pri potresni obtežbi

Da so sodobne tehnologije utrjevanja učinkovite, kažejo terenske preiskave kakor tudi nedavne preiskave na sliki 22 prikazane enostavne zidane stavbe v naravnem merilu. V zidani stavbi, predvideni za rušenje, sta bila pred utrditvijo in po njej preiskana dva zidova, utrjena s tremi pasovi karbonske tkanine v epoksidni podlagi, s katerimi sta bila zidova ovita, in s pasovi tkanine, nalepljenimi v obeh diagonalnih smereh na zgornji in spodnji polovici zidu (slika 30). Diagonalni pasovi so bili pri notranjem, z navpično obtežbo bolj obremenjenem zidu nalepljene na obeh, medtem ko so bile pri zunanem, manj obremenjenem zidu nalepljene samo na notranji strani zidu. Tudi v tem primeru

je bilo povečanje odpornosti veliko, v nasprotju s pričakovanjem pa je bilo večje pri zidu z enostransko diagonalno nalepljenimi pasovi tkanine (Lutman, 2012). Oba zidova sta bila po utrditvi tako toga in močna, da je bilo treba preiskavo zaradi nastajajočih poškodb stropnega dela stavbe prekiniti pred nastankom resnejših poškodb v zidu. Z oblogo, armirano z mrežo iz steklenih vlaken, je bila po preiskavi do dosežene odpornosti v obstoječem stanju utrjena tudi stavba, prikazana na sliki 22. Učinek utrditve se lepo vidi na sliki 31 (Triller, 2016). Raziskave utrjevanja zidov s sodobnimi materiali se nadaljujejo tudi v povezavi s Tehnološko univerzo v Krakovu na Poljskem.

5 • NAMESTO SKLEPA

Članek je nekoliko spremenjena verzija prispevka, napisanega za publikacijo ZAG v letu 2015 (ZAG, 2015), ki je bila izdana ob slovesnem odprtju novega prizidka Laboratorija za konstrukcije. Čeprav je poskušal biti kar se da faktografski, je prispevek kljub vsemu osebni pogled avtorja, ki je z laboratorijem preživel 49 let, na dosežke raziskovalcev, ki so svoje eksperimentalne raziskave opravljali v Zavodnem Laboratoriju za konstrukcije. Laboratorij za konstrukcije, ki je v času od svojega nastanka deloval v različnih organizacijskih

enotah nekdanjega Zavoda za raziskavo materiala in konstrukcij (ZRMK), je po njegovem prestrukturiranju v celoti prešel v ZAG. Laboratorij je bil in je tudi ostal sestavni del organizacijske enote, ki se danes imenuje Oddelek za konstrukcije. Tako kot je danes ZAG v Sloveniji, je bil ZRMK med najpomembnejšimi inštituti za gradbeništvo v nekdanji Jugoslaviji. V letih po ustanovitvi je bil ZRMK deležen pozornosti najvišjega vodstva tedaj še Federativne ljudske republike Jugoslavije (slika 32), slovesnega odprtja prizidka laboratorija pa se je

med drugimi gosti udeležila tudi ministrica, ki vodi matični resor, v okviru katerega deluje javni raziskovalni zavod ZAG (slika 33). Prispevek ni pregled vsega, kar je na Zavodu ob pomoči laboratorija nastalo na področju potresnega inženirstva. Tako v prispevku niso omenjene eksperimentalne raziskave obnašanja velikopanelnih stenasnih armirano-betonskih konstrukcij po sistemu Jugomont, ki je bil popularen v 60. letih prejšnjega stoletja, niti izboljšani sistem SCT iz 80. let, po katerem je zgrajeno stanovanjsko naselje Župančičeva jama v Ljubljani. Opisane niso raziskave vpliva načina armiranja armirano-betonskih sten na obnašanje pri potresu, pri katerih je simulacija obremenitev, nastalih



Slika 32 • Obisk najvišjega državnega vodstva leta 1959. Spredaj od leve proti desni: direktor ZRMK prof. Viktor Turnšek, predsednik FLRJ Josip Broz - Tito in tehnični direktor ZRMK Marjan Ferjan, v drugi vrsti sta Miha Marinko, predsednik vlade LR Slovenije in Ivan Maček - Matija (Fotografija: Arhiv ZAG)



Slika 33 • Gostje med slovesnim odprtjem novega prizidka Laboratorija za konstrukcije. Spredaj od leve proti desni: prorektor UL prof. dr. Goran Turk, ministrica za izobraževanje, znanost in šport dr. Maja Makovec Brenčič, direktor ZAG izr. prof. dr. Andraž Legat (Fotografija: Arhiv ZAG)

med potresom, zahtevala dobršno mero inovativnosti, niti raziskave obnašanja nekaterih drugih inovativnih monolitnih in montažnih konstrukcijskih sistemov oziroma poskusi reševanja geotehničnih problemov pri potresih. Tudi na področju zidanih konstrukcij

ni opisano vse, kar bi se morda komu drugemu zdelo omembe vredno. Opisane niso tudi tiste dejavnosti na področju potresnega inženirstva, ki niso neposredno povezane z laboratorijem, čeprav so pri varstvu pred potresi pomembne, denimo razvoj metod za

oceno potresne ogroženosti grajenega okolja in razvoj metodologij za oceno uporabnosti objektov, ki jih je poškodoval potres. Tudi navedene objave so le izbor v pomoč bralcu, da поблиže spozna v prispevku omenjene raziskave.

6 • LITERATURA

- Čačovič, F., Turnšek, V., Boštjančič, J., Tomažević, M., Droljč, S., Tomšič, J., Modelne preiskave na programirani vibracijski mizi, Poročilo ZRMK, Ljubljana, 1970.
- Benedetti, D., Tomažević, M., Sulla verifica sismica di costruzioni in muratura, *Ingegneria sismica*, 1 (0): 9–16, 1984.
- Bernardini, A., Modena, C., Turnšek, V., Vescovi, U., A comparison of three laboratory test methods used to determine the shear resistance of masonry walls, *Proceedings, 7th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol.7: 181–184, 1980.
- Bosiljkov, V., Tomažević, M., Lutman, M. Optimizacija oblike zidakov in tehnologije zidanja na potresnih območjih – zaključno poročilo, Poročilo ZAG 2153/02, Ljubljana, 2004.
- Boštjančič, J., Pogoji modelne podobnosti pri mehaničnih obremenitvah, *Gradbeni vestnik*, 17 (10): 177–181, 1968.
- Boštjančič, J., Možnosti uporabe fotogrametrije v gradbeništvu, *Informacije ZRMK, Gradbeni vestnik* 12 (10 in 11), str. 8, 1971.
- Boštjančič, J., Materiali za modeliranje zidanih zgradb, Poročilo ZRMK, Ljubljana, 1975.
- Boštjančič, J., Sheppard, P., Terčelj, S., Turnšek, V., Use of a modelling approach in the analysis of the effects of repair to earthquake-damaged stone-masonry buildings, *Bolletino di geofisica teorica ed applicata*, Part 2, 19 (72): 1091–1116, 1976.
- Lutman, M., Bohinc, U., Gams, M., Tomažević, M., In situ tests for the assessment of seismic strengthening historic brick masonry walls with carbon fiber fabric, *Proceedings, 15th World Conference on Earthquake Engineering*, CD ROM: paper 4161, 2012.
- Mayes, R.L., Clough, R.W., State-of-the-art in seismic shear strength of masonry – an evaluation and review, *Earthquake engineering research center, University of California, Berkeley*, 1975.
- Odredba o dimenzioniranju in izvedbi gradbenih objektov v potresnih območjih, *Ur. list SR Slovenije*, št. 18, Ljubljana, 1963.
- Raccomandazioni per la riparazione strutturale degli edifici in muratura – DT 2, Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Udine, 1977.
- Sheppard, P., Terčelj, S., Vpliv frekvence na nosilnostne in deformabilnostne karakteristike zidov pri dinamičnih horizontalnih obremenitvah, *Materiali i konstrukcije*, 19 (1): 3–9, 1976.
- Sheppard, P., In-situ test of the shear strength and deformability of an 18th century stone-and-brick masonry wall, *Proceedings, 7th International Brick Masonry Conference*, Vol. 1: 149–160, 1985.
- SIST EN 1998-1:2005, Evrokod 8. Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij, 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe, 2005.
- SIST EN 1996-1:2006, Evrokod 6. Projektiranje zidanih konstrukcij, 1. del: Splošno – pravila za armirano in nearmirano zidovje, 2006.
- Social and economic aspects of earthquakes: Proceedings of the Third International Conference »The social and economic aspects of earthquakes and planning to mitigate their impacts«, Jones, B.G., Tomažević, M. (ur.), Ljubljana, Ithaca, 1982.
- Terčelj, S., Sheppard, P., Turnšek, V., Seizmična odpornost opečnih zgradb, II. del, Poročilo ZRMK 63/74, Ljubljana, 1975.
- Terčelj, S., Boštjančič, J., Sheppard, P., Turnšek, V., Seizmična odpornost tipičnih kamnitih zgradb na Kozjanskem. Poročilo ZRMK 107/75, Ljubljana, 1976.
- Tomažević, M., Izpopolnitev računalniškega programa POR, Poročilo ZRMK-IK, Ljubljana, 1978.
- Tomažević, M., Turnšek, V., Lateral load distribution as a basis for the seismic resistance analysis of masonry buildings, *Proceedings of the International research conference on earthquake engineering*, Skopje: 455–488, 1980.
- Tomažević, M., Sheppard, P., Revitalizacija kamnitih zidanih zgradb z vidika seizmične zaščite, *Gradbeni vestnik*, 32 (4–5): 63–70, 1983.
- Tomažević, M., Žarnić, R., The effect of horizontal reinforcement on the strength and ductility of masonry walls at shear failure. *Proceedings, 7th International Brick/Block Masonry Conference*, Vol. 2: 1291–1392, 1985.
- Tomažević, M., Sheppard, P., In-situ ispitivanja nosivosti zidova starih zidanih zgradb, *Zbornik radova 2, 4. kongres saveza društava za seizmičko građevinarstvo Jugoslavije*, Cavtat: 85–92, 1986.
- Tomažević, M., Dynamic modelling of masonry buildings: storey mechanism as a simple alternative, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 15 (6): 731–749, 1987a.
- Tomažević, M., Dimenzioniranje armiranega zidovja na potresno obtežbo, *Gradbeni vestnik*, 36 (11-12): 260–268, 1987b.
- Tomažević, M., Modena, C., Seismic behaviour of masonry buildings with a mixed structural system: earthquake simulator study of three-storeyed building models, *European Earthquake Engineering*, 3 (1): 29–40, 1989a.
- Tomažević, M., Lutman, M., Seismic resistance of reinforced masonry walls, *Proceedings, 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. 6: 97–109, 1989b.
- Tomažević, M., Lutman, M., Weiss, P., The seismic resistance of historical urban buildings and the interventions in their floor systems : an experimental study, *The Masonry Society journal*, 12 (1): 77–86, 1993a.

- Tomažević, M., Apih, V., The strengthening of stone-masonry walls by injecting the masonry-friendly grouts, *European earthquake engineering*, 7 (1): 10–20, 1993b.
- Tomažević, M., Weiss, P., Seismic behavior of plain and reinforced masonry buildings, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 120 (2): 323–338, 1994.
- Tomažević, M., Lutman, M., Petković, L., Seismic behavior of masonry walls : experimental simulation, *Journal of Structural Engineering*, 122 (9): 1040–1047, 1996a.
- Tomažević, M., Lutman, M., Seismic behavior of masonry walls: modeling of hysteretic rules. *Journal of Structural Engineering*, 122 (9): 1048–1054, 1996b.
- Tomažević, M., Lutman, M., Weiss, P., Seismic upgrading of old brick-masonry urban houses: tying of walls with steel ties, *Earthquake Spectra*, 12 (3): 599–622, 1996c.
- Tomažević, M. in Klemenc, I., Seismic behavior of confined masonry walls, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 26 (10): 1059–1071, 1997a.
- Tomažević, M. in Klemenc, I., Verification of seismic resistance of confined masonry buildings, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 26 (10): 1073–1088, 1997b.
- Tomažević, M., Preiskave modelov zidanih stavb na potresni mizi. *Gradbeni vestnik*, 57 (9): 238–256, 1998a.
- Tomažević, M., Ocenjevanje uporabnosti po potresu poškodovanih objektov, Ljubljana: Ministrstvo za obrambo, Uprava RS za zaščito in reševanje, 1998b.
- Tomažević, M., Lutman, M., Bosiljkov, V., Robustness of hollow clay masonry units and seismic behaviour of masonry walls, *Construction and Building Materials*, 20 (10): 1028–1039, 2006.
- Tomažević, M., Lutman, M., Heritage masonry buildings in urban settlements and the requirements of Eurocodes: the experience of Slovenia, *International Journal of Architectural Heritage*, 1 (1): 108-130, 2007.
- Tomažević, M., Klemenc, I., Weiss, P., Seismic upgrading of old masonry buildings by seismic isolation and CFRP laminates: a shaking-table study of reduced scale models, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7 (1): 293–321, 2009a.
- Tomažević, M., Shear resistance of masonry walls and Eurocode 6 : shear versus tensile strength of masonry. *Materials and Structures*, 42 (17): 889–907, 2009b.
- Tomažević, M., Weiss, P., Displacement capacity of masonry buildings as a basis for the assessment of behaviour factor: and experimental study, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8 (6): 1267–1294, 2010.
- Tomažević, M., Weiss, P., Robustness as a criterion for use of hollow clay masonry units in seismic zones: an attempt to propose the measure, *Materials and Structures*, 45 (4): 541–559, 2012a.
- Tomažević, M., Gams, M. (2012), Shaking table study and modelling of AAC confined masonry buildings, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10 (3): 863–893, 2012b.
- Tomažević, M., Gams, M., Berset, T., Seismic strengthening of masonry walls with composites: an experimental study, *Građevinski materijali i konstrukcije*, 56 (2): 3–18, 2013.
- Tomažević, M., Gams, M., Berset, T., Strengthening of stone masonry walls with composite reinforced coatings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13 (7): 2003–2027, 2015.
- Triller, P., Gams, M., Tomažević, M., Seismic behaviour of multistorey strengthened URM masonry shear walls with opening: an experimental study. 16th World Conference on Earthquake Engineering, sprejeto za objavo v zborniku, 2016.
- Turnšek, V. in Čačovič, F., Teoretska i eksperimentalna istraživanja nosivosti zidova od opeke, *Naše građevinarstvo*, 24 (10): 217–223, 1970a.
- Turnšek, V., Reisner, J., Aparatura za seizmičke opite, *Materijali i konstrukcije*, 15 (3): 15–19, 1970b.
- Turnšek, V., Čačovič, F., Some experimental results on the strength of brick masonry walls, *Proceedings, 2nd International Brick-Masonry Conference, British Ceramic Society, Stoke-on-Trent*: 149–156, 1971.
- Turnšek, V., Terčelj, S., Razporeditev dinamične horizontalne sile na zidne elemente opečnih zgradb, *Simpozijum o prameni savremenih dostignuća u našem građevinarstvu u oblasti materijala i konstrukcija*, knjiga 2, ref. 2/13, 1972.
- Turnšek, V., Terčelj, S., Sheppard, P., Tomažević, M., The seismic resistance of stone-masonry walls and buildings, *Proceedings, 6th European Conference on Earthquake Engineering, Vol. 3*: 255–262, 1978.
- Turnšek, V., Sheppard, P., The shear and flexural resistance of masonry walls, *Proceedings of the International research conference on earthquake engineering*, Skopje: 517–568, 1980.
- Umek, A., Primerjava odpornosti med neojačenimi in z vertikalnimi zidnimi vezmi ojačenimi elementi zidanih zgradb ter armiranimi zidovi, *Gradbeni vestnik*, 20 (10): 241–248, 1971.
- Vugrinec, E., Izvedba povezovanja zidov z jeklenimi vezmi v praksi, *Informacije ZRMK, Gradbeni vestnik*, 26 (7–8), 1977.
- Žarnić, R. in Tomažević, M., Obnašanja armiranobetonskih okvirov z zidanimi polnili pri potresnih obtežbah, *Gradbeni vestnik*, 33 (9-10): 237–250, 1984.
- Žarnić, R., Tomažević, M., Velechovsky, T., Experimental study of methods for repair and strengthening of masonry infilled reinforced concrete frames, *Proceedings, 8th European Conference on Earthquake Engineering, Vol. 6*: 11.1/41–48, 1986.
- Žarnić, R., Tomažević, M., Experimental study of masonry infilled r/c frames subjected to cyclic loading, *International Symposium on Earthquake Countermeasures, Beijing*, str. 12, 1988.