# Kontrolirano seizmičko ponašanje čeličnih okvira sa zidanom ispunom

**Radić, Ivan; Markulak, Damir; Sigmund, Vladimir**

*Source / Izvornik:* **Građevinar, 2016, 68, 883 - 893**

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

https://doi.org/10.14256/JCE.1673.2016

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:895451

*Rights / Prava:* Attribution 4.0 International/Imenovanje 4.0 međunarodna

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-25**

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

*Repository / Repozitorij:*

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

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Primljen / Received: 17.5.2016.
Ispravljen / Corrected: 24.9.2016.
Prihvaćen / Accepted: 7.10.2016.
Dostupno online / Available online: 10.12.2016.

# Kontrolirano seizmičko ponašanje čeličnih okvira sa zidanom ispunom

Autori:

Doc.dr.sc. Ivan Radić, dipl.ing.građ.
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku
Građevinski fakultet Osijek
radic@gfos.hr

Prof.dr.sc. Damir Markulak, dipl.ing.građ.
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku
Građevinski fakultet Osijek
markulak@gfos.hr

Prof.dr.sc. Vladimir Sigmund

Izvorni znanstveni rad

Ivan Radić, Damir Markulak, Vladimir Sigmund

## Kontrolirano seizmičko ponašanje čeličnih okvira sa zidanom ispunom

Bilo da se radi o pregradnim ili nosivim zidovima, zidana ispuna značajno utječe na ponašanje primarne konstrukcije. U ovom se radu najprije razmatraju dvije različite vrste zidnih blokova (tzv. jaki i slabi) često korištenih u Hrvatskoj kao ispune čeličnih okvira. Na osnovu eksperimentalnih rezultata dobivenih ispitivanjem ponašanja tih dviju vrsta blokova predložena je treća vrsta ispune koja predstavlja specifičnu kombinaciju prethodnih dviju, kao mogućnost ostvarivanja kontroliranog ponašanja čeličnih okvira sa zidanom ispunom.

Ključne riječi:
zidana ispuna, čelični okviri, interakcija okvira i ispune, kontrolirano seizmičko ponašanje

Original scientific paper

Ivan Radić, Damir Markulak, Vladimir Sigmund

## Controlled seismic behaviour of masonry-infilled steel frames

Whether used as a curtain/partition wall or a bearing part of the structure, masonry infill significantly affects structural behaviour of the primary structure. Two different types of masonry units ('strong' and 'weak'), often used in Croatia as infill of steel frames, are initially considered in the paper. Based on experimental results obtained by testing behaviour of these two types of masonry units, a third type of infill is proposed, which is a specific combination of the initial two types, and enables realisation of controlled behaviour of masonry-infilled steel frames.

Ključne riječi:
masonry infill, steel frames, frame to infill interaction, controlled seismic behaviour

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Ivan Radić, Damir Markulak, Vladimir Sigmund

## Kontrolliertes seismisches Verhalten von Stahlrahmen mit Mauerwerksausfachungen

Unabhängig davon, ob es sich um Trennwände oder tragende Wände handelt, beeinflusst ausfachendes Mauerwerk das Verhalten des primären Tragwerks bedeutend. In dieser Arbeit werden zunächst zwei verschiedene Typen von Mauerwerksblöcken betrachtet (s. g. starke und schwache), die in Kroatien als Ausfachung verwendet werden. Basierend auf experimentellen Resultaten aus Versuchen an diesen Blöcken, wurde als ihre spezifische Kombination ein dritter Mauerwerkstyp vorgeschlagen, um ein kontrolliertes Verhalten von Stahlrahmen mit Mauerwerksausfachungen vorzuschlagen.

Ključne riječi:
Mauerwerksausfachung, Stahlrahmen, Interaktion von Rahmen und Ausfachung, Kontrolliertes seismisches Verhalten

## 1. Uvod

Opekarski proizvodi izrađeni od gline, lakog betona ili sličnog tipa agregata vrlo se često upotrebljavaju u građevinarstvu zahvaljujući njihovoj lakoj dostupnosti, prihvatljivoj cijeni, općenito dobrim fizikalnim svojstvima kao i jednostavnoj proizvodnji i ugradnji. Ti proizvodi mogu biti korišteni kao nosivi elementi ili kao ispuna kod glavnih nosivih elemenata, na primjer kod čeličnih i armiranobetonskih okvira. Činjenica da prisutnost te ispune utječe na ponašanje glavnog konstrukcijskog sustava danas je dobro poznata, no i dalje ne postoji nedvosmisleno propisana metoda odnosno detaljno propisana procedura proračuna ovih interaktivnih, kombiniranih sustava koje nazivamo okviri sa zidanom ispunom. Posebna poteškoća je u tome da utjecaji uslijed postojanja ispune mogu biti povoljni (npr. povećana krutost i nosivost cijele konstrukcije) ili nepovoljni (npr. izraženije naprezanje u priključcima čeličnih okvira, posebno tzv. efekt poluge, uzrokovano velikim tlačnim silama u dijagonalnom smjeru zidane ispune, efekt kratkog stupa i sl.), a što ovisi o mnogo različitih parametara koji se odnose na geometrijske razmjere i razmještaj glavnih konstrukcijskih elemenata, geometrijske karakteristike zidane ispune, svojstva materijala i sl., [1]. Nadalje, većina materijalnih karakteristika ispune direktno ovisi o sastavnim dijelovima ziđa kao i metodi izvođenja, te je ponašanje okvira sa zidanom ispunom izrazito nelinearno. Posljedično, primjerena metoda proračuna ponašanja ove vrste konstrukcije uobičajeno zahtijeva kombinaciju eksperimentalnih i analitičkih metoda.

Posebnu pažnju treba usmjeriti na kontaktno područje između okvira i zidanog panela. Općenito, tri različite situacije iz toga aspekta su moguće i prepoznate u sadašnjim normama [2] – zidana ispuna je odgovarajućim konstrukcijskim rješenjima povezana s čeličnim okvirom, zidani panel je konstrukcijski odvojen od elemenata čeličnog okvira i treći slučaj u kojem su zidana ispuna i elementi čeličnog okvira u kontaktu ali nisu nikakvim konstrukcijskim mjerama dodatno međusobno povezani. Ovaj treći po redu nabrojeni slučaj najčešće se pojavljuje u praksi kada je u pitanju zidana ispuna, te je ta mogućnost i detaljnije analizirana u ovom radu. Analizirajući sadašnju konstruktorsku praksu mogu se uočiti dva osnovna pristupa pri pokušajima poboljšanja ponašanja okvira sa zidanom ispunom, [1]:

a) ojačavanje zidane ispune različitim metodama radi daljnjeg povećanja nosivosti i monolitnog ponašanja cijele konstrukcije,
b) ograničenje intenziteta interakcije između zidanog panela i čeličnog okvira odgovarajućim konstrukcijskim mjerama i/ili napravama kako bi se smanjila oštećenja ispune i nepovoljni utjecaji na okvirnu konstrukciju.

Treba primijetiti da su ta dva pristupa potpuno suprotna, što dodatno naglašava značajni nedostatak razumijevanja konstrukcijskog ponašanja ove vrste konstrukcija. Nedostatak prvog pristupa, pristup a) da dodatna krutost zidanog panela smanjuje prirodni period okvira s ispunom što posljedično rezultira većim potresnim opterećenjem na konstrukciju. Nadalje, takvim rješenjem se još više utječe na konstrukcijsko ponašanje dok glavne karakteristike te konstrukcije i dalje ostaju jednake – općenito osjetljiv ispun, sklon naglom raspucavanju, drobljenju i ljuštenju koje može izazvati životno opasne situacije. Osim toga, to u prvom redu i jest razlog zašto se ovakve vrste konstrukcija smatraju potresno rizičnima. Osnovna poteškoća kod drugog pristupa, pristup b) jest potreba za uvođenje dodatnih naprava koje služe za cjelovito odvajanje zidanog panela od okvirne konstrukcije. To često značajno usložnjava proces izvođenja konstrukcije te samim tim smanjuje mogućnost praktične primjene takvih rješenja.

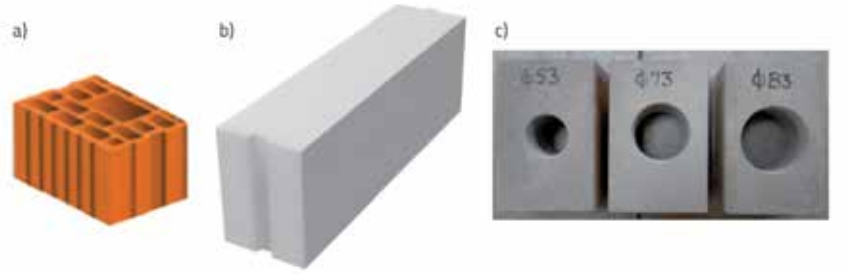
Mogućnost prezentirana u ovom radu razmatra intuitivni "inženjerski" pristup kojim bi se obuhvatilo složeno ponašanje okvirnih konstrukcija sa zidanom ispunom uz postizanje "kompromisnog" rješenja između pristupa a) i b). Ono bi do određene mjere uključilo prije spomenute povoljne utjecaje oba navedena pristupa – povećanu krutost, nosivost i kapacitet trošenja energije okvira sa zidanom ispunom te u isto vrijeme i očuvanje duktilnog ponašanja čeličnog okvira za povećana potresna opterećenja.

## 2. Formulacija problema

Ideja pokušaja kontrole ključnih parametara konstrukcijskog ponašanja okvira sa zidanom ispunom (odnosno bilo koje druge vrste konstrukcija) nije nova. Postoji dosta predloženih metoda za postizanje toga cilja a neke od njih, za primjer, mogu se naći u [3-5]. Kako je već istaknuto, većina tih rješenja zasniva se na određenim, manje ili više složenim napravama ili rješenjima koja moraju biti posebno izrađena i odgovarajuće ugrađena kako bi se osiguralo ciljano odvajanje ispune od okvira i tako polučio željeni učinak. To uobičajeno znači postojanje određenog razmaka između ispune i elemenata okvira, što trajno zahtijeva nužnu pažnju iz aspekta toplinske, zvučne i protupožarne zaštite toga panela, odnosno cijele konstrukcije. Iako spomenute poteškoće automatski nisu i nerješive i u konačnici neprimjenjive u praksi, istina je da one nepobitno vode k još složenijem izvođenju i analizi realnog ponašanja. Posljedično, može se postaviti pitanje postoji li doista stvarna potreba za usvajanjem sve složenijih rješenja ili se mogu pronaći neke jednostavnije i u konačnici jeftnije metode (npr. zamjena ziđa s nekom drugom vrstom materijala ako se ustanovi da ono doista vrlo nepovoljno djeluje u konkretnoj situaciji). Iz toga aspekta se čini logičnim nastaviti tražiti rješenja koja će uzimati u obzir postavljene ciljeve za osiguravanjem željenog ponašanja, ali uz istovremeno prihvatljiva konstrukcijska rješenja koja će takvo ponašanje i osigurati. U suprotnom, značajne prednosti ziđa (koje su naglašene u uvodnom poglavlju ovoga rada) mogu biti značajno kompromitirane kod ove vrsta konstrukcija.

Jedna od mogućnosti za postizanje navedenog cilja razmatra se u ovom radu. Ona obuhvaća kombiniranje dvije različite vrste zidane ispune koje su specifično razmještene unutar čeličnog

okvira. Te dvije vrste zidane ispune su različitih mehaničkih svojstava i sastoje se od šupljih glinenih blokova kao "jake" ispune i laganih porobetonskih blokova kao "slabe" ispune. "Slaba" ispuna se tako razmješta duž kontakta s čeličnim okvirom, a "jaka" ispuna ispunjava središnji dio panela, te se na taj način dobije odgovarajuća vrsta kompozitne ispune. Čvrstoća "slabije" ispune mora osigurati monolitnost (kompaktnost) ispune do određene razine opterećenja, a optimalno je da to bude razina koja odgovara zahtjevima graničnog stanja uporabljivosti ili manjem intezitetu seizmičkog opterećenja. Kada bočno (horizontalno) opterećenje premaši tu unaprijed definiranu razinu, počinje se događati djelomično odvajanje duž kontakta okvira i ispune kao posljedica postupnog raspucavanja i lomljenja "slabe" ispune smještene na kontaktu okvira i ispune. Na taj se način kompaktno ponašanje cijelog zidanog panela može očuvati do unaprijed određene razine bočnog opterećenja (npr. kroz poznati međukatni pomak), dok za veća bočna opterećenja nosivost preuzima čelični okvir i ostvaruje stabilnost konstrukcije, istovremeno izbjegavajući nepovoljno djelovanje zidane ispune. U ciljanim provedenim istraživanjima prezentiranim u ovom radu trudili smo se dokazati ispravnost ove hipoteze.




**Slika 1. Zidni elementi korišteni pri ispitivanju: a) skalirani šuplji glineni blok; b) porobetonski blok; c) skalirani prošupljeni porobetonski blok**

## 3. Provedena eksperimentalna istraživanja

Radi prilagodbe konstrukcijskog ponašanja kombinirane zidane ispune, najprije je trebalo provesti istraživanje mjerodavnih karakteristika pojedinačnih vrsta ispune koje se kombiniraju, ali i ostale sastavne dijelove konstrukcije (materijal čeličnog okvira, mort i zidne prizme).

Prvo ispitivanje je provedeno na zidnim elementima: šupljem glinenom bloku (korištenom kao "jaka" ispuna, oznaka uzoraka C-*i*), lakim porobetonskim blokovima (korištenom kao "slaba" ispuna, oznaka uzoraka A-*i*) te prošupljenom porobetonskom bloku (korištenom zajedno s prethodne dvije vrste ispune kod kombinirane ispune, oznaka uzoraka CA-*i*), slika 1.

Ispitivanja su provedena u skladu sa sadašnjim europskim normama, a dobiveni rezultati za tlačnu čvrstoću zidnih elemenata su prikazani u tablici 1. U drugoj seriji ispitivanja utvrđene su mehaničke karakteristike zidnih prizmi (slika 2.), čeličnog materijala za okvire i morta koji je bio korišten za izradu zida.

**Slika 2. Ispitivanje tlačne čvrstoće zidnih prizmi: a) C – zidna prizma; b) AAC – zidna prizma**

**Tablica 1. Tlačne čvrstoće zidnih elemenata**

| Uzorak | Glineni blokovi | | Porobetonski blokovi | Prošupljeni porobetonski blok | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $f_{m,v}$ [N/mm²] | $f_{m,h}$ [N/mm²] | $f_{m,h}$ [N/mm²] | $f_{m,v}$ [N/mm²] | | | $f_{m,h}$ [N/mm²] | | |
| | | | | Ø54 mm | Ø74 mm | Ø84 mm | Ø54 mm | Ø74 mm | Ø84 mm |
| **1** | 13,3 | 2,3 | 2,2 | 2,0 | 2,1 | 1,8 | 0,8 | 0,5 | 0,3 |
| **2** | 13,3 | 2,0 | 2,3 | 2,1 | 2,1 | 1,7 | 1,2 | 0,5 | 0,3 |
| **3** | 13,3 | 2,1 | 2,1 | 2,3 | 2,2 | 1,6 | 0,7 | 0,3 | 0,4 |
| **4** | 12,6 | 2,0 | 2,1 | 1,9 | 1,9 | 1,5 | 0,8 | 0,5 | 0,3 |
| **5** | 13,0 | 2,0 | 1,9 | 2,3 | 2,0 | 1,4 | 0,8 | 0,3 | 0,3 |
| **6** | 12,8 | 1,9 | 2,2 | 2,1 | 1,9 | 1,6 | 1,0 | 0,5 | 0,3 |

$f_{m,v}$ – vertikalna tlačna čvrstoća (u smjeru šupljina)
$f_{m,h}$ – horizontalna tlačna čvrstoća (u smjeru okomitom na smjer šupljina)

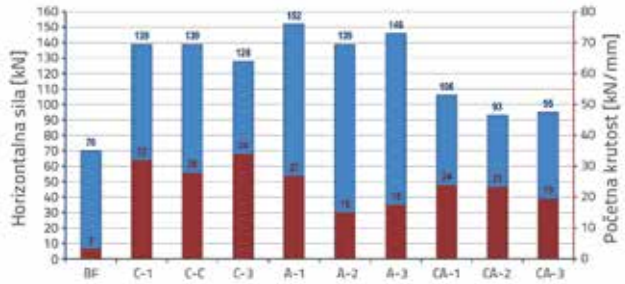
Prosječna granica popuštanja i čvrstoća osnovnog čeličnog materijala okvira bile su 337 N/mm$^2$ odnosno 483 N/mm$^2$. Prosječna tlačna čvrstoća morta korištenog kod zidanja jače ispune (C-*i* uzorci) i kombinirane ispune (CA-*i* uzorci) bila je 5,0 N/mm$^2$. Za slabiju ispunu od porobetonskih blokova (A-*i* uzorci) korišteno je propisano ljepilo s prosječnom tlačnom čvrstoćom od 9,1 N/mm$^2$.

Prosječne vertikalne karakteristične tlačne čvrstoće zidnih prizmi izrađenih od šupljih glinenih blokova (C-prizma) i porobetonskih blokova (AAC-prizma) bile su 1,6 odnosno 0,9 N/mm$^2$. Više podataka o svim provedenim ispitivanjima materijalnih karakteristika ziđa može se pronaći u [1].

Nakon ispitivanja sastavnih elemenata konstrukcije na Građevinskom fakultetu u Osijeku izgrađeno je i ispitano devet čeličnih jednokatnih, jednorasponskih okvira, koji su podijeljeni u tri serije ovisno o vrsti korištene zidne ispune, [1]. Svi čelični okviri bili su jednaki s nepopustljivim priključcima, a dimenzije su prikazane na slici 3.

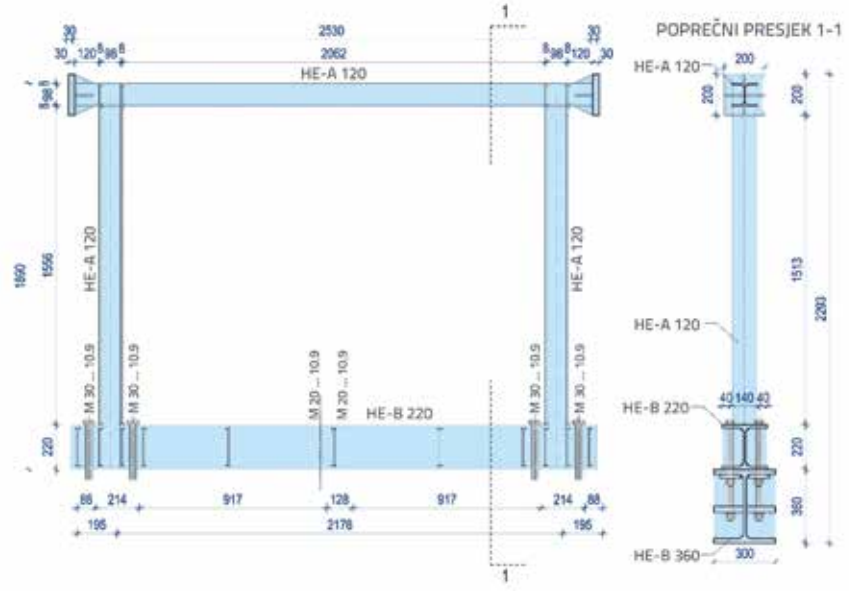
Zaključci dobiveni iz analiziranog ponašanja prethodno ispitanih uzoraka tipa C-*i* i A-*i* korišteni su za konstruiranje kombinirane ispune za treću seriju ispitivanja modela. Kao cilj simulacije "dvofaznog" ponašanja kombinirane ispune, za eksperimentalno je ponašanje uzet zahtjev da središnji dio ispune ostane uglavnom neoštećen. S obzirom na nedostatak preciznijih metoda proračuna koje bi omogućile izračun točnog opterećenja pri kojem će doći do gnječenja/lomljenja kombiniranog panela, porobetonski blokovi su bili dodatno oslabljeni bušenim rupama s tri različita promjera (d) za svaki uzorak iz serije CA (CA-1: d = 53 mm, CA-2: d = 73 mm i CA-3: d = 83 mm), slika 1.c.

Dvije hidraulične preše kapaciteta 350 kN i hoda klipa od ±150 mm bile su pričvršćene na čelični reaktivni okvir kako bi se nanijelo ciklično ravninsko bočno opterećenje u izgrađene modele. Preše su bile pozicionirane lijevo i desno u odnosu na uzorak tako da je opterećenje nanošeno preko posebnih ukrućenja smještenih na oba kraja grede okvira, slika 3. Čelični okviri bili su opterećivani nazovi-statički u cikličkom režimu, a prirast opterećenja kontroliran je na dva načina – kontrolom unosa sile do pojave tečenja i nakon toga kontrolom pomaka, u skladu s [1]. Eksperimentalno utvrđeno granično opterećenje i početna krutost (kao primarni pokazatelji globalnog konstrukcijskog ponašanja) za svaki uzorak prikazani su na slici 4.



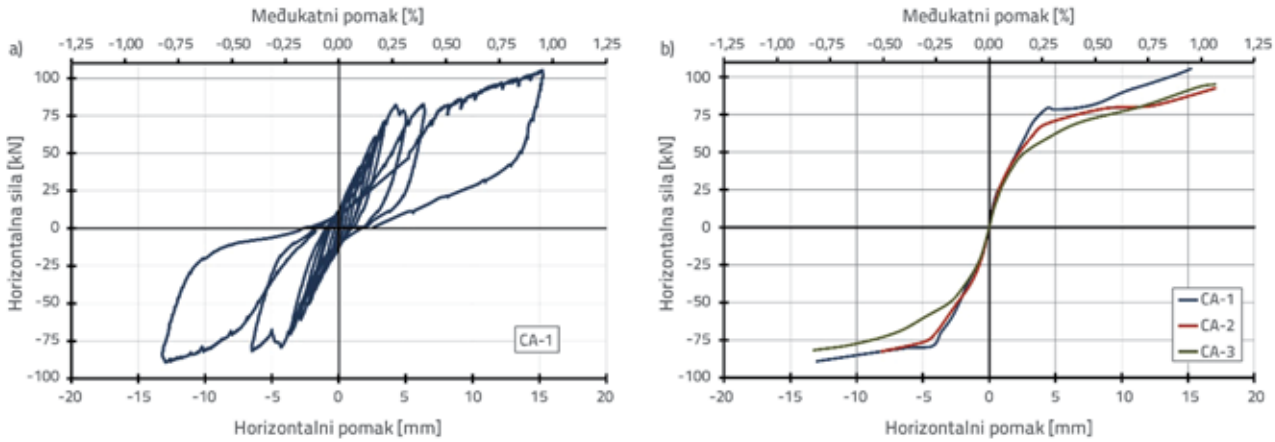

**Slika 4. Nosivosti i početne krutosti čeličnog okvira (BF) i okvira s ispunom od šupljih glinenih blokova (C-i), porobetonskih blokova (A-i) i s kombiniranom ispunom (CA-i)**

Općenito, primijećeno je vrlo različito ponašanje pojedinih ispitivanih serija uzoraka. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja serije C-i pokazuju da ti uzorci imaju najveću krutost uz istovremeno veliku čvrstoću, a oblik histerezne linije je gotovo gladak. Pri prekoračenju tlačne čvrstoće ispune pojavljuju se pukotine u smjeru dijagonala uz vidljivo ljuštenje i raspucavanje vanjskih slojeva šupljih blokova. To je i karakteristični način otkazivanja ispitne serije s jakom ispunom. Značajno drugačiji način ponašanja primijećen je kod serije A-i uzoraka. Ta vrsta ispune sastojala se od slabih zidnih elemenata povezanih vrlo čvrstim ljepilom te je njeno ponašanje bilo netipično za ziđe – ta je ispuna ostala cjelovita i u duboko neelastičnom području (čak do 1,7 % relativnog pomaka). Naime, iako je došlo do raspucavanja i pukotine su bile podjednako raspoređene duž cijelog zidnog panela, cjelovitost interaktivnog sustava okvir-ispuna je kod ovog tipa ispune bila dugo sačuvana pokazujući gotovo idealno elastoplastično ponašanje.




**Slika 3. Dimenzije čeličnog okvira**

Posljedično, u usporedbi sa serijom C-*i* uzoraka, kod A-*i* serije dostignuta je veća nosivost uz manju krutost i pojavu neelastičnih deformacija čeličnog okvira. Ponašanje treće ispitivane serije s kombiniranom ispunom bilo je specifično i drugačije od prethodne dvije serije. Dobivene histerezne ovojnice (primarne krivulje) za CA-*i* seriju uzoraka prikazane su na slici 5. (ostale histerezne ovojnice mogu se pronaći u [1]). Ponašanje uzorka CA-1 bilo je najbliže željenom ponašanju koje je objašnjeno prije. Pokušavalo se postići dvije različite faze

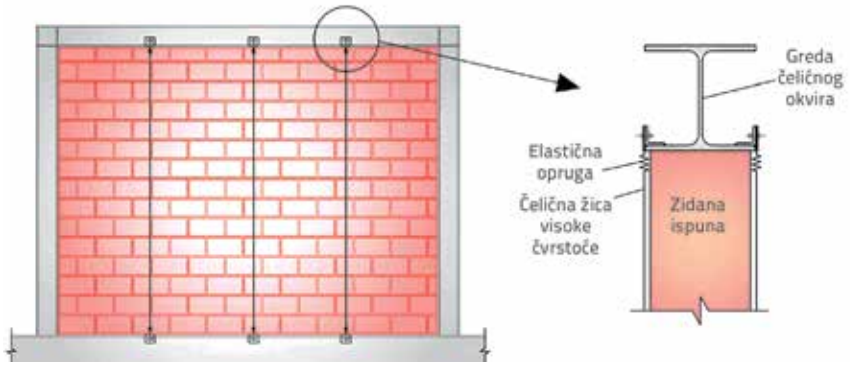



**Slika 5. a) Histerezna petlja uzorka CA-1; b) Histerezne ovojnice uzoraka CA-*i***

ponašanja – prva faza trebala bi biti karakterizirana monolitnim djelovanjem cijelog sustava okvira s ispunom, a druga s postupnim odvajanjem čeličnog okvira od ispune i njegovim samostalnim funkcioniranjem za veća opterećenja. Primijećeno je da je početna sekantna krutost uzorka CA-1 usporediva sa sekantnim krutostima uzoraka serije C-*i*, a općenito je bila veća od uzoraka serije A-*i*, osim uzorka A-1 koji se ponašao netipično toj seriji, slika 4.

Daljnje povećanje opterećenja uzrokovalo je odvajanje između okvira i ispune tako da je središnji dio panela ostao gotovo neoštećen, kako se može i vidjeti na slici 6.

**Slika 6. Fotografija uzorka CA-1 nakon sloma**



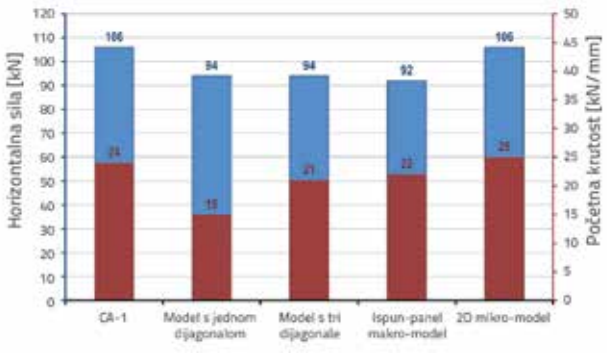

**Slika 7. Primjer pridržanja zidane ispune za onemogućavanje sloma izvan ravnine**

Uzimajući u obzir raspucano kontaktno područje između okvira i ispune, treba obratiti pozornost na pridržanje središnjeg dijela ispune kako ne bi došlo do njegova ispadanja izvan ravnine okvira (iako do separacije vjerojatno neće doći progresivno, naglo i potpuno duž čitave kontaktne duljine). Ispadanje panela izvan ravnine može se spriječiti odgovarajućim konstrukcijskim mjerama – na primjer pomoću nekoliko čeličnih žica jednoliko rapoređenih duž raspona okvira (s obje strane zidnog panela) i elastično pričvršćenih na pojasnice čelične grede, slika 7. Zidni panel nakon toga može biti ožbukan tako da ovakva mjera neće značajnije utjecati na sam proces izvođenja konstrukcije. Sačuvavši većinu zidnog panela neoštećenim i na taj način omogućavajući sanaciju raspucane kontaktne površine između panela i okvira, može ponekad značiti značajne uštede tijekom rekonstrukcije zgrade.

## 4. Analitičko modeliranje

Eksperimentalno dobiveni podatci o ponašanju ispitivanih modela korišteni su za kalibraciju relevantnih parametara odgovarajućih analitičkih modela, koji su uključivali makromodele (model s jednom i tri zamjenske dijagonale te makropanelni zidni element) te detaljni 2D mikromodel. Modeli sa zamjenskim dijagonalama, tako se i očekivalo, pokazali su se jako dobrim za procjenu globalnog ponašanja modela, slika 8. Model s makropanelnim zidnim elementom (izrađen u programu Seismostruct) bio je prihvatljive točnosti za sve tipove ispune. Mikromodeli su se pokazali najtočnijima s vrlo dobrom simulacijom globalnog i lokalnog ponašanja, slika 9. Detalje o provedenim kalibracijama analitičkih

modela te simuliranje eksperimentalno utvrđenog ponašanja može se pronaći u [6].

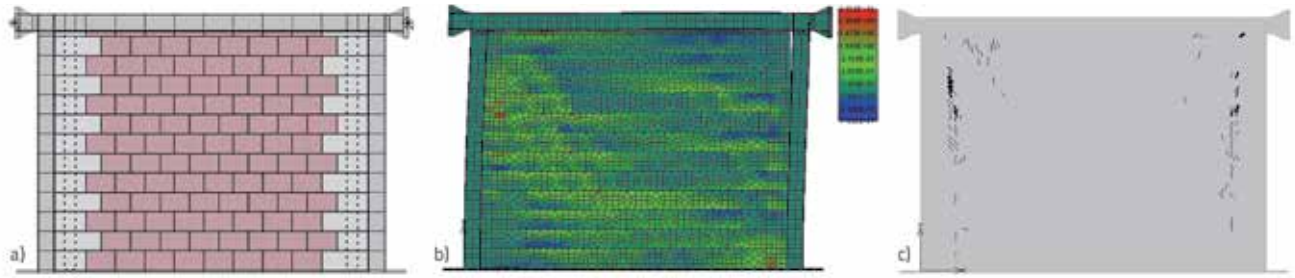



**Slika 8. Usporedba analitičkih i eksperimentalnih rezultata uzorka CA-1**

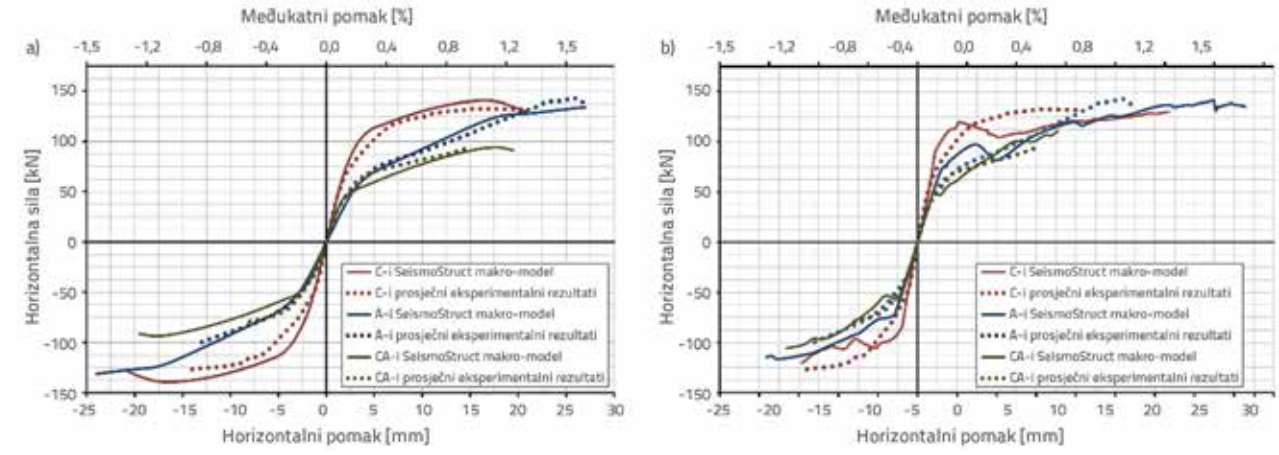
Kalibracija modela s kombiniranom ispunom bila je nešto teža u odnosu na modele C-*i* i A-*i* zbog karakterističnog dvofaznog ponašanja ("monolitno" i "odvojeno"). Analitički modeli, kod kojih je konstrukcijsko ponašanje panela definirano na globalnoj razini, bili su vrlo učinkoviti (makromodeli). Kod modela s kombiniranom ispunom korišten je trolinearni model ponašanja (koji reprezentira početnu krutost, fazu raspucavanja odnosno odvajanja te preostalu čvrstoću), dok je model koji se sastojao od četiri linearna odsječka bio prikladniji za modele iz C-*i* i A-*i* serije (koji reprezentira početnu krutost, fazu raspucavanja i dosezanja vršne čvrstoće, degradaciju krutosti poslije dosezanja vršne čvrstoće te preostalu čvrstoću ispune). Međutim, treba primijetiti da se ponašanje modela s porobetonskim blokovima može vrlo efektno modelirati koristeći bilinearni model, jer je uočeno da se ta vrsta ispune ponaša atipično za ziđe.

Vrlo učinkovit način da se ubrza proces modeliranja zidane ispune jeste upotreba odgovarajućeg predefiniranog konačnog elementa dostupnog u pojedinim MKE programskim paketima. Kao primjer takvog načina modeliranja upotrijebljen je neelastični makropanelni zidni element dostupan u programu Seismostruct, [7]. Ponašanje toga elementa bazirano je na istraživanjima koje su proveli Crisafulli i Carr [8] i Crisafulli [9], i omogućava uzimanje u obzir dva najčešća načina otkazivanja nosivosti – prekoračenje dijagonalnog tlačnog naprezanja te posmične čvrstoće. Međutim, kod korištenja mikro modela moguće je precizno simulirati stvarno ponašanje u različitim fazama rada ispune, slika 9. Za potrebe mikromodeliranja korišten je programski paket ATENA 2D FEM, [10, 11]. Kod tih modela su kreirane dvije vrste kontaktnih elemenata – prvi tip za modeliranje sljubnica u ziđu a drugi tip za modeliranje kontaktne linije između zidnog panela i čeličnog okvira. Oslabljeni porobetonski blokovi uz čelični okvir modelirani su svojom čistom širinom, tj. uzet je u obzir stvarni promjer izbušenih rupa (označeno isprekidanom linijom na slici 9.a).

Primarne krivulje dobivene korištenjem spomenutih makro i mikro modela prikazane su na slici 10.a odnosno slici 10.b, zajedno s prosječnim primarnim krivuljama za pojedine serije




**Slika 9. a) Mikromodel CA-*i* uzoraka; b) raspodjela normalnih naprezanja pri međukatnom pomaku od 0,5 %; c) raspored pukotina uzorka CA-1 pri međukatnom pomaku od 1,0 %**




**Slika 10. Primarne krivulje dobivene pomoću: a) makromodela (Seismostruct); b) mikromodela (Atena 2D)**

uzoraka dobivene eksperimentalnim ispitivanjem. Može se primijetiti da je točnost modela zadovoljavajuće razine, uzevši u obzir kompleksnost ponašanja ove vrste konstrukcija.

## 5. Numerički primjer

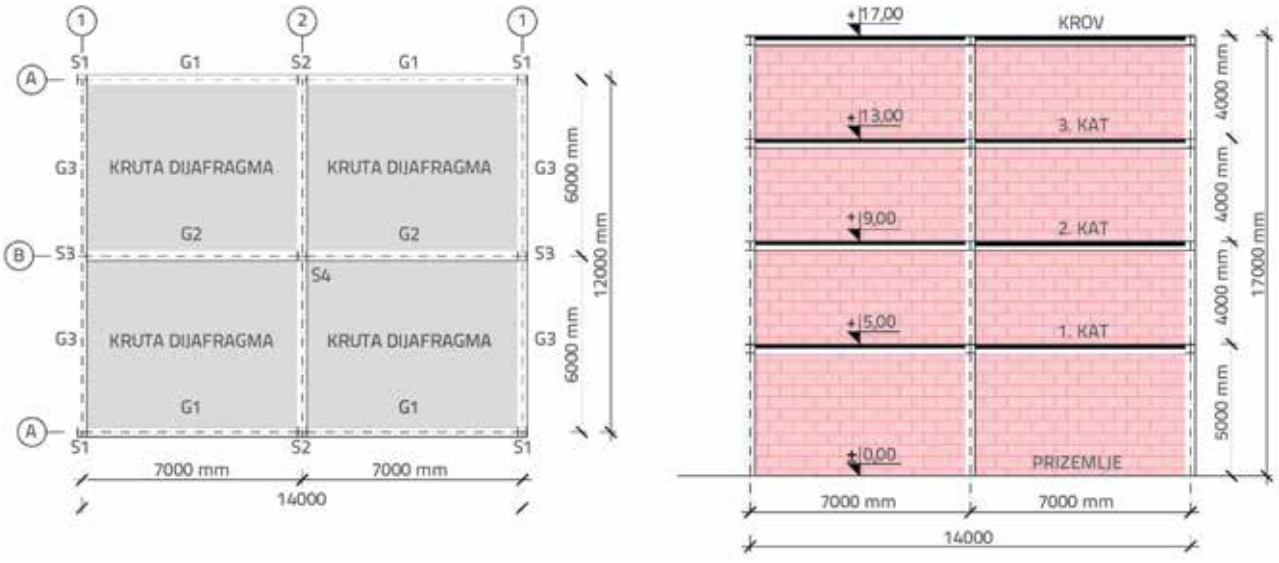
Mogućnost praktične primjene kombiniranog ispuna prikazana je na sljedećem numeričkom primjeru. Za ilustraciju je odabrana jednostavna zgrada poslovne namjene s pravokutnim 14,00 m x 12,00 m tlocrtom, smještena u Osijeku. Konstrukcijski sustav čine čelični okviri sa zidanom ispunom razmatrani u ovom radu (pri čemu se u konstrukciji istovremeno nalazi samo jedna od tri razmatrane vrste ispune, što znači da su kreirana tri numerička modela). Okvirni sustav sastoji se od glavnih okvira smještenih u tri paralelne ravnine na razmaku od 6 m koji su povezani sekundarnim gredama, slika 11. Glavni okviri formiraju dva simetrična raspona od 7 m i sastoje se od četiri kata. Visina prizemlja je 5 m dok je visina ostalih katova 4 m, te je ukupna visina građevine 17 m. Pretpostavljeno je da međukatna konstrukcija djeluje kao kruta dijafragma.

Radi pojednostavljenja, numerički proračuni provedeni su za glavni okvir u ravnini osi B, slika 11. Elementi okvira izrađeni su od vruće valjanih HEA profila od čelika klase S235 prema EN 10025. Korisno opterećenje izračunano je uzimajući u obzir kategoriju građevine B, [12], dok je krov svrstan u kategoriju H. Klimatska opterećenja određena su prema relevantnim dijelovima hrvatskog nacionalno dodatka normi HRN EN 1991. Seizmički zahtjevi izračunani su u skladu s HRN EN 1998, [2] (spektar tipa 1, vrsta tla C, $a_g$=2,0 m/s$^2$). Priključci stupova i greda u čeličnom okviru uzeti su kao nepopustljivi. Dimenzije poprečnih presjeka elemenata okvira izračunane za potresne i nepotresne kombinacije opterećenja u skladu s HRN EN 1990, [13], prikazane su u tablici 2.

Procjena seizmičke osjetljivosti promatranog čeličnog okvira sa zidanom ispunom urađena je metodom postupnog guranja (tzv. "pushover" analizom) uz kontrolu pomaka u programskom paketu Seismostruct, [7]. Čelični materijal okvira modeliran je elastičnim-idealno plastičnim materijalnim modelom s očvršćavanjem, [14], uz granicu popuštanja $f_y$=235 N/mm$^2$ i modul elastičnosti E=210 000 N/mm$^2$.

**Tablica 2. Dimenzije poprečnih presjeka čeličnog okvira u osi B**

| Kombinacije opterećenja / Katnost | Nepotresne kombinacije opterećenja | | | Potresne kombinacije opterećenja | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | S3 | S4 | G2 | S3 | S4 | G2 |
| Prizemlje | HEA 280 | HEA 320 | HEA 300 | HEA 400 | HEA 400 | HEA 300 |
| 1. kat | HEA 260 | HEA 280 | HEA 300 | HEA 320 | HEA 360 | HEA 300 |
| 2. kat | HEA 240 | HEA 240 | HEA 300 | HEA 300 | HEA 300 | HEA 300 |
| 3. kat | HEA 180 | HEA 240 | HEA 260 | HEA 280 | HEA 280 | HEA 240 |




**Slika 11. Tlocrt i poprečni presjek razmatrane poslovne zgrade**

**Tablica 3. Mehaničke karakteristike razmatranih ispuna korištenih za numeričke proračune**

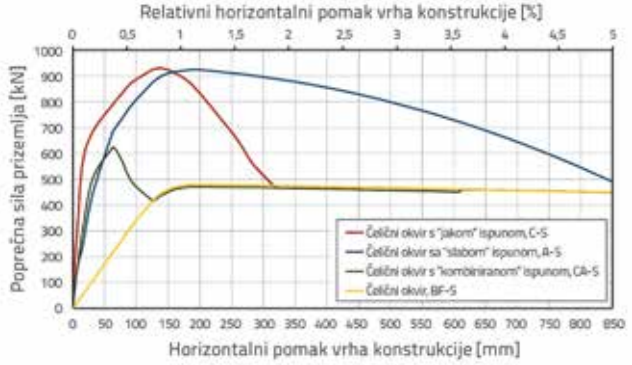
| Mehaničke karakteristike / Razmatrane ispune | $E_m$ [N/mm²] | $f_m$ [N/mm²] | $f_t$ [N/mm²] | $\varepsilon_m$ [-] | $\varepsilon_{ult}$ [-] | $c$ [N/mm²] | $\mu$ [-] | $\tau_{max}$ [N/mm²] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Glineni blokovi (C) | 4600 | 1,42 | 0,195 | 0,0012 | 0,01 | 0,70 | 0,80 | 1,00 |
| Porobetonski blokovi (A) | 1200 | 1,01 | 0,215 | 0,002 | 0,03 | 0,30 | 0,35 | 1,20 |
| Kombinirana ispuna (CA) | 2900 | 0,55 | 0,215 | 0,002 | 0,004 | 0,30 | 0,35 | 1,20 |

**Tablica 4. Dinamičke karakteristike analiziranih konstrukcija**

| Kombinacije opterećenja / Analizirana konstrukcija | Nepotresne kombinacije opterećenja ('- N') | | Potresne kombinacije opeterećenja ('-S') | |
|---|---|---|---|---|
| | Period konstrukcije $T_1$ [s] | Vlastita frekvencija $f_1$ [Hz] | Period konstrukcije $T_1$ [s] | Vlastita frekvencija $f_1$ [Hz] |
| Čelični okvir (BF-N/BF-S) | 1,694 | 0,590 | 1,337 | 0,748 |
| Čelični okvir s "jakom" ispunom (glineni blokovi, C-N/C-S) | 0,263 | 3,802 | 0,251 | 3,984 |
| Čelični okvir sa "slabom" ispunom (porobetonski blokovi, A-N/A-S) | 0,444 | 2,252 | 0,428 | 2,336 |
| Čelični okvir s kombiniranom ispunom (CA-N/CA-S) | 0,312 | 3,205 | 0,300 | 3,333 |

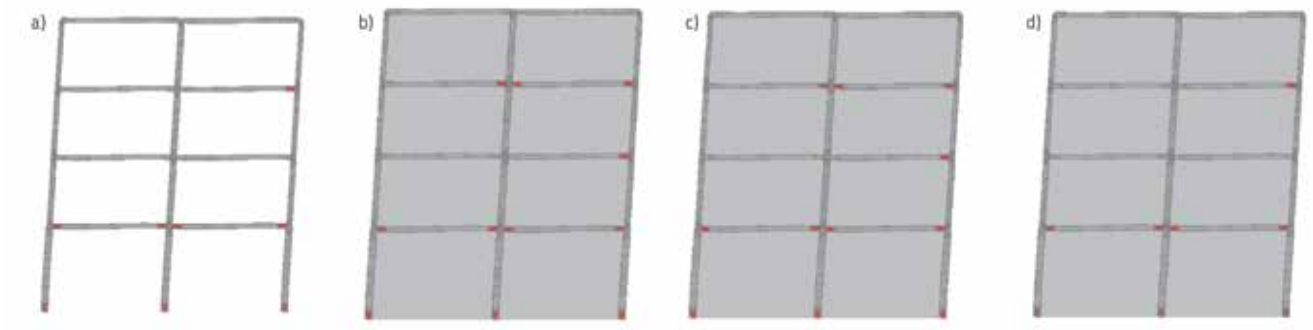
Materijalne karakteristike pojedinih vrsta zidane ispune dobivene prethodno opisanim postupkom kalibracije, primijenjene su u numeričkim simulacijama, osim debljine ispune, koja je u primjerima uzeta s debljinom od 19 cm. Posljedično toj činjenici bilo je potrebno korigirati i poprečni presjek ekvivalentne dijagonale $A_2$ u slučaju kombinirane ispune. Proračunske karakteristike pojedinih vrsta ispune prikazane su u tablici 3, gdje je $E_m$ elastični modul ziđa, $f_m$ tlačna čvrstoća ziđa, $f_t$ vlačna čvrstoća ziđa, $\varepsilon_m$ deformacija pri maksimalnom naprezanju, $\varepsilon_{ult}$ granična deformacija, $c$ kohezijska čvrstoća, $\mu$ koeficijent trenja, $\tau_{max}$ – maksimalna posmična čvrstoća.

Utjecaj ispune na ponašanje čeličnog okvira dobro se uočava u tablici 4., koja pokazuje dinamičke karakteristike proračunavanih konstrukcija. Rezultati proračuna u obliku dijagrama poprečna sila prizemlja (base shear) - horizontalni pomak vrha građevine prikazani su na slici 12. Odgovor konstrukcije zgrade koja se sastoji od cjelovitog sustava okvira daje bolji uvid u moguće povoljne i nepovoljne učinke specifičnih rješenja. Međutim, utjecaji zamijećeni na razini pojedinačnih okvira se obično multipliciraju na razini ponašanja cijele konstrukcije, stoga zaključci dobiveni na razmatranju jednog okvira (kao što se vidi na slici 10.) mogu biti jasnije primijećeni i analizirani. Vidljivo je da postoji značajno podudaranje između eksperimentalno dobivenih podataka i rezultata provedenog numeričkog proračuna. Treba primijetiti da u slučaju rezultata numeričkih proračuna, čije vrijednosti prelazi 2,5 % međukatnog pomaka, imaju samo teorijsko značenje. Na slici 13. prikazan je razvoj plastifikacije

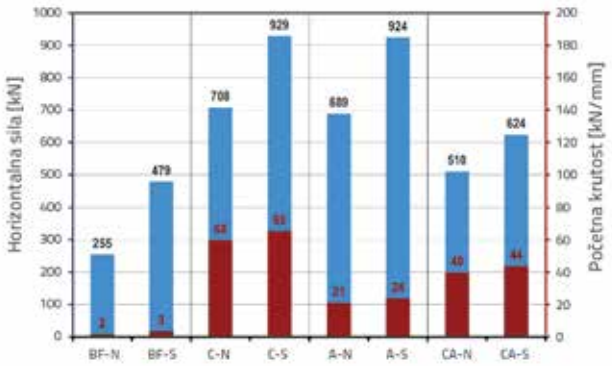



**Slika 12. Dijagram poprečna sila prizemlja-horizontalni pomak vrha konstrukcije**

(otvaranje plastičnih zglobova) u konstrukcijskim elementima analiziranih sustava pri međukatnom pomaku od 1,20 %. Uzimajući u obzir simetričnost i jednostavnost statičkog sustava, kao i korištenje makropanelnog Seismostruct zidnog elementa, treba primijetiti da se dobiveni rezultati odnose samo na globalno ponašanje konstrukcije, a da se neke važne specifičnosti ponašanja takvih sustava ovim modelom ne mogu ili nisu simulirali (npr. lokalni utjecaji, utjecaji priključaka i sl.). Može se primijetiti da je redoslijed otvaranja plastičnih zglobova vrlo sličan, uz prisutnost određenog vremenskog odmaka između pojedinih sustava. Također, može se primijetiti veća podudarnost između čistog čeličnog okvira i okvira s kombiniranom ispunom, kao što je to vidljivo na slici 13.



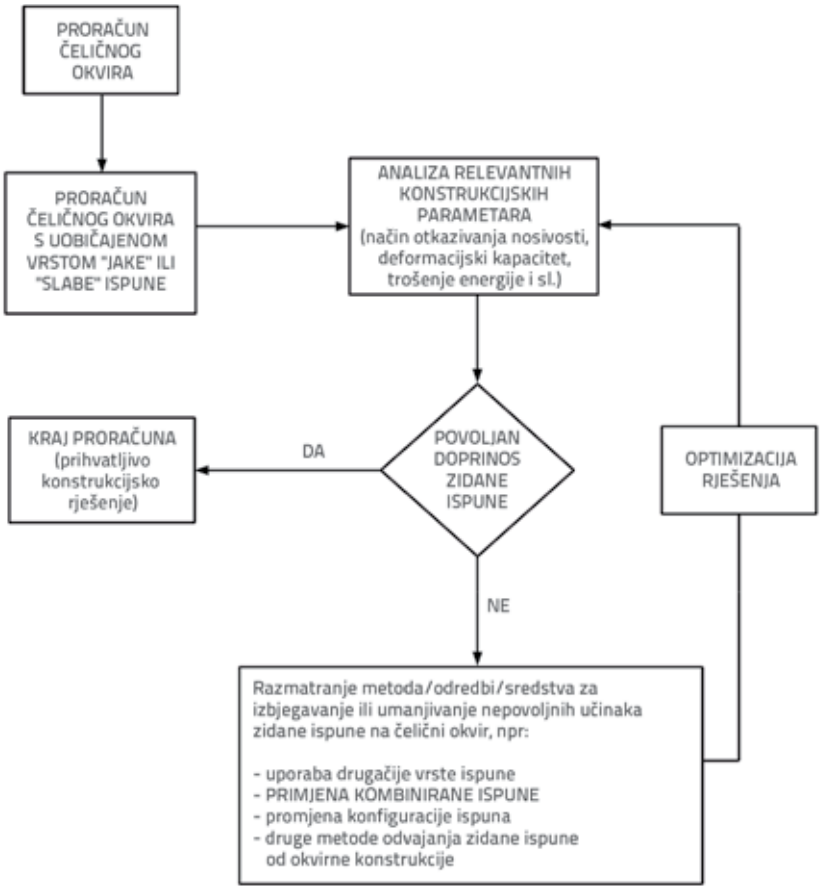

**Slika 13. Plastificirana područja pri horizontalnom pomaku konstrukcije od 1.20 %: a) čelična konstrukcija (BF-S); b) C-S sustav; c) A-S sustav; d) CA-S sustav**




**Slika 14. Nosivosti i početne krutosti razmatranih konstrukcijskih sustava**

Nadalje, na slici 14. prikazana je usporedba između globalnih karakteristika ponašanja (granične nosivosti i početne krutosti) analiziranih konstrukcijskih sustava. Može se primijetiti da je opći trend jednak onome prikazanom na slici 4. za eksperimentalno dobivene vrijednosti početne krutosti i granične nosivosti, te se povoljni učinci kombinirane ispune mogu grubo izraziti kroz povećanje početne krutosti sustava te u isto vrijeme očuvanja "čistog" fleksijskog ponašanja čeličnog okvira.

Konačno, praktične preporuke za korištenje kombinirane ispune prikazane su shematski na slici 15. Razumljivo, korištenje uobičajenih vrsta zidane ispune bit će prvo rješenje u većini slučajeva. Međutim, ako bi rezultati proračuna upućivali na prije spomenute nepovoljne utjecaje zidane ispune, potrebno je razmotriti i drukčija rješenja. Stoga je posebno važno najprije analizirati utjecaj ispune na ponašanje okvirnog konstrukcijskog sustava. Ako provedena analiza dokaže moguće nepovoljne učinke zidane ispune u konkretnim uvjetima, treba pokušati s drugim načinima i metodama da se ti utjecaji izbjegnu. Jedan od njih može biti i u ovom radu prezentirano korištenje kombinirane zidane ispune.




**Slika 15. Iterativni postupak proračuna za primjenu kombinirane zidane ispune**

## 6. Zaključak

Zahvaljujući svojim povoljnim karakteristikama (dostupnost, trajnost, dobra toplinska i zvučna zaštita kao i vatrootpornost, lako održavanje i sl.), ziđe se često koristi kao ispuna okvirnih sustava. Međutim, unatoč sada već brojnim provedenim istraživanjima i objavljenim radovima, konstrukcijsko ponašanje toga kompozitnog sustava je još uvijek vrlo teško jednostavno predvidjeti. Ono se ne može simulirati jednostavnim dodavanjem doprinosa zidane ispune već postojećem okvirnom sustavu zbog vrlo izraženog nelineranog ponašanja kao posljedice interakcije koja se događa između okvira i zidnog panela.

Štoviše, još uvijek ne postoji ni konsenzus oko samog opisa naravi te konstrukcije, pa se u literaturi još uvijek mogu naći izrazi poput "spregnuta", "hibridna", kombinirana", interaktivna" konstrukcija i sl.

Glavni cilj ovoga rada bilo je istraživanje mogućnosti ostvarenja kontroliranog ponašanja čeličnih okvira sa zidanom ispunom korištenjem jednostavniijih konstrukcijskih mjera. Pri tome je naglasak bio upravo na riječi "jednostavnijih" budući da nam je cilj s jedne strane bilo osigurati očuvanje povoljnih učinaka ispune na osnovni konstrukcijski sustav (okvir), ali isto tako osigurati veću vjerojatnost praktične primjene takvog rješenja s druge strane. To jednostavnije rješenje se u našem slučaju sastojalo od korištenja specifične kombinacije jake i slabe ispune koja se često koristi u Hrvatskoj. Eksperimentalna istraživanja obuhvatila su tri serije uzoraka čeličnih okvira s različitim vrstama zidane ispune – šupljih glinenih blokova, porobetonskih blokova te već spomenute njihove kombinacije kao inovativnog sustava. Dobiveni rezultati mogu se sažeti na sljedeći način:

1. Eksperimentalno utvrđeno ponašanje sva tri analizirana sustava bilo je vrlo različito:
   - čelični okviri s ispunom od glinenih šupljih blokova imali su najveću krutost i gotovo glatki oblik histereznih petlji dok je slom uzrokovan prekoračenjem tlačne čvrstoće zidnog panela i dijagonalnim raspucavanjem uz ljuštenje i otpadanje vanjskih slojeva blokova (primijećeno ponašanje bilo je tipično za ziđe);
   - histerezne petlje sustava s porobetonskim blokovima bile su više nepravilnije izdužene te su dostigli najveća granična opterećenja uz značajne neelastične deformacije (do međukatnih pomaka od 1,7 %); pukotine su bile gotovo ravnomjerno raspodijeljene duž čitave širine panela, a primijećeno ponašanje se općenito može opisati kao netipično za ziđe;
   - histerezne petlje sustava s kombiniranom ispunom imale su tipično "dvofazni" oblik pri čemu je uzorak s najmanjim oslabljenjima (C-1) bio i najbliže željenom konstrukcijskom ponašanju; prva faza bila je karakterizirana monolitnim djelovanjem ispune i okvira i imala je veću krutost i nosivost u odnosu na čiste čelične okvire, dok je druga faza započela s postupnih raspucavanjem kontaktnog oslabljenog sloja porobetonskih blokova u kontaktu s čeličnim stupovima okvira; na kraju je odvajanje zidnog panela od okvira uzrokovalo pad krutosti sustava te preraspodjelu daljnjeg opterećenja na čelični okvir; oslabljenje ostalih dvaju uzoraka iz te serije bilo je preveliko te je dovelo do preranog odvajanja okvira i ispune, što nije bilo planirano; općenito, uočeno ponašanje ove vrste modela sastojalo se od dva sustava – okvira s ispunom i čistog okvira.
2. Na osnovi provedenog eksperimentalnog ispitivanja kreirani su uobičajeni analitički modeli ispitivanih uzoraka koji su potom i kalibrirani; kada je u pitanju primjena makromodela, primijećeno je da se ponašanje sustava s glinenim šupljim blokovima može učinkovito modelirati odgovarajućom poligonalnom krivuljom definiranom s četiri linearna odsječka (koja odgovaraju početnoj krutosti, fazi raspucanja i dosezanja vršne čvrstoće, fazi opadanja krutosti nakon dosezanja vršne čvrstoće te preostaloj čvrstoći); u slučaju uzoraka s porobetonskim blokovima moguća je primjena bilinearne krivulje, a za sustav s kombiniranom ispunom najprikladnije je bilo odabrati krivulju s tri linearna segmenta (koja odgovaraju početnoj krutosti, fazi raspucanja/odvajanja, te preostaloj čvrstoći); predefinirani makrozidni element, dostupan u Seismostruct programu, bio je vrlo prikladan za modeliranje sve tri ispitivane serije ne samo zbog relativno jednostavnog modeliranja nego i brzine samog proračuna, što je kod ovakvih sustava vrlo važno.
3. Na numeričkom primjeru jednostavne poslovne zgrade ilustrirana je primjena kalibriranih analitičkih modela sva tri analizirana sustava; dobiveni rezultati vrlo su se dobro poklapali s provedenim eksperimentalnim ispitivanjima te dodatno razjasnili uočena ponašanja pojedinih vrsta ispune; dane su praktične preporuke za korištenje ovdje predloženog rješenja kombinirane ispune, a njena je primjena naročito pogodna u slučajevima kada korištenje standardnih vrsta zidane ispune dovodi do nepovoljnih utjecaja na osnovni okvirni sustav; pri tome posebno treba paziti o osiguravanju od ispadanja zidnog panela izvan ravnine okvira, za što je također u radu dano jedno od mogućih rješenja.

## Zahvala

Istraživanja prezentirana u ovom radu bila su dio znanstvenoistraživačkog projekta "Seizmička analiza okvira s ispunom", broj 149–1492966–1536. Autori iskreno zahvaljuju Ministarstvu znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske što je financiralo taj projekt.

## LITERATURA

[1] Markulak, D., Radić, I., Sigmund, V.: Cyclic testing of single bay steel frames with various types of masonry infill, Engineering structures, 51 (2013), pp. 267-277, https://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.01.026

[2] European Committee for Standardization: EN 1998-1, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels, Belgium, 2005.

[3] Kauffman, A., Memari, A.M.: Performance Evaluation of Different Masonry Infill Walls with Structural Fuse Elements Based on In-Plane Cyclic Load Testing, Buildings, 4 (2014) 4, pp. 605-634, https://doi.org/10.3390/buildings4040605

[4] Preti, M., Bettini, N., Plizzari, G.: Infill walls with sliding joints to limit infill-frame seismic interaction: Large-scale experimental test, Journal of Earthquake Engineering, 16 (2012) 1, pp. 125-141, https://doi.org/10.1080/13632469.2011.579815

[5] Mohammadi, M., Akrami, V.: An engineered infilled frame: Behavior and calibration, Journal of Constructional Steel Research, 66 (2010) 6, pp. 842-849, https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.01.008

[6] Radić, I., Markulak, D., Sigmund, V.: Analytical modelling of masonry-infilled steel frames. Tehnički vjesnik, 23 (2016) 1, pp. 115-127, https://doi.org/10.17559/TV-20150528133754

[7] SesimoStruct – A Computer Program for the Static and Dynamic Analysis of Framed Structures, http://www.seismosoft.com/Public/EditorUpload/Documents/SeismoStruct_User_Manual_en.pdf,26.4.2016.

[8] Crisafulli, F.J., Carr, A.J.: Proposed macro-model for the analysis of infilled frame structures, Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 40 (2007) 2, pp. 69-77.

[9] Crisafulli, F.J.: Seismic behaviour of reinforced concrete structures with masonry infills, University of Canterbury, PhD thesis, 1997.

[10] Červenka, V., Jendele, L., Červenka, J.: ATENA Program Documentation - Part 1 – Theory, www.cervenka.cz/assets/files/atena-pdf/ATENA_Theory.pdf, 26.4.2016.

[11] Červenka, V., Červenka, J.: ATENA Program Documentation - Part 2-1 - User's Manual for ATENA 2D, http://www.cervenka.cz/products/atena/documentation/pdf-users-manual-for-atena-2d, 26.4.2016.

[12] European Committee for Standardization: EN 1991-1-1, Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings, 2002.

[13] European Committee for Standardization: EN 1990, Eurocode 0 - Basis of structural design, 2002.

[14] European Committee for Standardization: EN 1993-1-5, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements, CEN, Brussels, Belgium, 2006.