

UDK 624.013.2:624.012.2

Primljeno 17. 9. 2007.

Modeliranje čeličnih okvira sa zidanim ispunom

Damir Markulak, Vladimir Sigmund, Ivan Radić

Ključne riječi

čelični okvir,
zidana ispuna,
sastavljeni sustav,
numeričko modeliranje,
djelovanje potresa,
metoda konačnih elemenata

Key words

steel frame,
masonry fill,
composite system,
numerical modelling,
earthquake action,
finite-element method

Mots clés

cadre d'acier,
remplissage en maçonnerie,
système composite,
modélage numérique,
action sismique,
méthode des éléments finis

Ключевые слова

стальная рама,
кладочное заполнение,
составленная система,
числовое
моделирование,
действие землетрясения,
метод конечных элементов

Schlüsselworte

Stahlrahmen,
Ausfachungsmauerwerk,
zusammengesetztes
System numerisches
Modellieren,
Erdbebenwirkung, Methode
der endlichen Elemente

D. Markulak, V. Sigmund, I. Radić

Prethodno priopćenje

Modeliranje čeličnih okvira sa zidanim ispunom

Prikazana je problematika numeričkog modeliranja čeličnih okvira sa zidanim ispunom pri djelovanju potresa. U novim europskim normama (EN 1998-1) predviđeno je proračunavanje interaktivnog djelovanja kod takvog sastavljenog sustava, ali se ne daju pravila proračuna. Na primjeru su prikazane najčešće primjenjivane mogućnosti modeliranja ponašanja takvih konstrukcija, primjenom metode konačnih elemenata te je upozoreno na potrebu praktičnog pristupa rješavanju ovoga problema.

D. Markulak, V. Sigmund, I. Radić

Preliminary note

Modelling steel frames with masonry fill

Problems encountered in numerical modelling of masonry-filled steel frames subjected to earthquake action are presented. According to new European standards (EN 1998-1) an interactive action should be calculated for such composite systems, but calculation rules are not provided. A practical example is used to show most frequent possibilities for modelling behaviour of such structures based on the finite-element method, and the need to use a practical approach to find solution to this problem is emphasized.

D. Markulak, V. Sigmund, I. Radić

Note préliminaire

Modelage des cadres d'acier à remplissage en maçonnerie

Des problèmes rencontrés au cours de modelage numérique des cadres d'acier à remplissage en maçonnerie soumis à l'action sismique sont présentés. Selon les normes européennes nouvelles (EN 1998-1) l'action interactive devrait être calculée pour de tels systèmes composites, mais les règles de calcul ne sont pas fournies. Un exemple pratique est utilisé pour montrer les possibilités les plus fréquentes dans le modelage du comportement de telles constructions selon la méthode des éléments finis, et l'accent est mis sur la nécessité d'utiliser l'approche pratique pour trouver solution à de tels problèmes.

Д. Маркулак, В. Сигмунд, И. Радич

Предварительное сообщение

Моделирование стальных рам с кладочным заполнением

В работе показана проблематика числового моделирования стальных рам с кладочным заполнением при действии землетрясения. В новых европейских нормах предусмотрен расчёт интерактивного действия у таким образом составленной системы, но не даются правила расчёта. На примере показаны чаще всего применяемые возможности моделирования поведения таких конструкций, с помощью применения метода конечных элементов и делается предупреждение о необходимости практического подхода к решению этой проблемы.

D. Markulak, V. Sigmund, I. Radić

Vorherige Mitteilung

Modellierung von Stahlrahmen mit Ausfachungsmauerwerk

Dargestellt ist die Problematik des numerischen Modellierens von Stahlrahmen mit Ausfachungsmauerwerk bei Erdbebenwirkung. In den neuen europäischen Normen (EN 1998-1) ist die Berechnung des interaktiven Wirkens bei solchem zusammengesetzten System vorgesehen, aber sind Berechnungsgrundsätze nicht angegeben. Am Beispiel zeigt man die häufigst angewendeten Modellierungsmöglichkeiten für das Verhalten solcher Konstruktionen durch Anwendung der Methode der endlichen Elemente. Es wird auf die Notwendigkeit des praktischen Zutritts zum Lösen dieses Problems hingewiesen.

Autori: Prof. dr. sc. **Damir Markulak**; prof. dr. sc. **Vladimir Sigmund**; **Ivan Radić**, dipl. ing. građ., Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet, Osijek

1 Uvod

Okviri sa zidanim ispunom kompozitne su konstrukcije sastavljene od okvira (čelični ili armiranobetonski) i ispunu za koje se u Hrvatskoj uobičajeno rabi opeka. Zgrade s takvim sustavom u Hrvatskoj prevladavaju kod niskih i srednje visokih građevina zbog niže cijene rada i tradicionalne uporabe zidanih konstrukcija. Od posebnog je interesa ponašanje takvih sustava pri potresnom opterećenju, a iskustva iz nedavnih potresa pokazuju i povoljna i nepovoljna ponašanja konstrukcija okvira s ispunom. Ispun bitno mijenja odgovor okvirne konstrukcije na potres i njegov se utjecaj mora na odgovarajući način uzeti u proračun. Uz vrlo detaljnu proceduru proračuna okvira i drugih uobičajenih nosivih konstrukcija u seizmičkim propisima te suvremenih metoda proračuna na raspolaganju projektantima, nedostatak uputa za okvire s ispunom može se pripisati samo nedovoljnom razumijevanju njihova ponašanja, tj. velikom broju nejasnoća uključenih u modeliranje djelovanja ispunu. Stoga većina propisa još uvijek ide u smjeru izdvajanja «glavnoga» okvirnog sustava iz ove kompozitne konstrukcije te istodobnog zanemarivanja nosivosti zidanog ispunu, koji se samo uračunava u težinu građevine [1]. Međudjelovanje između nearmiranog ispunu i okvira može dovesti do neuobičajenih ponašanja okvira, bilo lokalno (efekt *kratkog stupa*, otkazivanje priključaka), bilo globalno (formiranje *mekog kata*).



Slika 1. Čelični okvir sa zidanim ispunom

Dosadašnje analize (primjerice [22]) pokazuju da se okviri sa zidanim ispunom dimenzionirani sukladno normi EN 1998-1, [2], ponašaju bolje nego okviri bez ispunu pri uporabnom stanju konstrukcije, te jednako dobro pri proračunskom i ekstremnom opterećenju. Međutim, metoda proračuna sadržana u [2] jest prekonzervativna jer «kažnjava» konstrukcije s ispunom povećanjem proračunskih sila uz potpuno zanemarivanje doprinosa ispunu u preuzimanju tako povećanih opterećenja. Jedini razuman način uzimanja u obzir povoljnog i nepovoljnog učinka ispunu u proračunu seizmičkog odziva

konstrukcija jest izravno uključivanje zidanog ispunu u analitički model za proračun.

Razvoj racionalne metode proračuna nužan je ne samo radi smanjenja žrtava i šteta, nego i poradi dobivanja sigurnih i ekonomičnih rješenja. Nužan je i razvoj pojednostavnjenih metoda proračuna seizmičkog ponašanja okvirnih konstrukcija s ispunom koje će osigurati brzu analizu većeg broja varijanata u fazi projektiranja te omogućiti procjenu nosivosti i oštećenosti postojećih konstrukcija. U tom se smislu u radu daje pregled najčešće primjenjivanih proračunskih modela takvih konstrukcija na pojednostavnjenom primjeru jednokatnoga čeličnog okvira sa zidanim ispunom izloženom djelovanju horizontalne sile u ravnini grede okvira.

2 Karakteristike ponašanja čeličnih okvira sa zidanim ispunom

Ponašanje okvirnog sustava bez ispunskog zida dobro je istraženo te je ovisno o vrsti, namjeni i željenoj preciznosti proračuna moguće u obzir uzeti različite pretpostavke ponašanja konstrukcijskog sustava i materijala (elastični i plastični modeli, teorija prvoga ili drugoga reda i sl.).

Utjecaj zidanog ispunu na ponašanje okvira ovisi o nizu parametara – geometrijskim svojstvima i krutosti okvira te njegovom predviđenom (proračunskom) ponašanju pri ekstremnim opterećenjima, zatim također o vrsti, čvrstoći i krutosti zidanog ispunu, karakteristikama djelovanja kojima je konstrukcija izložena itd. Ispun se ponajprije kategorizira prema materijalu i geometrijskoj konfiguraciji. Zidovi od opeke najčešće su upotrebljavani tip ispunu, pri čemu se posebice često rabi šuplja opeka. Smještaj ispunu u odnosu na stupove okvira može biti centričan ili ekscentričan, a geometrijski odnosi zidanih panela ispunu obično su u omjeru 1:1 do 3:1. U dokumentu [3], koji nema snagu propisa, ali detaljnije obrađuje problematiku okvirnih konstrukcija sa zidanim ispunom pri potresnom djelovanju, navode se karakteristični načini ponašanja nearmiranog zidanog ispunu:

- klizanje po sljubnici morta
- prekoračenje tlačne nosivosti
- dijagonalno vlačno raspucavanje.

Pri djelovanju potresa može doći i do prevaljivanja, odnosno ispadanja ispunu izvan ravnine zida, što je karakteristično za gornje katove visokih zgrada, dok se u nižim katovima može dogoditi postupno «izmicanje» ispunu iz okvira pri svakom ciklusu opterećenja. Stoga je odgovarajućim konstrukcijskim postupcima potrebno spriječiti ovu pojavu.

Klizanje po sljubnici morta najčešće se pojavljuje zajedno s ostalim spomenutim načinima ponašanja, odnosno

gubitka nosivosti ispuna, a ta je pojava vjerojatna kod čvrstih i fleksibilnih okvira - čeličnih okvira. Ako su sljubnice morta relativno slabe u odnosu na elemente od kojih je zidan ispun (opeka, blok), najslabija je ravnina po kojoj će se dogoditi takvo otkazivanje nosivosti u blizini polovice visine zida ispuna.

Zbog horizontalnog opterećenja u ravnini okvira pojavljuju se velika tlačna naprezanja u dijagonalnom smjeru ispuna, dok u poprečnom smjeru dolazi do vlačnih naprezanja. Otkazivanje nosivosti ispuna zbog drobljenja tlačnog područja pojavljuje se zbog velikih koncentracija naprezanja u kutovima tlačne dijagonale. Kod čeličnih je okvira drobljenje kutova ispuna locirano na relativno malom području, dok se kod armiranobetonskih okvira drobljenje tlačnog područja ispune općenito događa na širem području.

Kada vlačne deformacije premaše deformacije pri kojima dolazi do pucanja zida ispuna, pojavljuju se dijagonalne pukotine. Kako se pomak konstrukcije povećava, dijagonalne pukotine nastoje se produljiti prema kutovima tlačnih dijagonala, a što će ovisiti o dimenzijama ispunskog panela. Takve se pukotine pojavljuju kod većine zidanih ispuna podvrgnutih velikim horizontalnim silama, a ponekad se pojavljuju i s klizanjem po sljubnici morta.

Čelični su okviri najčešće od I profila (uskopojasnih ili širokopojasnih), a pri razmatranju međudjelovanja sa zidanim ispunom pri potresnom opterećenju treba obratiti pozornost na sljedeće karakteristične načine ponašanja elemenata čeličnih okvira [3]:

- plastifikacije zbog savijanja
- plastifikacije ili izbočivanja hrpta zbog posmika
- otkazivanje nosivosti priključaka.

Zidani ispun zbog svoje horizontalne krutosti preuzima dosta horizontalnog opterećenja te zbog povećanih bočnih sila kod čeličnih okvira općenito dolazi do pojave plastifikacije zbog savijanja koja se očekuje u blizini krutih veza - kod upetih ležaja i priključaka greda-stup. S obzirom na veliku rotacijsku sposobnost čeličnih elemenata te utjecaja ispuna na ograničavanje relativnoga katnog pomaka, takav način ponašanja čeličnih okvira općenito ne dovodi do značajnijih posljedica. Prekoračenje posmične otpornosti ili izbočivanje hrpta kod stupova okvira može se dogoditi nakon početnog drobljenja zidanog ispuna u kutovima formirane tlačne dijagonale, kada se ona «pomiče» prema dolje, te tako dolazi do povećanih posmičnih sila koje djeluju na rubne dijelove stupova (efekt *kratkog stupa*). Djelovanjem ispuna se izvorno izrazito fleksijsko ponašanje čeličnih okvira općenito mijenja tako da dolazi do povećanja uzdužnih sila, a smanjenja momenata savijanja te mehanizam pri-

jenosa sila zbog aktiviranja tlačne dijagonale u zidanom ispunu postaje sličniji rešetkastom sustavu. Velike tlačne sile u dijagonalnom smjeru zidanoga ispuna izlažu priključke znatnijem vlačnom naprezanju, pa se u priključcima mogu pojaviti nepovoljna stanja naprezanja zbog «efekta poluge» te ovaj način ponašanja može imati ozbiljnije posljedice za konstrukciju.

Ponašanje kompozitnog sustava okvir-ispun izrazito je nelinearne prirode te preciznije modeliranje najčešće kombinira eksperimentalne postupke, ispitivanje materijala te primjenu nelinearnih analiza i metode konačnih elemenata (MKE), [4], [5], [6], [7], [8]. U [2] su navedene neke opće smjernice za proračunski tretman takve vrste konstrukcija te se razlikuju:

- fleksijski okviri s armiranobetonskim ispunom koja je na odgovarajući način povezan s čeličnim okvirom i s njim čini cjelinu,
- fleksijski okviri kod kojih je ispun konstrukcijskim mjerama odvojen od čeličnog okvira
- fleksijski okviri kod kojih je ispun u kontaktu s čeličnim okvirom, ali nije posebnim konstrukcijskim mjerama s njim povezana.

Prva se skupina konstrukcija proračunski tretira po pravilima za spregnute konstrukcije čelik-beton, a druga kao obična čelična konstrukcija. Za treću skupinu, koja se razmatra u ovom radu, zahtijeva se uzimanje u obzir međudjelovanja okvir-ispun te ravnomjerna raspodjela ispuna po visini. Međutim, iako se navodi mogućnost modeliranja utjecaja ispuna preko zamjenske tlačne dijagonale, detaljnijih podataka kako izračunati njezine geometrijske karakteristike nema (osim što se navodi da usvojena širina dijagonale treba biti neki fiksni postotak duljine dijagonale zidanog panela). Također, detaljnijih podataka o mogućim nepovoljnim utjecajima međudjelovanja okvir-ispun za sada nema.

3 Pregled aktualnih metoda modeliranja čeličnih okvira sa zidanim ispunom

Za numeričko modeliranje okvira s nearmiranim zidanim ispunom danas se rabi nekoliko karakterističnih modela. Pri modeliranju se općenito teži postići i dovoljna pouzdanost u procjeni ponašanja i prihvatljiva jednostavnost modela budući da su se izrazito kompleksni modeli s puno parametara pokazali neadekvatnima za praktičnu uporabu (osim u svrhu npr. kalibriranja jednostavnijih modela). Gruba se klasifikacija tih modela može provesti iz dvaju stajalista:

- kompleksnosti modela (od fenomenološkog modeliranja ili uporabe makroelemenata do modeliranja metodom konačnih elemenata, MKE)

- mogućnosti obuhvaćanja odgovarajućih mehanizama otkazivanja nosivosti zidanog ispuna (navedenih u prethodnom poglavlju).

U ovome se radu razmatraju mogućnosti modeliranja čeličnih okvirnih konstrukcija sa zidanim ispunom metodom konačnih elemenata (MKE) kada se ovisno o svrsi i traženoj točnosti proračuna najčešće primjenjuju sljedeći pristupi:

- Izdvojeno modeliranje okvira* - utjecaj zidanog ispuna na ponašanje okvira potpuno se zanemaruje te se okvir dimenzionira na prihvat ukupnog (i horizontalnog) opterećenja bez obzira na postojanje ispuna
- Linearni štapni model sa zamjenskim dijagonalama* - ispun se modelira s pomoću štapnog elementa kao zamjenske (tlačne) dijagonale koja spaja nasuprotne vrhove okvira a za slučaj cikličnog opterećenja model se sastoji od dviju (tlačnih) dijagonala; geometrijske i mehaničke karakteristike dijagonala određuju se pojednostavljenim postupcima te se pretpostavlja neograničeno linearno ponašanje
- Nelinearni štapni modeli* – ponašanje ispuna modelira se nelinearnim zakonitostima te se u proračunski model uvodi u obliku odgovarajućih nelinearnih elemenata («opruga», engl. *nonlinear spring*) kojima je moguće definirati različite karakteristike «sila-pomak»; pri tome je navedene nelinearne elemente, u skladu s načinom proračuna odgovarajućih parametara, moguće orijentirati horizontalno ili dijagonalno (slika 2.)
- Diskontinuirani ravninski modeli* - zidani se ispun modelira ravninskim elementima (s ortotropnim ili izotropnim svojstvima) no u modelu postoje zasebni čvorovi za svaku od komponenata konstrukcije (okvir i ispun), a za definiranje njihova kontakta uvode se posebni elementi kojima je moguće simulirati stvarnu situaciju u modelu – pri vlačnim naprezanjima dolazi do odvajanja elemenata u kontaktu, dok se pri tlačnim naprezanjima računaju ostvarena kontaktna naprezanja; za modeliranje kontakta mogu se rabiti tzv. *gap*, *gap/friction* ili *kontakti* (engl. *contact elements*) elementi.

Valja istaknuti da se u praksi, nažalost, ponekad može naići i na tzv. *kontinuirane modele*, kod kojih se zidani ispun modelira ravninskim elementima, ali je veza sa štapnim elementima okvira kontinuirana, tj. svi čvorovi okvira i zida imaju zajedničke pomake, što dakako ne odgovara stvarnoj situaciji. Takvi su modeli pogrešni, a u radu je taj model upotrijebljen za ilustrativniju usporedbu s rezultatima proračuna dobivenim na diskontinuiranom modelu. Neki od navedenih modela mogu biti približni ili čak na strani nesigurnosti, pa dajemo usporedni prikaz i komparaciju rezultata dobivenih na istom

numeričkom primjeru. Treba istaknuti da posebni problemi nastaju pri procjeni ponašanja sustava pri velikim deformiranjima. Za numerička modeliranja upotrijebljeni su programi NISA II/DISPLAY i ROBOT-Millennium [9], [10].

4 Primjeri modeliranja čeličnog okvira sa zidanim ispunom

U skladu s postavljenim ciljem rada, na numeričkom su primjeru jednokatnoga čeličnog okvira sa zidanim ispunom ilustrirane različite mogućnosti numeričkog modeliranja ponašanja takve kompozitne konstrukcije. Parametri za proračunsko definiranje modela nisu utemeljeni na konkretnom eksperimentu, ali su njihove vrijednosti odabrane na osnovi brojnih empirijskih smjernica nastalih na temelju obrade postojećih eksperimentalnih podataka dostupnih u literaturi. Za opće modeliranje ponašanja zidanog ispuna upotrijebljene su detaljnije preporuke dane u [3], dok su mehaničke karakteristike zidanog ispuna i čeličnog okvira određene na temelju odgovarajućih europskih norma.

Čelični je okvir dimenzija 2,50 m x 2,00 m s gredom i stupovima od valjanih profila HE A 180 te zidanog ispuna debljine 19 cm od zidnih elemenata dimenzija 19 cm x 19 cm x 33 cm. Okvir je izložen djelovanju horizontalne sile u visini gornjeg čvora okvira (slika 2.). Karakteristična se tlačna čvrstoća zidanog ispuna prema [11] može izračunati iz izraza:

$$f_k = K \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25} \quad [N/mm^2] \quad (1)$$

gdje je:

K - konstanta u $[N/mm^2]^{0,10}$ koja ovisi o tipu zidnih elemenata i načinu izvedbe zidanog ispuna (usvojeni zidni element svrstan je u skupinu 2a te je $K = 0,55$)

f_b - normalizirana tlačna čvrstoća zidnih elemenata u N/mm^2 , ovisno o smjeru djelovanja opterećenja (ovdje usvojeno $f_b = 10 N/mm^2$)

f_m - tlačna čvrstoća morta za opću namjenu u N/mm^2 (ovdje usvojeno $f_m = 5 N/mm^2$).

Uz usvojene vrijednosti karakteristična tlačna čvrstoća zidanog ispuna iznosi $f_k = 3,676 N/mm^2$, a prema istom se dokumentu sekantni modul elastičnosti može usvojiti prema izrazu:

$$E_{me} = 1000 f_k = 1000 \cdot 3,676 = 3676,0 N/mm^2 = 367,6 kN/cm^2 \quad (2)$$

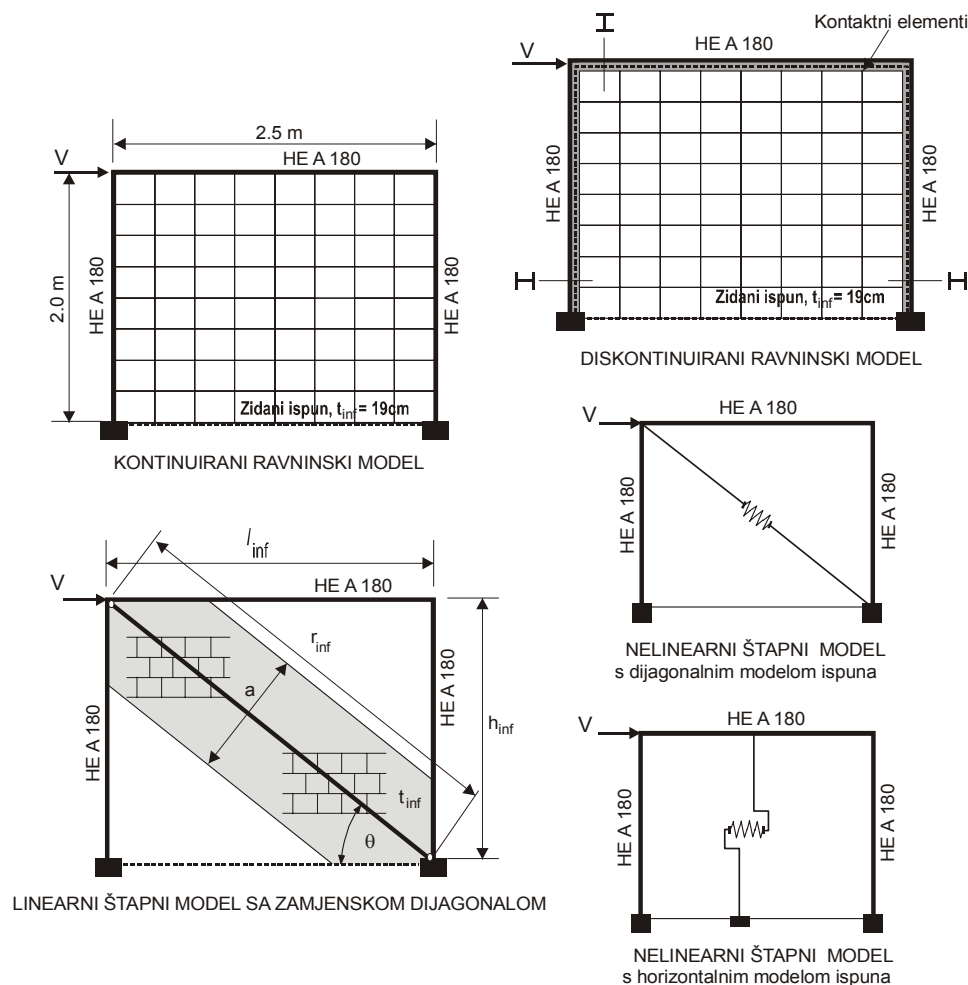
U svim je modelima pretpostavljeno idealno elastoplastično ponašanje materijala čeličnog okvira s granicom popuštanja $f_y = 235 N/mm^2$ i modulom elastičnosti

$E_{fe} = 210000 \text{ N/mm}^2$. Ostale geometrijske karakteristike sustava jesu:

- visina čeličnog stupa okvira $h_{col} = 200 \text{ cm}$
- visina zidanog ispuna $h_{inf} = 191,45 \text{ cm}$
- moment tromosti presjeka čeličnog stupa okvira $I_{col} = 2510,0 \text{ cm}^4$
- duljina zamjenske dijagonale $r_{inf} = 301,49 \text{ cm}$
- debljina zidanog ispuna $t_{inf} = 19,0 \text{ cm}$
- duljina zidanog ispuna $L_{inf} = 232,90 \text{ cm}$
- kut nagiba zamjenske dijagonale $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{191,45}{232,90}\right) = 39,42^\circ$

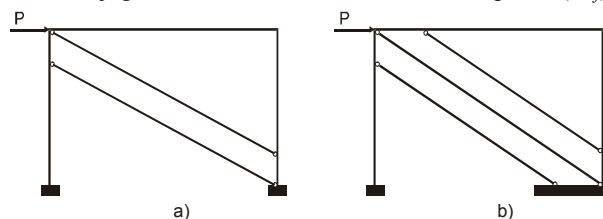
U skladu s prethodnim poglavljem, za kompozitni sustav čelični okvir-zidani ispun izrađeni su ravninski diskontinuirani i kontinuirani model te štapni linearni i nelinearni modeli (slika 2.).

Za diskontinuirani ravninski model uporabljeni su *kon-taktni elementi* čime je modelirana i geometrijska neli-



Slika 2. Modeliranje čeličnog okvira sa zidanim ispunom

nearnost modela. Kod linearnog modela sa zamjenskom dijagonalom vlačna se čvrstoća zidanog ispuna potpuno zanemaruje te se ispun modelira zamjenskom tlačnom dijagonalom (u slučaju cikličkog djelovanja potrebne su dvije dijagonale). Kod takvih je modela vrlo važna što točnija procjena geometrijskih karakteristika takve zamjenske dijagonale (slika 2.). Jedan od načina jest da se dimenzije zamjenske dijagonale odrede iz uvjeta jednakih horizontalnih pomaka diskontinuiranoga ravninskog modela (ili ispitnog uzorka) i «ekvivalentnog» modela sa zamjenskim dijagonalama. U literaturi se može pronaći i dosta gotovih izraza - od jednostavne ocjene da se širina dijagonale može uzeti kao $\frac{1}{4}$ visine ispuna (h_{inf})



Slika 3. Štapni modeli s više zamjenskih dijagonala u jednome smjeru

(npr. prema [12]), pa do kompleksnijih izraza osnovanih na eksperimentalnim istraživanjima (npr. prema [3]). Ovdje treba napomenuti da se katkad rabe i modeli s više zamjenskih dijagonala odgovarajućih karakteristika u jednome smjeru (slika 3.) [16]. Usporedbe rezultata takvih štapnih modela s rezultatima diskretnih ravninskih modela općenito pokazuju da je kod modela s više zamjenskih dijagonala horizontalna krutost okvira nešto manja u odnosu na model s jednom zamjenskom dijagonalom (a što ovisi i o usvojenom razmaku između dijagonala) [25].

Ipak, rezultati proračuna na modelu s jednom zamjenskom dijagonalom pokazuju da taj model, unatoč svojoj jednostavnosti, daje kvalitetnu procjenu horizontalne krutosti okvira sa zidanim ispunom

te raspodjelu uzdužnih sila u konstrukciji uzrokovanu horizontalnim bočnim opterećenjem. Stoga je u literaturi općeprihvaćeno da se model s jednom zamjenskom dijagonalom (dvije dijagonale za ciklična opterećenja) može uspješno primjenjivati za proračune i studije procjene sustava okvira i zidanog ispuna.

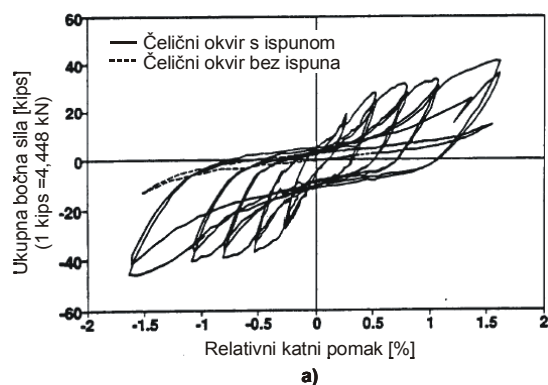
Kako u [2] nisu dane detaljnije upute za geometrijsko definiranje ispuna za potrebe modeliranja, u ovom je radu zamjenska dijagonala prikazana stvarnom debljinom ispuna koji je u kontaktu s okvirom (t_{inf}), duljinom dijagonale (r_{inf}) i širinom a koja je proračunana prema [3]:

$$a = 0,175(\lambda_1 \cdot h_{col})^{-0.4} \cdot r_{inf} \quad (3)$$

gdje je:

$$\lambda_1 = \left[\frac{E_{me} \cdot t_{inf} \cdot \sin 2\theta}{4E_{fe} \cdot I_{col} \cdot h_{inf}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

Primjer rezultata eksperimentalnog istraživanja ponašanja čeličnog okvira sa zidanim ispunom, koje je 1994. proveo Mander sa suradnicima, [13], prikazani su na slici 4.a).



Slika 4. a) Rezultati cikličkog ispitivanja čeličnog okvira sa zidanim ispunom i bez njega prema [13], b) Anvelopa nosivosti zidanog ispuna

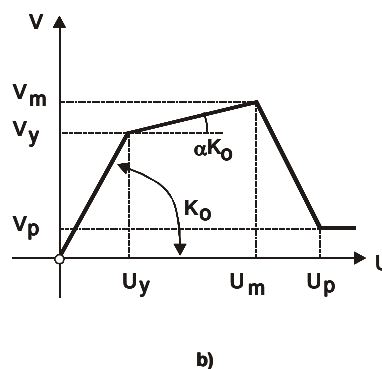
Obradom rezultata eksperimentalnih ispitivanja, ponašanje zidanog ispuna u nelinearnim proračunima može se opisati odgovarajućim anvelopama nosivosti ispuna, tzv. *backbone* krivuljama konstruiranim prema stvarnom histereznom ponašanju ispune, [20]. Kod nelinearnih je modela najjednostavnija primjena bilinearnog dijagrama, ali se rabe i složeniji modeli koji uključuju realnije ponašanje ispuna te sadrže i degradirajuće dijelove dijagrama.

U ovome je radu ponašanje ispuna modelirano jednostavnim linearnim modelom te nelinearnim modelima s anvelopom nosivosti ispuna po uzoru na oblik prikazan na slici 4.b), [14], [4]. Kod nelinearnih je modela anvelopa nosivosti ispuna definirana odgovarajućom nosivošću na horizontalna bočna opterećenja te pripadajućim po-

macima za pojedine razine opterećenja – nosivost pri popuštanju V_y , najveća posmična nosivost V_m , preostala posmična čvrstoća V_p te odgovarajući pomaci U_y , U_m i U_p . Parametar α je omjer horizontalne krutosti ispuna nakon pojave popuštanja i početne krutosti, slika 4.b)

Opisane se nelinearne karakteristike pri modeliranju unose s pomoću bezdimenzijskih «spring» elemenata čije je ponašanje moguće definirati proizvoljnom nelinearnom funkcijom (npr. u NISA II), dok je u većini inženjerskih programa (npr. ROBOT, SAP2000 i sl.) također moguće lokalno uključiti nelinearno ponašanje preko tzv. nelinearnih zglobova (eng. *nonlinear hinges*) ili nelinearnih ležaja. Takvim se pojednostavnjenim nelinearnim modelima, uz najčešće prihvatljivo povećanje vremena trajanja proračuna, bitno povećava točnost procjene odziva u odnosu na jednostavne linearne modele sa zamjenskom tlačnom dijagonalom jer tlačno otkazivanje nosivosti ispuna nije jedini način otkazivanja.

U razmatranom je numeričkom primjeru za proračun parametara anvelope nosivosti zidanog ispuna najveća horizontalna nosivost V_m određena prema dvama najčešćim načinima gubitka nosivosti: gubitak nosivosti zbog



klizajućeg posmika i gubitak tlačne nosivosti zamjenske dijagonale (kako je objašnjeno u poglavlju 2.). Kao mjerodavna vrijednost za definiranje najveće horizontalne nosivosti V_m usvojena je manja od ovih dviju vrijednosti. Vlačno raspucavanje općenito nije opći način otkazivanja nosivosti i više je povezano s upotrebljivošću konstrukcije budući da se veće bočne sile

mogü preuzeti drugim mehanizmima nosivosti. Stoga ovaj način ponašanja kao i mogućnost prevlajivanja ispune izvan ravnine okvira u ovome primjeru nisu razmatrani.

Za određivanje nosivosti na klizajući posmik primjenjuje se Mohr-Coulombov kriterij otkazivanja nosivosti:

$$\tau_{slide} = \tau_0 + \mu\sigma_N \quad (5)$$

gdje je τ_0 posmična čvrstoća morta, μ je koeficijent trenja duž sljubnice a σ_N je vertikalno tlačno naprezanje na promatranoj razini zidnog ispuna. Ako se u razmatranje uključe dimenzije zidne ispune, tada se najveća horizontalna posmična sila koju ispun može preuzeti može odrediti iz izraza:

$$V_{slide} = \tau_0 \cdot t_{inf} \cdot L_{inf} + \mu N \quad (6)$$

gdje je N vertikalna uzdužna sila u zidanom ispunu. Uzimajući u obzir ovdje razmatrani sustav i opterećenje, sila N može se proračunati kao vertikalna komponenta uzdužne sile u zamjenskoj dijagonali D . Nosivost ispuna na klizajući posmik dostignuta je pri $D \cos \theta = V_{slide}$ te se izraz (6) može napisati u obliku:

$$V_{slide} = \frac{\tau_0 \cdot t_{inf} \cdot L_{inf}}{1 - \mu \tan \theta} \quad (7)$$

Mnogi su istraživači ispitivali posmičnu čvrstoću morta τ_0 i koeficijent trenja μ koristeći se različitim materijali τ_0 ma, te je dobiven relativno širok interval izmjerenih vrijednosti u različitim uvjetima. Tipične vrijednosti posmične čvrstoće za opečne elemente i vapnene mortove nalaze se u intervalu od 0,1 do 0,7 MPa pri nultom osnom naprežanju, dok se izmjerene vrijednosti koeficijenta trenja nalaze u širokom intervalu od 0,3 do 1,2 (primjerice [21], [24]). Prema [11] se u nedostatku eksperimentalnih ispitivanja preporučuje usvojiti vrijednost od 0,1 MPa pa je ta vrijednost usvojena i u ovome primjeru, dok je za koeficijent trenja usvojena vrijednost od μ 0,4.

Tlačna se nosivost zamjenske dijagonale zidanoga ispuna prema [3] može odrediti iz izraza:

$$V_c = a \cdot t_{inf} \cdot f'_{m90} \cdot \cos \theta \quad (8)$$

gdje je f'_{m90} tlačna nosivost zidanoga ispuna u horizontalnom smjeru, koja se prema istom dokumentu u nedostatku eksperimentalnih podataka može uzeti u vrijednosti od 50 % karakteristične tlačne nosivosti ispuna (f'_k).

Ostali parametri potrebni za definiranje anvelope nosivosti zidanoga ispuna procijenit će se prema metodi prikazanoj u [14] i [4], gdje se daju izrazi za proračun parametara U_m i K_0

$$U_m = \frac{\varepsilon'_m \cdot r_{inf}}{\cos \theta} \quad (9)$$

$$K_0 = 2 \left(\frac{V_m}{U_m} \right) \quad (10)$$

pri čemu je ε'_m deformacija zidanoga ispuna pri najvećem tlačnom naprežanju, a K_0 početna horizontalna krutost zidanoga ispuna. Prema eksperimentalnim podacima vrijednost ε'_m iznosi od 0,002 do 0,005, a za ovaj će se primjer usvojiti vrijednost od 0,002 u skladu s [11]. Nadalje, iz geometrijskih odnosa anvelope nosivosti (slika 4.b) vrijedi:

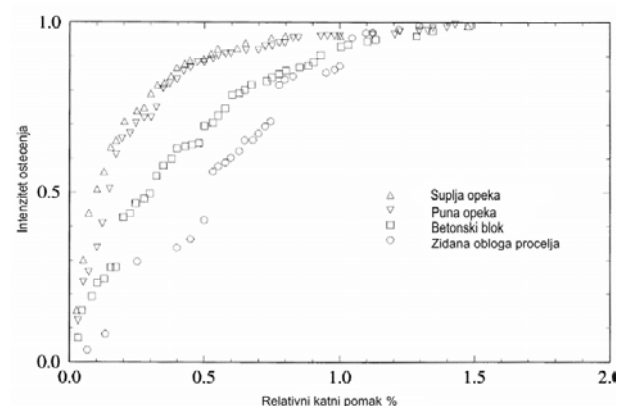
$$V_y = \frac{V_m - \alpha \cdot K_0 \cdot U_m}{1 - \alpha} \quad (11)$$

$$U_y = \frac{V_y}{K_0} \quad (12)$$

U ovome je radu pretpostavljena vrijednost parametra α jednaka 0,1. Prema [3] preostala se vrijednost posmične nosivosti zidanoga ispuna može procijeniti kao:

$$V_p = 0,3 \cdot V_m \quad (13)$$

dok najveći pomak U_p ovisi o vrsti materijala ispuna i ograničen je određenom vrijednošću međukatnog pomaka. Vrijednost graničnoga relativnog katnoga pomaka (relativni katni pomak/visina kata u %) za zidani ispun prema [3] iznosi 1,5 % i ta je vrijednost usvojena i u ovome primjeru (slika 5.) pri čemu je on u potpunosti oštećen.



Slika 5. Oštećenost ispuna u ovisnosti o relativnom katnom pomaku prema [22]

Uvrštavanjem numeričkih vrijednosti iz promatranog primjera u izraze (3) - (8) dobije se:

$$\lambda_1 = 0,0203 \text{ 1/cm}$$

$$a = 30,12 \text{ cm}$$

$$V_{slide} = 65,93 \text{ kN}$$

$$V_c = 81,26 \text{ kN}$$

te se za mjerodavnu posmičnu nosivost zidanog ispuna usvaja vrijednost $V_m = 65,93$ kN. Potom, uporabom izraza (9) - (13), uz gore objašnjene pretpostavke, proračunaju se ostali parametri anvelope nosivosti ispuna:

$$U_m = 0,781 \text{ cm}$$

$$K_0 = 168,83 \text{ kN/cm}$$

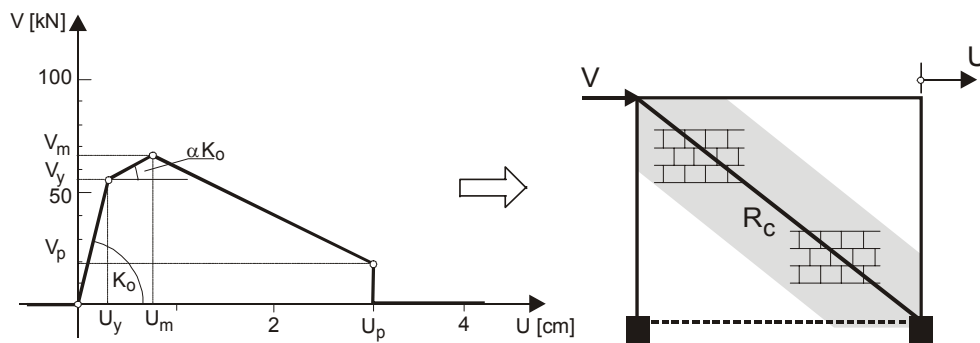
$$V_y = 58,60 \text{ kN}$$

$$U_y = 0,347 \text{ cm}$$

$$V_p = 19,78 \text{ kN}$$

$$U_p = 3,00 \text{ cm}$$

Anvelopa nosivosti zidanog ispuna za razmatrani primjer prikazana je na slici 6., pri čemu treba voditi računa da se dobiveni parametri nosivosti odnose na horizontalni bočni smjer. Pri uporabi nelinearnoga dijagonalnog modela, vrijednosti parametara proračunanih za horizon-



Slika 6. Anvelopa nosivosti zidanog ispuna za promatrani numerički primjer

talni smjer moraju se korigirati projekcijom na dijagonalni smjer.

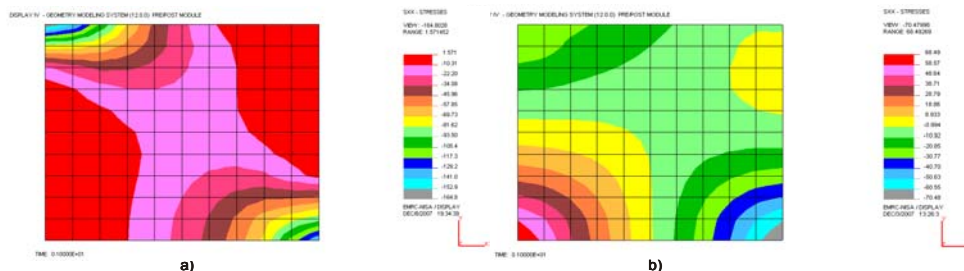
5 Rezultati proračuna i komentar

Na slikama 7. do 9. prikazani su neki rezultati provedenih proračuna na ravninskim modelima konstrukcije iz numeričkog primjera (prikazane veličine naprezanja odnose na horizontalno opterećenje pri doseganju tlačne nosivosti ispuna), a na temelju parametara definiranih u prethodnom poglavlju izrađeni su linearni i nelinearni statički proračuni proračunskih štapnih modela. Usporednim analiziranjem dobivenih rezultata na razmatranim proračunskim modelima mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Raspodjela normalnih σ_{xx} i posmičnih τ_{xy} naprezanja u zidanom ispunu očekivano je bitno drukčija kod kontinuiranoga i diskontinuiranoga ravninskog modela – kod diskontinuiranog se modela jasno uočava formirano dijagonalno tlačno područje uz najveća naprezanja na rubovima toga područja, dok se u slučaju kontinuiranog modela evidentno značajno aktivira i vlačno područje («vlačna dijagonala»), a što je nerealno ponašanje za zidani ispun; usporedba intenziteta dobivenih normalnih naprezanja na linearnom štapnom modelu sa zamjenskom dijagonalom:

$$\sigma = \frac{R_c}{a \cdot t_{inf}} = \frac{82,20}{30,12 \cdot 19,0} = 0,144 \text{ kN/cm}^2,$$

gdje je R_c sila u tlačnoj dijagonali, pokazuje relativno dobru procjenu naprezanja u odnosu na diskretni ravninski model (slika 7.).



Slika 7. Normalno naprezanje σ_{xx} (N/cm^2) za: a) diskontinuirani model, b) kontinuirani model

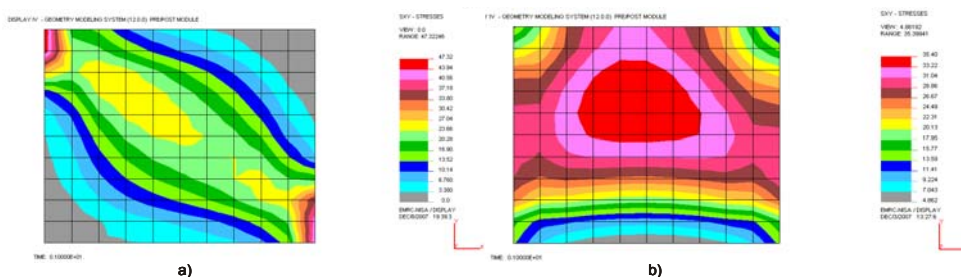
- Na shemi deformiranja diskontinuiranog modela vidi se razdvajanje čeličnog okvira i zidanog ispuna na mjestima pojave vlačnih naprezanja na kontaktnoj plohi, za razliku od kontinuiranog modela gdje su pomaci na cijeloj duljini kontakta okvira i zida zajednički.

- Važna je stavka pri ocjeni pojedinog modela i usporedba dobivenih rezultata s ponašanjem čeličnog okvira budući da neočekivano međudjelovanje pri dimenzioniranju može bitno poremetiti predviđene načine otkazivanja nosivosti; rezultati proračuna štapnih modela prikazani na slici 10. pokazuju da je zidani ispun povećao horizontalnu krutost konstrukcije, ali i smanjio njezinu duktilnost, pa se zbog toga za takav tip konstrukcija u [2] predviđa relativno konzervativan faktor ponašanja ($q = 2$) pri proračunu na potresna djelovanja.
- Ako se primjenjuje linearni model sa zamjenskom dijagonalom pri kojemu je ispun modelirana tlačnom dijagonalom s neograničenim elastičnim ponašanjem, horizontalna krutost takvog modela još je veća (slike 10.) te je tada potrebno voditi računa o preuzetoj sili u zamjenskoj dijagonali (koja ne smije prijeći nosivost ispuna), kako se ne bi dobila nerealno velika nosivost konstrukcije u cjelini; na slici 11. prikazana je usporedba odziva nelinearnih štapnih modela s dijagonalno i horizontalno postavljenim nelinearnim «oprugama» za modeliranje ponašanja zidanoga ispuna.

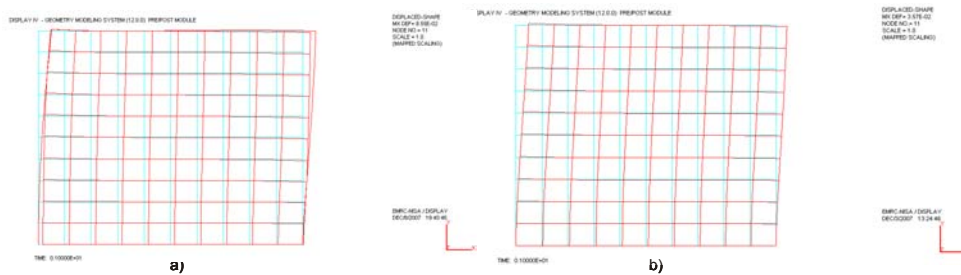
Iz ovog je primjera vidljiva važnost što točnijeg definiranja ponašanja kompozitnog sustava okvir-zidani ispun da bi se dobila kvalitetnija procjena odziva pri horizontalnim opterećenjima. Pri tome treba i dalje raditi na iznalaženju racionalnijih pojednostavljenih metoda koje mogu s dovoljnom točnošću obuhvatiti izrazito nelinearno ponašanje okvirnih konstrukcija sa zidanim ispunom.

U tom je smislu nužna primjena parametarskih studija potkrijepljenih odgovarajućim eksperimentalnim istraživanjima pojedinih parametara modela kakve se danas intenzivno provode. Objavljeni rezultati takvih provedenih studija (npr. [6]) na-

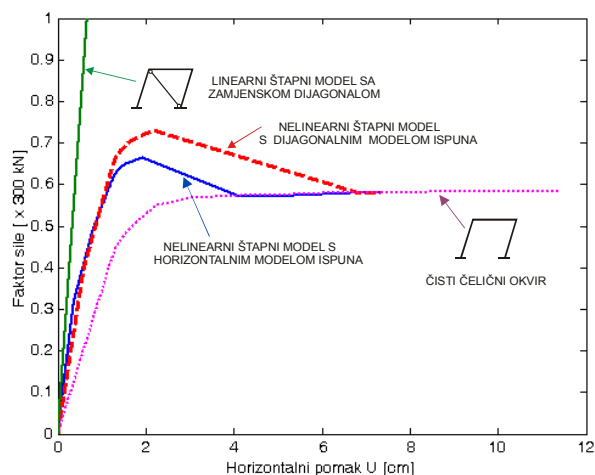
vode da se radi o izrazito kompleksnom, kadšto i ponešto slučajnom fenomenu kada je u pitanju međudjelovanje okvira i ispuna, a kao posebno važni utjecajni čimbenici navode se dimenzije ispuna i omjer dimenzija okvira, prionjivost i trenje u sljubnicama, čvrstoća i horizontalna krutost ispuna, čvrstoća i horizontalna krutost elemenata okvira, nepopustljivost ležajnih spojeva i priključaka greda-stup, gravitacijsko opterećenje te eventualno postojanje razmaka između okvira i ispuna.



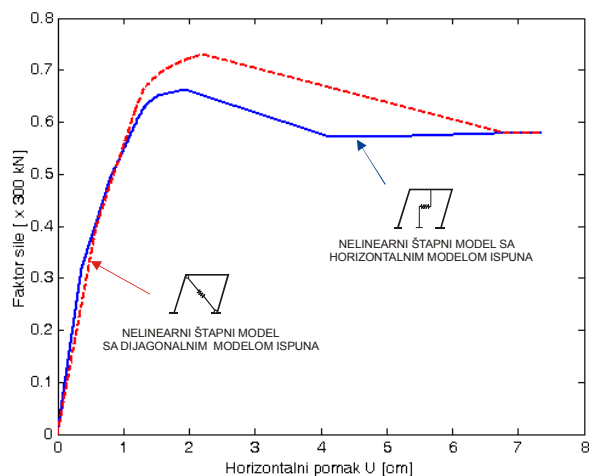
Slika 8. Posmično naprežanje τ_{xy} (N/cm²) za: a) diskontinuirani model, b) kontinuirani model



Slika 9. Oblik deformiranja za: a) diskontinuirani model, b) kontinuirani model



Slika 10. Dijagram sila-pomak za štapne modele



Slika 11 Usporedba rezultata nelinearnih štapnih modela s dijagonalnim i horizontalnim modeliranjem ponašanja zidanoga ispuna

U pokušajima za što boljim kontroliranjem odziva okvira sa zidanim ispunom pri potresnom djelovanju mogu se razlučiti dva dijametralna pristupa. Jedan se zasniva na ojačanju ispuna (npr. betoniranjem dijagonalnih uglova), kako bi se omogućilo preuzimanje većih sila i bolje međudjelovanje s okvirom, dok se u drugom pristupu nastoji ograničiti zajedničko djelovanje okvira i ispuna tako da pri određenoj sili dođe do njihova razdvajanja, čime bi se okvir «oslobodio» dodatnih sila koje preuzima ispun. Balansiranje između ovih rješenja i odabir konačnog rješenja ovisit će o konkretnim parametrima, tj. vrsti građevine, opterećenja, željenom načinu ponašanja, posljedicama rušenja i sl., a zapravo se u osnovi radi o modernom pristupu koji nazivamo «potresno inženjersvo sukladno očekivanom odzivu» (engl. *Performance Based Design*).

6 Zaključak

U radu je obrazložena problematika modeliranja ponašanja čeličnih okvira sa zidanim ispunom. Pri tome je posebno zanimljivo ponašanje takvih sustava pri potresnom djelovanju budući da sadašnji propisi iz toga područja upućuju na potrebu proračunskog obuhvaćanja međudjelovanja iako još uvijek ne daje detaljne smjernice za proračun. Na istovjetnom numeričkom primjeru ilustrirane su najčešće primjenjivane metode modeliranja takvih sustava primjenom MKE, uz prethodni proračun parametara potrebnih za opisivanje pojedinih modela.

Kako su okvirne konstrukcije sa zidanim ispunom dosta zastupljene u našim krajevima, evidentna je potreba za provođenjem daljnjih istraživanja radi boljeg razumijevanja njihova ponašanja i kvalitetnije procjene rizika pri potresu. Upoznavanjem i obradom rezultata prethodnih

istraživanja, te njihovim prikazom na inženjerski način, postupno se formiraju zaključci o bitnim karakteristikama ponašanja. Istraživanja treba nastaviti na kontroliranim i ciljanim eksperimentima te daljnjim razvojem numeričkih modela, kako bi se postiglo poboljšanje proračuna radi realnijeg upoznavanja ponašanja okvirnih konstrukcija s ispunom. Na taj će način biti moguće dati prijedloge racionalnijih metoda projektiranja koje izrav-

no uključuju ispun u analizu ponašanja konstrukcija u fazi projektiranja, čime će se projektirati pouzdanije i racionalnije konstrukcije. Stoga je vrlo važno razvijati inženjerske metode proračuna koje će omogućiti brži proračun većeg broja varijanata u fazi projektiranja takvih konstrukcija, a krajnji rezultat istraživanja treba biti praktična metodologija utemeljena na širokoj bazi eksperimentalnih ispitivanja.

Napomena

Istraživanja opisana u ovome radu obavljena su u okviru znanstvenog projekta br.(149-1492966-1536.), «Seizmički proračun okvirnih konstrukcija s ispunom» koji financira Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske. Autori se zahvaljuju na potpori.

LITERATURA

- [1] Kaushik, H.B.; Rai, D.C.; Jain, S.K.: *Code Approaches to Seismic Design of Masonry-Infilled Reinforced Concrete Frames: A State-of-the-Art Review*, Earthquake Spectra, Earthquake Engineering Research Institute, Volume 22, No. 4, pp. 961-983, November 2006.
- [2] EN 1998-1: *Design of structures for earthquake resistance Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, European Committee for Standardization, Bruxelles, December 2004.
- [3] FEMA 306: *Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings*, Basic Procedures Manual, Federal Emergency Management Agency, Applied Technology Council (ATC-43 Project), Washington DC, USA, 1998.
- [4] Mostafaei, H.; Kabeyasawa, T.: *Effect of Infill Masonry Walls on the Seismic Response of Reinforced Concrete Buildings Subjected to the 2003 Bam Earthquake Strong Motion: A Case Study of Bam Telephone Center*, Bulletin of the Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Vol. 79, pp. 133-156, 2004.
- [5] Henderson, R.C.; Fricke, K.E.; Jones, W.D.; Beavers, J.E.; Bennett, R.M.: *Summary of Large- and Small-scale Unreinforced Masonry Test Program*, U.S. Department of Energy, 2002.
- [6] Dawe, J.L.; Liu, Y.; Seah, C.K.: *A parametric study of masonry infilled steel frames*, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 28, No. 1, pp. 149-157(9), February 2001.
- [7] Kappos, A.J.; Stylianidis, K.C.; Michailidis, C.N.: *Analytical Models for Brick Masonry Infilled R/C Frames Under Lateral Loading*, Journal of Earthquake Engineering, vol. 2, No. 1, pp. 59-87, 1998.
- [8] Abrams, D.: *Seismic Response of Unreinforced Masonry Buildings*, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER), University at Buffalo, State University of New York, USA, 1994.
<http://mceer.buffalo.edu/publications/resaccom/94-SP02/>
- [9] NISA II, *User's Manual*, Version 9.0, Engineering mechanics research corporation, Michigan, USA, December 1995.
- [10] Robot Millennium v.17.0, *User's Manual*, Update November 2003, Firma Informatyczna RoboBAT SP z.o.o., Krakow, Poland
- [11] ENV 1996-1-1: *Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for buildings - Rules for reinforced and unreinforced masonry*, European Committee for Standardization, Bruxelles, June 1995.
- [12] Aničić, D.; Fajfar, P.; Petrović, B.; Szavits-Nossan, A.; Tomažević, M.: *Zemljotresno inženjerstvo – visokogradnja*, Građevinska knjiga, Beograd, 1990.
- [13] Mander, J.B.; Aycardi, L.E.; Kim, D.K.: *Physical and Analytical Modeling of Brick Infilled Steel Frames*, Proceedings of NCEER Workshop on Seismic Response of Masonry Infills, Technical Report NCEER-94-0004, San Francisco, 1994.
- [14] Madan, A.; Reinhorn, A.M.; Mander, J.B.; Valles, J.B.: *Modeling of Masonry Infill Panels for Structural Analysis*, Vol. 123, No. 10, pp. 1295-1302, October 1997.
- [15] Proença, J.; Oliveira, C.S.; Almeida, J.P.: *Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete Structures with Masonry Infilled Panels: The Case of Block # 22 of the Santa Maria Hospital in Lisbon*, ISET Journal of Earthquake Tehnology, Paper No. 449, Vol. 41, No. 2-4, pp. 233-247, June-December 2004.
- [16] El-Dakhkhni, W.W.; Elgaaly, M.; Hamid, A.A.: *Three-Strut Model for Concrete Masonry-Infilled Steel Frames*, Journal of Structural Engineering, Vol. 129, Issue 2, pp. 177-185, February 2003.
- [17] Moghaddam, H.A.: *Lateral Load Behavior of Masonry Infilled Steel Frames with Repair and Retrofit*, Journal of Structural Engineering, Vol. 130, Issue 1, pp. 56-63, January 2004.
- [18] El-Dakhkhni, W.W.; Hamid, A.A.; Elgaaly, M.: *GFRP Reinforcing of Concrete Masonry Infill Walls*, 3rd International Conference on composites in infrastructures, San Francisco, USA, June 2002.
- [19] Z. Sorić: *Zidane konstrukcije I*, Z. Sorić, Zagreb, 2004.
- [20] FEMA 273: *Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Applied Technology Council, Washington DC, USA, 1997.
- [21] Priestley, M.; Paulay, T.: *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*, John Wiley&Sons Inc., New York, USA, 1992.
- [22] A. Kappos, F. Ellul, ; *Seismic design and performance assessment of masonry infilled r/c frames*, Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, February 2000.
- [23] Algan, B.B.: *Drift and Damage Considerations in Earthquake Resistant Design of R/C Buildings*, Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana/Champaign, 1982.
- [24] Tomažević, M.: *Earthquake-resistant Design of Masonry Buildings*, Imperial College Press, London, 2000.
- [25] Smyrou, E.: *Implementation and verification of a masonry panel model for nonlinear dynamic analysis of infilled RC frames*, MS Dissertation, European school for advanced studies in reduction of seismic risk Rose School, Università degli Studi di Pavia, 2006.