

Primljen / Received: 14.11.2011.

Ispravljen / Corrected: 24.4.2012.

Prihvaćen / Accepted: 2.5.2012.

Dostupno online / Available online: 25.5.2012.

# Utjecaj vertikalnih serklaža na nosivost zidanih zidova

## Autori:



**Marija Smilović**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

[marija.smilovic@gradst.hr](mailto:marija.smilovic@gradst.hr)



Prof.dr.sc. **Jure Radnić**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

[jure.radnic@gradst.hr](mailto:jure.radnic@gradst.hr)



Prof.dr.sc. **Alen Harapin**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Splitu

Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

[alen.harapin@gradst.hr](mailto:alen.harapin@gradst.hr)

Izvorni znanstveni rad

**Marija Smilović, Jure Radnić, Alen Harapin**

## Utjecaj vertikalnih serklaža na nosivost zidanih zidova

U radu su prikazani rezultati numeričkih testova utjecaja vertikalnih serklaža na ponašanje zidanih zidova pod statičkim i dinamičkim opterećenjem. Analizirani su dvoetažni zidovi bez otvora i s otvorima, s dobrim i lošim zidom, s različitim rubnim uvjetima na spoju temelja zida i podloge. Istražen je utjecaj profila uzdužnih šipki vertikalnih serklaža na ponašanje zidova za horizontalna statička opterećenja te za harmonijska i potresna ubrzanja podloge. U analizi je primijenjen prethodno razvijen numerički model autora za statički i dinamički proračun ravninskih zidanih konstrukcija.

### Ključne riječi:

zidani zid, vertikalni serklaž, numerički test, nosivost, statičko i dinamičko opterećenje

Original scientific paper

**Marija Smilović, Jure Radnić, Alen Harapin**

## Influence of vertical tie columns on bearing capacity of masonry walls

Numerical test results, defining influence of vertical tie columns on the performance of masonry walls subjected to static and dynamic load, are presented in the paper. The analysis focuses on two-storey walls without openings and with openings, with good and poor quality masonry, and with different boundary conditions at the contact between wall foundations and the subsoil. The influence of the profile of longitudinal bars of vertical tie beams on the performance of walls under horizontal static load, and harmonic and seismic acceleration of subsoil, is studied. The numerical model for static and dynamic analysis of in-plane masonry structures, previously developed by the authors, is used in the analysis.

### Key words:

masonry wall, vertical tie beam, numerical testing, bearing capacity, static and dynamic load

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

**Marija Smilović, Jure Radnić, Alen Harapin**

## Einfluss vertikaler Ringanker auf die Tragfähigkeit von gemauerten Wänden

In der Arbeit sind die Resultate numerischer Tests der Einflüsse vertikaler Ringanker auf das Verhalten von gemauerten Wänden unter statischer und dynamischer Belastung dargestellt. Es wurden Doppelstagen - Wände mit und ohne Öffnungen, mit gutem und schlechtem Mauerwerk unter verschiedenen Randbedingungen an den Verbindungen des Mauerfundaments und der Unterlage analysiert. Es wurde der Einfluss von Längsstab-Profilen vertikaler Ringanker auf das Verhalten von Wänden bei horizontalen, statischen Belastungen sowie harmonischen und Erdbebenbeschleunigungen der Unterlage erforscht. In der Analyse wurde das vorher entwickelte numerische Modell des Autors für die statische und dynamische Berechnung von ebenen Mauerkonstruktionen angewandt.

### Schlüsselwörter:

gemauerte Wand, vertikaler Ringanker, numerischer Test, Tragfähigkeit, statische und dynamische Belastung

## 1. Uvod

Vertikalni i horizontalni serklaži znatno utječu na ponašanje i nosivost zidanih zidova pod vertikalnim i osobito horizontalnim opterećenjem. Njihova je uloga posebno značajna pri djelovanju potresa na zidane građevine. Prije svega, serklaži povezuju i ukružuju zide. Oni znatno pridonose nosivosti zida na tlak, savijanje i posmik i za opterećenja u ravnini zidova i za opterećenja okomito na njihovu ravninu. Serklaži smanjuju deformacije zida. Pri horizontalnim djelovanjima serklaži omogućavaju formiranje tlačnih dijagonala u zidu. Vertikalni serklaži dominantno prenose vlačna naprezanja u zidu. Oni omogućavaju aktiviranje betonskih temelja pri pojavi vlaka na spoju zida i temelja. Horizontalni serklaži preraspodijeljuju vertikalna opterećenja na zide, a osobito koncentrirane sile.

Spoznaje utjecaja serklaža u zidanim građevinama pretežito su kvalitativne. Naime, iako su izvršena mnogobrojna eksperimentalna i numerička istraživanja ponašanja zidanih zidova pod statičkim i dinamičkim opterećenjem (neka se mogu naći u [1-20]), autorima ovog rada nisu bila dostupna neka takva istraživanja koja su kvantitativno valorizirala utjecaje različitih parametara vertikalnih i horizontalnih serklaža na nosivost i deformabilnost zidanih zidova.

Uporabom prethodno razvijenoga numeričkog modela autora ovog rada za statički i dinamički proračun zidanih konstrukcija [21, 22], u ovom je radu istražen utjecaj više parametara vertikalnih serklaža na ponašanje i graničnu nosivost zidanih zidova. Analize su izrađene posebno za statička i posebno za dinamička (potresna) opterećenja. Numerički su testovi provedeni za jednostavnu geometriju zidova. Razmatrani su dvoetažni zidani zidovi bez otvora i s otvorima, s dobrim i lošim zidom, s različitim rubnim uvjetima na spoju temelja zidova i podloge. Analiziran je utjecaj promjera armaturnih šipki vertikalnih serklaža na ponašanje zidova. Na kraju su navedeni najvažniji zaključci provedenih istraživanja.

U pripremi je eksperimentalna provjera nekih ovdje provedenih numeričkih testova na dinamičkoj platformi. Numerički i eksperimentalni testovi utjecaja horizontalnih serklaža na nosivost zidanih zidova predmet su posebnog istraživanja autora.

## 2. Kratak opis primijenjenoga numeričkog modela

Detaljni opis odabranoga numeričkog modela za statički i dinamički proračun zidanih konstrukcija može se naći u [21, 22]. U nastavku ćemo samo sažeto opisati njegove glavne karakteristike.

Model je namijenjen simulaciji ravninskih zidanih konstrukcija opterećenih u svojoj ravnini. Konstrukcija može biti izvedena od zida i/ili armiranog betona, a model geometrije može sadržavati i temeljno tlo. Moguća je simulacija najvažnijih nelinearnih efekata ponašanja zida, armiranog betona i tla.

Može se primijeniti makromodel i mikromodel zida. U makromodelu zida složeno se ponašanje zida (zidni elementi povezani mortom) zamjenjuje ekvivalentnim gradivom

reprezentativnih mehaničkih svojstava. U mikromodelu moguća je simulacija na razini zidnog elementa i morta (sljubnice), kao i simulacija spoja morta i zidnog elementa s pomoću kontaktnih elemenata reprezentativnih svojstava materijala. Moguće je koristiti se izotropnim modelom zida i anizotropnim modelom s različitim čvrstoćama (tlačna, vlačna, posmična), modulom elastičnosti, modulom posmika i graničnim deformacijama zida u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Modelirano je popuštanje i slom zida u tlaku, otvaranje i zatvaranje pukotina zida u vlaku, vlačna i posmična krutost s pukotinama te posmični slom zida. Rabi se model fiksnih ortogonalnih pukotina. One mogu biti horizontalne i vertikalne ili sukladne smjerovima glavnih vlačnih naprezanja.

Ponašanje betona simulira se izotropnim materijalnim modelom. Modelirano je popuštanje i drobljenje betona u tlaku, otvaranje i zatvaranje pukotina betona u vlaku te vlačna i posmična krutost betona s pukotinama. Također se rabi model fiksnih ortogonalnih pukotina, sa smjerom pukotina koji odgovara smjeru glavnih vlačnih naprezanja u betonu. U dinamičkim analizama moguće je simulirati utjecaj brzine deformacije na mehaničke karakteristike betona i čelika. Moguće je simulirati nelinearno ponašanje armature u tlaku i vlaku s efektima rasterećenja.

Za tlo se mogu primijeniti modeli zida ili betona, uz prilagođavanje odgovarajućih parametara materijala.

Numerički model uključuje i geometrijsku nelinearnost konstrukcije (velike pomake).

## 3. Numerički testovi utjecaja vertikalnih serklaža na ponašanje zidanih zidova

### 3.1. Općenito

Ponašanje zidanih zidova pod opterećenjem, osim brojnih drugih parametara, ovisi o njihovoj geometriji (visina, širina, odnos visine i širine, etažnost, broj i položaj otvora, povezanost sa zidovima suprotnog smjera, broj i raspored serklaža i sl.). Za analizu utjecaja vertikalnih serklaža na ponašanje zidanih zidova uzeti su zidovi jednostavne geometrije.

Analizirani su realni samostalni dvoetažni zidovi bez otvora i s otvorima, visine 6 m, širine 3 m i debljine 0,24 m (slika 1.). Svi zidovi imaju jednaki armiranobetonski temelj koji je oslonjen na krutu podlogu. Na razini etaža svi su zidovi opterećeni kontinuiranim vertikalnim opterećenjem  $q$ . Vlastita težina zida, serklaža i temelja uzeta je izravno u proračune.

Ispitivao se makromodel zida s izotropnim svojstvima gradiva. Razmatrani su slučajevi tzv. dobrog zida (zide visokih čvrstoća, modula elastičnosti i modula posmika) i tzv. lošeg zida (zide niskih čvrstoća, modula elastičnosti i modula posmika).

U statičkim analizama, uz konstantno vertikalno opterećenje, zidovi su na razini etaža opterećivani horizontalnim silama do sloma. U dinamičkim je analizama za sve zidove najprije razmatrano jednoliko horizontalno harmonijsko ubrzanje podloge. Pritom se period pobude podudara s prvim periodom

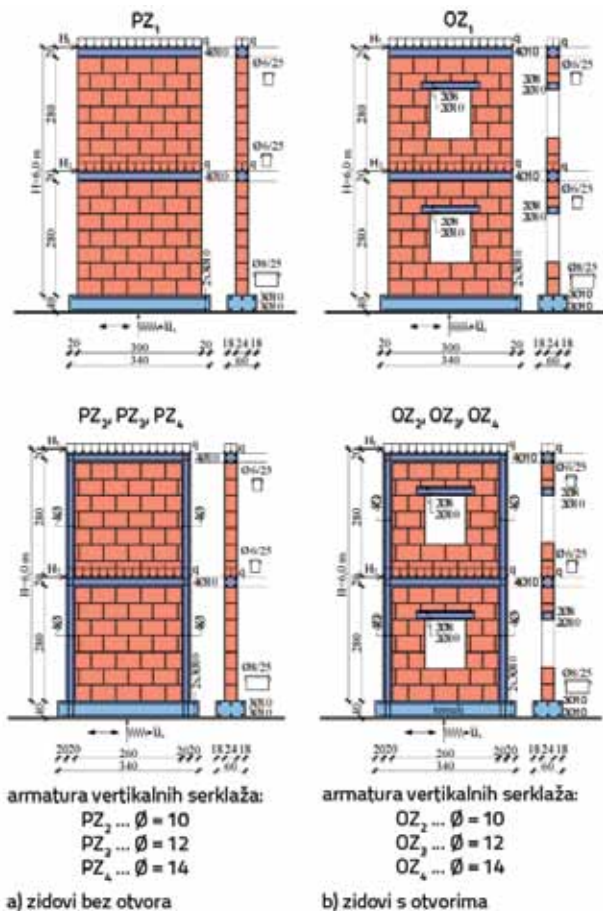
slobodnih oscilacija pojedinog zida s elastičnim svojstvima gradiva. Usvojeno je rezonantno harmonijsko ubrzanje podloge kako bi se postigla što veća razina nelinearnosti te zorno ilustrirala razlika rezultata dobivenih s pomoću uobičajenoga linearnog modela i uporabljenoga nelinearnog modela ponašanja [21, 22]. Potom je izvršena dinamička analiza svih zidova za djelovanje realnog potresa. Geometrija analiziranih zidanih zidova, s armaturom serklaža i temelja, prikazana je na slici 1.

### 3.2. Moguće odizanje temelja zidova od podloge i klizanje temelja po podlozi

Ovaj slučaj odgovara brojnim stanjima realnih zidanih zidova kojima nije spriječeno eventualno odizanje temelja od podloge i eventualno klizanje temelja po podlozi (slobodno oslonjen zid). Usvojeni osnovni parametri gradiva za numeričku analizu prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Usvojeni osnovni parametri gradiva za analizu zidova

Zide	dobro zide (d)	$f_{m,c} = 5$ MPa tlačna čvrstoća $f_{m,t} = 0,15$ MPa vlačna čvrstoća $E_m = 5\ 000$ MPa modul elastičnosti $G_m = 1\ 000$ MPa modul posmika
	loše zide (l)	$f_{m,c} = 1$ MPa tlačna čvrstoća $f_{m,t} = 0,03$ MPa vlačna čvrstoća $E_m = 1\ 000$ MPa modul elastičnosti $G_m = 200$ MPa modul posmika
Beton temelja i serklaža		$f_{c,c} = 25$ MPa tlačna čvrstoća $f_{c,t} = 2,5$ MPa vlačna čvrstoća $E_c = 30\ 500$ MPa modul elastičnosti $G_c = 13\ 260$ MPa modul posmika
Kontaktnelementi ispod temelja		$f_{k,c} = 25$ MPa tlačna čvrstoća $f_{k,t} = 0,0$ MPa vlačna čvrstoća $E_k = 30\ 500$ MPa modul elastičnosti $G_k = 13\ 260$ MPa modul posmika
Čelik za armiranje		$f_{s,c} = 500$ MPa tlačna čvrstoća $f_{s,t} = 500$ MPa vlačna čvrstoća $E_s = 210\ 000$ MPa modul elastičnosti

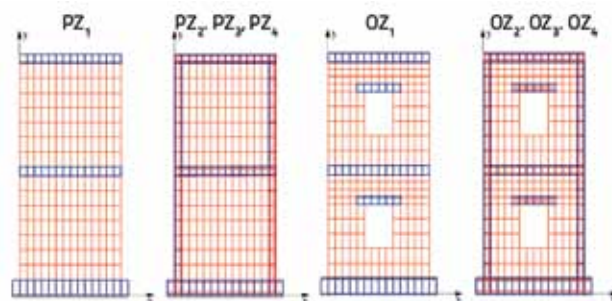


Slika 1. Analizirani zidani zidovi; a) zidovi bez otvora, b) zidovi s otvorima

Zidovi bez otvora (PZ) i zidovi s otvorima (OZ) imaju jednaka rješenja horizontalnih serklaža (uzdužne šipke 4Ø10). Zidovi PZ<sub>1</sub> i OZ<sub>1</sub> nemaju vertikalne serklaže. Zidovi PZ<sub>2</sub> i OZ<sub>2</sub> imaju vertikalne serklaže s uzdužnom armaturom 4Ø10, zidovi PZ<sub>3</sub> i OZ<sub>3</sub> vertikalne serklaže s uzdužnom armaturom 4Ø12 i zidovi PZ<sub>4</sub> i OZ<sub>4</sub> vertikalne serklaže s uzdužnom armaturom 4Ø14. Spone svih vertikalnih i horizontalnih serklaža su Ø6/25. Nije se istraživao utjecaj poprečne armature serklaža na ponašanje omeđenih zidanih zidova, ali to se planira učiniti. Svi zidovi imaju jednaka svojstva betona i armature. Razmatrana su dva slučaja oslanjanja temelja zidova na krutu podlogu:

- moguće odizanje i klizanje temelja
- spriječeno odizanje i klizanje temelja.

Prostorna diskretizacija zidova prikazana je na slici 2. Može se reći da je usvojena relativno gruba mreža konačnih elemenata, a osobito za serklaže. Na spoju temelja i podloge uzeti su tanki kontaktnelementi za što adekvatniju simulaciju odizanja i klizanja temelja.



Slika 2. Diskretizacija analiziranih zidova konačnim elementima

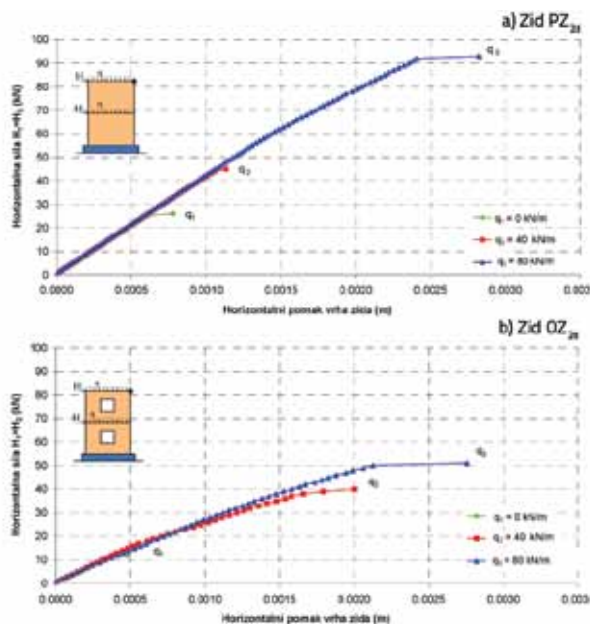
#### 3.2.1. Statička analiza

Najprije je izračunano početno stanje pomaka, naprezanja i unutarnjih sila za vlastitu težinu i vertikalno opterećenje q.

Nakon toga zidovi su dopunski opterećivani horizontalnim silama  $H_1 = H_2$ , sukcesivno u inkrementima do sloma.

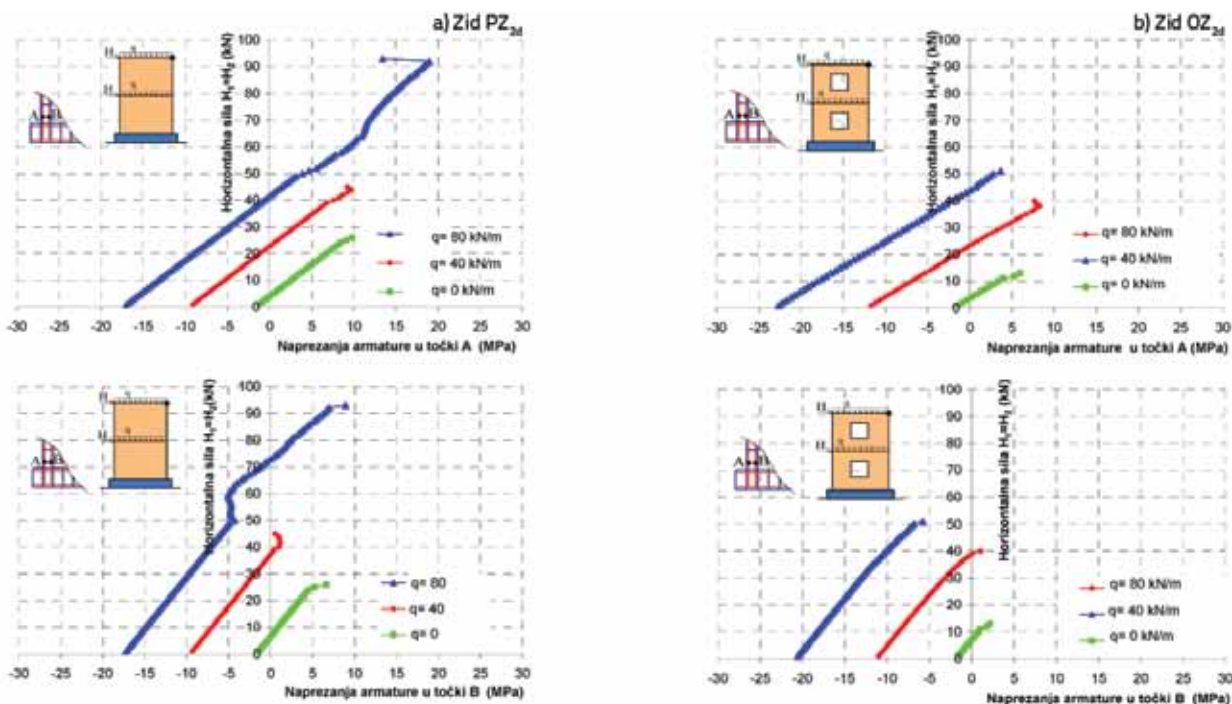
Osim o drugim brojnim parametrima, nosivost i deformabilnost zidova opterećenih horizontalnim opterećenjem bitno ovisi o njihovu vertikalnom opterećenju. Za ilustraciju ovog utjecaja, na početku su analizirani samo zidovi  $PZ_{2d}$  i  $OZ_{2d}$  ( $d$  = dobro ziđe) s različitim vertikalnim opterećenjem na razini etaža ( $q$ ):  $q_1=0$  kN/m (djeluje samo vlastita težina zida),  $q_2=40$  kN/m (srednje vertikalno opterećen zid) i  $q_3=80$  kN/m (jače vertikalno opterećen zid). Granična nosivost svih zidova uvjetovana je gubitkom njihove stabilnosti (prevrtanjem) kao krutog tijela. Horizontalni je pomak vrha zidova prikazan na slici 3., a naprezanja armature u točkama A i B na slici 4. Rezultati analize pokazuju, što se i očekivalo, da za mala vertikalna opterećenja zidovi mogu nositi i male horizontalne sile jer brzo dolazi do gubitka stabilnosti zida kao krutog tijela. U slučaju većega vertikalnog opterećenja, zidovi mogu nositi i veće horizontalne sile. Vlačna su naprezanja u uzdužnoj armaturi vertikalnih serklaža mala. U daljnjim su primjerima, u kojima se istraživao utjecaj vertikalnih serklaža na ponašanje zidova, svi zidovi na razini etaža opterećeni sa  $q=40$  kN/m.

Utjecaj vertikalnih serklaža na horizontalni pomak vrha zidova bez otvora prikazan je na slici 5., a na horizontalni pomak vrha zidova s otvorima na slici 6. Vidljivo je da postoji velika razlika u nosivosti i deformabilnosti zidova bez vertikalnih serklaža u odnosu na zidove s vertikalnim

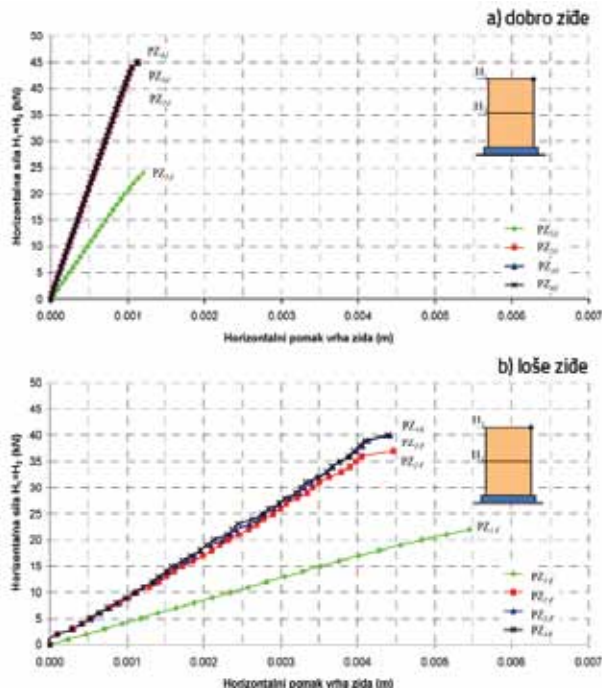


Slika 3. Horizontalni pomak vrha zidova  $PZ_{2d}$  i  $OZ_{2d}$  ovisno o vertikalnom opterećenju  $q$  – slobodno oslonjen temelj, statičko opterećenje

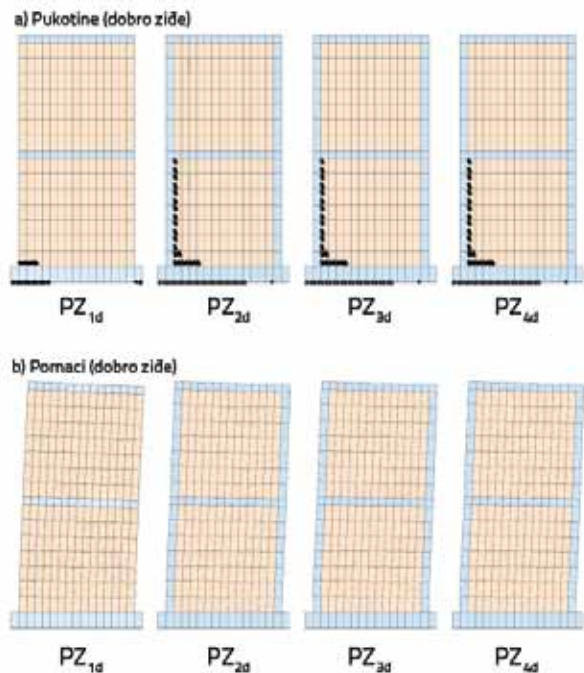
serklažima. Pri tome promjer šipki vertikalnog serklaža nema praktičnog utjecaja na graničnu nosivost zidova. Naime, kako je prethodno navedeno, zidovi nemaju veliko vertikalno opterećenje i njihova je granična nosivost uvjetovana gubitkom stabilnosti zida kao krutog tijela.



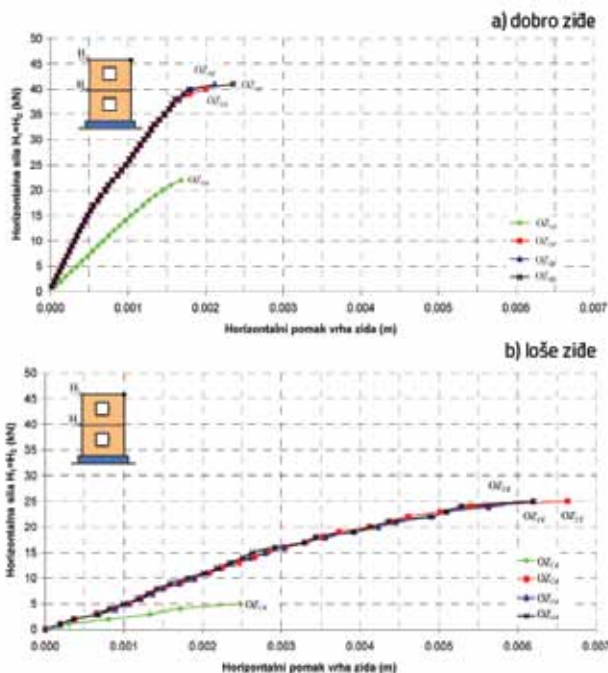
Slika 4. Naprezanja u armaturi vertikalnog serklaža pri dnu zidova  $PZ_{2d}$  i  $OZ_{2d}$  u ovisnosti o vertikalnom opterećenju  $q$  – slobodno oslonjen temelj, statičko opterećenje



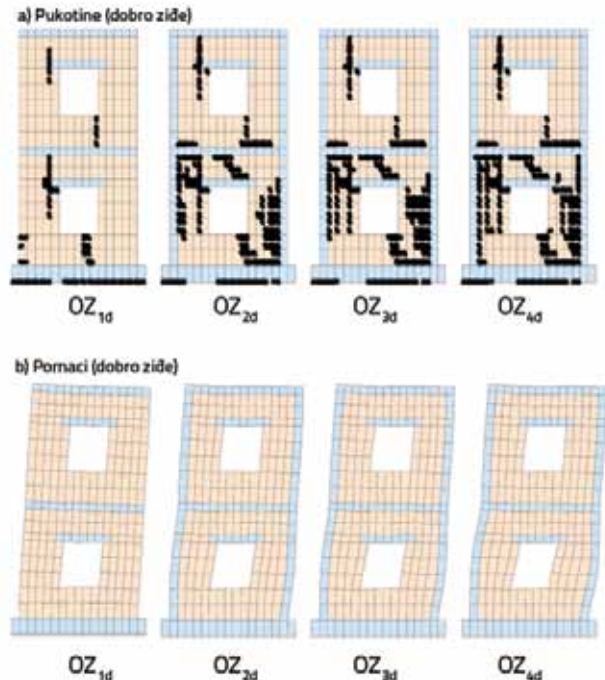
Slika 5. Utjecaj vertikalnih serklaža na horizontalni pomak vrha zidova bez otvora – slobodno oslonjen temelj, statičko opterećenje



Slika 7. Pomaci i pukotine u zidovima bez otvora neposredno pred slom – slobodno oslonjen temelj, statičko opterećenje



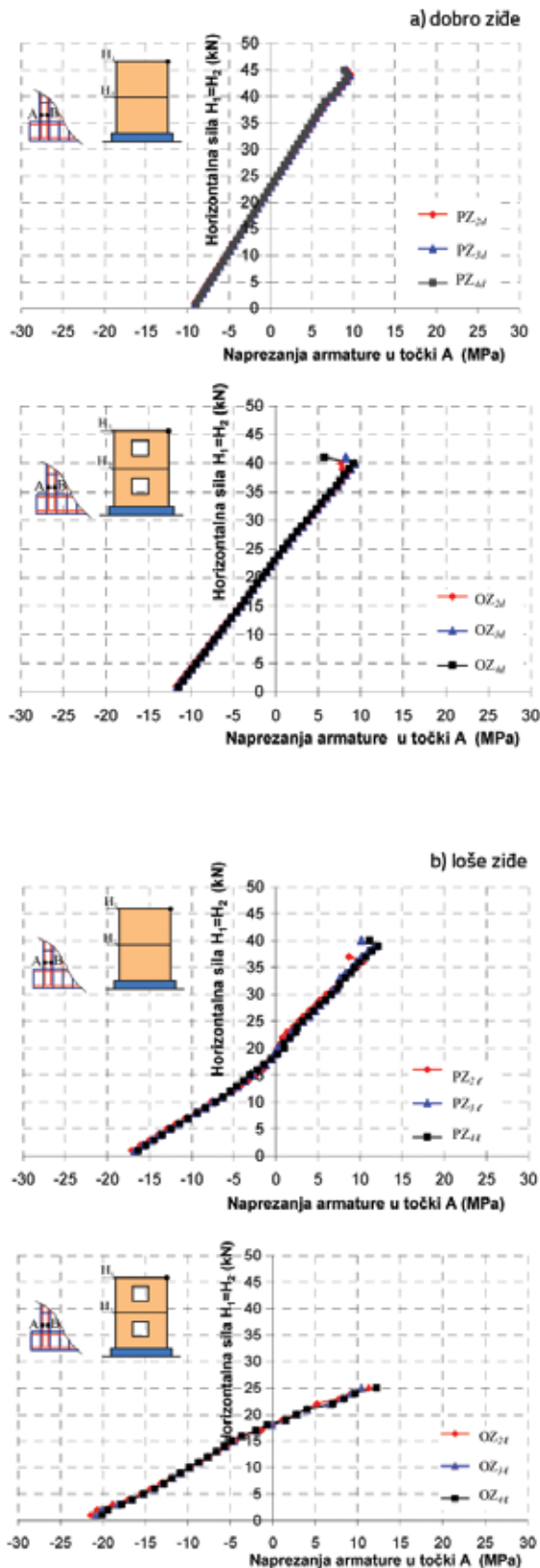
Slika 6. Utjecaj vertikalnih serklaža na horizontalni pomak vrha zidova s otvorima – slobodno oslonjen temelj, statičko opterećenje



Slika 8. Pomaci i pukotine u zidovima s otvorima neposredno pred slom – slobodno oslonjen temelj, statičko opterećenje

Pomaci zidova neposredno pred slom, s odgovarajućim stanjem pukotina, prikazani su na slikama 7. i 8. U odnosu na zidove bez otvora, zidovi s otvorima imaju znatno veće pomake i znatno šire zone pukotina.

Naprezanja u armaturi vertikalnog serklaža pri dnu zidova neposredno pred slom prikazana su na slici 9. Kao što je prethodno navedeno, vidi se da su ona niska i gotovo jednaka za sve profile uzdužnih šipki vertikalnih serklaža.



Slika 9. Naprezanja u armaturi vertikalnog serklaža pri dnu zidova neposredno pred slom – slobodno oslonjen temelj, statičko opterećenje

### 3.2.2. Dinamička analiza

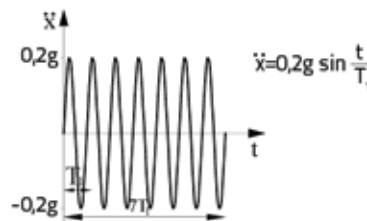
Analizirani su zidovi na slici 1., opterećeni stalnim vertikalnim opterećenjem  $q=40$  kN/m. Za svaki je zid i njegovu odgovarajuću krutost prvo riješena svojstvena zadaća problema [21, 22]. Prvi i drugi period slobodnih oscilacija zidova prikazan je u tablici 2. Vidi se da otvor u zidu omekšava zid, a da zidovi bez serklaža ( $PZ_1, OZ_1$ ) imaju znatno veće periode osciliranja (manju krutost) od odgovarajućih zidova s vertikalnim serklažima. Armatura vertikalnih serklaža ne pridonosi znatno krutosti zida. Također je uočljiva velika razlika između prvog ( $T_1$ ) i drugog ( $T_2$ ) perioda slobodnih oscilacija zidova, što je svojstveno krutim konstrukcijama. Osim proračuna zidova prema nelinearnom modelu [21, 22], za ilustraciju razlike u numeričkim rezultatima, izvršen je i proračun s linearno-elastičnim modelom ponašanja zidova. Pritom je za sve slučajeve usvojeno 2% viskozno konstrukcijsko prigušenje.

Tablica 2. Prvi ( $T_1$ ) i drugi ( $T_2$ ) period slobodnih oscilacija zidova na slici 1.

Zid	$T_1$ [s]		$T_2$ [s]		
	Dobro zide	Loše zide	Dobro zide	Loše zide	
Bez otvora	$PZ_1$	0,1459	0,3239	0,040	0,089
	$PZ_2$	0,1046	0,1771	0,0334	0,063
	$PZ_3$	0,1042	0,1767	0,0333	0,0628
	$PZ_4$	0,1037	0,1761	0,0332	0,0626
S otvorima	$OZ_1$	0,1655	0,3641	0,0506	0,1113
	$OZ_2$	0,1217	0,2122	0,0408	0,0763
	$OZ_3$	0,1213	0,2116	0,0407	0,0761
	$OZ_4$	0,1208	0,2109	0,0406	0,0758

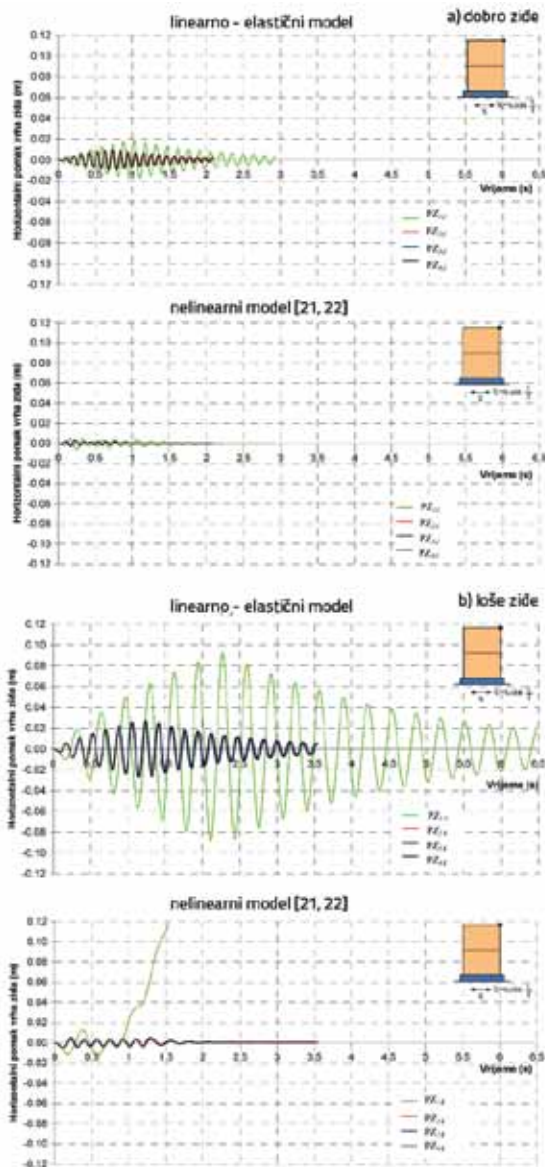
### Jednoliko harmonijsko ubrzanje podloge

Zidovi su izloženi jednolikom harmonijskom ubrzanju podloge prema slici 10. Dakle, period pobude odgovara prvom periodu slobodnih oscilacija elastičnog zida ( $T_1$ ). Maksimalno ubrzanje podloge uzeto je 0,2 g, a trajanje pobude  $7T_1$ .



Slika 10. Usvojeno horizontalno harmonijsko ubrzanje podloge

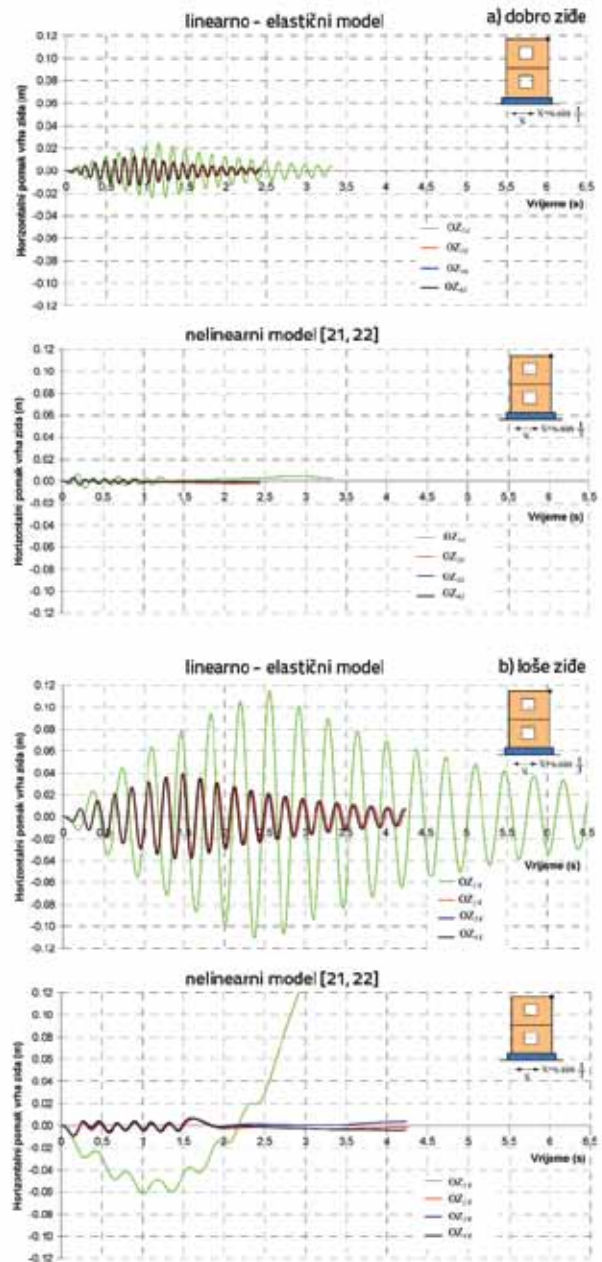
Na slici 11. prikazan je utjecaj vertikalnih serklaža na horizontalni pomak vrha zidova bez otvora, a na slici 12. horizontalni pomak vrha zidova s otvorima. Očito je da je odgovor zidova s usvojenim nelinearnim numeričkim modelom [21, 22] potpuno različit od odgovora s linearno-elastičnim modelom ponašanja. Za elastično ponašanje i harmonijsku pobudu, dobiva se dobro poznato rezonantno gibanje zida. Kod nelinearnog modela, nakon pojave prvih nelinearnosti (pukotina) u zidu i odizanja temelja od podloge, zid "ispada" iz rezonantnog gibanja.



Slika 11. Utjecaj vertikalnih serklaža na horizontalni pomak vrha zidova bez otvora – slobodno oslonjen temelj, harmonijsko ubrzanje podloge

Također je velika razlika u maksimalnim pomacima zidova. Za nelinearni model ponašanja, zidovi s lošim zidom bez vertikalnih

serklaža teže urušavanju. Vidi se da profil uzdužnih šipki vertikalnih serklaža nema praktičnog utjecaja na ponašanje zida.

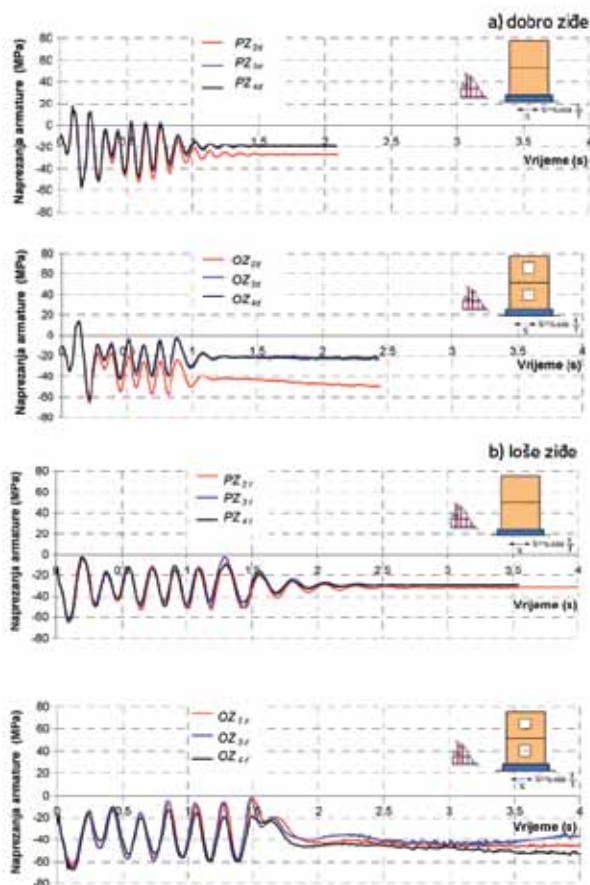


Slika 12. Utjecaj vertikalnih serklaža na horizontalni pomak vrha zidova s otvorima - slobodno oslonjen temelj, harmonijsko ubrzanje podloge

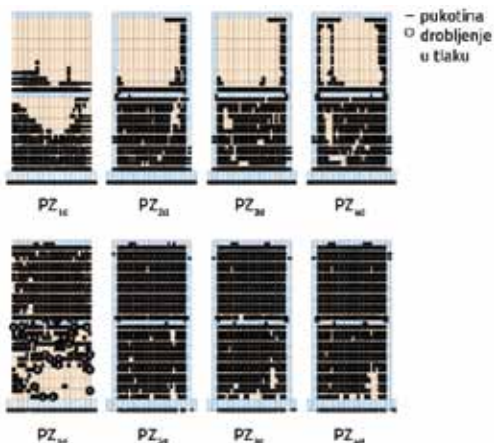
Utjecaj promjera uzdužnih šipki vertikalnih serklaža na naprezanje armature pri dnu serklaža za nelinearni model ponašanja prikazan je na slici 13. Očito je da su, za odgovarajuću geometriju zidova i svojstva zida, naprezanja armature vertikalnog serklaža praktično neovisna o promjeru šipki vertikalnog serklaža. Maksimalna naprezanja armature su niska, što je ponajviše posljedica relativno male ukupne

težine zida i odizanja temelja od podloge tijekom dinamičke pobude.

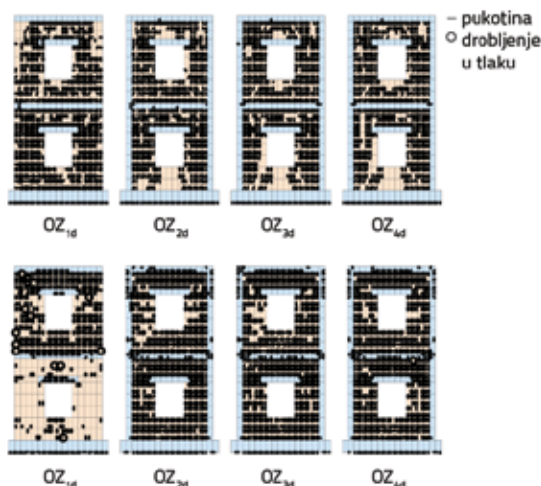
Stanje pukotina u zidovima neposredno pred slom prikazano je na slikama 14. i 15.



Slika 13. Utjecaj promjera uzdužnih šipki vertikalnih serklaža na naprezanja armature pri dnu serklaža (točka A) - slobodno oslonjen temelj, harmonijsko ubrzanje podloge



Slika 14. Stanje pukotina u zidovima bez otvora nakon prestanka djelovanja harmonijske pobude - slobodno oslonjen temelj, harmonijsko ubrzanje podloge

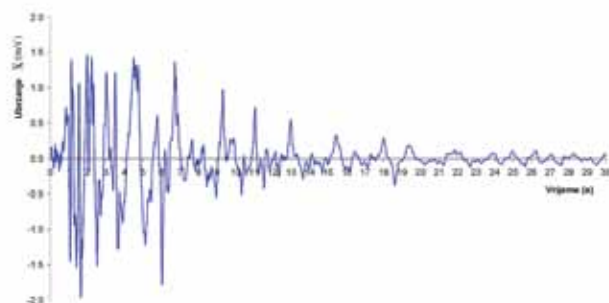


Slika 15. Stanje pukotina u zidovima s otvorima nakon prestanka djelovanja harmonijske pobude - slobodno oslonjen temelj, harmonijsko ubrzanje podloge

### Potresno opterećenje

Izvršena je dinamička analiza analogno onoj u točki *Jednoliko harmonijsko ubrzanje podloge*, s tim da je za sve razmatrane zidove usvojena horizontalna komponenta ubrzanja potresa "Kobe" (slika 16.) i samo nelinearni model ponašanja [21, 22]. Pri tome su amplitude potresa skalirane (pomnožene faktorom), tako da najveća amplituda ubrzanja iznosi 0,2g (kao kod harmonijske pobude).

Neki dobiveni rezultati analize prikazani su na slikama 17., 18., 19. Ako se usporede računski vrijednosti na ovim slikama s odgovarajućim vrijednostima na slikama 11., 12., 13., može se zaključiti da je potresno ubrzanje ovdje nepovoljnije od rezonantnoga harmonijskog ubrzanja podloge.

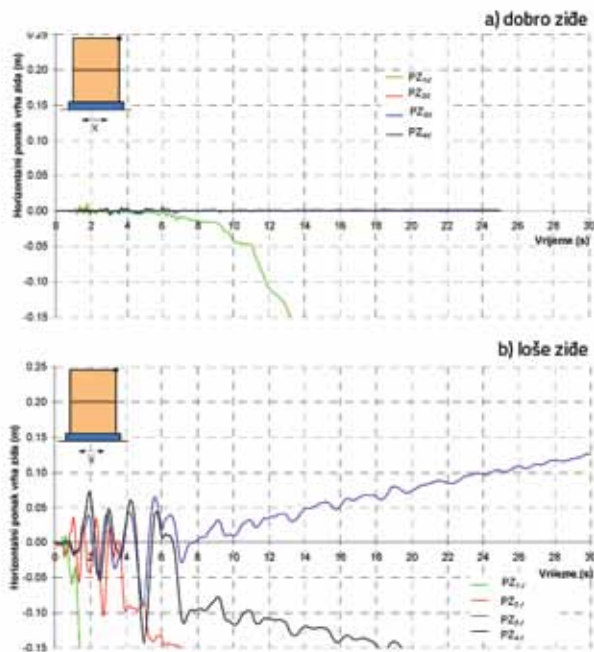


Slika 16. Potres "Kobe" (horizontalna komponenta ubrzanja)

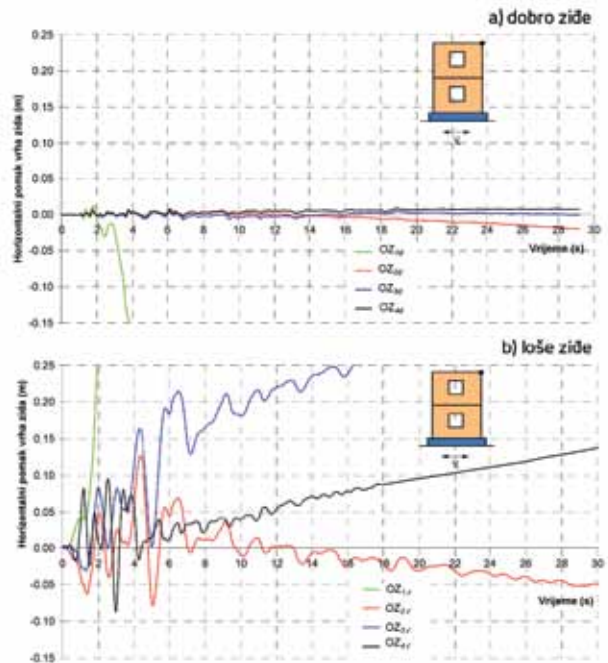
### 3.3. Spriječeno odizanje temelja zidova od podloge i klizanje temelja po podlozi

Ovaj slučaj odgovara nekim stanjima realnih zidanih zidova kod kojih nije moguće odizanje temelja od podloge

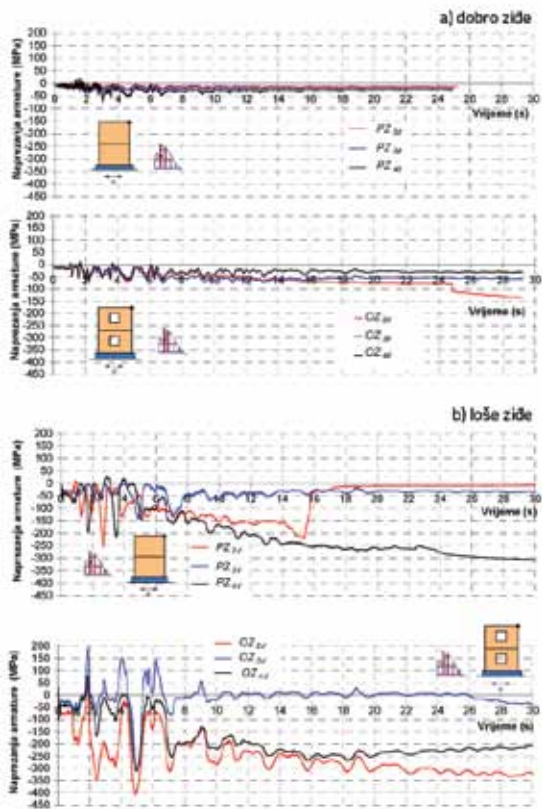




Slika 17. Utjecaj vertikalnih serklaža na horizontalni pomak vrha zidova bez otvora – slobodno oslonjen temelj, potresno djelovanje



Slika 18. Utjecaj vertikalnih serklaža na horizontalni pomak vrha zidova s otvorima – slobodno oslonjen temelj, potresno djelovanje



Slika 19. Utjecaj promjera uzdužnih šipki vertikalnih serklaža na naprezanja armature pri dnu serklaža (točka A) – slobodno oslonjen temelj, potresno djelovanje

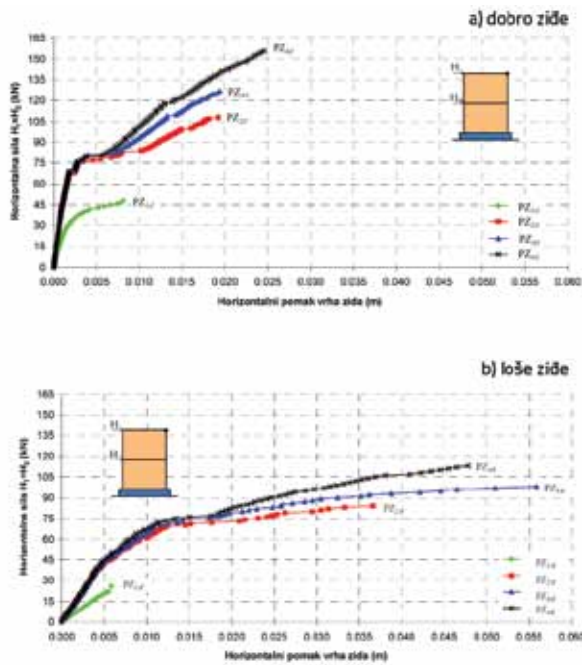
i klizanje temelja po podlozi za proračunska opterećenja. U analizi su ponovno razmatrani zidovi na slici 1., ali sa spriječenim horizontalnim i vertikalnim pomacima dna temelja. Vertikalno opterećenje na razini etaža uzeto je  $q=40$  kN/m. Razmatran je samo nelinearni model ponašanja gradiva prema [21, 22].

### 3.3.1. Statička analiza

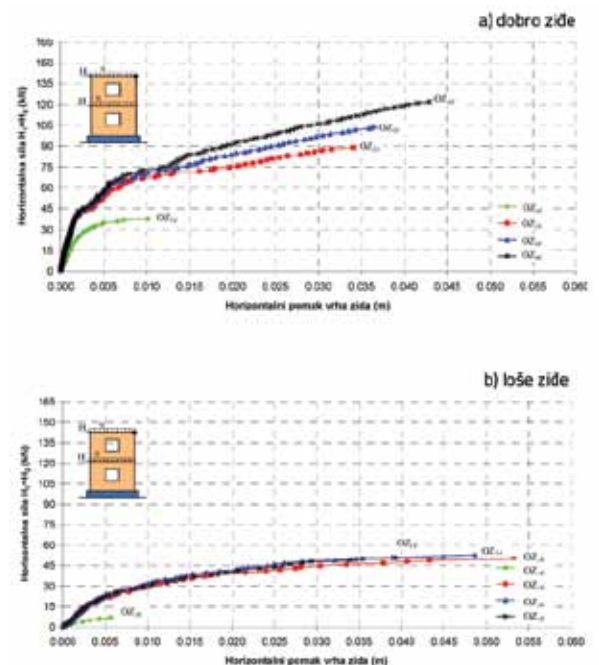
Provedena je analiza analogno onoj u točki 3.2.1. Neki dobiveni rezultati prikazani su na slikama 20.-24. Ako se usporede računске vrijednosti na ovim slikama s odgovarajućim vrijednostima na slikama 5.-9., može se zaključiti kako slijedi.

Zid sa spriječenim odizanjem temelja i spriječenim klizanjem temelja po podlozi, u odnosu na isti zid s mogućim odizanjem i klizanjem temelja, ima znatno veću graničnu nosivost.

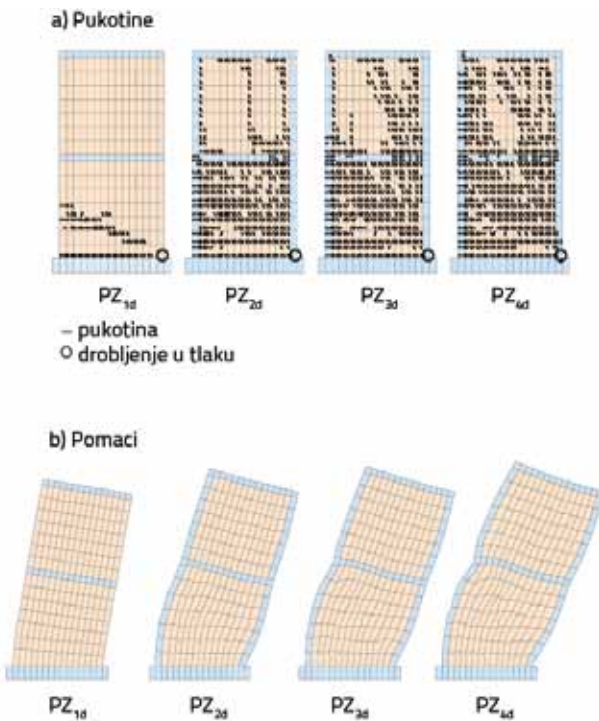
Granična je nosivost uvjetovana nosivošću armature vertikalnog serklaža (dobro zide) ili nosivošću zida (loše zide). Ovdje se vidi veća razlika u graničnoj nosivosti i deformabilnosti zidova bez vertikalnih serklaža u odnosu na zidove s vertikalnim serklažima. Isto se tako vidi utjecaj promjera šipki vertikalnih serklaža na graničnu nosivost zidova. Također se može uočiti znatan utjecaj kvalitete zida na graničnu nosivost i deformabilnost zidova.



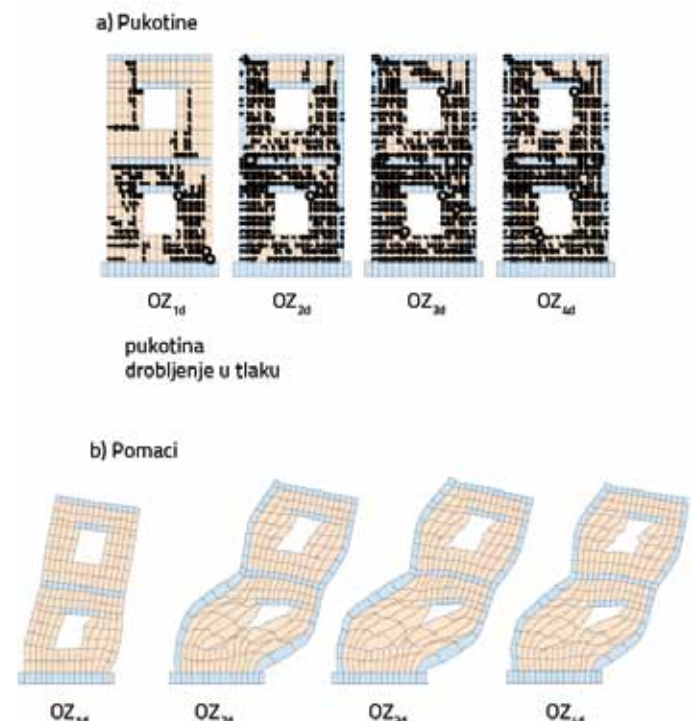
Slika 20. Utjecaj vertikalnih serklaža na horizontalni pomak vrha zidova bez otvora – nepomični temelj, statičko opterećenje



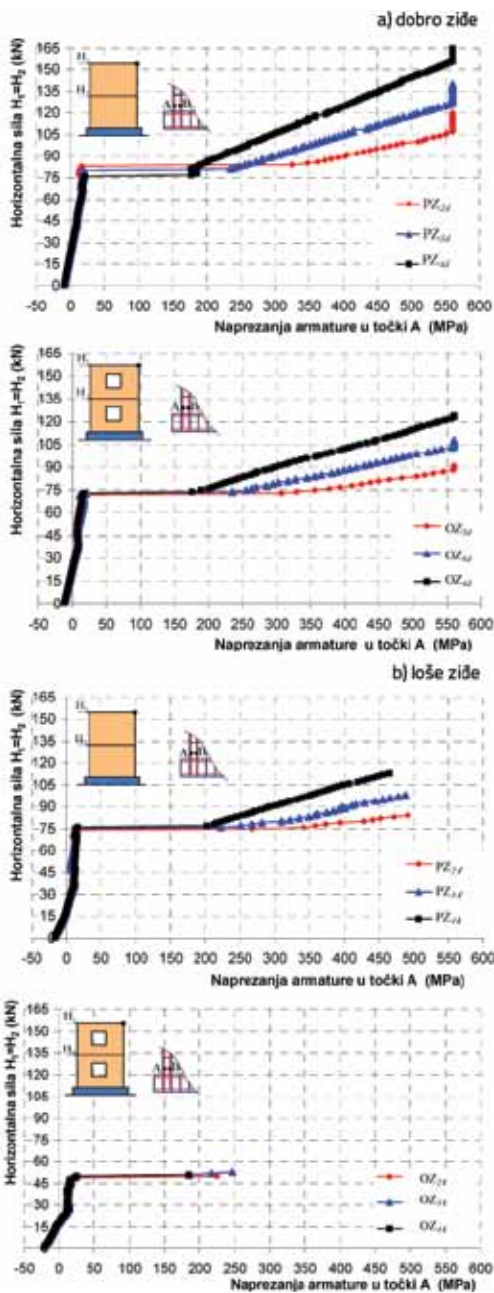
Slika 21. Utjecaj vertikalnih serklaža na horizontalni pomak vrha zidova s otvorima – nepomični temelj, statičko opterećenje



Slika 22. Pomaci i pukotine u zidovima bez otvora (dobro zide) neposredno pred slom – nepomični temelj, statičko opterećenje



Slika 23. Pomaci i pukotine u zidovima s otvorima (dobro zide) neposredno pred slom – nepomični temelj, statičko opterećenje



Slika 24. Naprezanja u armaturi vertikalnog serklaža pri dnu zidova neposredno pred slom – nepomični temelj, statičko opterećenje

### 3.3.2. Dinamička analiza

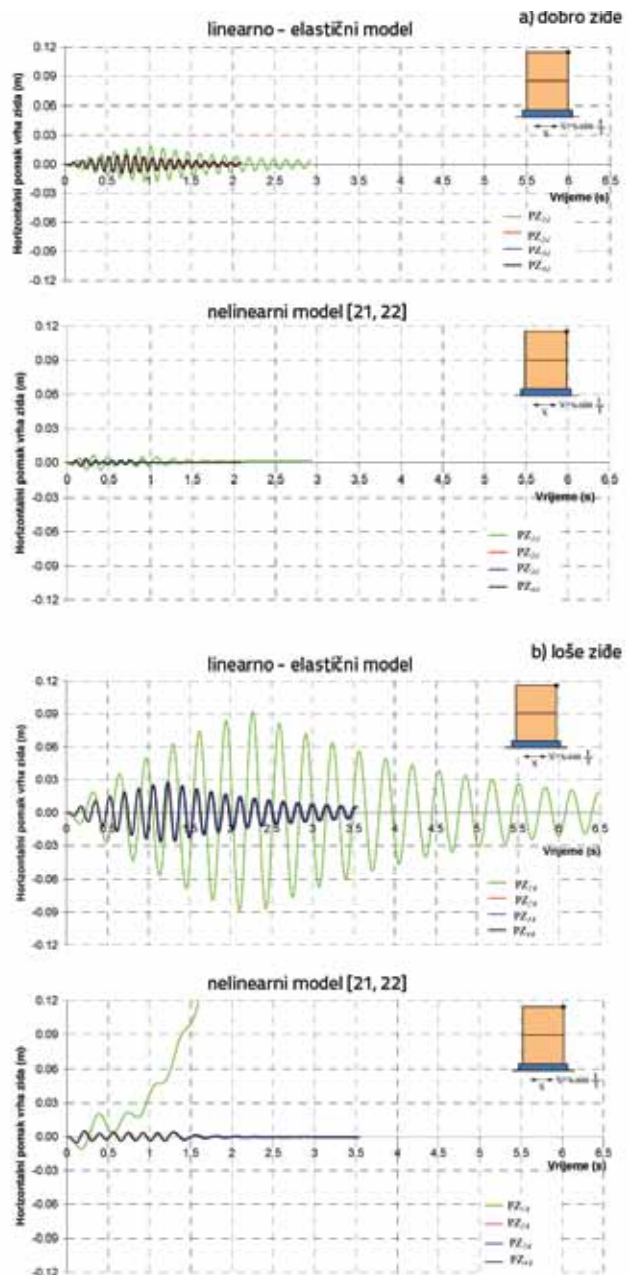
Provedena je dinamička analiza *Jednolikoga harmonijskog ubrzanja podloge*. Treba napomenuti da zidovi sa spriječnim odizanjem i klizanjem temelja također imaju periode elastičnog sustava prema tablici 2.

#### Jednoliko harmonijsko ubrzanje podloge

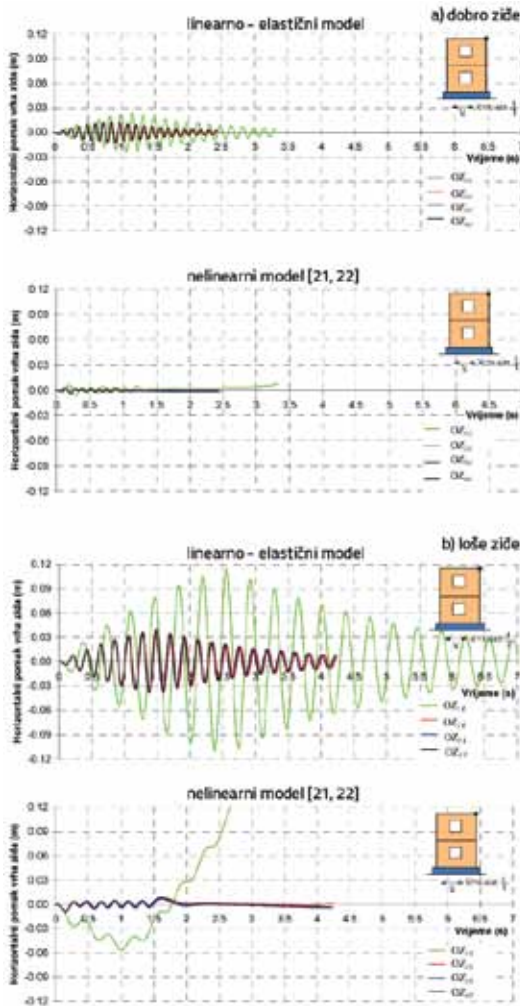
Neki su dobiveni rezultati prikazani na slikama 25.-29. Ako se usporede dobivene računске veličine na ovim slikama s

odgovarajućima na slikama 11.-15., može se zaključiti da su one slične. Dakle, za promatrano harmonijsko ubrzanje podloge, zid s nepomičnim temeljem ima podjednako ponašanje kao i zid s temeljem koji se može odizati od podloge i klizati po podlozi.

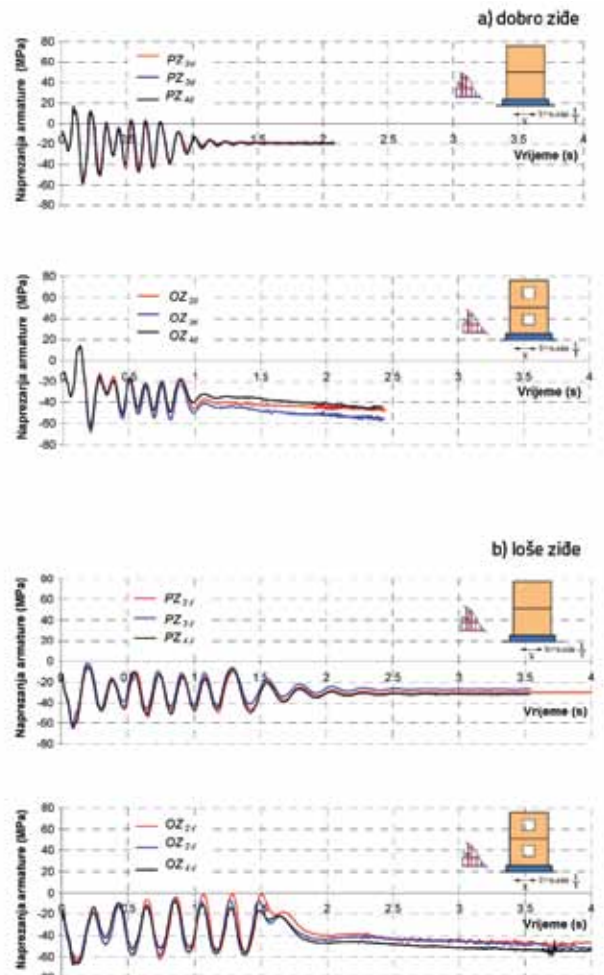
Utjecaj vertikalnih serklaža na naprezanje armature pri dnu vertikalnog serklaža za nelinearni model ponašanja prikazan je na slici 27.



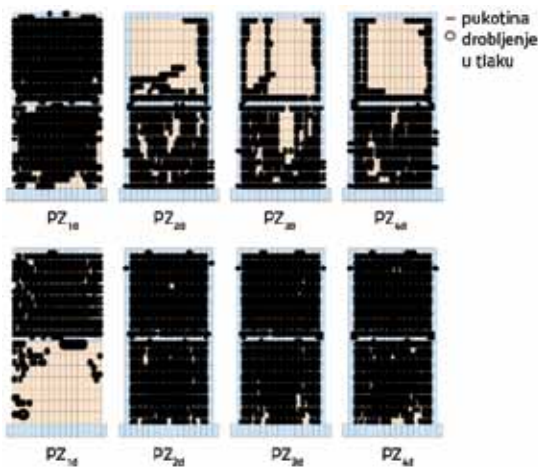
Slika 25. Utjecaj vertikalnih serklaža na horizontalni pomak vrha zidova bez otvora – nepomični temelj, harmonijsko ubrzanje podloge



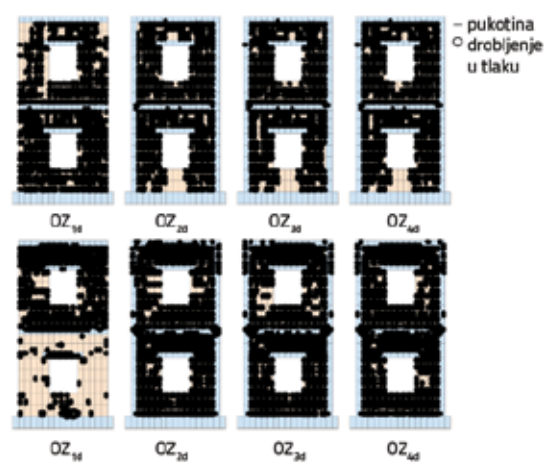
Slika 26. Utjecaj vertikalnih serklaža na horizontalni pomak vrha zidova s otvorima – nepomični temelj, harmonijsko ubrzanje podloge



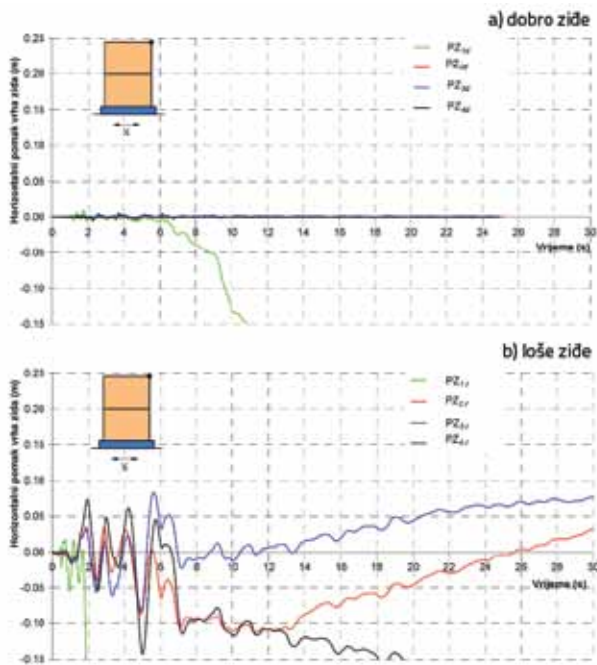
Slika 27. Utjecaj vertikalnih serklaža na naprezanja armature pri dnu vertikalnog serklaža – nepomični temelj, harmonijsko ubrzanje podloge



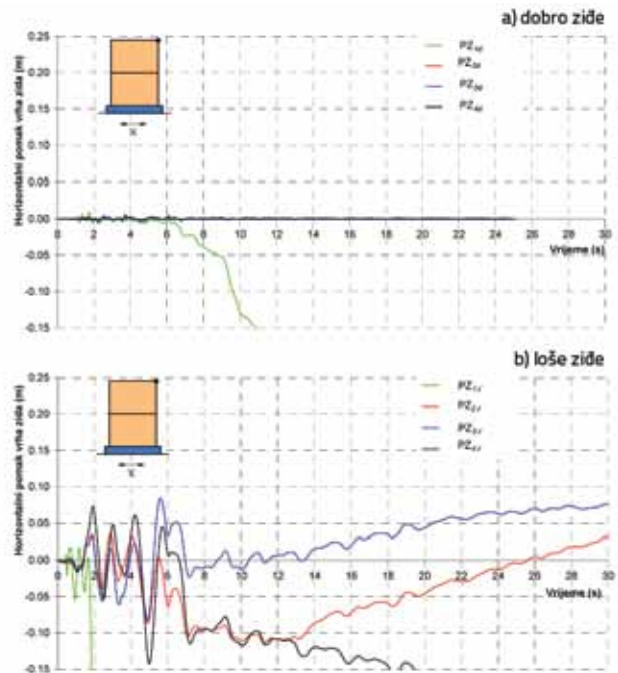
Slika 28. Stanje pukotina u zidovima bez otvora nakon prestanka djelovanja harmonijske pobude – nepomični temelj, harmonijsko ubrzanje podloge



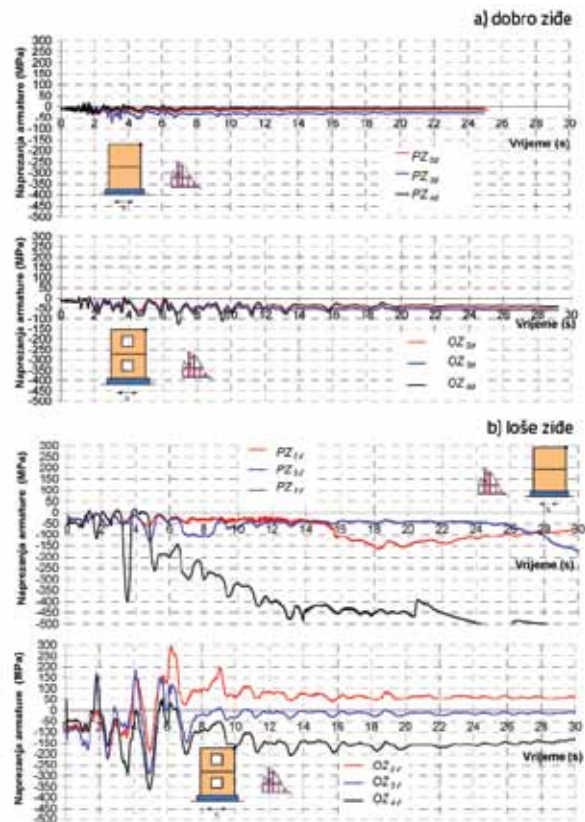
Slika 29. Stanje pukotina u zidovima s otvorima nakon prestanka djelovanja harmonijske pobude – nepomični temelj, harmonijsko ubrzanje podloge



Slika 30. Utjecaj vertikalnih serklaža na horizontalni pomak vrha zidova bez otvora – nepomični temelj, potresno djelovanje



Slika 31. Utjecaj vertikalnih serklaža na horizontalni pomak vrha zidova s otvorima – nepomični temelj, potresno djelovanje



Slika 32. Utjecaj promjera uzdužnih šipki vertikalnih serklaža na naprezanja armature pri dnu serklaža – nepomični temelj, potresno djelovanje

#### Potresno ubrzanje

Izvršena je dinamička analiza *Jednolikoga harmonijskog ubrzanja podloge*. Neki rezultati proračuna prikazani su na slikama 30.-32. Kad se usporede odgovarajući rezultati za isti zid sa slobodno oslonjenim temeljem (slike 17.-19.), može se primijetiti da su oni slični.

#### 4. Zaključak

Ponašanje svakoga zidanog zida pod statičkim i dinamičkim (potresnim) opterećenjem specifično je i ovisi o velikom broju parametara. Navedeni su samo globalni zaključci provedenih istraživanja, primjenjivi na sve zidane zidove u praksi. Osim o drugim brojnim parametrima, ponašanje zidanih zidova uvelike ovisi o njihovu ukupnom vertikalnom opterećenju. Zidani zidovi s većim ukupnim vertikalnim opterećenjem redovito imaju veću graničnu nosivost na djelovanje horizontalnih statičkih sila. Zidovi s mogućim klizanjem temelja po podlozi i odizanjem temelja od podloge, kada su ti uvjeti ispunjeni, uglavnom imaju znatno manju graničnu nosivost od istih zidova s nepomičnim temeljima. U odnosu na zidove bez otvora, zidovi s otvorima mogu imati značajno veće pomake i značajno manju graničnu nosivost, ovisno o veličini i položaju otvora. Ove se razlike povećavaju sa smanjenjem kvalitete ziđa. Utjecaj serklaže kod zidanih zidova s otvorima veći je od onog kod zidova bez otvora. Zidovi bez vertikalnih serklaža imaju znatno manju graničnu nosivost od istih zidova s vertikalnim serklažima. Zidovi koji imaju veću

armaturu (veće profile šipki) vertikalnih serklaža imaju veću graničnu nosivost na horizontalna statička opterećenja i pri djelovanju potresa – osobito za slučajeve kada nosivost zidova nije uvjetovana gubitkom njihove stabilnosti kao krutog tijela (klizanje, prevrtanje). Utjecaj vertikalnih serklaža na nosivost i deformabilnost zidanih zidova je to veći što je slabija kvaliteta

ziđa. Uzdužnu i poprečnu armaturu vertikalnih serklaža u praksi treba oblikovati u svemu sukladno armaturi čistih armiranobetonskih okvira ili armiranobetonskih okvira sa zidanom ispunom. Djelovanje realnog potresa može biti nepovoljnije od rezonantnoga harmonijskog ubrzanja podloge jednakoga maksimalnog ubrzanja.

## LITERATURA

- [1] Haacha, V. G.; Vasconcelos, G.; Lourenco, P. B.: "Parametrical study of masonry walls subjected to in-plane loading through numerical modeling", Engineering Structures 33, (2011) p.p.1377–1389.
- [2] Milani, G.: "Simple homogenization model for the non-linear analysis of in-plane loaded masonry walls", Computers and Structures 89, (2011) p.p. 1586–1601.
- [3] Mojsilović, N.: "Strength of masonry subjected to in-plane loading: A contribution", International Journal of Solids and Structures 48, (2011) p.p.865–873.
- [4] Sima, J. F.; Roca, P.; Molins, C.: "Nonlinear response of masonry wall structures subjected to cyclic and dynamic loading", Engineering Structures, Vo 33, (2011) p.p. 1955-1965.
- [5] Brasile, S.; Casciaro, R.; Formica, G.: "Finite Element formulation for the homogenisation of masonry", International Journal of Solids and Structures, (2009).
- [6] Brasile, S.; Casciaro, R.; Formica, G.: "Multilevel approach for brick masonry walls – Part I: A numerical strategy for the nonlinear analysis", Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 198 (2009) p.p. 3934–3943.
- [7] Brencich, A.; de Felice, G.: "Brickwork under eccentric compression: Experimental results and macroscopic models", Construction and Building Materials 23, (2009).
- [8] Mebarki, A.; Bui, Q.H.; Bui, R.; Saada, A.; Delmotte, P.; Sanchez Tizapa, S.: "A simplified mechanical model to assess the bearing capacity of masonry walls: Theory and experimental validation", Construction and Building Materials 23, (2009) p.p. 1109–1117.
- [9] Chaimoon, K.; Attard, M. M.: "Modelling for unreinforced masonry walls under shear and compression", Engineering Structures 29, (2007) p.p. 2056–2068.
- [10] Ramalho, M.A.; Taliércio, A.; Anzani, A.; Binda, L.; Papa, E.: "Numerical model for the description of the nonlinear behaviour of multi-leaf masonry walls", Engineering Structures 29, (2007).
- [11] Hashem, A.; Mosalam, K.M.: "Shake-table experiment on reinforced concrete structure containing masonry infill wall", Earthquake Engng Struct. Dyn. 35, (2006) p.p. 1827–1852.
- [12] Gabor, A.; Ferrier, E.; Jacquelin, E.; Hamelin, P.: "Analysis and modelling of the in-plane shear behaviour of hollow brick masonry panels", Construction and Building Materials 20 (2006) p.p 308–321.
- [13] Lourenco, P. B.; Pina-Henriques, J.: "Validation of analytical and continuum numerical methods for estimating the compressive strength of masonry", Computers and Structures 84, (2006) p.p. 1977–1989.
- [14] Milani, G.; Lourenco, P.B.; Tralli, A.: "Homogenised limit analysis of masonry walls Part II: Structural examples", Computers and Structures 84, (2006) p.p. 181–195.
- [15] Asteris, P.G.; Syrmakizis, C. A.: "Strenght of unreinforced masonry walls under concentrated compression loads", Practice Periodical on Structural Design and Construction, 10, (2005) p.p.133.
- [16] Berto, L.; Saetta, A.; Scotta, R.; Vitaliani, R.: "Failure mechanism of masonry prism loaded in axial", Materials and Structures 38, (2005) p.p. 249-256.
- [17] Cavaleri, L.; Failla, A.; La Mendola, L.; Papia M.: "Experimental and analytical response of masonry elements under eccentric vertical loads", Engineering Structures 27, (2005) p.p. 1175–1184.
- [18] D. Schermer: "Experimental and numerical investigations on the behaviour of unreinforced masonry buildings under seismic loadings", 13th International Brick and Block Masonry Conference, Amsterdam, (2004).
- [19] Badoux, M.; Elgwady, M.A.; Lestuzzi, P.: "Earthquake simulator tests on unreinforced masonry walls before and after upgrading with composites", 12 European Conference of earthquake Engineering, (2002).
- [20] Tomažević, M.: "Some aspects of experimental testing of seismic behavior of masonry walls and models of masonry buildings", ISET Journal of earthquake Technology, Vol 37, (2000) p.p 101-117.
- [21] Radnić, J.; Harapin, A.; Matešan, D.; Trogrlić, B.; Smilović, M.; Grgić, N.; Baloević, G.: "Numerički model za statički i dinamički proračun zidanih konstrukcija", Građevinar 63, (2011.) str. 529–546.
- [22] Radnić, J.; Harapin, A.; Matešan, D.; Smilović, M.; Grgić, N.: "Numerical Model for Static and Dynamic Analysis of Masonry Structure", 5th International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting, Algarve, Portugal, (2011.).