

Primljen / Received: 27.3.2013.

Ispravljen / Corrected: 12.6.2013.

Prihvaćen / Accepted: 17.6.2013.

Dostupno online / Available online: 10.7.2013.

Određivanje svojstava tlačnog štapa ispune temeljem cikličkih ispitivanja u ravnini

Autori:



Dr.sc. **Sanja Hak**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
sanja.hak@grad.hr



Dr.sc. **Paolo Morandi**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Paviji
Odsjek za građevinarstvo i arhitekturu
EUCENTRE, Pavia, Italija
paolo.morandi@unipv.it



Prof.dr.sc. **Guido Magenes**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Paviji
Odsjek za građevinarstvo i arhitekturu
EUCENTRE, Pavia, Italija
guido.magenes@unipv.it

Izvorni znanstveni rad

Sanja Hak, Paolo Morandi, Guido Magenes

Određivanje svojstava tlačnog štapa ispune temeljem cikličkih ispitivanja u ravnini

U nelinearnoj analizi AB okvira sa zidanom ispunom jednostavni se zamjenjujući tlačni štap često primjenjuje za modeliranje ispune, posebice u slučaju opsežnih numeričkih proračuna. Stoga je pažljiv odabir odgovarajućih svojstava tlačnog štapa od iznimne važnosti za vjerodostojni prikaz odziva zgrade. U ovom je radu predložen i primijenjen postupak određivanja svojstava tlačnog štapa za prikaz zidane ispune temeljem interpretacije rezultata cikličkih, statičkih ispitivanja u ravnini na uzorcima jednoetažnih, jednorasponskih armiranobetonskih okvira s ispunom i bez nje.

Ključne riječi:

zidana ispuna, zamjenjujući dijagonalni tlačni štap, cikličko ispitivanje u ravnini, granična stanja

Original scientific paper

Sanja Hak, Paolo Morandi, Guido Magenes

Evaluation of infill strut properties based on in-plane cyclic tests

In the nonlinear analysis of masonry infilled RC frame structures, simple strut models are often adopted to represent the masonry infill, particularly in the case of extensive parametric numerical studies. Therefore, a careful definition of the corresponding strut properties is of exceptional significance for achieving a realistic building response. A method for evaluation of masonry infill strut properties is proposed and applied in this paper, based on the interpretation of results obtained by cyclic in-plane testing of single-storey, single-bay bare and infilled RC frame specimens.

Key words:

masonry infill, equivalent diagonal strut, cyclic in-plane testing, limit states

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Sanja Hak, Paolo Morandi, Guido Magenes

Ermittlung der Eigenschaften von Druckstreben für Ausfachungen durch zyklische Versuche in der Ebene

In nichtlinearen Berechnungen von Stahlbetonrahmen mit Ausfachungen aus Mauerwerk werden für die Darstellung der Ausfachungen oft Ersatzstabmodelle angewandt, insbesondere wenn umfangreiche numerische Analysen vorgesehen sind. Um eine realistische Beschreibung des Gebäudeverhaltens zu erzielen, ist die sorgfältige Auswahl entsprechender Eigenschaften der Druckstrebe von entscheidender Bedeutung. In dieser Arbeit ist ein Verfahren für die Charakterisierung des Ersatzstabes für die Darstellung von Ausfachungen mittels der Interpretation von Resultaten zyklischer, statischer Versuche an Proben einfacher einstöckiger Rahmen in der Ebene vorgeschlagen und angewandt.

Schlüsselwörter:

Ausfachung aus Mauerwerk, diagonaler Ersatzstab, zyklische Versuche in der Ebene, Grenzzustände

1. Uvod

Iako za prikaz nekonstrukcijske zidane ispune postoji čitav niz modela različitih razina preciznosti, primjerice [1, 2], primjena je jednostavnog zglobno priključenog tlačnog štapnog elementa pri tvorbi nelinearnih numeričkih modela armiranobetonskih okvira sa zidanom ispunom široko prihvaćena. Takav pojednostavljeni pristup, koji se često upotrebljava u opširnim analizama seizmičkog odziva zgrada, je prikladan posebice kada je proračun usmjeren na određivanje globalnih pomaka konstrukcije. U tom slučaju nije moguće izravno obuhvatiti utjecaje ispune na elemente nosivog sustava prouzročene lokalnim učincima [3] te je moguće promatrati samo odziv ispune u ravnini.

Temeljem praktičnih iskustava prikupljenih na terenu nakon potresa koji su se dogodili posljednjih godina, opisan je niz primjera istovremenog oštećenja zidanih ispuna od opeke zbog opterećenja u ravnini i izvan nje, primjerice [4, 5], upućujući na snažnu povezanost mogućeg otkazivanja izvan ravnine i prethodnog razvoja oštećenja u ravnini koje je također potrebno obuhvatiti provjerama nosivosti [6]. Za zidane ispune izgrađene u potpunom dodiru s obodnom okvirnom konstrukcijom, zahvaljujući stvaranju mehanizma lučnog djelovanja [7], otpornost se neoštećenog ispunskog panela od opeke izvan ravnine, u ovisnosti o omjeru vitkosti, pokazala razmjerno visokom, primjerice [8]. Stoga je u okviru ovog rada pozornost usmjerena ponajviše na određivanje doprinosa nenosive ispune odzivu konstrukcije izazvanog horizontalnim opterećenjem u ravnini, odnosno procjenu odgovarajućeg odziva same ispune.

S namjerom da se ustanovi jednostavan model zidane ispune od opeke, potrebno je obratiti pažnju na određivanje odgovarajućih svojstava zamjenjujućeg dijagonalnog tlačnog elementa. Važnost te činjenice je naglašena ako proračun nije usredotočen samo na odziv okvirne konstrukcije nego i na procjenu ponašanja ispune, odnosno na odgovarajuću raspodjelu oštećenja u ravnini ziđa. Tlačni štapni model zidane ispune uobičajeno je zadan zakonitošću ponašanja uzdužnih deformacija i naprezanja za monotona djelovanja, odnosno odgovarajućim pravilom histereze u slučaju cikličkog opterećenja, te svojstvima koja određuju čvrstoću i krutost, a usko su povezana s postupkom određivanja zamjenjujuće širine dijagonalnog tlačnog elementa, primjerice [9]. Sposobnost deformacije ispune, iznimno važna za ocjenu odgovarajućeg oštećenja, ponajprije je izražena ovisnošću naprezanja o deformacijama koja stoga treba biti pažljivo odabrana.

U ovom je radu predložen postupak određivanja parametara potrebnih za definiranje jednostavnog modela tlačnog štapa za prikaz zidane ispune od opeke temeljem usporedbe eksperimentalnih i numeričkih rezultata koji opisuju ponašanje okvira s ispunom i bez nje. Pri tome je posebna pozornost usmjerena na određivanje vrijednosti deformacija pomoću kojih je opisano nelinearno ponašanje zidane ispune. Polazeći

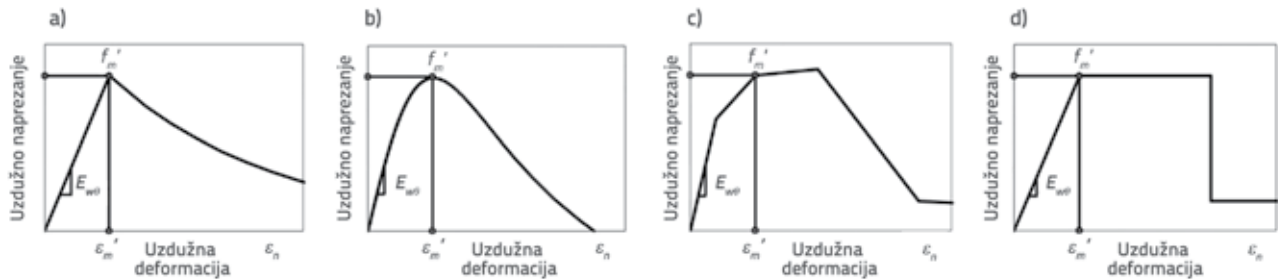
od dobivenih svojstava ispune, potkrijepljenih opažanjima oštećenja postignutih tijekom eksperimentalnih ispitivanja, mogu se definirati kriteriji ponašanja za pojedinačnu ispunu od ziđa. S namjerom da se omogući jednostavna upotreba raspoloživih eksperimentalnih rezultata za primjenu u numeričkim postupcima te dosljedna usporedba svojstava različitih tipova zidane ispune u pogledu čvrstoće, krutosti i sposobnosti deformacije, za tipove ispune od tankog ziđa (primjerice sastavljene od perforirane glinene opeke koja se uobičajeno koristi u Europskoj građevinskoj praksi), primijenjen je postupak interpretacije eksperimentalnih rezultata dobivenih cikličkim, statičkim ispitivanjima u ravnini na uzorcima jednoetažnih, jednorasponskih armiranobetonskih okvira [10]. Predloženi postupak proveden je za tri različita tipa zidane ispune, polazeći od postojećih rezultata dobivenih u prethodnim eksperimentalnim ispitivanjima koja su izvršena na Sveučilištu u Paviji u Italiji [11, 12].

2. Parametri modela zidane ispune

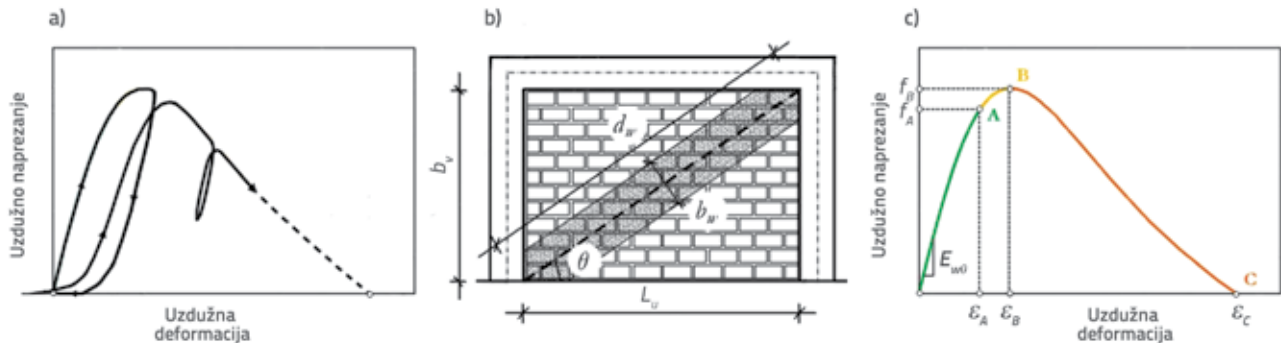
2.1. Pristup modeliranju

Za određivanje svojstava zamjenjujućeg dijagonalnog tlačnog elementa ispune pretpostavljen je nelinearni model konstrukcije utemeljen na teoriji koncentrirane plastičnosti za prikaz armiranobetonskih nosivih elemenata. Stupovi i grede su stoga prikazani jednodimenzionalnim modelom [13] sastavljenim od idealno elastičnog štapnog elementa s plastičnim zglobovima na krajevima, čije je nelinearno ponašanje opisano modificiranim Takedinim zakonom histereze [14]. Omjer pretpostavljene početne krutosti i krutosti nakon početka tečenja određen je faktorom Ramberga i Osgooda [15] temeljem bilinearne idealizacije krivulje ovisnosti momenata savijanja i zakrivljenosti. S obzirom na pretpostavku da je primjenom suvremenih propisa za projektiranje potresne otpornosti postignuto zadovoljavajuće dimenzioniranje i odgovarajuće oblikovanje detalja konstrukcije, smanjenje čvrstoće u plastičnim zglobovima nije uzeto u obzir, a isključena je i mogućnost posmičnog otkazivanja elemenata konstrukcije.

Za određivanje ovisnosti uzdužnih naprezanja i deformacija, pridružene zamjenjujućem dijagonalnom tlačnom elementu ispune, na raspolaganju je niz različitih zakonitosti ponašanja. Primjere je moguće pronaći u ranim otkrićima Klingnera i Bertera [16] (slika 1.a), potom u razvoju povezanih istraživanja (primjerice Crisafulli [17], slika 1.b), odnosno u novijim radovima, primjerice Rodrigues *et al.* [18] (slika 1.c). Općenito pojednostavljenje ponašanja tlačnog štapa za nelinearne statičke analize predložio je Fardis [19] (slika 1.d). U ovom je radu za prikaz odziva zamjenjujuće tlačne dijagonale koja prikazuje zidanu ispunu usvojen Crisafullijev model ovisnosti uzdužnih naprezanja i deformacija [17] (slika 1.b). Sličan je postupak svakako moguće usvojiti i u slučaju donekle izmijenjenih pretpostavki modeliranja vezanih uz prikaz



Slika 1. Ovisnost napreznja i deformacija: a) Klingner & Bertero [16]; b) Crisafulli [17]; c) Rodrigues *et al.* [18]; d) Fardis [19]



Slika 2. a) Crisafullijevo pravilo histereze [17]; b) Model zamjenjujućeg dijagonalnog tlačnog štapa; c) Razine ponašanja pojedinačne ispune od opeke

elemenata nosive konstrukcije, odnosno alternativnog odabira modela zidane ispune. Iako se istraživanja u ovom radu prije svega temelje na nelinearnim statičkim analizama, pripadajuće je Crisafullijevo pravilo cikličke histereze [17] prikazano na slici 2a. Svojstva koja određuju krutost zamjenjujućeg tlačnog štapa ispune u okviru ovog rada utvrđena su određivanjem omjera b_w/d_w , pri čemu je b_w zamjenjujuća širina tlačnog elementa, a d_w je dužina dijagonale zidane ispune (slika 2.b), u skladu s modelom koji su predložili Decanini *et al.* [20], dok je debljina tlačnog elementa t_w pretpostavljena jednaka debljini ziđa. Modul elastičnosti ziđa E_{w0} pridružen smjeru djelovanja tlačne dijagonale određen je temeljem uobičajenog modela za ortotropne elastične materijale izložene ravninskom napreznju.

2.2. Razine ponašanja

Dva značajna parametra mogu se pridružiti opsegu oštećenja zidane ispune, neovisno o modelu ispune koji se koristi, a to su uzdužna deformacija (ili pomak) pri vršnom napreznju (ili sili), povezana s razvojem umjerenog oštećenja, te krajnja deformacija (ili pomak), povezana s postizanjem teškog oštećenja ziđa. Stoga su najvažniji parametri, nužni za definiranje ovisnosti napreznja i deformacija koje je potrebno utvrditi, vršno napreznje f_m' , pripadna deformacija ϵ_m' i krajnja deformacija ϵ_n . Ako je predviđena primjena kalibriranog modela za numeričke analize usmjerene na procjenu oštećenja ostvarenog u nenosivom ziđu, vrijednosti deformacija su od iznimne važnosti, budući da se mogu izravno povezati sa sposobnošću deformacije ispune.

Definicija uvjeta povezanih s pojedinim graničnim stanjima, dana u Europskim propisima za projektiranje potresne otpornosti [21], ne uključuje na cjeloviti način proračunske okolnosti vezane uz oštećenja zidane ispune i ne upućuje na specifične kriterije projektiranja vezane uz utvrđivanje prihvatljivih razmjera štete. Opći zahtjevi ograničenja oštećenja smatraju se ispunjenim ako međukatni pomaci prouzročeni odgovarajućim djelovanjem potresa za svaki kat građevine ne nadmašuju granične međukatne pomake koji su definirani za zgrade s nekonstrukcijskim elementima od krhkih materijala pričvršćenim za konstrukciju, za zgrade s duktilnim nekonstrukcijskim elementima i za zgrade s nekonstrukcijskim elementima pričvršćenim tako da deformacije konstrukcije na njih nemaju utjecaja ili bez nekonstrukcijskih elemenata te iznose 0.50%, 0.75% i 1.00%. Vezano uz projektiranje novih građevina, slični zahtjevi postavljeni su i u drugim propisima, primjerice u Velikoj Britaniji (International Building Code, 2012 IBC [22]), u Kanadi (National Building Code of Canada, 2010 NBCC [24]) i na Novom Zelandu (New Zealand Standard, NZS 1170.5:2004 [25]), podrazumijevajući provjere za različita granična stanja. Usmjerene na ocjenjivanje ponašanja postojećih građevina, dokumenti s odgovarajućim smjericama izdani u SAD-u (*Federal Emergency Management Agency, FEMA 306 [26], FEMA 307 [27]*) sadrže određene upute vezane uz definiciju graničnih stanja s obzirom na sposobnost deformacije različitih tipova ispune. Osim toga, u značajnom broju prijašnjih eksperimentalnih ispitivanja, primjerice [8, 17, 28, 29], izvedeni su važni opći zaključci i moguće posljedice s obzirom na razvoj oštećenja u zidanoj ispuni pri porastu međukatnog pomaka konstrukcije.

Tablica 1. Razine ponašanja za pojedinačnu zidanu ispunu

| Granično stanje | Područje | Deformacija | Katni pomak |
|-----------------------|----------|---|---|
| Uporabljivosti | O - A | $\varepsilon \leq \varepsilon_A = \frac{2}{3} \varepsilon_m'$ | $\delta \leq \delta_A = f\left(\frac{2}{3} \mu_A, \frac{L}{h}\right)$ |
| Ograničenja oštećenja | A - B | $\varepsilon_A < \varepsilon \leq \varepsilon_B = \varepsilon_m'$ | $\delta_A < \delta \leq \delta_B = f\left(\mu_B, \frac{L}{h}\right)$ |
| Krajnje | B - C | $\varepsilon_B < \varepsilon \leq \varepsilon_C = \varepsilon_u$ | $\delta_B < \delta \leq \delta_C = f\left(\mu_C, \frac{L}{h}\right)$ |

S namjerom usvajanja sustavnog pristupa definiciji razina ponašanja za pojedinačnu ispunu može se uspostaviti njihova ovisnost o postignutoj deformaciji u zamjenjujućem tlačnom elementu, odnosno o odgovarajućem međukatnom pomaku okvirne konstrukcije [30], prema tablici 1., pozivajući se na sliku 2c. Prikazani zahtjevi za ponašanje mogu se definirati primjenom vrijednosti deformacija dobivenih interpretacijom eksperimentalnih ispitivanja. Osim toga, potrebno je naglasiti da kalibracija numeričkog modela i usporedna definicija graničnih stanja mora biti provedena uzimajući u obzir stvarno napredovanje oštećenja ispunne dobiveno tijekom ispitivanja.

2.3. Međukatni pomaci i uzdužne deformacije zamjenjujućeg tlačnog štapa

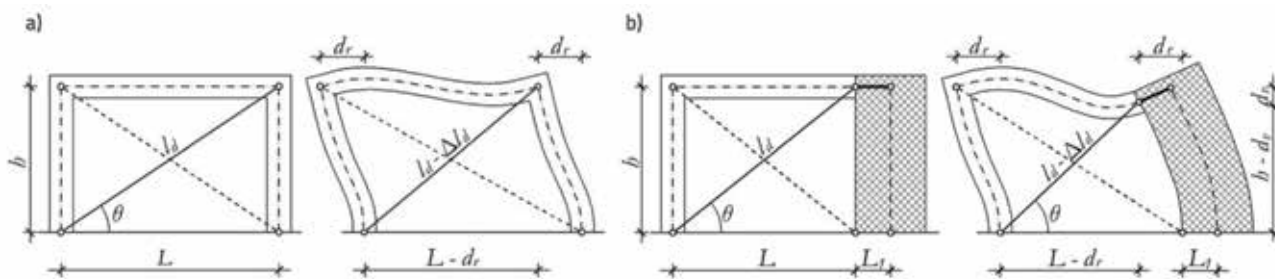
S obzirom na to da se prema Europskim propisima za projektiranje potresne otpornosti konstrukcija [21], provjere sigurnosti nekonstrukcijskih elemenata radi kontrole oštećenja u ravnini pri projektiranju armiranobetonskih okvira provode u pogledu međukatnih pomaka, čini se prikladnim uvesti ovisnost uzdužnih deformacija dijagonalnog tlačnog elementa i odgovarajućih vrijednosti horizontalnog pomaka. Ako se zanemare uzdužne deformacije u nosivim elementima, za jednoetažnu, jednorasponsku okvirnu konstrukciju (slika 3.a), temeljem jednostavnih geometrijskih ovisnosti, međukatni pomak $\delta = d_r/h$, pri čemu je d_r horizontalni pomak kata, može se približno izraziti kao funkcija izražena jednadžbom (1) uzdužne deformacije $\varepsilon = \Delta l_0/l_0$ u pritisnutom elementu početne duljine l_0 i omjera osnog raspona i visine okvira L/h . Prema tome, uzdužna deformacija ε može se

izraziti kao funkcija međukatnog pomaka δ i omjera osnog raspona i visine okvira L/h koja je dana jednadžbom (2).

$$\delta = \frac{d_r}{h} = f\left(\varepsilon, \frac{L}{h}\right) = \frac{L}{h} - \sqrt{(1-\varepsilon)^2 \left[1 + \left(\frac{L}{h}\right)^2\right]} - 1 \tag{1}$$

$$\varepsilon = f\left(\delta = \frac{d_r}{h}, \frac{L}{h}\right) = 1 - \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{L}{h} - \frac{d_r}{h}\right)^2}}{1 + \left(\frac{L}{h}\right)^2} \tag{2}$$

Iako su u okviru ovog rada svojstva modela ispunne određivana na uzorku okvirne konstrukcije, s obzirom na moguću primjenu kalibriranih modela u numeričkim analizama stvarnih višekatnih nosivih sustava, treba istaknuti da pojednostavljeni izrazi ovisnosti uzdužnih deformacija zamjenjujuće dijagonale i odgovarajućih međukatnih pomaka, dani jednadžbama (1) i (2), nisu izravno primjenjivi na modele dvojnih sustava sastavljenih od zidnih i okvirnih elemenata (slika 3.b). Naime, vertikalni pomak d_v krajnjeg ruba zida koji nastupa pri deformaciji konstrukcije nije zanemariv i može prouzročiti veće vrijednosti uzdužne deformacije zamjenjujuće tlačne dijagonale nego za okvirni sustav, pri istim vrijednostima međukatnog pomaka. Uz pretpostavku određenog omjera $r_{vr} = d_v/d_r$ vertikalnog pomaka d_v i horizontalnog pomaka kata d_r , za jednoetažni, jednorasponski dvojni sustav, međukatni pomak δ može se, temeljem geometrijskih ovisnosti, približno izraziti jednadžbom (3). Slično, uzdužna deformacija ε , izražena u ovisnosti međukatnog pomaka δ , dana je jednadžbom (4). Parametar r_{vr} može se odrediti na pojednostavljeni način, ovisno o omjerima elastične krutosti na savijanje stupova



Slika 3. Geometrijska ovisnost međukatnog pomaka i deformacije tlačnog štapa: a) Model okvirnog sustava; b) Model dvojnog sustava

odnosno zidova i greda nosive konstrukcije ($EI_c/EI_b, EI_w/EI_b$), te geometrijskih svojstava sustava ($L_i/L, h/L$).

$$\delta = \frac{d_c}{h} = f\left(\varepsilon, \frac{L}{h}, r_{vr}\right) = \frac{1}{1+r_{vr}^2} \left\{ \frac{L}{h} + r_d - \sqrt{(1+r_{vr}^2)(1-\varepsilon)^2 \left[1 + \left(\frac{L}{h}\right)^2 \right] - \left(r_{vr} \frac{L}{h} - 1\right)^2} \right\} \quad (3)$$

$$\varepsilon = f\left(\delta = \frac{d_c}{h}, \frac{L}{h}, r_{vr}\right) = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{L}{h}\right)^2} \sqrt{\left[1 + \left(\frac{L}{h}\right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{L}{h} - \frac{d_c}{h}\right)^2 + r_d \frac{d_c}{h} \left(r_{vr} \frac{d_c}{h} - 2\right) \right]} \quad (4)$$

Za primjenu modela tlačnog štapa na stvarne dispozicije građevina, odstupanje veze između deformacija i međukatnih pomaka za dvojni sustav u odnosu na okvir može biti značajna za analitičko određivanje postignutog oštećenja u zidanoj ispuni od opeke temeljem vrijednosti deformacija u zamjenjujućem tlačnom elementu, odnosno odgovarajućih međukatnih pomaka konstrukcije. Polazeći od usporedbe izraza danih u jednadžbama (1) do (4) moguće je uočiti da se pri istom međukatnom pomaku za dvojni sustav dobivaju veće vrijednosti deformacija nego za okvir. Ovakav je zaključak očigledno izveden isključivo teorijskim razmatranjima na temelju modela zamjenjujućeg tlačnog elementa, s obzirom na to da u prethodnim istraživanjima ponašanje zidane ispune u dodiru s armiranobetonskim zidovima nije obuhvaćeno eksperimentalnim ispitivanjima.

3. Postupak kalibracije modela ispune

3.1. Interpretacija rezultata cikličkih ispitivanja u ravnini

Eksperimentalno određivanje odziva konstrukcije u ravnini izazvanog horizontalnom pobudom za nosive sustave od opeke obično se provodi statičkim ili dinamičkim ispitivanjima, uz konstantno uzdužno opterećenje. Iako dinamička ispitivanja dopuštaju realniji prikaz djelovanja potresa, zbog statičkog opterećenja u pravilu se postiže jače oštećenje i manja čvrstoća, dijelom zbog toga što ponašanje zida može ovisiti o brzini nanošenja opterećenja. Stoga se u pravilu smatra da statička ispitivanja predstavljaju konzervativni pristup istraživanju mogućih oštećenja zidanih elemenata uzrokovanih djelovanjem potresa [31]. Za određivanje odziva pri djelovanju potresa na armiranobetonske okvire sa zidanom ispunom može se primjena statičkog postupka ispitivanja također smatrati prikladnom, što potvrđuju brojna prethodna eksperimentalna istraživanja, primjerice [17, 28, 32, 33], posebice kada je pozornost ponajprije usmjerena na odziv same zidane ispune. Pri cikličkim, statičkim ispitivanjima u ravnini na uzorcima jednoetažnih, jednorasponskih armiranobetonskih okvira s ispunom nanosi se opterećenje najčešće primjenom kontroliranog prirasta pomaka za dani vremenski zapis, postizanjem određenog broja (n_d) različitih razina pomaka, te se za svaki ciljani pomak izmjenični ciklusi opterećenja ponavljaju određeni broj puta (obično $n_c = 3$).

Eksperimentalni rezultati koji opisuju odziv uzorka na takvu pobudu obično su prikazani kao ovisnost sile i pomaka, i to za čitav vremenski zapis, odnosno za sve cikluse opterećenja i razine intenziteta pomaka. Zbog početne degradacije uzorka, odziv u pojedinim ciklusima opterećenja za određeni ciljani pomak može se bitno razlikovati, naročito pri većim iznosima postignutog pomaka, a obično se ustaljuje oko trećeg ciklusa. Stoga interpretacija rezultata temeljem ukupne anvelope konačnog odziva u nekim slučajevima može dovesti do dvosmislenih zaključaka. Povrh toga, ako je ispitivanjem ustanovljen nesimetričan odziv, ili je tijekom izmjeničnog cikličkog opterećenja uočena značajna degradacija čvrstoće, određivanje odgovarajućih krivulja nosivosti, prikladnih za moguću primjenu u numeričkim postupcima, dodatno gubi jednoznačnost. S namjerom da se u okviru danih ograničenja premosti raskorak između rezultata dobivenih statičkim ispitivanjima i potrebe za jednostavnošću u njihovoj numeričkoj primjeni, predložen je pojednostavljeni postupak interpretacije eksperimentalnih rezultata koji se temelji na određivanju prosječne krivulje ovisnosti sile i pomaka iz odgovarajućih krivulja za svaki ciklus opterećenja zasebno [10]. U slučaju armiranobetonskih okvira sa zidanom ispunom, za kalibraciju modela ispune, ukupnu prosječnu krivulju nosivosti potrebno je odrediti za okvir s ispunom kao i za odgovarajući okvir bez ispune temeljem raspoloživih eksperimentalnih rezultata na sljedeći način, u skladu s prikazom na slici 4.

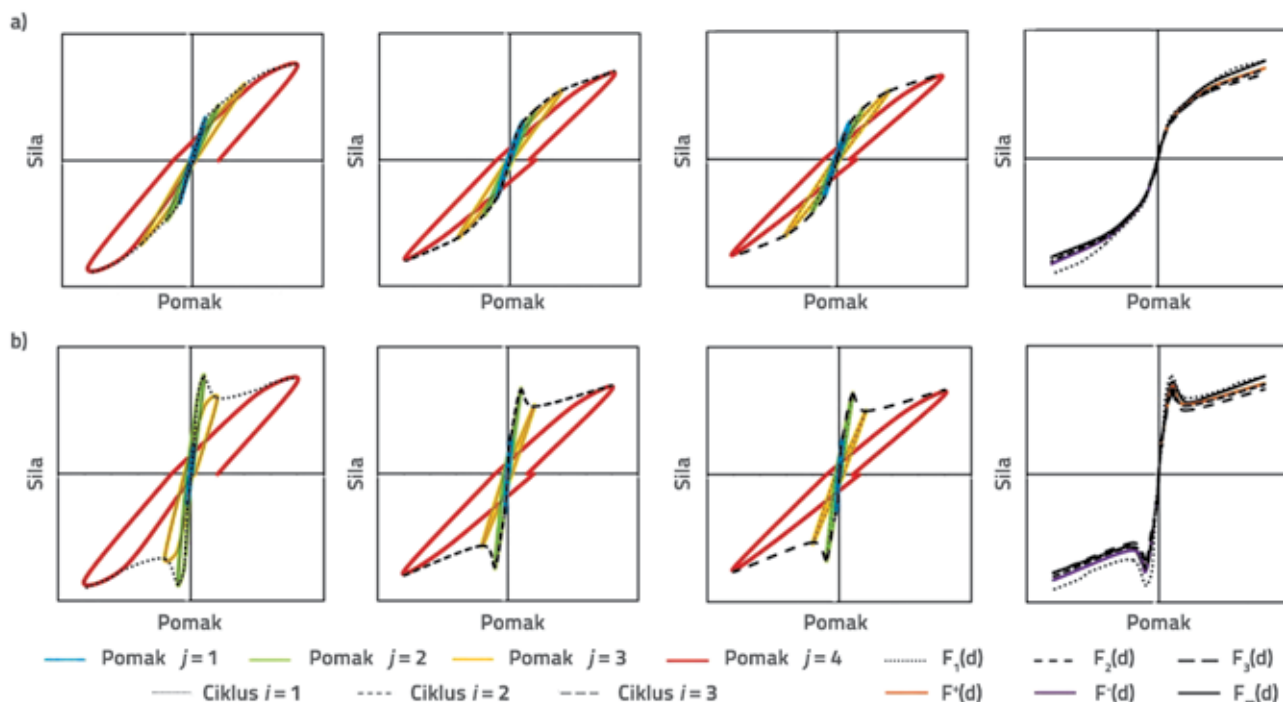
- Eksperimentalno dobiveni odziv uzorka izražen odnosom sile i pomaka treba prikazati zasebno za svaki pojedini ciklus opterećenja $i = 1 \dots n_d$ za $j = 1 \dots n_d$ razina intenziteta pomaka.
- Za svaki pojedini ciklus treba odrediti jednu krivulju ovisnosti sile i pomaka $F_i(d_j)$, $i = 1 \dots n_d$ kao anvelopu odziva za $j = 1 \dots n_d$ razina intenziteta pomaka.
- Temeljem n_c krivulja ovisnosti sile i pomaka $F(d_j)$ treba odrediti jednu prosječnu krivulju za svaki ciklus, tako da amplituda sile pri pomaku d_j odgovara srednjoj vrijednosti amplituda sila iz anvelopa dobivenih za svaki ciklus $F_i(d_j)$, $i = 1 \dots n_d$, pri istom pomaku d_j , jednadžba (5).

$$F(d_j) = \frac{1}{n_c} \sum_{i=1}^{n_c} F_i(d_j) \quad (5)$$

Može se primijetiti da je prosječne vrijednosti sile $F(d_j)$ potrebno odrediti za pomake d_j koji su prisutni u svim anvelopama dobivenim za pojedine cikluse opterećenja $F_i(d_j)$, $i = 1 \dots n_d$.

- Konačnu prosječnu krivulju ovisnosti sile i pomaka $F_m(d_j)$ treba odrediti kao prosjek pozitivne $F^+(d_j)$ i negativne $F^-(d_j)$ grane prosječne krivulje $F(d_j)$, tako da amplituda sila pri svakom pomaku d_j odgovaraju srednjoj vrijednosti apsolutnih iznosa sile pri istom pomaku d_j , jednadžba (6):

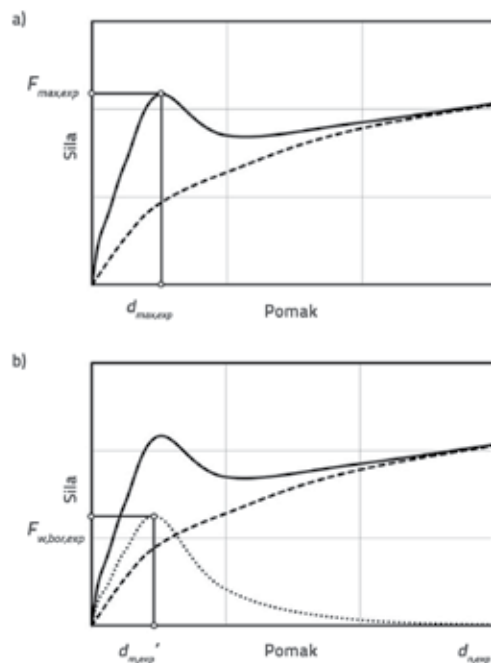
$$F_m(d_j) = \frac{1}{2} \left\{ F^+(d_j) + \text{abs} \left[F^-(d_j) \right] \right\} \quad (6)$$



Slika 4. Interpretacija tipičnih rezultata statičkih ispitivanja u ravnini: a) Okvir bez ispune; b) Okvir s ispunom

Odgovarajući maksimalni prosječni doprinos zidane ispune $F_{w,hor,exp}$ pri pridruženom pomaku $d_{m,exp}$ u odnosu na ukupnu prosječnu nosivost $F_{max,exp}$ okvira s ispunom pri pomaku $d_{max,exp}$ može se procijeniti određivanjem razlike prosječnog odziva okvira s ispunom i bez nje (slika 5.). Dobiveni odnos sile i pomaka za samu ispunu predstavlja polazište za određivanje čvrstoće i deformacijskih svojstava zamjenjujućeg tlačnog elementa kalibracijom koja se provodi na numeričkim modelima promatranih uzoraka. Pozivajući se na sliku 5, važno je napomenuti da je otpornost okvira s ispunom $F_{max,exp}$ postignuta pri odgovarajućem pomaku $d_{max,exp}$ dok čvrstoća same zidane ispune u horizontalnom smjeru $F_{w,hor,exp}$ dobivena temeljem eksperimentalnih rezultata, odgovara pomaku $d_{m,exp}$ za koji se uobičajeno mogu očekivati vrijednosti manje od $d_{max,exp}$. Potpuna degradacija ispune, odnosno iščezavanje njezinog doprinosa ukupnom odzivu, pretpostavlja se pri dostizanju pomaka označenog sa $d_{u,exp}$. Prikazani postupak interpretacije eksperimentalnih rezultata dakako počiva na pretpostavci približno simetričnog odziva zidane ispune, kao primjerice u slučaju sloma pretežno postignutog dijagonalnim raspucavanjem. Osim toga, pretpostavlja se da početak razvoja oštećenja ne utječe značajno na ponašanje pri odgovarajućem opterećenju u suprotnom smjeru. U općenitijem slučaju, ovisno o načinu otkazivanja zidane ispune, može se očekivati jače naglašeno nesimetrično ponašanje, posebice pri posmičnom slomu klizanjem, te značajnija međusobna ovisnost odziva za djelovanje opterećenja u izmjeničnim smjerovima. Nesimetričan odziv također može biti prouzročen prisutnošću otvora, nepravilno raspoređenih unutar zida. S obzirom na to da navedene

pojave ne mogu biti obuhvaćene danim pojednostavljenim postupkom interpretacije eksperimentalnih rezultata koji se u ovom radu primjenjuje za određivanje svojstava jednostavne zamjenjujuće tlačne dijagonale, za njihovo bi vjerodostojno prikazivanje bila potrebna primjena detaljnijih numeričkih modela.



Slika 5. a) Prosječna krivulja nosivosti za okvir bez ispune i s ispunom; b) Prosječan doprinos ispune

3.2. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata

Pri kalibraciji modela zidane ispune temeljem raspoloživih rezultata ispitivanja jednoetažnih, jednorasponskih okvira s ispunom i odgovarajućeg uzorka bez ispune, početna aproksimacija ovisnosti naprezanja i deformacija može se postaviti određivanjem deformacije $\varepsilon_{m,exp}'$ pri vršnom naprezanju i krajnje deformacije $\varepsilon_{u,exp}'$ prema jednadžbi (2), koje ovise o eksperimentalno dobivenim vrijednostima pomaka $d_{m,exp}'$ pri prosječnoj horizontalnoj nosivosti $F_{w,hor,exp}$ zidane ispune (jednadžba (7a)) i pomaka $d_{u,exp}$ pri kojem je ustanovljeno iščezavanje doprinosa ispune ukupnoj nosivosti okvira sa zidanom ispunom (jednadžba (7b)). Vršno uzdužno naprezanje tlačne dijagonale $f_{m,exp}'$ koje odgovara horizontalnoj nosivosti $F_{w,hor,exp}'$ može se odrediti jednadžbom (8), pri čemu t_w označava debljinu zida, b_w zamjenjujuću širinu tlačnog elementa, a θ odgovarajući kut nagiba.

$$\varepsilon_{m,exp}' = 1 - \frac{1 + \left(\frac{L}{h} \frac{d_{m,exp}'}{h}\right)^2}{1 + \left(\frac{L}{h}\right)^2} \quad (7a)$$

$$\varepsilon_{u,exp}' = 1 - \frac{1 + \left(\frac{L}{h} \frac{d_{u,exp}}{h}\right)^2}{1 + \left(\frac{L}{h}\right)^2} \quad (7b)$$

$$f_{m,exp}' = \frac{F_{w,hor,exp}}{t_w b_w \cos \theta} \quad (8)$$

U skladu s navedenim početnim pretpostavkama moguće je uspostaviti numerički model uzoraka sa zidanom ispunom i bez nje. U idealnom slučaju, kada se usvojeni model ispune (tj. u okviru ovog rada Crisafullijev model [17]) može definirati tako da točno opisuje eksperimentalno dobiveni prosječni odziv ispune, uz uvjet da je postignuta zadovoljavajuća podudarnost rezultata za okvir bez ispune, krivulja ovisnosti sile i pomaka okvira s ispunom, dobivena numerički temeljem nelinearne statičke analize metodom postupnog guranja, u potpunosti odgovara dobivenom prosječnom eksperimentalnom odzivu. Međutim, u većini praktičnih slučajeva može biti potrebno izvjesno dodatno podešavanje svojstava zamjenjujućeg tlačnog elementa temeljem usporedbe numerički i eksperimentalno dobivenih rezultata u svrhu optimizacije modela. Opisani pristup može se izravno primijeniti za kalibraciju modela koji se koriste u nelinearnim statičkim analizama, s obzirom na to da se nosivost zidane ispune može opisati u skladu s dobivenim vrijednostima deformacija i naprezanja.

Za slučaj cikličkog opterećenja, kada se za opis cikličkog odziva ispune upotrebljava krivulja histereze (primjerice u skladu s Crisafullijevim modelom [17]), predloženi se postupak također može primijeniti za određivanje vrijednosti deformacija pridruženih odgovarajućoj anvelopi nosivosti. Deformacija pri vršnom naprezanju ε_m' i krajnja deformacija ε_u kao i pridruženi opseg oštećenja nisu pod značajnim utjecajem cikličkog ponavljanja opterećenja. Stoga se

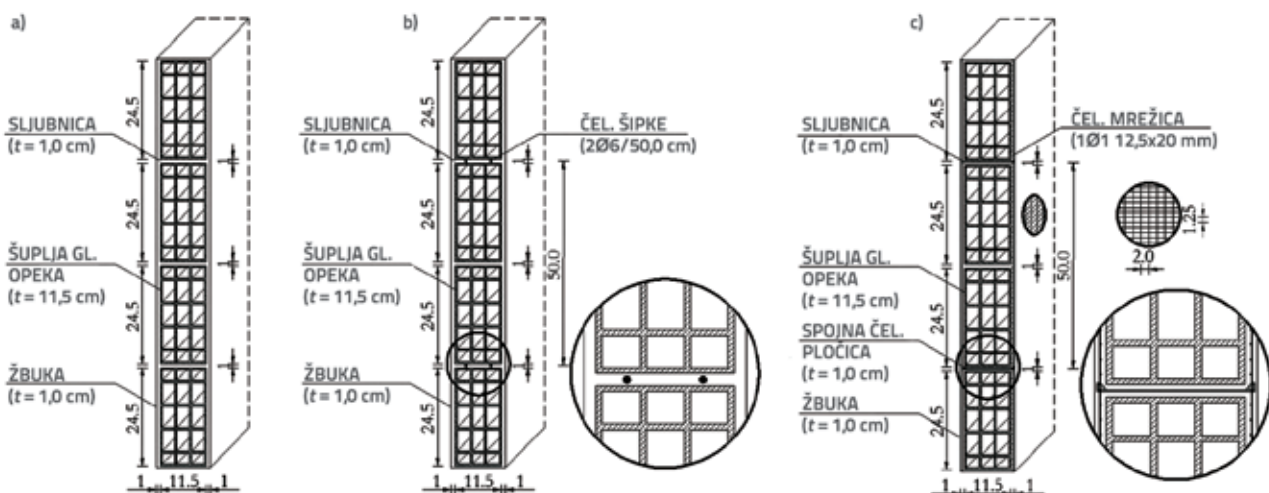
prikazani postupak određivanja razina ponašanja u ovisnosti postignutih međukatnih pomaka može smatrati primjenjivim za cikličke analize. Takav pristup prihvaćen je primjerice u opširnim numeričkim istraživanjima provedenim za višekratne višeraspanske armiranobetonske okvirne konstrukcije [34, 35], temeljem nelinearnih dinamičkih analiza.

4. Primjena za različite tipove zidane ispune

4.1. Interpretacija postojećih rezultata ispitivanja u ravnini

Predloženi postupak kalibracije numeričkog modela u okviru ovog rada primijenjen je za tri različita tipa zidane ispune, polazeći od rezultata dobivenih prethodnim eksperimentalnim istraživanjima provedenim na Sveučilištu u Paviji u Italiji, vezanim uz ponašanje nearmirane i slabo armirane zidane ispune od opeke u novo projektiranim armiranobetonskim okvirnim konstrukcijama [11, 12]. U toj opširnoj studiji proveden je niz cikličkih, statičkih ispitivanja na jednoetažnim, jednorasponskim uzorcima okvira visine 2.875 m i raspona 4.50 m, proračunanih u skladu sa suvremenim propisima za projektiranje potresne otpornosti. Osim okvira bez ispune, ispitani su uzorci s tradicionalnom nearmiranom zidanom ispunom i s dva različita tipa slabo armirane zidane ispune, koja predstavljaju moguća rješenja za poboljšanje ponašanja pri potresu. Pri tome je nearmirana ispunna bila sastavljena od jednostrukog ziđa debljine 11.5 cm izgrađenog od glinene opeke s horizontalnim šupljinama i sloja žbuke debljine 1.0 cm sa svake strane (slika 6.a). Za izgradnju armirane zidane ispune korišteni su isti opečni elementi, kod prvog tipa, uz primjenu 2φ6 šipke armature položene u horizontalne sljubnice svaka dva reda opeke, odnosno na razmaku od 50 cm po visini ziđa. Za drugi tip slabo armiranog ziđa korištene su čelične armature mrežice sastavljene od žice promjera 1.0 mm na razmaku od 20.0 mm u horizontalnom, odnosno od 12.5 mm u vertikalnom smjeru, postavljene u sloj žbuke sa svake strane ziđa i povezane čeličnim pločicama u horizontalnim sljubnicama svaka dva reda opeke, odnosno na razmaku od 50 cm po visini ziđa (slika 6.c).

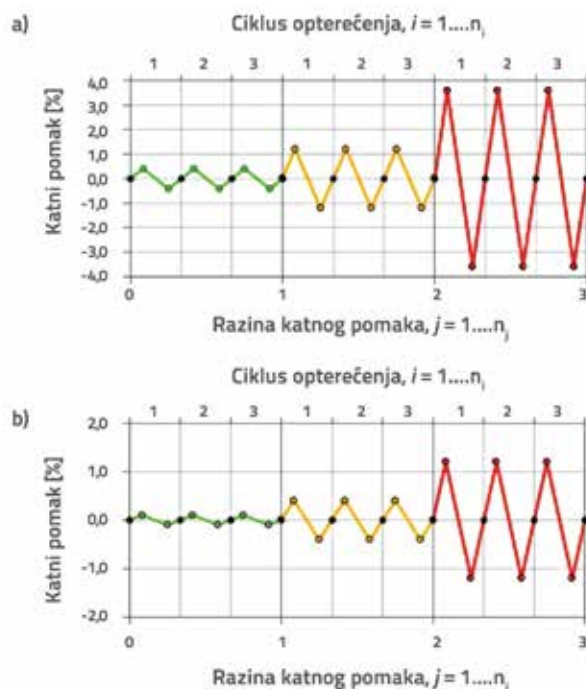
Glavni zaključci temeljeni na eksperimentalnom odzivu ispitanih uzoraka upućivali su na činjenicu da se zahvaljujući maloj količini armature može postići bitno poboljšano ponašanje pojedinačnog okvira s ispunom, posebice s obzirom na zadovoljavanje graničnih stanja oštećenja. Povrh toga, naglašena je značajna uloga oštećenja nekonstrukcijskih elemenata pri definiranju graničnih stanja za armiranobetonske okvire, s obzirom na to da za učinkovito projektirane konstrukcije visoki stupanj oštećenja ispune i mogućnost otkazivanja izvan ravnine, a time i postizanje uvjeta koji odgovaraju krajnjem graničnom stanju građevine, mogu prethoditi značajnijim oštećenjima samog okvira. Ostali detalji vezani uz postavljanje i tijek izvođenja eksperimentalnog ispitivanja, razvoj oštećenja na uzorcima i



Slika 6. Zidane ispune od opeke: a) nearmirana ispuna; b) slabo armirana ispuna (šipke u sljubnicama); c) slabo armirana ispuna (mrežica u sloju žbuke)

dobivene rezultate mogu se pronaći u odgovarajućoj literaturi [11, 12].

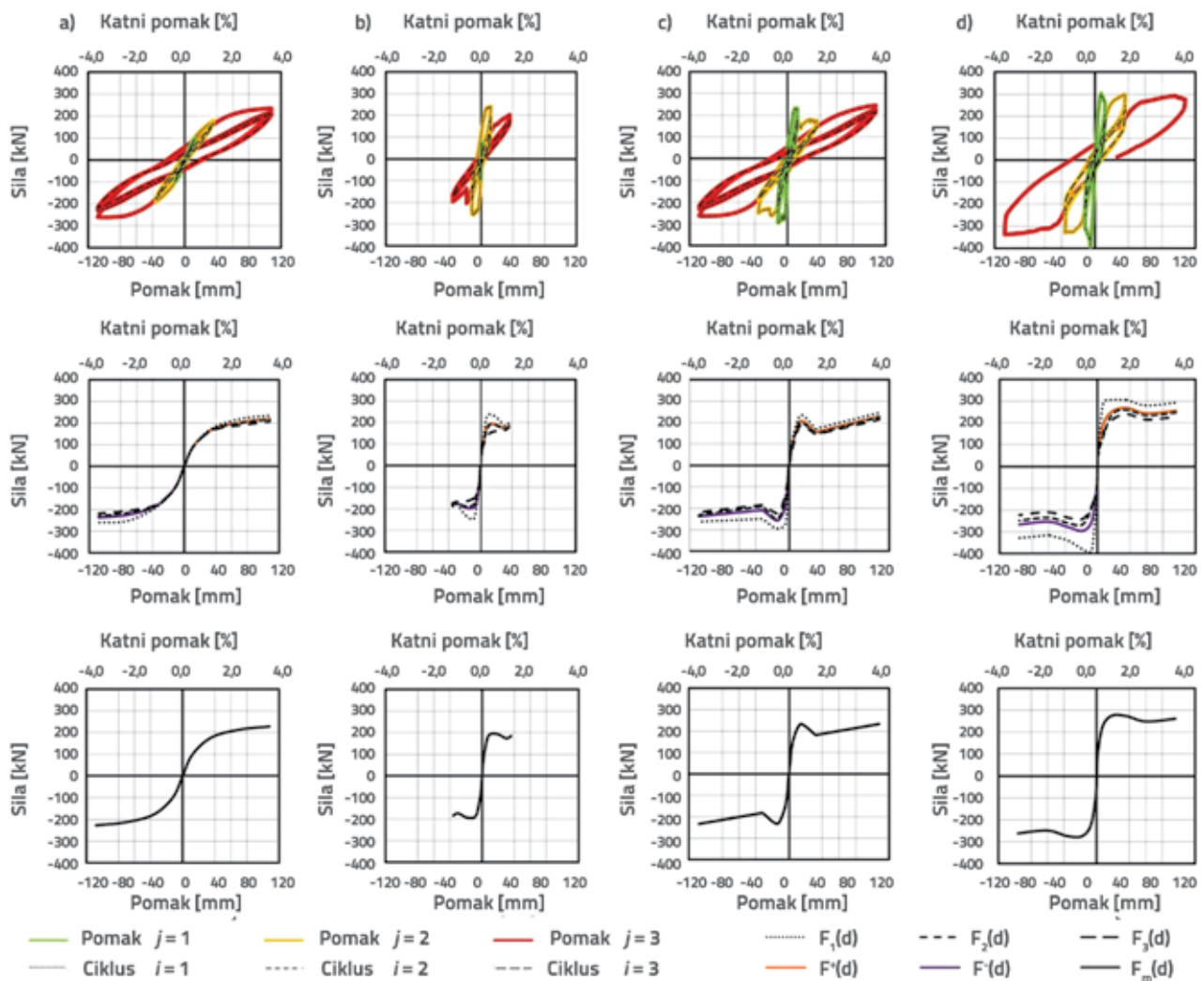
Za potrebe ovog istraživanja svojstva zamjenjujuće tlačne dijagonale određena su temeljem rezultata ispitivanja u ravnini za tri izmjenična ciklusa ($n_c = 3$) u tri faze statičkog opterećenja ($n_d = 3$) određene ciljanim katnim pomacima od 0.40 %, 1.20 % i 3.60 % za okvir bez ispune i za okvire sa slabo armiranom ispunom (slika 7.a), odnosno 0.10 %, 0.40 % i 1.20 % za okvire s nearmiranom ispunom (slika 7.b). Za uzorak s armaturnom mrežicom za zadnji intenzitet pomaka $j = 3$ odziv je bio na raspolaganju samo za ciklus $i = 1$, a za preostale rezultate pretpostavljene su vrijednosti u skladu s podacima dobivenim za manje iznose pomaka. Postupak određivanja prosječne krivulje nosivosti za okvir bez ispune i za okvire s nearmiranom i armiranom ispunom prikazan je na slici 8. Konačne eksperimentalno dobivene prosječne krivulje nosivosti za promatrane uzorke dane su na slici 9, dok je odgovarajući doprinos ispune ukupnoj nosivosti prikazan na slici 10. U tablici 2. sažete su eksperimentalno dobivene prosječne vrijednosti koje opisuju ovisnost sile i pomaka za promatrane tipove zidane ispune. Temeljem izloženih rezultata moguće je izravno razmotriti sposobnost nosivosti i deformacije same ispune za različita promatrana rješenja, posebice s obzirom na poboljšanje ponašanja zahvaljujući slabom armiranju.



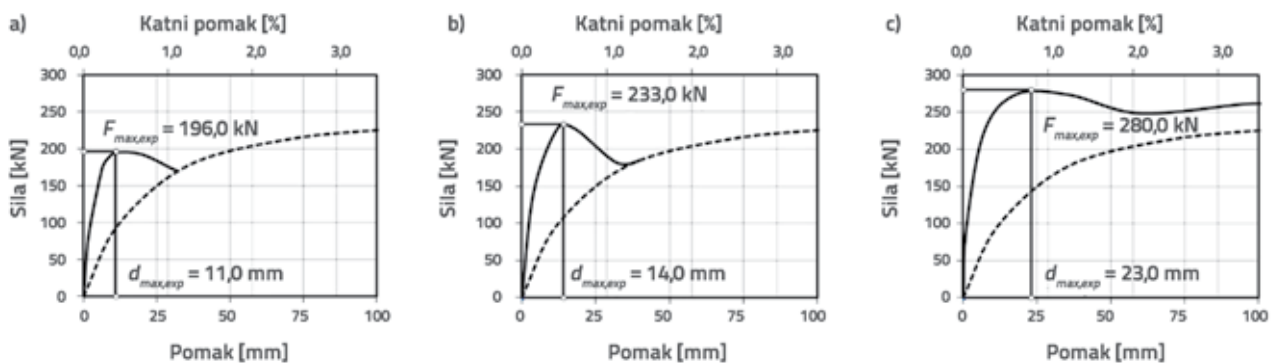
Slika 7. Zapis opterećenja: a) okvir bez ispune/sa slabo armiranom ispunom; b) okvir s nearmiranom ispunom

Tablica 2. Eksperimentalno dobivene vrijednosti ovisnosti sile i pomaka

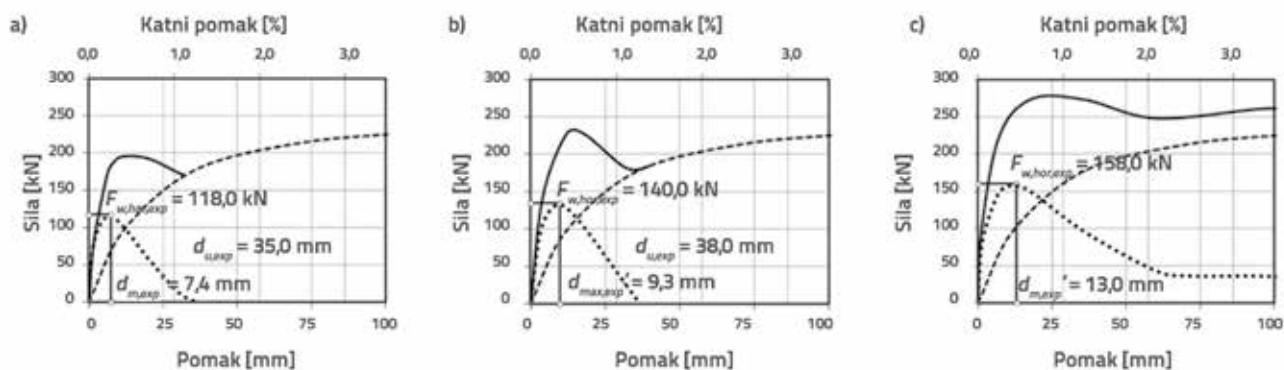
| Tip ispune | $F_{max,exp}$ [kN] | $d_{max,exp}$ [mm] | $F_{u,ho,exp}$ [kN] | $d_{m,exp}'$ [mm] | $d_{u,exp}$ [mm] |
|---|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| Nearmirana ispuna | 196.0 | 11.0 | 118.0 | 7.4 | 35 |
| Slabo armirana ispuna (šipke u sljubnici) | 233.0 | 14.0 | 140.0 | 9.3 | 38 |
| Slabo armirana ispuna (mrežica u sloju žbuke) | 280.0 | 23.0 | 158.0 | 13.0 | - |



Slika 8. Interpretacija rezultata ispitivanja: a) nearmirana ispuna; b) slabo armirana ispuna (šipke u sljubnicama); c) slabo armirana ispuna (mrežica u sloju žbuke)



Slika 9. Prosječna eksperimentalna nosivost: a) nearmirana ispuna; b) slabo armirana ispuna (šipke u sljubnicama); c) slabo armirana ispuna (mrežica u sloju žbuke)



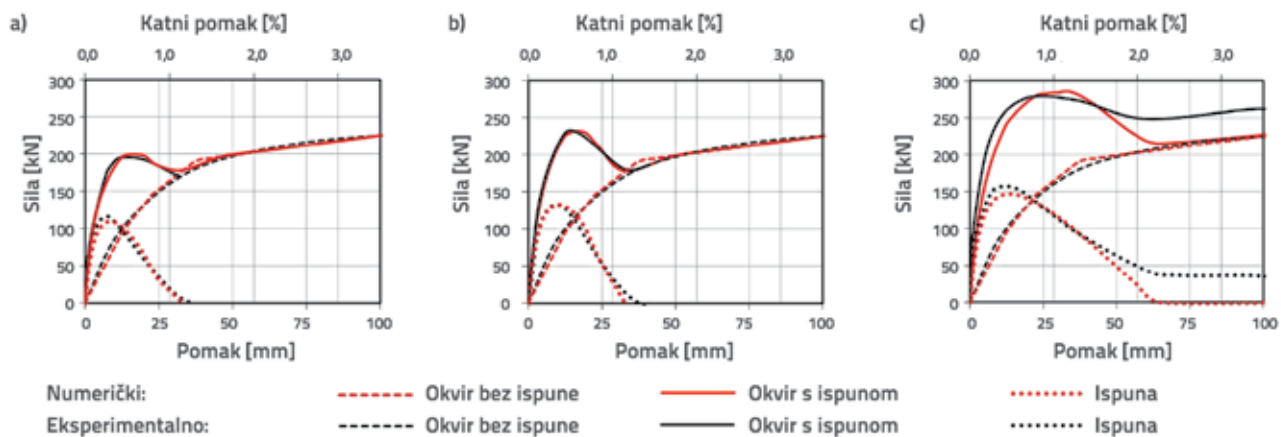
Slika 10. Doprinos ispune nosivosti: a) nearmirana ispuna; b) slabo armirana ispuna (šipke u sljubnicama); c) slabo armirana ispuna (mrežica u sloju žbuke)

4.2. Rezultati kalibracije modela ispune

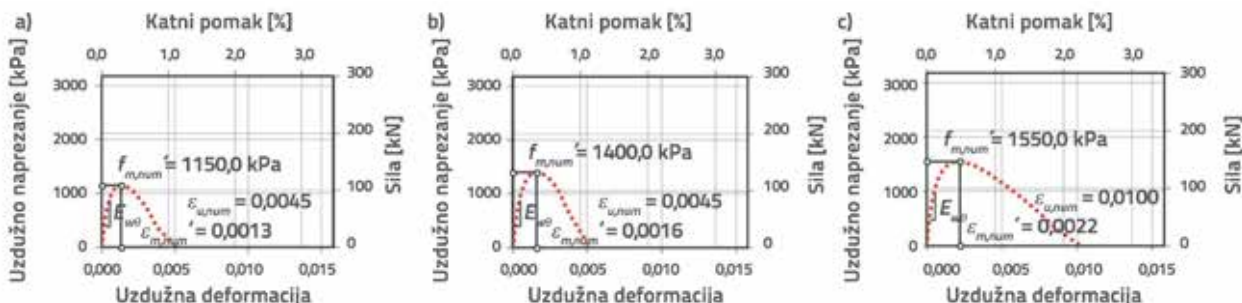
Koristeći program za analizu konstrukcija Ruaumoko [36], proveden je niz statičkih analiza metodom postupnog guranja na nelinearnim numeričkim modelima promatranih uzoraka, oblikovanim slijedeći pretpostavke modeliranja za konstrukcijske i nekonstrukcijske elemente, prema opisu u točki 2.1 ovog rada. Za modele okvira s ispunom pretpostavljene su različite vrijednosti parametara ovisnosti naprezanja i deformacija za svaki promatrani tip ispune.

Rezultati prikazani na slici 11. upućuju na zadovoljavajuću podudarnost eksperimentalno i numerički dobivenih krivulja nosivosti. Konačne ovisnosti naprezanja i deformacija pridružene modelima tlačne dijagonale za sva tri tipa ispune prikazane su na slici 12.

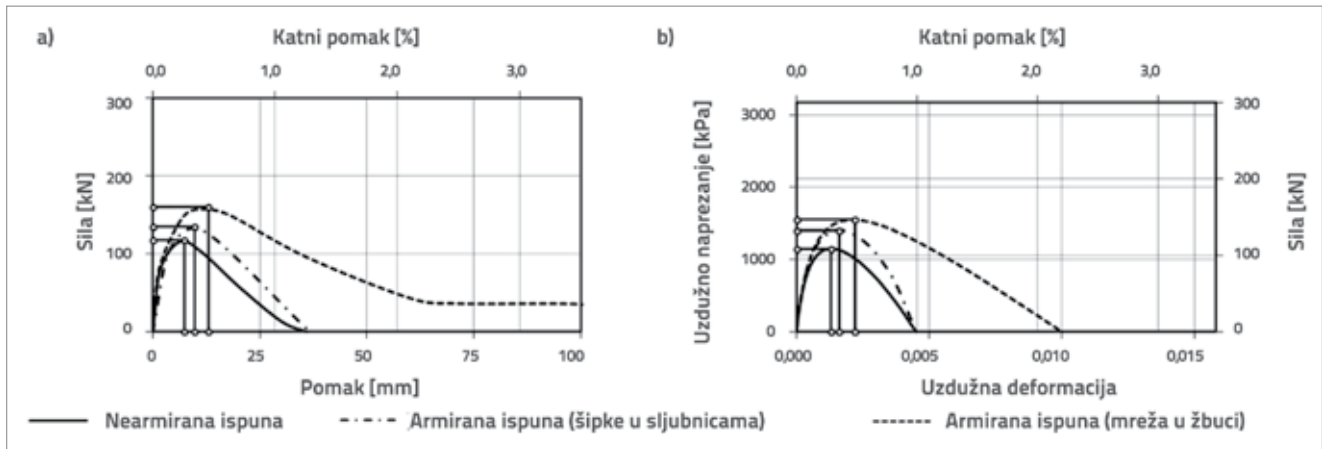
Treba istaknuti da se eksperimentalni odziv promatranih tipova zidane ispune, slijedeći predloženi postupak, može obuhvatiti samo u okviru ograničenja jednostavnog modela zamjenjujućeg tlačnog elementa, razmatranih primjerice u radovima [9, 37]. Međutim, pri opširnim numeričkim analizama većih modela



Slika 11. Usporedba numeričkih i eksperimentalnih rezultata: a) nearmirana ispuna; b) slabo armirana ispuna (šipke u sljubnicama); c) slabo armirana ispuna (mrežica u sloju žbuke)



Slika 12. Dobivena ovisnost naprezanja i deformacija tlačne dijagonale: a) nearmirana ispuna; b) slabo armirana ispuna (šipke u sljubnicama); c) slabo armirana ispuna (mrežica u sloju žbuke)



Slika 13. a) usporedba eksperimentalno dobivenog doprinosa ispune; b) usporedba ovisnosti napreznaja i deformacija dobivene kalibracijom modela

Tablica 3. Ovisnost napreznaja i deformacija prema Crisafulliju za tlačnu dijagonalu dobivena kalibracijom modela

| Tip ispune | $f_{m,num}'$ [kPa] | $\varepsilon_{m,num}'$ | $\varepsilon_{u,num}$ | $\delta_{m,num}'$ [%] | $\delta_{u,num}$ [%] |
|---|--------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| Nearmirana ispuna | 1150.0 | 0.0013 | 0.0045 | 0.287 | 0.993 |
| Slabo armirana ispuna (šipke u sljubnici) | 1400.0 | 0.0016 | 0.0045 | 0.353 | 0.993 |
| Slabo armirana ispuna (mrežica u sloju žbuke) | 1550.0 | 0.0022 | 0.0100 | 0.494 | 2.205 |

Tablica 4. Razine ponašanja za pojedinačnu ispunu

| Granično stanje | Uporabljivosti | | Ograničenje oštećenja | | Krajnje | |
|---|----------------|--------------|-----------------------|--------------|---------------|--------------|
| | ε | δ [%] | ε | δ [%] | ε | δ [%] |
| Nearmirana ispuna | ≤ 0.0009 | ≤ 0.191 | ≤ 0.0013 | ≤ 0.287 | ≤ 0.0045 | ≤ 0.993 |
| Slabo armirana ispuna (šipke u sljubnici) | ≤ 0.0011 | ≤ 0.235 | ≤ 0.0016 | ≤ 0.353 | ≤ 0.0045 | ≤ 0.993 |
| Slabo armirana ispuna (mrežica u sloju žbuke) | ≤ 0.0015 | ≤ 0.329 | ≤ 0.0022 | ≤ 0.494 | ≤ 0.0100 | ≤ 2.205 |

konstrukcija, za koje bi postupci modeliranja više razine detalja mogli biti suviše računski zahtjevni i dovesti do otežane kontrole proračuna, primjena jednostavnih modela zamjenjujuće tlačne dijagonale, kalibriranih polazeći od eksperimentalnih rezultata, može se smatrati opravdanom, posebice za određivanje globalnih zahtjeva pomaka konstrukcije.

Dobra podudarnost numeričkih i eksperimentalnih rezultata postignuta je naročito za slučaj nearmirane zidane ispune i armirane zidane ispune sa šipkama armature u horizontalnim sljubnicama, te se može zaključiti da je odabrani konstitucijski model [17] prikladan za prikaz eksperimentalno dobivenog odziva ispune. Za zidanu ispunu s armaturnim mrežicama u sloju žbuke eksperimentalni su rezultati odabranim numeričkim modelom pri većim pomacima opisani uz nešto nižu preciznost, budući da analitička krivulja napreznaja i deformacija prema Crisafulliju ne dopušta odgovarajući prikaz zaostale nosivosti

dobivene eksperimentalno za taj slučaj slabo armiranog ziđa. Prosječni doprinos ispune dobiven eksperimentalno za različite tipove ziđa prikazan je na slici 13.a, upućujući na povećanje čvrstoće za oba slučaja slabo armiranog ziđa kao i na značajno poboljšanje sposobnosti deformacije zahvaljujući primjeni armaturne mrežice u sloju žbuke. Za usporedbu, konačne vrijednosti napreznaja i deformacija s odgovarajućim iznosima katnog pomaka, dobivene kalibracijom i pridružene konstitucijskom modelu koji opisuje zamjenjujuću tlačnu dijagonalu za promatrane tipove ziđa, sažete su prikazom na slici 13.b i u tablici 3. U nastavku su, prema tablici 4., određeni uvjeti razina ponašanja koji se odnose na pojedinačnu ispunu. Utvrđeno je da su stvarna oštećenja dobivena tijekom ispitivanja [11, 12] sukladna razinama ponašanja koje su određene temeljem vrijednosti deformacija i odgovarajućih katnih pomaka postupkom kalibracije numeričkog modela.

5. Zaključak

Opisani postupak za određivanje svojstava tlačnog elementa za pojednostavljeni model zidane ispune primijenjen je na postojeće rezultate ispitivanja za tri različita tipa zidane ispune, a usvojene pretpostavke pokazale su se prikladnima za odgovarajući opis odziva nearmirane i slabo armirane tanke zidane ispune. Isti postupak može se primijeniti na druge slične tipove ispune, uz pretpostavku da su na raspolaganju odgovarajući eksperimentalni rezultati cikličkih, statičkih ispitivanja. Umjereno odstupanje modela usvojenog u ovom radu s obzirom na eksperimentalno dobiveni odziv uočeno je za slučaj ispune s armaturnom mrežicom u sloju opeke zbog razine zaostale nosivosti pri većim iznosima postignutih pomaka konstrukcije u ravnini, upućujući na činjenicu da bi za neke tipove ispune s bitno različitim svojstvima primjena alternativnih konstitucijskih modela mogla biti prikladnija. Unatoč tome, može se primijeniti izloženi postupak koji počiva na interpretaciji eksperimentalnih rezultata i njihovoj usporedbi s odzivom numeričkog modela. Potrebno je naglasiti da je ovaj pojednostavljeni pristup prije svega primjenjiv za tipove ispune za koje se očekuje pretežno simetričan odziv, uz razvoj oštećenja odnosno načina sloma razmjerno neovisan za pozitivan i negativan smjer opterećenja u ravnini. Dobiveni rezultati dopuštaju primjenu kalibriranih modela za opširne numeričke analize i ocjenu oštećenja ispune temeljem razina ponašanja definiranih u ovisnosti postignutih deformacija odnosno pomaka. Osim toga, predloženi postupak omogućuje jednostavnu usporedbu čvrstoće i deformacijske sposobnosti različitih tipova ispune, dopuštajući dosljednu interpretaciju i primjenu podataka dobivenih eksperimentalnim ispitivanjima.

U okviru ovog rada promatrano je tradicionalno tanko ispunsko ziđe na temelju interpretacije postojećih rezultata ispitivanja. Određivanjem prosječnog odziva ispune doneseni su novi zaključci vezani uz povećanje čvrstoće i sposobnosti deformacije ispune zbog slabog armiranja u odnosu na nearmirano ziđe. Sukladno tome utvrđeno je povećanje čvrstoće od 20 % za zidane ispune sa šipkama armature u horizontalnim sljubnicama, odnosno od 35 % za zidane ispune s armaturnim mrežicama u sloju žbuke, u odnosu na odgovarajući nearmirani tip ispune. Nadalje, uočeno je značajno povećanje sposobnosti deformacije koje s obzirom na pomak pri vršnom naprezanju iznosi 20 %, odnosno 70 % za promatrane tipove armirane ispune. Također je utvrđeno da prisutnost armaturnih šipki u sljubnicama ne utječe značajno na krajnji pomak zidane ispune, dok je primjenom armaturnih mrežica u sloju žbuke uočeno značajno povećanje krajnjeg pomaka.

Primjenom predloženog postupka na druga moguća rješenja ispune od nearmiranog ziđa, primjerice suvremene tipove ispune od blok opeke koji se uobičajeno koriste za izgradnju vanjskih zidova građevina, može se očekivati postizanje većih razina sposobnosti deformacije u odnosu na ispune od tankog nearmiranog ziđa. Na Sveučilištu u Paviji i pri Eucentru u Paviji u Italiji trenutačno je u tijeku opširna eksperimentalna studija u okviru koje se planira prikupljanje odgovarajućih podataka značajnih za daljnja istraživanja.

Zahvala

Ovo istraživanje je provedeno na Sveučilištu u Paviji i pri Eucentru u Paviji u Italiji, pod pokroviteljstvom udruge ANDIL Assolaterizi i u okviru izvršnog projekta DPC-RELUIS 2010-2013, zadatak AT2-1.3. Stoga autori zahvaljuju na pruženoj financijskoj potpori.

LITERATURA

- [1] Mehrabi, A. B. & Shing, P. B.: Finite element modeling of masonry-infilled RC frames, *Journal of Structural Engineering*, 123:5, pp. 604-613, 1997.
- [2] Asteris, P.G.: Finite element micro-modeling of infilled frames, *Electronic Journal of Structural Engineering*, 8, pp. 1-11, 2008.
- [3] Hak, S., Morandi, P. & Magenes, G.: Local effects in the seismic design of RC frame structures with masonry infills, *4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Kos Island, 2013.
- [4] Braga, F., Manfredi, V., Masi, A., Salvatori, A. & Vona, M.: Performance of non-structural elements in RC buildings during the L'Aquila 2009 earthquake, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9, 307-324, 2011.
- [5] Magenes, G., Bracchi, S., Graziotti, F., Mandirola, M., Manzini, C.F., Morandi, P., Palmieri, M., Penna, A., Rosti, A., Rota, M. & Tondelli, M.: Rapporto preliminare sul rilievo dei danni alle strutture in muratura dopo i terremoti dell'Emilia del Maggio 2012, v.1, <http://www.eqclearinghouse.org/2012-05-20-italy-it/>.
- [6] Morandi, P., Hak, S. & Magenes, G.: Simplified Out-of-plane Resistance Verification for Slender Clay Masonry Infills in RC Frames, *15th National Conference ANIDIS*, Padova, 2013.
- [7] Drysdale, R.G., Hamid, A.A. & Baker, L.R.: *Masonry structures: behavior and design*, The Masonry Society, Boulder, Colorado, 1999.
- [8] Angel, R., Abrams, D., Shapiro, D., Uzarski, J. & Webster, M.: *Behaviour of reinforced concrete frames with masonry infills. Research Report*, University of Illinois, 1994.

- [9] Asteris, P.G., Antoniou, S.T., Sophianopoulos, D.S. & Chrysostomou, C.Z.: Mathematical macromodeling of infilled frames: State of the art, *Journal of Structural Engineering*, 137:12, pp. 1508-1517, 2011.
- [10] Hak, S., Morandi, P. & Magenes, G.: Interpretation of in-plane response and definition of damage levels for masonry infilled RC frames, *15th International Brick and Block Masonry Conference*, Florianópolis, 2012.
- [11] Calvi, G.M. & Bolognini D.: *Seismic response of R.C. frames infilled with weakly reinforced hollow masonry panels*, Research Report, University of Pavia, 1999.
- [12] Calvi, G.M. & Bolognini D.: Seismic response of RC frames infilled with weakly reinforced masonry panels, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 153-185, 2001.
- [13] Giberson, M.F.: *The response of nonlinear multi-story structures subjected to earthquake excitation*, EERL Report, California Institute of Technology, 1967.
- [14] Otani, S.: Hysteresis models of reinforced concrete for earthquake response analysis, *Journal of the Faculty of Engineering of the University of Tokyo*, 36:2, pp. 125-159, 1981.
- [15] Ramberg, W. & Osgood, W.R.: Description of stress-strain curves by three parameters, *National Advisory Committee on Aeronautics*, Technical Note 902, 1943.
- [16] Klingner, R.E. & Bertero, V.V.: *Infilled frames in earthquake resistant construction*, Report No. EERC 76-32, University of California, 1976.
- [17] Crisafulli, F.J.: *Seismic behaviour of reinforced concrete structures with masonry infills*, PhD Dissertation, University of Canterbury, 1997.
- [18] Rodrigues, H., Varum, H. & Costa, A.: Simplified macro-model for infill masonry panels, *Journal of Earthquake Engineering*, 14:3, pp. 390- 416, 2010.
- [19] Fardis, M.N.: Seismic design issues for masonry-infilled RC frames, *1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, 2006.
- [20] Decanini, L.D., Bertoldi, S.H. & Gavarini, C.: Telai tamponati soggetti ad azione sismica, un modello semplificato: confronto sperimentale e numerico (in Italian), *6th National Conference ANIDIS*, Perugia, 1993.
- [21] CEN: Eurocode 8 EN 1998-1, *Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, European Committee for Standardisation, Brussels, 2004.
- [22] IBC 2012 edition: *International Building Code*, International Code Council, 2012.
- [23] ASCE Standard ASCE/SEI 7-10: *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, 2010.
- [24] NBCC 2010 edition: *National Building Code of Canada*, National Research Council, 2010.
- [25] NZS 1170.5:2004: *Structural Design Actions – Part 5: Earthquake Actions New Zealand*, Standards Council New Zealand, 2004.
- [26] FEMA 306: *Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings – Basic Procedures Manual*, Federal Emergency Management Agency, 1998.
- [27] FEMA 307: *Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings – Technical Resources*, Federal Emergency Management Agency, 1998.
- [28] Mehrabi, A.B., Shing, P.B., Schuller, M.P. & Noland, J.L.: Experimental evaluation of masonry infilled frames, *Journal of Structural Engineering*, 122:2, pp. 228-237, 1996.
- [29] Combescure, D., Pires, F., Cerqueira, P. & Pegon, P.: *Test on masonry infilled RC frames and its numerical interpretation*, Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering. Acapulco, Mexico, 1996.
- [30] Morandi, P., Hak, S. & Magenes, G.: Comportamento sismico delle tamponature in laterizio in telai in c.a.: definizione dei livelli prestazionali e calibrazione di un modello numerico (in Italian), *Atti del XIV convegno nazionale ANIDIS*, 2011.
- [31] Calvi, G.M., Kingsley, M.R. & Magenes, G.: Testing of masonry structures for seismic assessment, *Earthquake Spectra*, 12:1, pp. 145-162, 1996.
- [32] Durrani, A.J. & Haider, S.: Seismic response of RC frames with unreinforced masonry infills, *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, 1996.
- [33] Kakaletsis, D.J. & Karayannis, C.G.: Influence of masonry strength and openings on infilled RC frames under cyclic loading, *Journal of Earthquake Engineering*, 12:2, pp. 197-221, 2008.
- [34] Morandi, P., Hak, S. & Magenes, G.: Comportamento sismico delle tamponature in laterizio in telai in c.a.: analisi numeriche su edifici ed implicazioni progettuali (in Italian), *Atti del XIV convegno nazionale ANIDIS*, 2011.
- [35] Hak, S., Morandi, P., Magenes, G. & Sullivan, T.: Damage control for clay masonry infills in the design of RC frame structures, *Journal of Earthquake Engineering*, 16:S1, pp. 1-35, 2012.
- [36] Carr, A.J.: *Ruaumoko Manual*, University of Canterbury, 2007.
- [37] Smyrou, E., Blandon, C., Antoniou S., Pinho, R. & Crisafulli, F.J.: Implementation and verification of a masonry panel model for nonlinear dynamic analysis of infilled RC frames, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9:5, pp. 1519-1534, 2011.