Proračun seizmičkog odziva zgrada bez krutih stropova

Morić, Dragan

Source / Izvornik: **Građevinar, 2000, 52, 673 - 681**

Journal article, Published version
Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:730835

Rights / Prava: Attribution 4.0 International/Imenovanje 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

GRAĐEVINSKI I ARHITEKTONSKI FAKULTET OSIJEK
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Repository / Repozitorij:

Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

UDK 624.042+624.025:699.64 *Primljeno 30. 3. 2000.*

Proračun seizmičkog odziva zgrada bez krutih stropova

Dragan Morić

Ključne riječi

zgrada bez krutih stropova, modeliranje, zid od kamena, stropna konstrukcija, mehanizam sloma

D. Morić *Izvorni znanstveni rad*

Proračun seizmičkog odziva zgrada bez krutih stropova

U radu se opisuje za inženjersku praksu prihvatljiv način modeliranja spoja dvaju međusobno okomitih zidova od kamena. Osim toga prikazan je prijedlog postelastičnoga, nelinearnog ponašanja zida opterećenog u ravnini i okomito na svoju ravninu te elementa koji određuje njihovu prostornu vezu. Na taj način moguće je prostorno modelirati stare kamene zgrade spomeničke baštine i na tom modelu provesti seizmički proračun u nelinearnom području te interpretirati mehanizam sloma.

Key words

building without rigid floors, modeling, stone wall, floor structure, failure mechanism

D. Morić *Original scientific paper*

Designing seismic response of buildings without rigid floors

A practical and technically acceptable method for modeling connection between two stone walls perpendicular to one another is described in the paper. In addition, a proposal is given for the post-elastic non-linear behavior of the wall subjected to load in its own plane and perpendicular to it, and for the element that defines their relationship in space. This enables spatial modeling of old stone buildings belonging to national monument heritage. The obtained model can then be used to conduct a seismic analysis in the non-linear area, which is followed by interpretation of the failure mechanism.

Mots clés

bâtiment sans assemblages rigides, modélisation, mur en pierre, plafond, mécanisme de rupture

D. Morić *Ouvrage scientifique original*

Calcul de la réponse sismique des bâtiments sans plafonds rigides

Cet article décrit une méthode acceptable pour la pratique de l'ingénieur de la modélisation de l'assemblage de deux murs en pierre perpendiculaires l'un par rapport à l'autre. De plus, on fournit un proposition de comportement post-élastique, non linéaire d'un mur chargé sur son plan et perpendiculairement à son plan, ainsi que de l'élément qui en détermine la liaison spatiale. Ceci permet de modéliser dans l'espace les vieux bâtiments classés en pierre, d'effectuer sur ce modèle le calcul sismique dans la zone non linéaire et d'interpréter le mécanisme de rupture.

Schlüsselworte:

Gebäude ohne starrer Decken, Modelieren, Steinmauer, Deckenkonstruktion, Bruchmechanismus

D. Morić *Wissenschaftlicher Originalbeitrag*

Berechnung der seismischen Reaktion von Gebäuden ohne starrer Decken

Im Artikel beschreibt man ein für die Ingenieurspraxis annehmbares Verfahren für das Modelieren der Verbindung zweier gegenseitig senkrechter Steinwände. Ausserdem ist ein Vorschlag des postelastischen, nichtlinearen Betragens einer Wand, belastet in ihrer Ebene und senkrecht dazu dargestellt, sowie des Elements welches deren räumliche Verbindung bestimmt. Auf diese Weise ist es möglich alte Steingebäude der geschichtlichen Erbschaft räumlich zu modelieren, an diesem Modell die seismische Berechnung im nichtlinearen Bereich durchzuführen und den Bruchmechanismus zu interpretieren.

Autor: Doc. dr. sc. **Dragan Morić**, dipl. ing. građ. Građevinski fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Drinska 16a

1 Uvod

Današnje metode proračuna seizmičkog odziva zgrada temelje se na aksiomu *apsolutno krutih stropnih ploča*. Ako zbog konzervatorskih uvjeta nije dopušteno višekatne zidane građevine spomeničke vrijednosti sanirati ugradbom krutih armiranobetonskih stropnih konstrukcija, konstruktor mora odrediti seizmičku otpornost građevine na način koji propisima nije precizno određen.

U ovom radu prikazan je prijedlog postupka proračuna na temelju kojega je moguće analizirati seizmički odziv takvih građevina, s inženjersko-aplikativnim zaključcima.

Ovaj prijedlog proračuna temelji se na obrazloženom izboru modela konstrukcije, potresnog opterećenja, karakteristika gradiva i prigušenja te na numeričkoj analizi usklađenoj s izabranim modelima. Prijedlog proračuna je valoriziran usporedbom s rezultatima objavljenog eksperimenta.

2 Model konstrukcije građevine

Model konstrukcije mora što realnije interpretirati vlastita dinamička svojstva konstrukcije: periode i oblike, budući da odnos između vlastitih perioda i predominantnih perioda potresa određuje dinamičku amplifikaciju potresnog opterećenja. Kamene građevine spomeničke baštine uglavnom su nekoaksijalne konstrukcije na čija dinamička svojstva bitno utječe krutost stropnih konstrukcija u vlastitoj ravnini. Optimalna interpretacija vlastitih dinamičkih svojstava takvih konstrukcija može se postignuti prostornim modelom. To mora biti model koji realno interpretira krutosti i vertikalnih i horizontalnih konstrukcijskih elemenata te njihovu međusobnu vezu, raspored i veličinu masa.

Karakteristična su oštećenja kamenom zidanih građevina (slika 1.):

- oštećenje zidova čija se ravnina poklapa sa smjerom potresa (*in plane* zidovi)
- oštećenja (ispadanje, prevrtanje) zidova okomitih na smjer potresa (*out of plane* zidovi)
- oštećenje uglova odnosno spoja tih dvaju okomitih zidova.

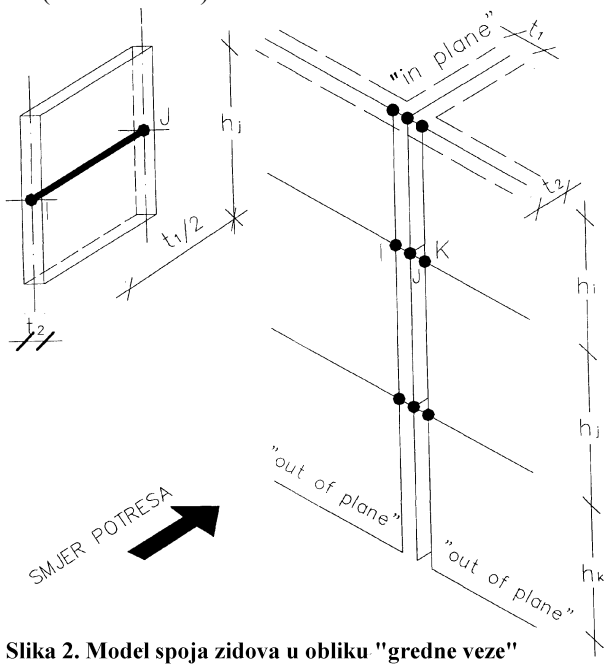


Slika 1. Karakteristična oštećenja kamenom zidanih zgrada u potresu

Zbog toga u prostornom modelu konstrukcije upravo ti elementi moraju biti obvezatno modelirani budući da se njihovim oštećivanjem mijenjaju dinamičke karakteristike građevine. Osim njih obvezatno je u model uključiti i stropne konstrukcije i njihovu vezu sa zidovima jer i o tome uvelike ovisi odziv konstrukcije i mehanizam sloma.

Zbog navedenih razloga predlaže se načiniti prostorni model konstrukcije koji sadrži sljedeće konačne elemente:

- stropa, i to bilo ploče realne debljine povezane sa zidovima, bilo drvenoga grednika čije su grede modelirane kao poluzglobno povezani štapovi sa zidovima na koje se oslanjaju
- zidova u smjeru djelovanja potresa (*in plane*) s otvorima, modeliranih kao posmični (*shear*) elementi,
- zidova okomitih na smjer djelovanja potresa (*out of plane*) s otvorima, modeliranih kao elementi ljuske (*shell elements*).

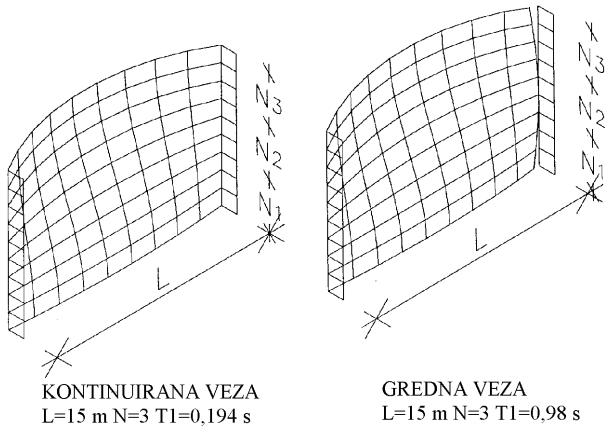


Slika 2. Model spoja zidova u obliku "gredne veze"

Posebna pažnja posvećena je modeliranju "veze" međusobno okomitih zidova. Realno je stanje u konstrukciji uglovni spoj međusobno okomitih nosivih zidova. Veza nije apsolutno kruta, tj ne radi se o potpuno upetom ležaju *out of plane* zidova, budući da postoji rotacija oko vertikalne osi građevine čija veličina ovisi o krutosti spoja zidova. Krutost spoja ovisi o debljini zidova i osnom opterećenju. Kako se radi o nosivim zidovima, oni su gotovo uvijek u pojedinim katovima jednake debljine. Analizirajući mehanizam sloma starih kamenih zgrada, prvenstveno pojavu sloma, tj. ispadanja zidova okomitih na smjer potresa (*out of plane*), uočeno je da do njega dolazi nakon pojave degradacije uglovne veze. Ovaj mehanizam započinje od vrha zgrade prema podnožju. Da bi se moglo interpretirati slom veze ugla, koji je neduktilan, potrebno je modelirati što jednostavniju verziju te veze. Zbog toga je odabran model pojednostavljene veze grednim elementom u ravnini stropne konstrukcije. Duljina "grede" (*l)* jednaka je polovici debljine zida okomitog na smjer grede (*in plane*), širine *t* koja je jednaka debljini zida u ravnini grede (*out of plane*), a visine (*h*) jednake je ukupnoj visini kata na čijem se vrhu

nalazi. Na taj način "greda" svojom geometrijom interpretira stvarni volumen uglovnog spoja dvaju zidova, a svojim položajem (u ravnini stropne konstrukcije) i načinom zadavanja (beam element), u prostornom modelu konstrukcije, jest zapravo element koji prenosi reakcije asinkronog osciliranja *out of plane* zida te je ujedno dio mehanizma povezanosti zidova koji, manje ili više kruto ostvaruje, stropna konstrukcija (slika 2.)

Opisani način modeliranja spoja zidova u obliku "gredne veze" verificiran je nizom proračuna u kojima je numerički provedena usporedba rezultata tako koncipiranog modela veze dvaju zidova s rezultatima proračuna modela gdje je veza ostvarena stvarnom "kontinuiranom" vezom (slika 3.).



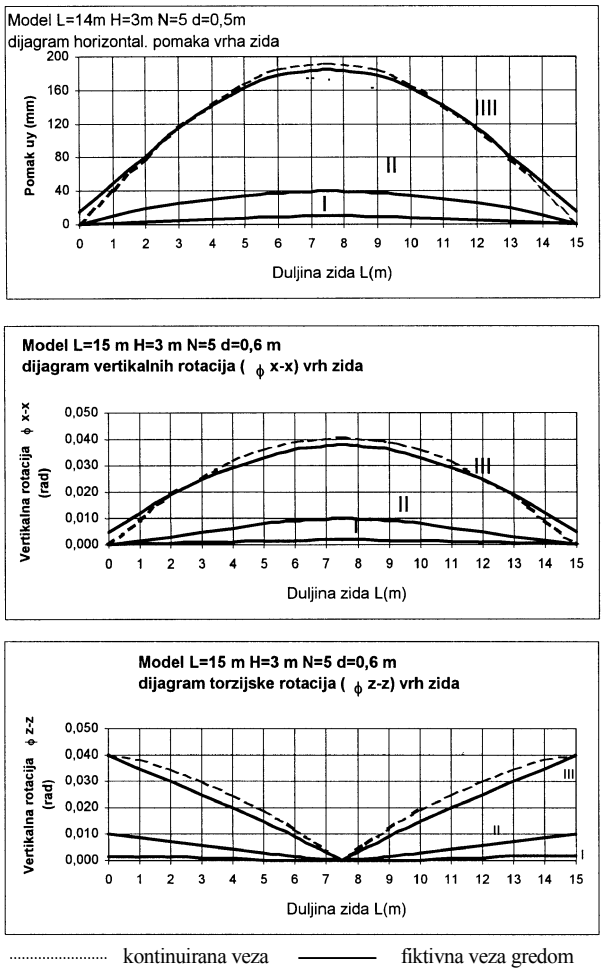
Slika 3. Usporedba odziva zida duljine L = 15m i visine 9m (N = 3), za oba tipa uglovne veze

U tim proračunima variran je odnos duljine (L) *out of plane* zida, koji se povezuje s dva kruta *in plane* zida prema konstantnoj katnoj visini h = 3m (odnosi L/h = 15/3; 10/3 i 5/3), te broj katova N od 1 do 5. Oba modela imaju slobodne horizontalne pomake okomito na zid te rotacije oko horizontalne i vertikalne osi. Proračuni su provedeni modalnom (CQC) analizom, a kao input opterećenje uporabljen je spektar potresa Petrovac (Crna Gora) iz 1979. godine. Usporedni rezultati prikazani su grafički na slici 4.

Uspoređeni su rezultati proračuna vlastitih oscilacija (period i oblik prvog tona na slici 3.), kao i veličine horizontalnog pomaka, rotacije oko horizontalne osi i rotacije oko vertikalne osi, u horizontalnim ravninama svih katova po cijeloj duljini *out of plane* zida (slika 4.).

Podudarnost rezultata proračuna može se ocijeniti vrlo dobrom i prihvatljivom za inženjersku praksu. Manje su izražene razlike u rezultatima proračuna za duži zid L =15 m (u prosjeku 2%), nego za kraći zid (L = 5 m), gdje se razlike kreću u prosjeku do 10%.

Budući da je bitno lakše interpretirati postelastično stanje grede kao uglovne veze nego kontinuirane veze po izvod nici, a usporedba rezultata provedenih dinamičkih prora



Slika 4. Usporedba deformacija zida duljine L = 15m i visine 9m (N = 3), za oba tipa uglovne veze

čuna je prihvatljiva, logično je prihvatiti i testirati takav način modeliranja spoja dvaju zidova u prostornom modelu realne građevine.

3 Model potresnog opterećenja

Usvojeni model potresnog opterećenja u ovoj analizi jest vremenski zapis ubrzanja tla budući da sadrži tri najbitnija dinamička parametra gibanja podloge: maksimalno ubrzanje, predominantne periode i realno vrijeme trajanja, a i kompatibilan je nivou složenosti modela konstrukcije. Osim tog argumentiranog razloga još je zbog jednog razloga vremenski zapis odabran da bi se mogla provesti valorizacija rezultata proračuna usporedbom s rezultatima eksperimenta kojega su zapisi poznati i numerički određeni.

4 Modeliranje nelinearnosti gradiva

4.1 Ideja i pristup problemu

Uza sve aproksimacije i nesigurnost što ih donosi seizmički proračun, inženjerski je dopustivo "točnu" nelinearnu analizu na prostornom modelu pojednostaviti pseudoneli-

nearnim postupkom koji je u biti niz linearnih analiza. Nelinearnost se u takvom slučaju formulira tako da je gradivo u svakoj proračunskoj fazi linearno izotropno, ali s različitim vrijednostima elastičnih karakteristika. Dakle, kada gradivo dosegne svoje nelinearno područje pod opterećenjem pretpostavlja se da ono postaje opet linearno izotropno gradivo s novim, nižim vrijednostima elastičnih karakteristika. Pri tome treba korektno opisati nelinearnost gradiva i promjenu prigušenja, na način da se slijedi obvojnica odnosa promjene odabrane elastične karakteristike gradiva i mjerodavnog parametra odgovora konstrukcije. Korektan unaprijed zadani odnos u funkciji je dobrog poznavanja ponašanja konstruktivnih elemenata zidane građevine. Zbog toga je potrebno pomno promotriti i analizirati mehanizme i ponašanje zidova paralelnih smjeru potresa (*in plane* zidova), zidova okomitih na smjer potresa (*out of plane* zidova) i njihovih uglovnih veza. Pravila nelinearnosti odrediti će se za svaki od njih odvojeno.

*4.2 Zidovi opterećeni u svojoj ravnini (*in plane *zidovi)*

Ovaj konstrukcijski element je jedini istraženi konstrukcijski element zidanih zgrada pri potresnom opterećenju. Poznato je da se karakteristična deformacija *in plane* zida sastoji od rotacijske i posmične komponente. S obzirom na odnos duljine i katne visine zida njihov se udio u ukupnoj deformaciji mijenja, pa razrada teorijskog modela tu činjenicu obvezatno mora uzeti u obzir. Rotacijska komponenta u funkciji je krutosti (EI), a posmična komponenta u funkciji je posmične krutosti (GA).

Parametri odgovora zida u dinamičkoj analizi su apsolutni horizontalni pomak (u) i rotacija u ravnini zida (φ). Također je, istraživanjem mehanizma sloma (posmik, savijanje i posmik) s pomoću interaktivnih dijagrama, utvrđeno da je za dimenzije i osno opterećenje realnih konstrukcija mjerodavan posmični slom zida.

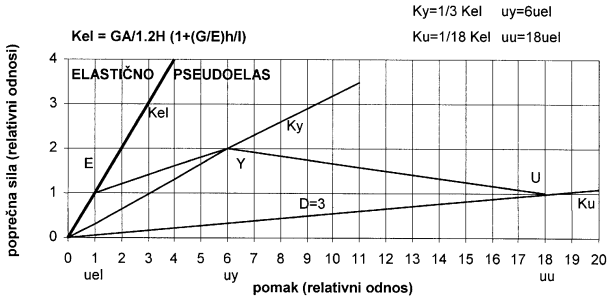
Zbog toga je modul posmika (G) odabran kao parametar čija će promjena interpretirati ponašanje zida u nelinearnom području. Utjecaji rotacijskih deformacija i promjena rotacijske krutosti neće biti eliminirani. Naime Poissonov koeficijent (μ) zadržat će se tijekom cijele analize konstantnim, pa će i modul elastičnosti (E) slijediti linearno pad vrijednosti modula posmika (G) ovisno o unaprijed određenom, obvojnicom zadanom, radnom dijagramu.

Posmična deformacija (γ) ovisi o vrijednosti modula posmika (G), a ujedno je funkcija pomaka (u) po visini zida. Kako se nelinearnost za svaki zid po katovima modelira različito zbog promjene osnog opterećenja, najlogičnije je odabrati relativni međukatni pomak zida ($\Delta = u/h$), kao karakterističan parametar odziva konstrukcije.

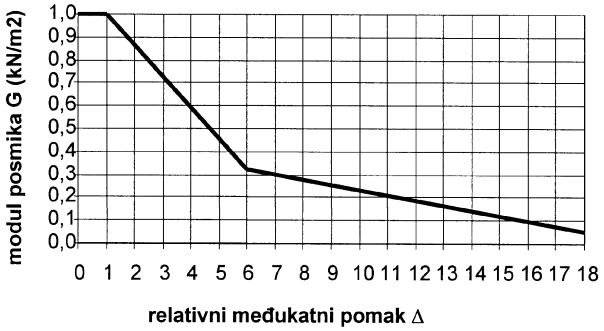
Dakle, nelinearno ponašanje zida opterećenog u svojoj ravnini (*in plane* zid) odredit će se obvojnicom odnosa modula posmika (G), kao karakteristikom gradiva i relativnoga međukatnog pomaka zida (Δ), kao karakterističnim parametrom odziva konstrukcije.

Nelinearni odnos relativnoga međukatnog pomaka i modula posmika treba biti preslikani odnos nekoga idealiziranoga radnog dijagrama zida koji sadrži idealizirane promjene sekantne krutosti zida.

Analizom niza histereznih krivulja ziđa [1] utvrđeno je da realne histerezne krivulje najbolje oslikava idealizirani trilinearni radni dijagram (slika 5.). U skladu s pretpostavkom da je promjena modula posmika linearna funkcija promjene sekantne krutosti zida, idealizirani model neelastičnog ponašanja, koji je načinjen u funkciji usvojenog trilinernog radnog dijagrama, prikazan je na slici 6.



Slika 5. Idealizirani radni dijagram *in-plane* zida

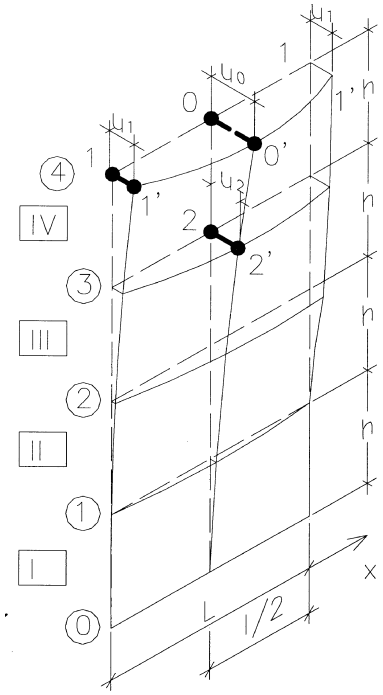


Slika 6. Idealizirani model nelinearnog ponašanja *in-plane* zida

*4.3 Zidovi opterećeni okomito na svoju ravninu (*out of plane *zidovi)*

Građevine spomeničke baštine često imaju seizmički vrlo nepovoljnu dispoziciju. Nepridržani fasadni zidovi duljine i do 20 metara, visine približno 4 metra, s "mekanom" stropnom konstrukcijom drvenog grednika, primjeri su dispozicija pri kojima analiza seizmičke otpornosti građevine mora uzeti u obzir i zidove okomite na smjer djelovanja potresa.

Svaki zid određen je geometrijskim i mehaničkim karakteristikama. Dva relativna međupomaka na vrhu zida u sredini njegove duljine (L) na vrhu katne visine (h) određuju deformacijsko stanje zida: δ_l je relativni katni međupomak u horizontalnoj ravnini stropa, a δ_h relativni međukatni pomak u vertikalnoj ravnini po visini zgrade (slika 7.).



Slika 7. Deformacija *out-of-plane* zida

Izrazi za momente savijanja oko vertikalne (m_l) i horizontalne osi (m_h) mogu se napisati kao:

$$m_l = K_e\,[\delta^2 u / \delta x^2 + \mu\,(\delta^2 u / \delta z^2)]$$
$$m_h = K_e\,[\delta^2 u / \delta z^2 + \mu\,(\delta^2 u / \delta x^2)]) \quad (1)$$

gdje je:

$K_e = (E_e \times t^3)/12$ krutost zida, a t debljina zida.

Uz grubu aproksimaciju $\Delta x = L/2$ i $\Delta z = h$ i uz zanemarivanje poprečne deformacije, usvajaju se približni izrazi za momente savijanja:

$$m_h = (K_e \times \delta_h)/\mathrm{h} \quad (2)$$

$$m_l = (K_e \times \delta_h)/(L/2) \quad (3)$$

Vrijednosti momenata savijanja na "kraju područja elastičnosti" m_h^y i m_l^y ovise o karakterističnim čvrstoćama ziđa na savijanje i to onoj paralelno sa sljubnicama i onoj okomitoj na sljubnice. U [2] se navode vrijednosti karakterističnih čvrstoća zidova na savijanje:

čvrstoća na savijanje paralelno sa sljubnicama
$f_{sp} = 0{,}1$ MPa (4)

čvrstoća na savijanje okomito na sljubnice
$f_{so} = 0{,}3$ MPa (5)

Ako usporedimo te iznose sa srednjom vrijednošću tlačne čvrstoće kamenih zidova $f_c = 4$ MPa, određene nizom ispitivanja *in situ*, analiziranih u [1] onda se, u funkciji tlačne čvrstoće, dobije:

$$f_{sp} = 0{,}025\,f_c \quad (6)$$
$$f_{so} = 0{,}075\,f_c \quad (7)$$

Veličine pomaka (δ_h^y i δ_l^y) pri kojima prestaje "elastičnost", odnosno pri kojima će se dosegnuti navedene čvrstoće ziđa na savijanje (f_{sp} i f_{so}) su:

$$\delta_h^y = 0{,}050\,h\,[(f_c/E_e)\,(L/t)]$$
$$\delta_l^y = 0{,}075\,\mathrm{L}\,[(\mathrm{f_c}/E_e)\,(h/t)] \quad (8)$$

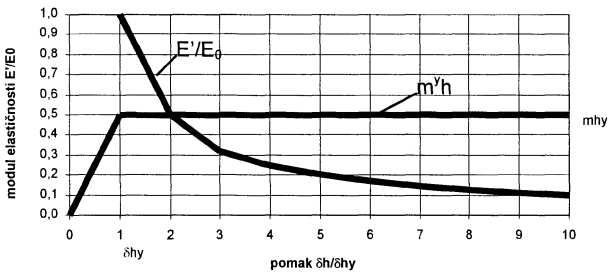
gdje su:

δ_h^y - relativni međukatni pomak u vertikalnoj ravnini koji dovodi do dosezanja čvrstoće zida na savijanje paralelno sa sljubnicama ($0{,}025 \times f_c$)

δ_l^y - relativni katni međupomak u horizontalnoj ravnini koji dovodi do dosezanja čvrstoće zida na savijanje paralelno s reškama ($0{,}075 \times f_c$).

Izlazak iz tako zamišljenog "područja elastičnosti" riješen je linearnom promjenom modula elastičnosti E_e. Usvojen je elastoplastični radni dijagram odnosa m-δ_h, pa se smanjenje krutosti *out of plane* zida u katu određuje promjenom modula elastičnosti zida E'. Promjena se određuje linearnim odnosom, ovisno o dosegnutom međukatnom pomaku d_h' i njegovu odnosu prema unaprijed određenom pomaku pri pojavi oštećenja d_h^y, (slika 8.):

$$E' = E_{el}\,(d_h^y / d_h') \quad (9)$$



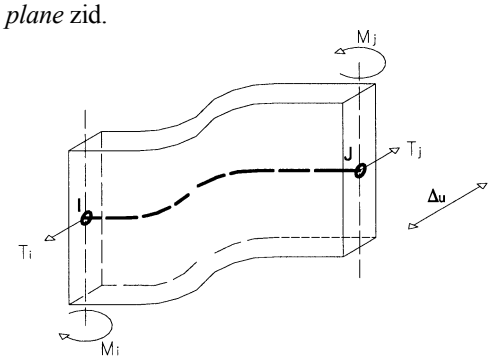
Slika 8. Idealizirani model nelinearnosti *out-of-plane* zidova

4.4 Greda koja povezuje zidove

Numeričkom usporedbom kontinuirane katne uglovne veze s pojednostavnjenom "grednom" vezom, pokazano je da usvojeno pojednostavnjenje, u elastičnom području, inženjerski dosta dobro oponaša stvarnu vezu. Greda svojom krutošću oponaša čitavu katnu visinu i površinu po kojoj se zidovi međusobno spajaju. Uglovni je spoj ležajna linija *out of plane* zida. Taj kontinuirani ležaj po izvodnici svojom rotacijskom krutošću preuzima torzijski moment oko vertikalne osi, a svojom posmičnom krutošću horizontalnu poprečnu silu po katnoj visini.

Slom ugla po visini događa se zbog torzijskog momenta, prekoračenjem posmičnog naprezanja po horizontalnoj površini ugla, ili posmičnim slomom vertikalne katne površine ($t \times h$) spoja, zbog reakcije poprečnih sila. Oba tipa sloma su funkcija osnog opterećenja σ_o ugla, pa se to mora uzeti u obzir. Evidentno je da se radi o složenom stanju naprezanja u uglovnoj vezi po katnoj visini.

Model veze koncipiran je tako da vezu između *in plane* i *out of plane* zidova čine vezne grede dimenzija: širina grede (t) jednaka je debljini *out of plane* zida, visina grede (h) jednaka je katnoj visini i duljina grede ($t/2$) je polovica debljine *in plane* zida. Na slici 9. prikazana je deformacija toga grednog elementa u modelu konstrukcije preko kojeg se prenosi reakcija asinkronog osciliranja *out of plane* zida na *in plane* zid.



Slika 9. Deformacija uglovne gredne veze

Budući da je horizontalni pomak u smjeru djelovanja potresa odabran kao parametar odziva konstrukcije, evidentno je da greda svojom velikom posmičnom krutošću predstavlja "kratki stup". Naime rotacijske deformacije i moment savijanja ne mogu se razviti budući da je dominantan posmični slom.

U skladu s navedenim odabran je sljedeći model nelinearnosti:

Posmična krutost štapa je općenito

$$K = (G \times A)/(1{,}2 \times h) \tag{10}$$

Za uglovnu gredu to znači

$$K_g = (G \times t \times h)/(1{,}2 \times 0{,}5\ t) = 1{,}67 \times G \times h \tag{11}$$

Razlika u pomacima rubnih točaka jest

$$\Delta u = T_g/K_g \tag{12}$$

pa je poprečna sila vezne grede modela

$$T_g = 1{,}67 \times \Delta u \times G \times h \tag{13}$$

Ako je sila sloma ugla

$$T^u = \tau^u \times t \times h \tag{14}$$

onda je relativni međupomak krajeva grede pri kojem nastaje slom

$$\Delta u^u = (\tau^u \times t)/(1{,}67 \times G) \tag{15}$$

Kako τ^u ovisi o f_t i σ_o prema izrazu

$$\tau^u = (f_t/1{,}5) \times (1 + (\sigma_o/f_t))^{1/2} \tag{16}$$

to je konačni izraz za relativni međupomak krajeva grede pri kojem nastaje slom vezne grede

$$\Delta u^u = [f_t \times t \times (1 + (\sigma_o/f_t))^{1/2}\ ] / [2{,}50 \times G] \tag{17}$$

U modelu pretpostavljamo potpuni krhki slom, tj. krutost nakon sloma pada na nulu. Uglovna greda ne eliminira se iz modela nego joj se modul posmika reducira na vrijednost koja fizikalno znači zaostalo trenje u uglu. Dakle, vrijedi sljedeći model neelastičnosti (krhki slom):

za $\Delta u > \Delta u^u$, slijedi $G' = 0{,}01\ G_{el.}$ (18)

5 Model prigušenja

Smatra se da je prigušenje oscilacija konstrukcije konstantna veličina do pojave pukotina u nosivom zidu, a nakon pojave pukotina postaje veće jer raste apsorpcija energije. Prigušenje kao ulazni parametar obvezan je kod vremenske analize prostornog modela, a zadaje se kao bezdimenzijska veličina u obliku koeficijenta prigušenja (ξ).

Ako raspolažemo rezultatima eksperimenta, moguće ga je izračunati iz histereznih petlja pojedinih ciklusa izrazom

$$\xi = (E_D / E_p)\ (1/(4\ \pi)\ ) \tag{19}$$

gdje su:

E_D - površina histerezne petlje ciklusa

E_p - potencijalna energija tog ciklusa .

U inženjerskoj će praksi ta mogućnost biti rijetka pa je potrebno pronaći praktičniji način interpretacije promjene prigušenja u neelastičnom području. Kako je koeficijent prigušenja omjer prigušenja i kritičnog prigušenja, a prigušenje se izražava umnoškom koeficijenta prigušenja i kutne frekvencije ovisne o drugom korijenu odnosa krutosti i mase, uz konstantnu masu povećanje koeficijenta prigušenja ξ' proporcionalno je drugom korijenu pada sekantne krutosti u nelinearnom području.

Zbog toga je usvojen način da se promjena koeficijenta prigušenja teorijski izrazi odnos:

$$\xi' = \xi_e \times (K_e/K')^{1/2} \tag{20}$$

Kako je usvojeni radni dijagram *in plane* zidova, koji su uglavnom jedini "apsorberi" energije razvojem oštećenja, trilinearan s odnosima $K^y = (1/3)K_e$ i $K^u = (1/18)K_e$, to su karakteristične vrijednosti prigušenja u ovisnosti o dosegnutim relativnim međukatnim pomacima:

$\xi_e = 5{,}0\%$ do granice elastičnosti (početak oštećenja)

$\xi_y = 8{,}5\%$ do granične nosivosti

$\xi_u = 21{,}2\%$ neposredno pred slom (21)

Navedene brojčane vrijednosti služe samo za proračun i ne treba ih povezati sa stvarnim vrijednostima.

6 Izbor numeričke analize

Izbor numeričke analize mora biti u funkciji cilja koji se proračunom želi postići. Postavljeni cilj jest odrediti odziv zgrade za potresno opterećenje.

Analizirati seizmičku otpornost znači interpretirati ponašanje konstrukcije u neelastičnom području. Neelastično područje određuju postelastične deformacije konstrukcije. Dakle, osim krutosti, potrebno je odrediti još i nosivost i duktilnost njezinih konstruktivnih elemenata te postelastičnu promjenu prigušenja.

Budući da se do sloma geometrija ne mijenja (zanemaren *P*-delta efekt), znači da se u postelastičnoj fazi mijenjaju upravo karakteristike gradiva u nekom odnosu prema postignutim deformacijama.

Ako je taj odnos unaprijed poznat ili pretpostavljen na temelju argumenata, može se pokušati nelinearna analiza pojednostaviti nizom linearnih. U svakoj novoj linearnoj analizi mijenjat će se vrijednosti karakteristika gradiva u odnosu na dosegnute deformacije iz prethodne elastične analize prema određenom pravilu. Dakle pokušano je "pravu nelinearnu analizu" zamijeniti nizom linearnih analiza s promijenjenim elastičnim konstantama u funkciji dosegnutih deformacija iz prethodne analize. Numerička analiza odabrana je, dakle, u duhu modela nelinearnosti gradiva.

7 Valorizacija numeričkog modela eksperimentom

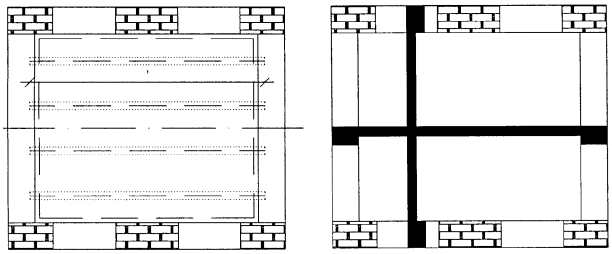
Prijedlog proračuna testiran je numeričkom simulacijom pokusa načinjenog u Zavodu za raziskavo materiala in konstrukcij (ZRMK), Ljubljana, Slovenija 1990. i 1992. godine.

7.1 Eksperiment ZRMK 1990.-1992.

Program ispitivanja temelji se na namjeri da se utvrdi utjecaj postojećih stropnih konstrukcija (nesidreni drveni grednik) i usporedi s tri uobičajena tehnička rješenja ojačanja (sanacije) stropnih konstrukcija: armiranobetonska ploča i povezivanje zidova čeličnim zategama u varijantama: a) strop - drveni grednik i b) strop - svodna konstrukcija. Modeli na kojima je provedeno ispitivanje nisu modeli čitave prototipne građevine, već samo njezina tipičnog dijela, kojim se idealizira tlocrtna dispozicija, ali i pokušavaju zadržati glavne značajke: međusobne razmake okomitih zidova, raspone stropnih konstrukcija te položaj otvora na fasadnim zidovima. Izrađeno je ukupno četiri modela prototipskog segmenta građevine u mjerilu 1:4. Ono po čemu su se modeli razlikovali jesu stropovi i veze među zidovima. Za valorizaciju numeričkog modela bitan je model kod kojega su oba stropa drveni grednici oslonjeni na *in plane zidove*, označen kao *Model A*. Njegova suprotnost je *Model B* kod kojega su oba stropa armiranobetonske pune ploče. Na slici 10. prikazani su tlocrti ispitanih modeli.

Mehaničke karakteristike gradiva ziđa modela utvrđene su prethodnim ispitivanjima standardiziranim postupcima. Dobivene su sljedeće vrijednosti mehaničkih karakteristika ziđa:

$$f_c = 1{,}235 \text{ MPa}, \quad f_t = 0{,}0395 \text{ MPa}, \quad f_t/f_c = 0{,}032,$$
$$E_o = 826 \text{ MPa}, \quad G_o = 122 \text{ MPa}, \quad E_o/G_o = 6{,}77,$$
$$\sigma_o = 0{,}41 \text{ MPa}, \quad \sigma_o/f_c = 0{,}33, \quad E_o/f_c = 669. \qquad (22)$$



Slika 10. Pokus ZRMK. Tlocrti ispitanih modela

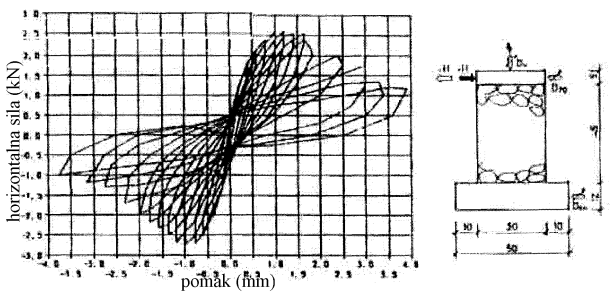
Kao prototipno potresno opterećenje odabrana je *N*-*S* komponenta akcelerograma Petrovac ($a_{gmax.}$= 0,43g) s vremenom trajanja t_d= 6 s, u šest faza. Faze su označene s R025, R050, R075, R100, R150 i R200. Brojevi uz *R* su postoci s kojima je pomnoženo ubrzanje prototipskog akcelerograma i iz njega dvostrukom integracijom određeni pomaci vibro-platforme. Ispitivanje s rastućim intenzitetom opterećenja po fazama odabrano je da bi se mogao pratiti razvoj oštećenja i utvrditi točan mehanizam sloma.

Modeli su sazidani na vibroplatformi i instrumentirani mjernim instrumentima.

7.2 Proračun seizmičkog odziva prema predloženom numeričkom modelu

Za ispitane modele segmenta prototipa načinjen je prostorni model, unaprijed određeni modeli nelinearnog ponašanja gradiva i prigušenja te u skladu s teorijskim algoritmom provedeni svi koraci proračuna za šest faza opterećenja (R025 do R200). Rezultati provedenih proračuna su ubrzanja i pomaci karakterističnih točaka konstrukcije modela koje odgovaraju točkama na kojima je provedeno mjerenje tijekom eksperimenta.

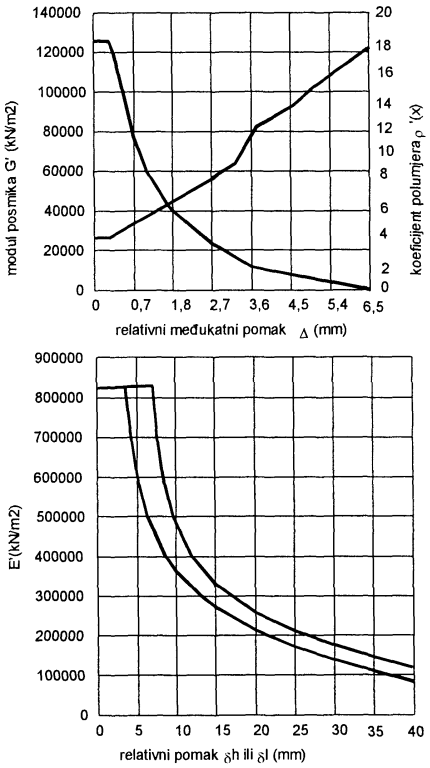
Prostorni model konstrukcije osim svih konstrukcijskih elemenata modela zgrade (zidovi, gredna veza među njima i stropovi) sadržavao je i model vibroplatforme.



Slika 11. Pokus ZRMK. Prethodno ispitivanje ziđa

Nelinearnost zabatnih (*in plane*) zidova određena je na osnovi histerezne krivulje (slika 11.), dobivene eksperimentalnim ispitivanjem karakterističnog zida sazidanog od istog materijala kao i model, opterećenog kombiniranim opterećenjem. Proračunom ciklusa histerezne krivulje utvrđene su karakteristične vrijednosti ispitanog zida.

Transformacija vrijednosti pomaka koje dovode do identične degradacije modula posmika (G') i porasta prigušenja (ξ) za zidove modela, provedena je izjednačivanjem vrijednosti posmične i relativne deformacije. Na taj način određena degradacija modula posmika (G') i porasta prigušenja (ξ') čini usvojeni "nelinearni model" za *in plane* zidove (G'). Nelinearnost fasadnih (*out of plane*) zidova određena je kao degradacija modula elastičnosti fasadnih zidova po elastoplastičnom dijagramu. Oba dijagrama prikazana su na slici 12.



Slika 12. Numerički modeli nelinearnosti zidova modela A i B iz pokusa ZRMK

Nelinearnost veznih uglovnih greda određena je prema izrazima (10) do (18) kao granična vrijednost između pomaka čvorova grede Δ^u pri kojem nastaje krhki slom uglovne veze, a ovisi o graničnom glavnom vlačnom naponu ziđa f_t, osnom opterećenju σ_o, debljini zida t i posmičnom modulu G_o, kako slijedi:

- vlačna čvrstoća ziđa f_t = 39,5 kN/m^2,
- osni napon ziđa σ_o = 0 na vrhu I. kata i σ_o = 16 kN/m^2 na vrhu prizemnog kata
- debljina zida t = 0,12 m
- elastični modul posmika G_o = 122000 kN/m^2.

Proračun graničnog relativnog međupomaka rubnih točaka vezne grede:

- u ravnini stropa I. kata:

$$\tau^u = (39{,}5/1.5) = 26{,}33 \text{ kN/m}^2$$

$$T^u = 26{,}33 \cdot 0{,}12 \cdot 0{,}75 = 2{,}37 \text{ kN}$$

$$\Delta^u = (39{,}5 \cdot 0{,}12) : 2{,}5 \cdot 122000 = 0{,}016 \text{ mm} \qquad (23)$$

- u ravnini stropa prizemlja*:*

$$\tau^u = (39{,}5/1{,}5) \cdot [1+(16/39{,}5)]\ 0{,}5 = 31{,}33 \text{ kN/m2}$$

$$T^u = 31{,}33 \cdot 0{,}12 \cdot 0{,}75 = 2{,}82 \text{ kN}$$

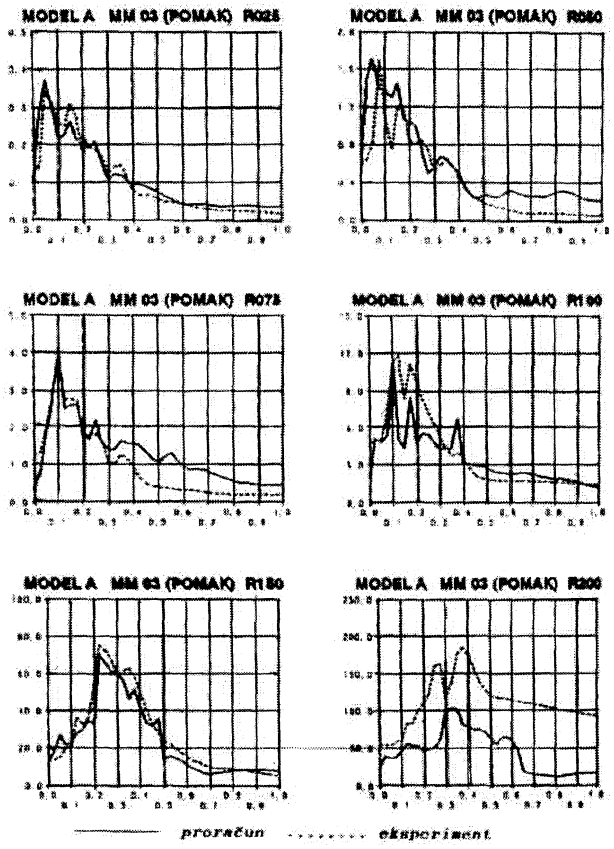
$$\Delta^u = \frac{39{,}5 \cdot 0{,}12 \cdot [1+(16/39{,}5)]0{,}5}{2{,}5 \cdot 122000} = 0{,}018 \text{ mm} \qquad (24)$$

7.3 Komentar rezultata provedenog proračuna

Komentar usporedbe rezultata eksperimenta i proračuna proveden je radi valorizacije prijedloga proračuna. Komentar se daje u sažetom obliku.

7.3.1 Vremenski zapisi odziva konstrukcije

Usporedba je provedena u obliku vremenskog zapisa za sve faze opterećenja (od R025 do R200) za model s nepovezanim zidovima (Model A).



Slika 13. Usporedba eksperimentalnih i proračunanih spektara odziva modela bez krutih stropova za sve faze opterećenja

Radi kvalitetnije i preglednije usporedbe, ti su isti vremenski zapisi podvrgnuti postupku izrade elastičnih spektara apsolutnih pomaka SDOF sustava te su za svaki uspoređeni vremenski zapis dobiveni karakteristični spektri pomaka (slika 13.).

Na temelju usporednih vrijednosti odziva konstrukcije za više točaka (detaljno u [1]) uočava se da je podudaranje izmjerenih i proračunskih vremenskih zapisa karakterističnih pomaka izuzetno dobro do opterećenja R100, vrlo dobro za zapise faze R150, dok se veće razlike uočavaju za fazu R200 u kojoj je došlo do sloma modela.

Utvrđeno je da se grednom vezom spoja zidova i njezinim nelinearnim modelom korektno interpretira faza i intenzitet opterećenja pri kojem nastaje oštećenje ugla na vrhu modela, nakon čega veza zidova prestaje funkcionirati.

7.3.2 Parametri koji određuju postelastično stanje konstrukcijskih elemenata

Ovdje se navode samo odnosi i skraćeni komentar.

Relativni međukatni pomaci (Δ) zabatnih *in plane* zidova podudaraju se gotovo 100%-tno za faze R025 do R100. Za fazu R150 10%, dok je odstupanje u fazi R200 bitno (40%) za model koji ima stropnu konstrukciju drveni grednik. Za model B (armiranobetonske stropne ploče) u prizemlju (posmični slom prizemlja) podudaranje je 100%-tno za fazu R200, što pokazuje korektnu interpretaciju mehanizma sloma.

Relativni međukatni pomaci (δ_h) fasadnih *out of plane* zidova podudaraju se gotovo 100%-tno faze R025-R150 u prizemlju, odnosno faze R025 do R100 u prvome katu. Za fazu R200 u prizemlju odstupanje je oko 15%, dok su najveća odstupanja u predslomnoj fazi R200 za vrijednosti u prvome katu i do 50%.

Relativni katni pomaci (δ_{f2}) fasadnih *out of plane* zidova u prvome katu zapravo određuju "trbuh" ili ispupčenje fasadnog *out of plane* zida. Za prvih pet faza R025 do R150, ni u eksperimentu ni u proračunu vrijednosti ne prekoračuju graničnu vrijednost 6,03mm koja određuje slom savijanjem okomito na sljubnice. Odstupanje u završnoj fazi najveće je kod *Modela A* i iznosi 30%.

Granični pomaci uglovnih greda Δ^u, dobiveni proračunom, vrlo su precizno interpretirali fazu sloma ugla kod svih modela. Ova je činjenica vrlo bitna jer je slom uglovne veze ključan u različitosti globalnih mehanizama sloma.

7.3.3 Histerezne krivulje

Histereze dobivene proračunom ne pokazuju "uštinuća" oko ishodišta karakteristična za posmične sustave, što znači da ne mogu slijediti stvarnu opadajuću krutost. Oblik proračunskih histereza zapravo proizlazi iz faznih razlika vremenskih zapisa pomaka i ubrzanja kada su usrednjene. Međutim vrlo dobro prate razvoj akumulacije katnih oštećenja. Također vrlo je dobra podudarnost kada su u pitanju najveće sile i pomaci u određenoj fazi. Naročito to dolazi do izražaja kada se histereze pretvore u idealizirane anvelopne histereze iz kojih se dobivaju idealizirani radni dijagrami. Ono u čemu se ti idealizirani radni dijagrami razlikuju jest opadajuća krutost nakon ulaska u postelastično stanje.

8 Zaključak

Nakon provedene usporedbe rezultata dobivenih predloženim numeričkim postupkom s rezultatima dobivenim eksperimentom ZRMK, može se zaključiti:

1. Rezultati odziva konstrukcije koji se dobiju proračunom prema predloženom numeričkom postupku pokazuju vrlo dobru korelaciju i u linearnom i u nelinearnom području.
2. Predloženi numerički postupak korektno interpretira razvoj oštećenja i mehanizam sloma.
3. Pokazalo se da je, vodeći računa o nesigurnostima koje općenito sadrže seizmički proračuni realne građevine, predloženim numeričkim postupkom moguće i inženjerski dovoljno pouzdano, analizirati seizmičku otpornost realnih građevina koje imaju krute, ali i fleksibilne stropne konstrukcije koje ne povezuju zidove, što je još važnije za stare kamene zgrade koje su spomenička baština.

LITERATURA

[1] Morić, D.: *Seizmička otpornost kamenih zgrada s obzirom na dopustive sanacijske zahvate na međukatnim konstrukcijama*, Disertacija, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb, 1998.

[2] Aničić, D.; Tomaževič, M.: *Konstruiranje i proračun zidanih zgrada*, dio 2., Građevinski kalendar 1991., Savez građevinskih inženjera i tehničara Jugoslavije, Beograd 1989., str.9.-109.

[3] Tomaževič, M.; Weiss, P.; Velechovsky, T.: *Vpliv togosti stropnih konstrukcij na potresno odpornost starih zidanih zgradb: Preiskave modelov A in B*, Elaborat ZRMK/PI- 90/01, Ljubljana 1990.

[4] Tomaževič, M.; Lutman, M.; Velechovsky, T.; Klemenc, I.: *Vpliv togosti stropnih konstrukcij na potresno odpornost starih zidanih zgradb: Preiskave modelov kamenitih zgradb:* Preiskave Modelov C in D, Elaborat ZRMK/PI- 92/01, Ljubljana 1992.

[5] Tomaževič, M.; Lutman, M.; Weiss, P.; Velechovsky, T: *Vpliv togosti stropnih konstrukcij na potresno odpornost starih zidanih zgradb: Preiskave modelov kamenitih hiš - Konačno poročilo*, Elaborat ZRMK/PI- 92/03, Ljubljana 1992.