
DGKS

**DRUŠTVO GRAĐEVINSKIH
KONSTRUKTERA SRBIJE**

14. KONGRES

NOVI SAD
24-26. SEPTEMBAR

2014.

14

K

O

N

G

R

E

S

2014

U SARADNJI SA:



**GRAĐEVINSKIM FAKULTETOM
UNIVERZITETA U BEOGRADU**

**MINISTARSTVOM PROSVETE,
NAUKE I TEHNOLOŠKOG RAZVOJA
REPUBLIKE SRBIJE**



**INŽENJERSKOM KOMOROM
SRBIJE**

**ZBORNİK
RADOVA**



**CHINA ROAD AND BRIDGE
CORPORATION SERBIA BRANCH**

Izdavač: **Društvo građevinskih konstruktora Srbije**
Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73/1

Urednici: prof. dr **Miloš Lazović**
prof. dr **Boško Stevanović**

Tehnička
priprema: **Saška - Stoja Todorović**

Priprema za
štampu: **Nebojša Ćosić**

Štampa: **DC Grafički centar**

Tiraž: **150 primeraka**

Beograd, septembar 2014.

ORGANIZACIONI ODBOR

PRESEDNIŠTVO DGKS

Prof. dr Miloš LAZOVIĆ, dipl.inž.grad., predsednik
Aleksandar BOJOVIĆ, dipl.inž.grad., potpredsednik
Prof. dr Boško STEVANOVIĆ, dipl.inž.grad., sekretar
Prof. dr Đorđe VUKSANOVIĆ, dipl.inž.grad.
Prof. dr Mihajlo ĐURĐEVIĆ, dipl.inž.grad.
Prof. dr Dragoslav STOJIC, dipl.inž.grad.
Prof. dr Đorđe LADINOVIĆ, dipl.inž.grad.
Prof. dr Snežana MARINKOVIĆ, dipl.inž.grad.
Prof. dr Aleksandar RISTOVSKI, dipl.inž.grad.
Doc. dr Bratislav STIPANIĆ, dipl.inž.grad.
Dr Zoran FLORIĆ, dipl.inž.grad.
Mr Slobodan GRKOVIĆ, dipl.inž.grad.
Branko KNEŽEVIĆ, dipl.inž.grad.
Gojko GRBIĆ, dipl.inž.grad.
Goran VUKOBRATOVIĆ, dipl.inž.grad.
Đorđe PAVKOV, dipl.inž.grad.
Svetislav SIMOVIĆ, dipl.inž.grad.

ČLANOVI ORGANIZACIONOG ODBORA IZVAN PRESEDNIŠTVA

Prof. dr Zlatko MARKOVIĆ, dipl.inž. grad.
Miroslav MIHAJLOVIĆ, dipl.inž.grad.
Aleksandar TRAJKOVIĆ, dipl.inž.grad.

NAUČNO-STRUČNI ODBOR

1. Prof. dr Radenko Pejović, Građevinski fakultet Podgorica, Crna Gora
2. Prof. dr Duško Lučić, Građevinski fakultet Podgorica, Crna Gora
3. Prof. dr Goran Markovski, Univerzitet "Kiril i Metodij" Gradežen fakultet, Skopje, Makedonija
4. Prof. dr Meri Cvetkovska, Univerzitet "Kiril i Metodij" Gradežen fakultet, Skopje, Makedonija
5. Prof. dr Tatjana Isaković, Univerzitet u Ljubljani Fakultet građevinarstva i geodezije, Ljubljana, Slovenija
6. Prof. dr Viktor Markelj, Ponting d.o.o., Maribor, Slovenija
7. Prof. dr Zlatko Šavor, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za konstrukcije, Katedra za mostove, Zagreb, Hrvatska
8. Prof. dr Radu Bancila, University "POLYTEHNICA", Temišvar, Rumunija
9. Mr Predrag Popović, Čikago, SAD
10. Prof. dr Kostadin Topurov, Sofija, Bugarska
11. Prof. dr Dušan Najdanović, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
12. Prof. dr Miloš Lazović, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
13. Prof. dr Đorđe Vuksanović, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
14. Prof. dr Dejan Bajić, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
15. Prof. dr Đorđe Ladinović, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija
16. Prof. dr Dragoslav Stojić, Arhitektonsko-građevinski fakultet, Niš, Srbija
17. Doc. dr Bratislav Stipanić, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija

14. KONGRES JE ORGANIZOVAN U SARADNJI SA:

GRAĐEVINSKIM FAKULTETOM UNIVERZITETA U
BEOGRADU

MINISTARSTVOM PROSVETE, NAUKE I TEHNOLOŠKOG
RAZVOJA REPUBLIKE SRBIJE

INŽENJERSKOM KOMOROM SRBIJE, Beograd

DONATORI SIMPOZIJUMA:

DIJAMANTSKI

CHINA ROAD & BRIDGE CORPORATION, SERBIA BRANCH,
Belgrade

SREBRNI

SIKA d.o.o., Novi Sad

BRONZANI

"POTISJE KANJIŽA" AD, Kanjiža

Vedran Carević¹, Janko Radovanović²

MODELIRANJE NELINEARNOG PONAŠANJA ZIDANE ISPUNE U AB SKELETNIM KONSTRUKCIJAMA

Rezime:

Zidovi ispune unutar AB skeletnih konstrukcija obično se posmatraju kao nekonstruktivni elementi i zbog toga se njihov doprinos zanemaruje pri proračunu konstrukcija. Istraživanja u novije vreme pokazala su da zidana ispuna može značajno izmeniti ponašanje konstrukcije. U ovom radu sprovedena je analiza ponašanja AB ramovske konstrukcije sa ispunom pri dejstvu zemljotresnog opterećenja. Ispuna je modelirana prema preporukama FEMA koristeći softverski paket SAP 2000. Za definisanje histerezisnog ponašanja ispune izabran je Pivot model. Rezultati proračuna upoređivani su sa rezultatima proračuna korišćenjem Kinematic modela na osnovu čega su usvojeni zaključci koji su prikazani u radu.

Ključne reči: zidana ispuna, SAP2000, FEMA, Pivot, Kinematic

MODELING OF NONLINEAR BEHAVIOR OF MASONRY INFILL IN RC FRAMES

Summary:

Infill walls within frame buildings have been considered as non-structural elements and thus have been typically neglected in the construction design process. Research in recent years has shown that masonry infill can significantly alter the behavior of the structure. In the present paper an analysis has been made to study the behavior of RC frames with infill when subjected to dynamic earthquake load. Infill has been modelled according to FEMA using software package SAP 2000. Hysteresis behavior of infill was defined with Pivot model. The results of the calculations are compared with the results made using Kinematic model, based on this conclusions are presented.

Keywords: masonry infill, SAP2000, FEMA, Pivot, Kinematic

¹ mast.inž.grad. – student doktorskih studija, GP Krajina, Banja Luka, vecacarevic@gmail.com

² mast.inž.grad., V.d.o.o Morava, Čačak, jankoradovanovic87@gmail.com

1 UVOD

U savremenom građevinarstvu opekarski proizvodi ne primenjuju se u velikoj meri za izradu nosećih konstruktivnih elemenata pogotovo u seizmički aktivnim oblastima. Njihovu upotrebu zamenjuju beton, čelik i drugi savremeni materijali sa velikim čvrstoćama na savijanje i velikom duktilnošću. Međutim, opeka predstavlja nezaobilazan materijal kada je u pitanju izrada pregradnih elemenata i fasada, zahvaljujući osobinama kao što su:

- jeftina i jednostavna proizvodnja,
- ekološke sirovine za proizvodnju,
- jednostavna gradnja,
- dobre toplotne karakteristike.

Zidana ispunja izvodi se nakon izrade armirano-betonske konstrukcije i samim tim u pogledu prenosa vertikalnog opterećenja predstavlja nenoseće elemente, odnosno dodatno opterećenje. Shodno tome uobičajena je inženjerska praksa da se zanemari nosivost ispune pri dejstvu seizmičkih uticaja. Brojna istraživanja objekata izloženih zemljotresnom dejstvu pokazali su da se uticaj zidane ispune u armirano-betonskim ramovskim konstrukcijama ne treba zanemariti. Najvažniji uticaj zidane ispune predstavlja smanjenje deformacija konstrukcije pri dejstvu zemljotresa, a samim tim i promenu dinamičkih karakteristika sistema.

Cilj ovog rada je pokazati način na koji se modelira zidana ispunja ramovskih konstrukcija koristeći preporuke koje daje FEMA (*Federal Emergency Management Agency*) za ponašanje zidane ispune. Pristup problemu je drugačiji od do sada opšte prihvaćenog proračuna u inženjerskoj praksi. Strogo posmatrajući, problem je složen sa naglašenim nelinearnim ponašanjem. Iako za prikaz ispune postoji čitav niz modela odve se predlaže primena pojednostavljenog modela sa zamenjujućim štapom (ekvivalentnim linijskim elementom). Modeliranje je izvršeno u programskom paketu SAP 2000, gde je ispunja modelirana „Link“ elementom. Na ovaj način u obzir se uzima histerezisno ponašanje zidane ispune koje je karakteristično za njen odgovor pri seizmičkom opterećenju. Ovo predstavlja bitan faktor za određivanje dinamičkih karakteristika kako ispune tako i celog objekta. Analiza upotrebe ovih elemenata izvršena je na jednoj postojećoj armirano-betonskoj skeletnoj konstrukciji lociranoj u Banjaluci.

2 UTICAJ ZIDANE ISPUNE U AB SKELETNIM KONSTRUKCIJAMA

Krutost neispucane ispune u horizontalnom pravcu uveliko doprinosi nosivosti sistema pri dejstvu horizontalnih sila. Pri većim deformacijama dolazi do pojave prslina na zidu koje uslovljavaju pad njegove horizontalne krutosti. Određivanje karakteristika zidane ispune kao celine nije uvek tako jednostavno, prevashodno zbog velikog broja parametara koje je teško kvantifikovati. To se odnosi na kvalitet izvođenja radova i veliku razliku u karakteristikama komponentnih materijala koji se koriste za izradu zidova ispune.

Ponašanje zidane ispune pri dejstvu seizmičkih sila opisuje se histerezisnim dijagramom. Te krive predstavljaju najbolji način opisivanja stvarnog ponašanja zidova izloženih svim mogućim uticajima. Na osnovu ovih histerezisnih krivih mogu se definisati karakteristike zida kao što su nosivost, krutost i duktilnost.

Uticaj zidane ispune ogleda se pre svega u promeni dinamičkih karakteristika sistema. Ispuna sprečava deformacije nosećeg sistema, periodi oscilovanja se smanjuju a usled toga dolazi do preraspodele sile u sistemu u odnosu na stanje kada se uticaji ispune zanemaruju. Pri

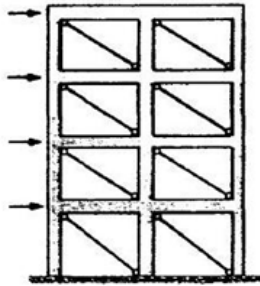
malim deformacijama, kada nije došlo do degradacije krutosti, sile preuzima ispunu zbog velike krutosti zidova naspram fleksibilne ramovske konstrukcije. Daljim povećanjem deformacija dolazi do pojave prslina u zidu i pada krutosti. Sile se od tog trenutka raspoređuju na glavnu noseću konstrukciju koja deluje zajedno sa zidanom ispunom. Kako deformacije nastavljaju da rastu dolazi do propagacije prslina u zidovima sve do loma istih kada sile u potpunosti preuzima skeletna konstrukcija. Ovaj fenomen prenosa opterećenja u toku odgovora konstrukcije teorijski je poznat, ali njegovo modeliranje je složeno. U ovom radu detaljno je opisan način modeliranja ispunne kako bi se omogućilo njeno realnije ponašanje u toku odgovora konstrukcije.

Bez obzira na to što usled preraspodele krutosti dolazi do lokalnog povećanja opterećenja u konstrukciji, može se reći da zidana ispunu povoljno utiče na skeletne konstrukcije [1]. Pomaže pri apsorpciji i disipaciji energije u toku zemljotresa, a pri malim pomeranjima i opterećenjima, kakva izazivaju blaži potresi, u potpunosti prihvata seizmička opterećenja.

Sa druge strane postoji i negativan uticaj zidane ispunne na skeletnu konstrukciju koji dovodi do oštećenja konstrukcije ili čak do njenog kolapsa. To se manifestuje na kontaktnim mestima ispunne i skeleta, gde dolazi do pojave koncentracije opterećenja i uticaja koje mogu dovesti do oštećenja nosećih elemenata konstrukcije. Usled dejstva ispunne u stubovima i gredama mogu se generisati velike sile o kojima se najčešće ne vodi računa pri projektovanju.

3 MODELIRANJE ZIDANE ISPUNE

Za kvalitetno modeliranje zidane ispunne neophodno je modelom obuhvatiti histerezisno ponašanje ispunne pri dinamičkom opterećenju. Jedan od najzastupljenijih pristupa modeliranja zidane ispunne je metoda ekvivalentnog štapa (*Strut element*). Primena ove metode detaljno je objašnjena u velikom broju radova [2,3]. S namerom da se ustanovi jednostavan model ispunne od opeke ili bloka, potrebno je obratiti pažnju na definisanje odgovarajućih svojstava zamenjujućeg štapa kao i na način postizanja histerezisnog ponašanja ispunne. Na Slici 1 prikazan je princip modeliranja ispunne metodom ekvivalentnog štapa.

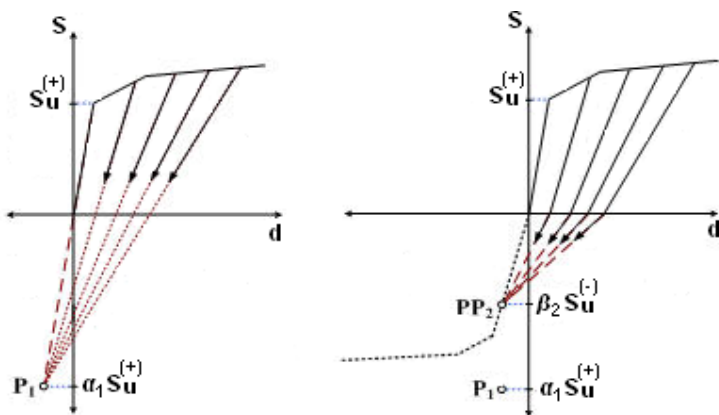


Slika 1 – Metoda ekvivalentnog štapa
Figure 1 – Equivalent strut method

Pritisnuta dijagonala koja se formira u ispunni pri dejstvu horizontalnog opterećenja najjednostavnije se modelira jednim ekvivalentnim prostim štapom između čvorova ramovske konstrukcije. Ovaj pristup je prikladan za potrebe određivanja dinamičkih karakteristika

sistema. Međutim, na ovaj način nije moguće detaljno odrediti uticaj ispune na elemente nosivog sistema prouzrokovane lokalnim efektima [4]. Ekvivalentni prosti štap se u programu SAP 2000 definiše *Link* elementom [5]. *MultiLinear Plastic Link* element, koji je korišćen u ovom radu, može se zadati dijagram nosivosti koji opisuje nelinearno ponašanje ispune.

Za definisanje histerezisnog ponašanja elementa izabran je *Pivot* model [6]. Pokazuje se da kontinualna promena krutosti zidane ispune pri cikličnom opterećenju proizvodi manje prigušenja po ciklusu nego klasičan elasto-plastičan odgovor. Izborom *Pivot* modela moguće je obuhvatiti degradaciju krutosti ispune tokom dejstva cikličnog opterećenja i na taj način omogućiti realističnije modeliranje nelinearnog ponašanja ispune. Eksperimentalna zapažanja pokazala su da svako rasterećenje sile, bez obzira na veličinu pomeranja, uglavnom teži jednoj tački u ravni sila-pomeranje koju nazivamo *Pivot* tačkom (P_1) [6]. Takođe pokazuje se da sve linije opterećenja u ravni sila-pomeranje imaju tendenciju da preseku elastičnu liniju opterećenja na približno istom mestu. Ovu tačku nazivamo *Pinching Pivot* tačkom (PP_2) (Slika 2). Vrednosti *Pivot* tačke i *Pinching Pivot* tačke u programu SAP 2000 definisane su koeficijentima α i β , koji su faktori kojima se multiplikuje vrednost sile nosivosti ispune S_u .

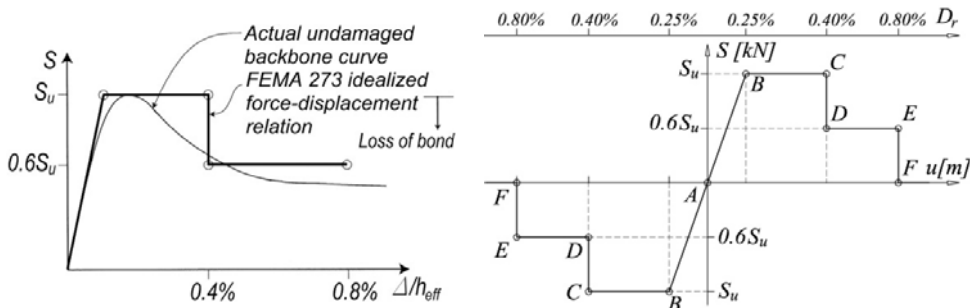


Slika 2 – *Pivot* histerezis
Figure 2 – *Pivot* hysteresis

Vrednosti koeficijenata α i β dobijaju se na osnovu rezultata eksperimentalnih istraživanja sprovedenih na ramovima sa ispunom pri dejstvu cikličnog opterećenja i iznose u konkretnom slučaju 1,5 i 0,15 respektivno. Grafičkim putem očitavaju se vrednosti koeficijenata sa dobijenih histerezisnih dijagrama [1]. Izborom *Pivot* modela omogućeno je preciznije modeliranje ponašanja ispune u odnosu na druga dva modela koja SAP 2000 omogućava. *Kinematic* modelom nije obuhvaćena degradacija krutosti tokom dejstva cikličnog opterećenja dok je *Takeda* model prelazno rešenje između modela *Pivot* i *Kinematic*.

Karakteristike ispune zadaju se u programu direktno preko ulaznih podataka, kao karakteristike *Link* elementa. U radu je predložen postupak definisanja karakteristika ispune prema preporukama koje daje FEMA (*Federal Emergency Management Agency*) [7]. Prema ovim preporukama i rezultatima eksperimentalnih istraživanja, prslina na ispuni javljaju se već pri relativnom spratnom pomeranju od 0,25%. Do spajanja ovih prslina (od ugla do ugla) i formiranja dijagonalne pukotine dolazi pri relativnom spratnom pomeranju od 0,4%. Pri ovom

pomeranju dolazi do pada nosivosti ispune i ispuna od tog trenutka nosi isključivo trenjem po spojnica pukotine, što se može uočiti padom krutosti na dijagramu (Slika 3-levo). Gubitak nosivosti nastaje pri relativnom spratnom pomeranju od 0,8% i ispuna više nije u mogućnosti da prihvati silu. Sa druge strane eksperimentalna istraživanja pokazuju da se granice relativnih spratnih pomeranja pri kojima dolazi do rušenja zidova kreću između 1,0÷ 2,0% [8]. Na Slici 3 (levo) nalazi se prikaz dijagrama sila-pomeranje prema preporukama FEMA-e.



Slika 3 – Dijagram sila-pomeranje zidane ispune prema preporukama FEMA-e [7] (levo) i idealizovan dijagram (desno)

Figure 3 – Force-Deflection relation for infill panels according to FEMA [7] (left) and idealized diagram (right)

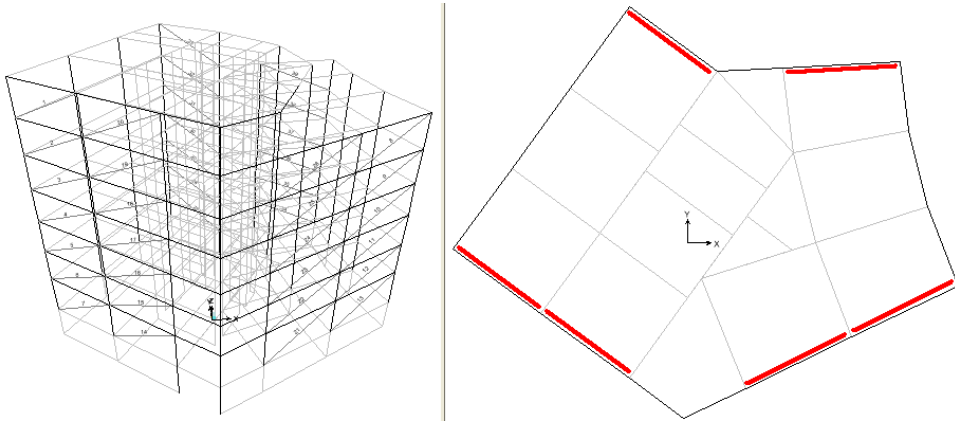
Na dijagramu se uočava granica elastičnosti ispune (tačka B) nakon koje nastupa plastično ponašanje (linija B-C). Tačkom C definisan je gubitak nosivosti ispune nakon koje dolazi do trenutnog pada nosivosti (linija C-D). Ispuna od tog trenutka poseduje samo rezidualnu nosivost definisanu kao nosivost trenjem između spojnica pukotine (linija D-E). Ova nosivost je prema FEMA-i definisana kao 60% ukupne nosivosti ispune S_u . Nakon relativnog spratnog pomeranja od 0,8% dolazi do potpunog gubitka nosivosti ispune i njenog kolapsa (tačka F).

Definisanje krutosti *Link* elementa kao i vrednosti granične sile nosivosti S_u detaljno je razmatrano u nekim radovima a što u ovom radu nije posebno analizirano [9,10]. U programu SAP 2000 omogućeno je zadavanje kompletnog dijagrama sila – pomeranje kao na Slici 3 (desno). Važno je naglasiti da program ne dozvoljava da se za različite vrednosti sile unese isto pomeranje, pa je potrebno tačke C i D razdvojiti na apscisi, tako što se za tačku D unosi nešto veće pomeranje.

4 OPIS KONSTRUKCIJE

U ovom radu prikazana je upotreba *Link* elementa za modeliranje zidane ispune na jednoj realnoj konstrukciji u programskom paketu SAP 2000. Objekat je lociran u Banjaluci. Reč je o poslovnom objektu visine Po+Pr+5/6 spratova. Konstrukcija je armirano-betonska sa stubovima dimenzija 45/45 cm i gredama dimenzija 45/90 cm. Svi elementi izvedeni su od betona MB 40. Podrumski etaža ima betonske zidove po obimu. Debljina podrumskih zidova je 20 cm. Unutar objekta nalaze se dva liftovska jezgra sa zidovima debljine 20 cm. Ploče su armirano-betonske debljine 20 cm. Poslednja etaža razlikuje se od prethodnih jer jedan deo objekta ima 5, a drugi deo 6 spratova. Međuspratna visina tipskih etaža je 3,4 m dok su visine

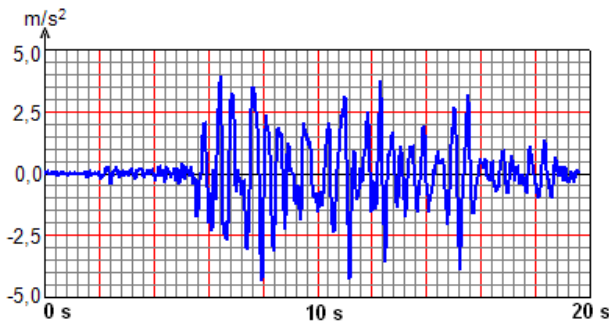
podruma i prizemlja 3,6 i 4,0 m respektivno. Na Slici 4 nalazi se prikaz konstrukcije ovog objekta kao i prikaz položaja *Link* elemenata u osnovi.



Slika 4 – Konstrukcija objekta, prostorni prikaz (levo) i prikaz osnove (decho)
Figure 4 – Construction of the building, the spatial representation (left) and base (right)

Ispuna je zidana od blokova dimenzija 29x19x19 cm, tako da se uzima da je debljina zidova ispune 20 cm (omalterisan zid). S obzirom na različite visine i širine ispune postoje četiri vrste *Link* elemenata sa različitim karakteristikama. Vrednosti modula klizanja G i modula elastičnosti E uzimaju se prema preporukama koje daje FEMA i za definisani blok iznose 1320 MPa i 3300 MPa respektivno.

Na konstrukciju deluje seizmičko opterećenje zadato preko horizontalnog ubrzanja oslonaca konstrukcije u dva ortogonalna pravca. Zemljotresni zapis koji je korišćen je Petrovac 1979. godine. Na Slici 5 prikazan je zapis ubrzanja ovog zemljotresa. S obzirom da cilj rada nije bio prikazati seizmički proračun postojećeg objekta već isključivo prikazivanje mogućnosti upotrebe odgovarajućeg *Link* elementa za modeliranje ispune i njen uticaj na ponašanje konstrukcije, zapis sa lokaliteta Petrovac iz 1979. godine je poslužio svrsi.



Slika 5 – Zapis ubrzanja zemljotresa Petrovac 1979. godine
Figure 5 – Petrovac earthquake acceleration record in 1979.

5 ANALIZA REZULTATA

U Tabeli 1 prikazane su vrednosti perioda oscilovanja nakon sprovedenog proračuna dinamičkih karakteristika konstrukcije za slučaj sa ispunom i bez nje.

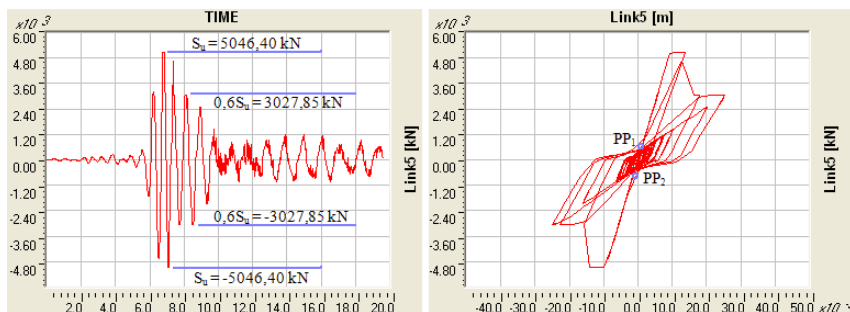
Tabela 1 - Periodi oscilovanja

Table 1 - Natural periods

	Sa ispunom [s]	Bez ispune [s]	Razlika [%]
T_1	0,9213	1,2273	24,93
T_2	0,7874	1,1200	29,70
T_3	0,5605	0,9343	40,01

Na slikama koje slede biće prikazani ispisi programa SAP 2000 koji se odnose na *Link* elemente u konstrukciji. Prikazaće se samo karakteristični dijagrami promene aksijalne sile u toku vremena i odgovarajuće histerezisne petlje.

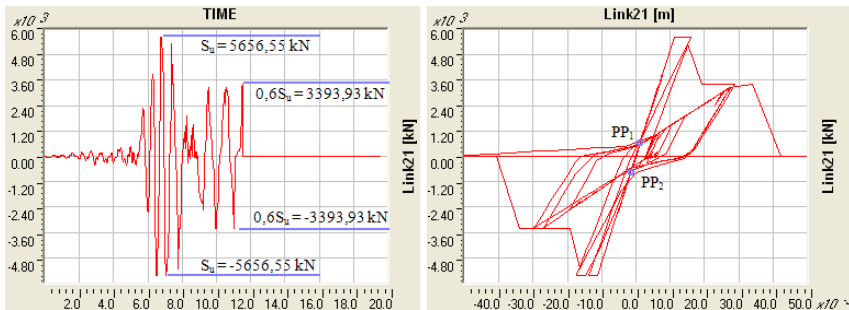
Slika 6 prikazuje dijagrame za *Link* 5 koji se nalazi na drugom spratu konstrukcije. Prvi dijagram prikazuje vrednosti aksijalne sile u toku delovanja cikličnog opterećenja. Prikazan je trenutak dostizanja granice nosivosti $S_u=5046,40$ kN i trenutak pada nosivosti na $0,6S_u=3027,85$ kN, kada se ostvaruje nosivost trenjem po spojnicama pukotina. Drugi dijagram predstavlja histerezisnu krivu, odnosno zavisnost između aksijalne sile i pomeranja unutar ispune (*link* elementa). Primarne *Pivot* tačke nalaze se u preseku produžetaka svih linija rasterećenja. Može se uočiti linija početne krutosti kao i *Pinching Pivot* tačke (PP_1 i PP_2) na mestu gde sve linije opterećenja seku elastičnu liniju opterećenja. Sa slike se vidi da nije došlo do gubitka nosivosti *Link* elementa, već samo do njegove plastifikacije. Važno je napomenuti da *Pivot* histerezisni dijagram proizvodi manje prigušenja u odnosu na klasičan elasto-plastičan odgovor, pa je samim tim na slici vidljivo takozvano „uštinuće“ histerezisnog dijagrama.



Slika 6 – Dijagram sila-vreme (levo) i sila-pomeranje (desno) Link 5 (drugi sprat)
Figure 6 – Diagram force-time (left) and force-displacement (right) Link 5 (second floor)

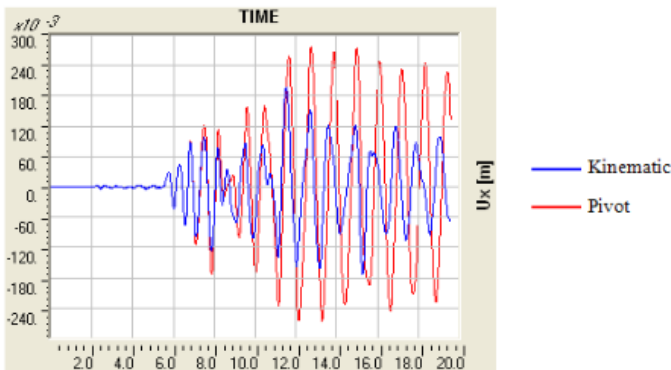
Na Slici 7 prikazani su dijagrami za *Link* 21 koji se nalazi u prizemlju objekta. Može se primetiti da je kod ovog *Link* elementa došlo do pucanja nakon 11,6 s i da od tog trenutka element više ne prima silu. Pomeranje koje je izazvalo lom u ispuni iznosi 36 mm, što se može videti na histerezisnom dijagramu. Bitno je uočiti važne karakteristike *Pivot* modela koji je korišćen u ovom radu. To se pre svega odnosi na mogućnost realnijeg opisivanja histerezisnih

krivih, odnosno pada krutosti u toku dejstva seizmičkog opterećenja, kao i obvojnici histerezisnih dijagrama koja je opisana *MultiLinear Plastic* ponašanjem.



Slika 7 – Dijagram sila-vreme (levo) i sila-pomeranje (desno) Link 21 (prizemlje)
 Figure 7 – Diagram force-time (left) and force-displacement (right) Link 21 (ground floor)

Slika 8 prikazuje pomeranje čvora br.1 koji se nalazi na vrhu objekta. Pomeranja su data u funkciji od vremena za vremenski interval delovanja seizmičkog opterećenja. Upoređeni su rezultati za slučaj modeliranja pomoću *Pivot* i *Kinematic* modela *Link* elementa. Način modeliranja pomoću *Kinematic* modela detaljno je opisan u radu [10] i ovde nije posebno razmatran. Maksimalno pomeranje *Pivot* modela javlja se na 12,7 s od početka delovanja zapisa, dok se maksimalno pomeranje *Kinematic* modela javlja na 11,3 s od početka delovanja seizmičkog zapisa. Evidentno je da se korišćenjem *Pivot* modela dobijaju dosta veća pomeranja konstrukcije. Ovakav efekat je posledica primene *Pivot* modela koji bolje opisuje opadanje krutosti u toku delovanja cikličnog opterećenja od *Kinematic* modela koji ne poseduje tu mogućnost. Takođe, na osnovu ovog dijagrama se može zaključiti da je primenom *Pivot* modela odgovor celokupne konstrukcije izmenjen u odnosu na *Kinematic* model. Maksimalno pomeranje odloženo je za 1,6 s, što potvrđuje činjenicu da se u slučaju primene *Kinematic* modela celokupni objekat ponaša krute, te se maksimalne vrednosti javljaju ranije.



Slika 9 – Dijagram pomeranja vrha konstrukcije u toku vremena
 Figure 9 – Diagram of displacement at the top of the construction during the time

6 ZAKLJUČAK

Problem modeliranja zidane ispune svodi se na problem obuhvatanja histerezisnog ponašanja ispune tokom dinamičkog opterećenja. Upotreba *Pivot* modela za *Link* element omogućava nam da izvršimo realnije modeliranje nelinearnog ponašanja zidane ispune pri dinamičkom opterećenju, pri tome uzimajući u obzir stalnu degradaciju krutosti ispune tokom dejstva cikličnog opterećenja.

U ovom radu prikazan je način modeliranja ispune u programskom paketu SAP 2000, ali će tačnost rezultata pre svega zavisiti od odabira karakterističnih vrednosti na dijagramu sila-pomeranje. To se prevashodno odnosi na izbor graničnih pomeranja pri kojima dolazi do tečenja ispune, odnosno gubitka nosivosti, ali i na odabir samog oblika ovog dijagrama. Postoje brojne preporuke za izbor ovih vrednosti ali su ovde korišćene one koje preporučuje FEMA.

Pokazano je u konkretnom slučaju da zidana ispuna na fasadi konstrukcije smanjuje period oscilovanja prvog tona za približno 25% u odnosu na konstrukciju bez ispune. Samim tim uticaj ispune na promenu dinamičkih karakteristika sistema je značajan.

Upoređujući dva modela histerezisnog ponašanja koje nudi program SAP 2000 može se uočiti da postoji razlika u pogledu pomeranja konstrukcije, kao i u pogledu odgovora konstrukcije tokom dejstva dinamičkog opterećenja. Upotreba *Pivot* modela u ovom slučaju povećava pomeranja konstrukcije proizvodeći manje prigušenja u odnosu na klasičan elasto-plastičan odgovor. Može se zaključiti da se upotrebom *Pivot* modela znatno bolje opisuje ponašanje ispune i konstrukcije pri dejstvu seizmičkih uticaja.

LITERATURA

- [1] Aničić D., Fajfar P., Petrović B., Szavits-Nossan A., Tomažević M.: *Zemljotresno inženjerstvo – visokogradnja*. DIP „Građevinska knjiga“, Beograd, 1990, strana 399-408.
- [2] Paulay T., Priestley M. J. N., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [3] Tomažević M., *Lateral load distribution in masonry buildings, Proceedings*. 6 – IBMaC, Rim, 1982.
- [4] 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.
- [5] Computers and Structures, Inc: *CSI Analysis Reference Manual*. Berkeley, California, 2010.
- [6] Dowell R.K., Seible F., Wilson E.L.: *Pivot Hysteresis Model for Reinforced Concrete Members*. ACI Structural Journal, 1998, strana 608-611.
- [7] FEMA (*Federal Emergency Management Agency*) publikacije 273, 306, 308, 356; 2000.
- [8] Hak S., Morandi P., Magenes G.: *Evaluation of infill strut properties based on in-plane cyclic tests*. Građevinar, 2013, strana 509-521.
- [9] Korčinski I. L., Poljakov S. V., Duzinkevič S. J., Pavlik V. S.: *Osnovi seizmičkog projektovanja zgrada u zemljotresnim oblastima*. Građevinska knjiga, Beograd, 1964.
- [10] Salatić R., Mandić R., Marinković M., Carević V.: *Modeliranje zidane ispune primjenom komercijalnog računarskog programa*. X Međunarodni naučno-stručni skup „Savremena teorija i praksa u graditeljstvu“, Banja Luka, 2014, strana 133-136.