

Mladen Ćosić¹

ANVELOPA CILJNIH POMERANJA OKVIRNIH SISTEMA U INTERAKCIJI SA TLOM ZA USLOVE SEIZMIČKOG DEJSTVA

Rezime:

Primenjujući metodu modifikacije pomeranja (*displacement modification method*) prema *FEMA 440* razmatrani su efekti interakcije konstrukcija-tlo (*soil-structure interaction*) za višespratne okvirne sisteme. Za procenu uticaja efekata interakcije konstrukcija-tlo sprovedeni su numerički testovi uzimajući u obzir kinematičke efekte i prigušenja temelja, odnosno tla. Ciljna pomeranja su određena za različite tipove tla prema *FEMA 273* i ovako dobijene diskretne vrednosti su iskorišćene radi konstruisanja anvelope ciljnih pomeranja.

Ključne riječi: interakcija konstrukcija-tlo, FEMA 440, pushover analiza

TARGET DISPLACEMENTS ENVELOPE OF THE SOIL-MULTI-STOREY FRAME INTERACTION FOR SEISMIC EFFECTS

Summary:

Applying the displacement modification method according to the FEMA 440 were discussed the effects of soil-structure interaction for multi-storey frame systems. To assess the impact of soil-structure interaction effects, numerical tests were carried out taking into account the kinematic and damping effects of the foundation, or soil. Target displacements are determined for different types of soil according to FEMA 273 and thus obtained discrete values are used for constructing envelopes of target displacements.

Key words: soil-structure interaction, FEMA 440, pushover analysis

¹ Mr, dipl.inž.grad., adresa: Marka Milanovića 17, 15300, Loznica, mladen165@info.net

1 UVOD

Realno ponašanje objekata u uslovima seizmičkog dejstva zahteva modeliranje interakcije konstrukcija-tlo (*SSI-soil structure interaction*) čime se uvodi fleksibilnost temeljne konstrukcije i tla. Deformacije i pomeranja konstrukcije tokom zemljotresa zavise od interakcije tri povezana sistema: konstrukcije objekta, temeljne konstrukcije i geološke sredine u kojoj se nalazi temeljna konstrukcija. Problematika *SSI* interakcije razmatra se dominantno primenom dinamičkih analiza. Ukoliko se primeni razvoj i geometrijske i materijalne nelinearnosti onda rešavanje ovakvih procedura postaje znatno komplikovano. Sa druge strane zbog kompleksnosti *3D* numeričkog modela i rešavanja sistema u vremenskom domenu primenom akceleroograma, ovakve metode postaju neefikasne za rad primenom personalnih računara i u praktične svrhe.

Analize koje uvode uticaj *SSI* interakcije, a koje su znatno efikasnije i dovoljno pouzdane zasnivaju se na nelinearnom odgovoru sistema apliciranjem seizmičkih sila kao statičkih. Ove analize su poznate kao nelinearne statičke seizmičke analize (*NSPA-nonlinear static pushover analysis*). Istraživanje prikazano u ovom radu je bazirano na primeni rešenja metode modifikacije pomeranja (*DMM-displacement modification method*) prema propisima *FEMA 440* [1]. *DMM* procedura uvodi efekte prigušenja (*damping*) i kretanja tla (*ground motion*) u problematici *SSI* interakcije. Generalna procedura za određivanje nivoa ciljnog pomeranja zasnovana je na konceptu metode koeficijenata (*CM-coefficient method*) prema *FEMA 273* [2], a koja je modifikovana i predstavljena kao *DMM* metoda.

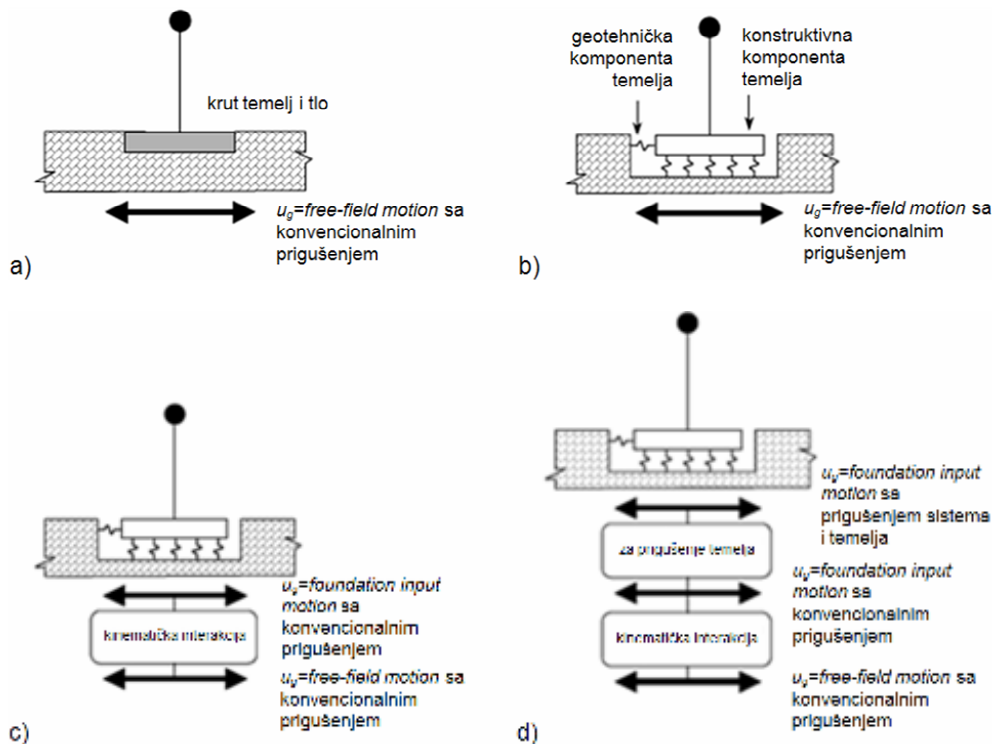
2 INTERAKCIJA KONSTRUKCIJA -TLO PREMA *FEMA 440*

Kada se razmatra interakcija temelja i tla u seizmičkim područjima misli se, pre svega, na poznavanje ponašanja zemljišta pod statičkim i dinamičkim opterećenjem i širok dijapazon promene parametara koji se odnose na seizmologiju, seizmičke geotehničke probleme, geologiju i primenjenu mehaniku tla i mehaniku uopšte [3]. Problematika analize *SSI* interakcije u cilju dobijanja pouzdanih i istovremeno ekonomičnih rešenja, odnosi se na definisanje: seizmičkog dejstva-opterećenja, dinamičkih karakteristika tla, stabilnosti temelja u seizmičkim uslovima i modeliranje konstrukcija-temelj-tlo za *SSI* interakciju. Postoje tri ključna parametra koja se moraju razmatrati pri uvođenju efekata *SSI* interakcije prema *FEMA 440* [1]:

- uvođenje fleksibilnosti sistema temeljna konstrukcija-tlo (*flexible foundation effects*),
- filtriranje zapisa kretanja tla u prenošenju do konstrukcije (*kinematic effects*),
- disipacija energije iz sistema konstrukcija-tlo radijacijom i histerezisnim prigušenjem tla (*foundation damping effects*).

Osnovni klasični model kod koga se ne uvodi *SSI* interakcija tretira temeljnu konstrukciju i tlo kao apsolutno kruto (slika 1.a). Ovakav sistem je pobuđen kretanju slobodne površine tla (*free field motion*) sa konvencionalnim prigušenjem. Konstruktivni sistemi koji uzimaju u obzir vertikalne elemente za ukrućenje (zidna platna, okviri za ukrućenje) mogu biti posebno osetljivi čak i na male rotacije i translacije, koje se ne uzimaju u obzir pretpostavkom kruto nepomične osnove. Prema *FEMA 440* [1] propisima za nelinearne statičke seizmičke analize *SSI* interakcija se modelira uvođenjem fleksibilnosti u sistem temeljna konstrukcija-tlo. Ovakav model interakcije se zove model sa fleksibilnom osnovom (*flexible base model*). Kod datog modela se uvodi uticaj konstrukcijskih komponenti temelja i geotehničkih komponenti

temelja. Prva komponenta se uvodi modeliranjem fleksibilne konstrukcije temelja, dok se druga komponenta uvodi modeliranjem opruga sa pripadajućim komponentama krutosti koje zamenjuju uticaj tla (slika 1.b). I kod ovog modela se koristi rezultujući zapis ubrzanja koji se dobija za površinu tla sa 5% prigušenja kao konvencionalna početna vrednost. Upoređujući sa modelom koji ima apsolutno krutu temeljnu konstrukciju, nastupa povećanje perioda vibracija konstrukcije, promena u raspodeli sila u poprečnim presecima i može se uzeti u obzir uticaj temeljne konstrukcije. Slika 1.c) ilustruje efekte filtriranja koji se mogu javiti u interakciji konstrukcija-tlo u zavisnosti od karaktera i intenziteta zemljotresa. U ovom slučaju kao zapis ubrzanja tla se uzima zapis na nivou temelja sa konvencionalnim prigušenjem. Slika 1.d) ilustruje efekte prigušenja temeljne konstrukcije i sistema, a zapis se generiše uzimajući u obzir fleksibilnost temeljne konstrukcije. Prigušenje temeljne konstrukcije se dobija iz relativnog pomeranja temelja i tla, tako da se postiže efektivno smanjenje ordinate spektralne krive.



Slika 1 - a) model sa krutom osnovom, b) model sa fleksibilnom osnovom, c) kinematička interakcija, d) prigušenje temelja

Figure 1 - a) rigid base model, b) flexible base model, c) kinematic interaction, d) foundation damping

U praktičnim analizama prigušenje temeljne konstrukcije se uvodi preko koeficijenta koji predstavlja odnos osnovnog perioda vibracija sistema na fleksibilnim temeljima, u odnosu na model na krutim temeljima. Ostali faktori koji utiču na prigušenje temelja su dimenzije temeljne konstrukcije i uticaj podzemnih etaža. Prigušenje temelja je kombinovano sa

konvencionalnim inicijalnim prigušenjem konstrukcije, radi korekcije koeficijenta prigušenja celog sistema uključujući konstrukciju, temelje i tlo. Zapis ubrzanja tla kojim je temeljna konstrukcija izložena razlikuje se od zapisa na slobodnoj površini, usled statističkog osrednjavanja različitih zapisa ubrzanja tla. Ovi efekti pripadaju grupi efekata kinematičke interakcije (*kinematic effects*) i značajni su za objekte sa relativno kratkim periodima vibracija ($<0.5s$), velikih dimenzija u osnovi i sa postojanjem podzemnih etaža dubine veće od $3m$. Indeks spektra odgovora (*ratio of response spectra*) RRS koristi se za predstavljanje efekata kinematičke interakcije, preko odnosa ordinate spektra odgovora na nivou temelja (*foundation input motion*) i ordinate spektra ubrzanja slobodne površine tla.

U određivanju indeksa RRS učestvuju efekat prisustva temeljne ploče i uticaj podzemnih etaža. Uvođenje prisustva temeljne ploče se koristi kod modela konstrukcija gde se eksplicitno ne modelira temeljna konstrukcija. Efekat implicitnog uvođenja temeljne ploče se može izostaviti kod objekata bez poprečno povezane temeljne konstrukcije i sa fleksibilnom spratnom i krovnom pločom. Drugi efekat treba uzimati u analizi svih konstrukcija kod kojih postoje podzemne etaže, a značajan je pri dubinama većim od $3m$. Efekti kinematičke interakcije se mogu efikasno obuhvatiti procedurom koja je definisana u [4]:

- odrediti efektivnu veličinu temelja $b_e = \sqrt{ab}$, gde su a i b dimenzije temelja u osnovi,
- odrediti RRS kao funkciju perioda vibracija T , gde je:

$$RRS_{bsa} = 1 - \frac{1}{14.1} \left(\frac{b_e}{T} \right)^{1.2} \quad \text{za } T \geq 0.2s, \quad (1)$$

- ukoliko je e dubina do koje postoje podzemne etaže, potrebno je proračunati dodatne uticaje za RRS postojanjem podzemnih etaža, a koji su funkcija perioda vibracija T , gde je:

$$RRS_e = \cos \left(\frac{2\pi e}{Tn v_s} \right) \quad \text{za } T \geq 0.2s, \text{ pri čemu je:} \quad (2)$$

e dubina do koje postoje podzemne etaže,
 v_s brzina smičućeg talasa za lokalne uslove tla, uzeto kao osrednjena vrednost brzine na dubini e ,
 n faktor redukcije smičućih talasa za očekivano maksimalno ubrzanje tla (*peak ground acceleration*) PGA : $PGA=0.1g$: $n=0.9$, $PGA=0.15g$: $n=0.8$, $PGA=0.2g$: $n=0.7$ i $PGA=0.3g$: $n=0.65$.

- multiplicirati RRS_{bsa} i RRS_e da bi se dobila konačna vrednost RRS za zahtevani period vibracija. Spektralna ordinata zapisa ubrzanja je proizvod spektra zapisa na slobodnoj površini i RRS .

- da bi se dobio kompletan spektar zapisa za temeljnu konstrukciju potrebno je prethodne korake iterirati za različite periode vibracija.

Za meke gline (klasa E) potrebno je eliminisati efekat kinematičke interakcije, dok je efekat postojanja podzemnih etaža potrebno eliminisati u slučaju fundiranja na čvrstim stenama (klasa A i B). Vrednosti brzina smičućih talasa su u funkciji klasa tla prema *FEMA 273* [2]: A : $v_s > 1524m/s^2$, B : $762 < v_s < 1524$, C : $366 < v_s < 762$, D : $183 < v_s < 366$, E : $v_s < 183m/s^2$. Efekti prigušenja temelja se predstavljaju preko modifikovanog koeficijenta prigušenja sistema. U inicijalnom koeficijentu prigušenja konstrukcije β_i se ne uzima u obzir prigušenje temelja β_f , a generalno β_i se uzima kao 5%-tno. Konačna vrednost koeficijenta prigušenja sistema je β_0 kojim se uzima u obzir SSI interakcija, tako da promena iz β_i u β_0 utiče na korekciju elastičnog spektra odgovora. Određivanje koeficijenta prigušenja temelja se sprovodi prema:

- odredi se period vibracija konstrukcije podrazumevajući da je temeljna konstrukcija nepomična T_{fix} , a zatim se uzima u obzir fleksibilnost u određivanju perioda vibracija T_{flex} , pri čemu se vrednosti komponentata krutosti određuju prema *FEMA 356* [5] i *ATC-40* [6],
- koeficijent prigušenja temelja se određuje iz:

$$\beta_f = a_1 \left(\frac{T_{flex,eff}}{T_{fix,eff}} - 1 \right) + a_2 \left(\frac{T_{flex,eff}}{T_{fix,eff}} - 1 \right)^2, \quad (3)$$

- dok se koeficijent prigušenja sistema β_0 kojim se uzima u obzir *SSI* interakcija određuje iz:

$$\beta_0 = \beta_f + \frac{\beta_i}{\left(\frac{T_{flex,eff}}{T_{fix,eff}} \right)^3}. \quad (4)$$

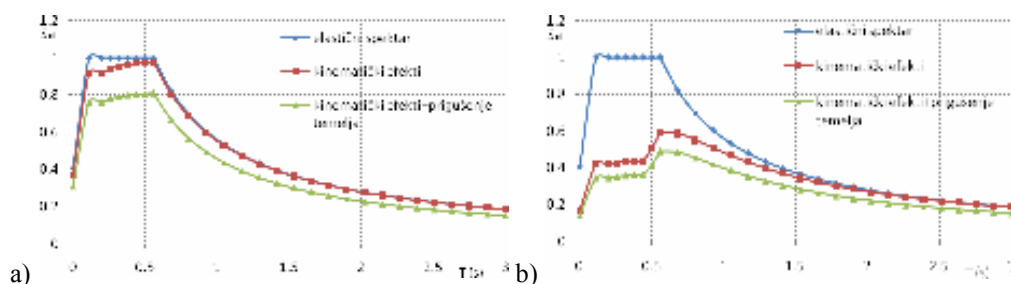
3 ANVELOPA CILJNIH POMERANJA. PARAMETARSKA ANALIZA

Za procenu efekata *SSI* interakcije primenjena je parametarska analiza za 4 i 8-spratne 4-brodne regularne i neregularne (sa eliminacijom dva stuba u prizemlju) okvirne sisteme. Za analizu okvira u uslovima seizmičkog dejstva koriste se gredni linijski konačni elementi, dok su nelinearni efekti uključeni primenom geometrijske i materijalne nelinearnosti. Prvo su izvršene *NSPA* analize *MDOF* sistema, a zatim su primenom *DMM* metode određena ciljna pomeranja. Na osnovu sprovedene *NSPA* analize razvijene su krive kapaciteta (*pushover krive*), koje su reprezentativne ukupne horizontalne smičuće sile za odgovarajuća pomeranja najvišeg čvora konstrukcije. Koncept *SSI* interakcije je inkorporiran u analizi ciljnog pomeranja.

Spektri ubrzanja (slika 2.) u analizi sistema uvedeni su prema *FEMA 273* [2] sa normalizovanim ordinatama na vrednost 1. U odnosu na ove spektre generisani su spektri ubrzanja sa kinematičkim efektima i prigušenjem temelja. Uticaj koeficijenta e kojim se uvodi postojanje podzemnih etaža, može se sagledati upoređenjem dijagrama (slika 2.a i 2.b), za različite vrednosti $e_1=0$ i $e_2=9m$ pri konstantama: tlo C : $v_s=564m/s^2$, $PGA=0.3g$, $n=0.65$, $\beta_0=0.1$. Redukcija vrednosti u oblasti konstantnih brzina iznosi i do 50%.

Na osnovu primenjenih spektara odgovora, razvijenih *pushover* kriva i kriva zahteva (*demand curves*) određeni su nivoi ciljnih pomeranja. Povezivanjem ovako izdvojenih diskretnih vrednosti nivoa ciljnih pomeranja konstruisana je zbirna kriva-anvelopa ciljnih pomeranja (*TDE-target displacements envelope*) [7]. *TDE* anvelopa predstavlja moguća stanja globalnih *drift*-ova jednog višespratnog okvira u funkciji tipa tla i različitih nivoa prigušenja β_0 . Parametar globalni *drift* predstavlja odnos horizontalnog ciljnog pomeranja najvišeg čvora okvira i visine objekta (u procentima). Uzimajući u obzir *SSI* interakciju razmatrane su promene parametara: $\beta_0 \in (5, 10, 15, 20, 25, 30)\%$, tipovi tla $C(A, B, C, D, E)$ prema *FEMA 273* [2] za $e=3m$, $PGA=0.3g$, $n=0.65$. Ukupan broj sprovedenih analiza je 324.

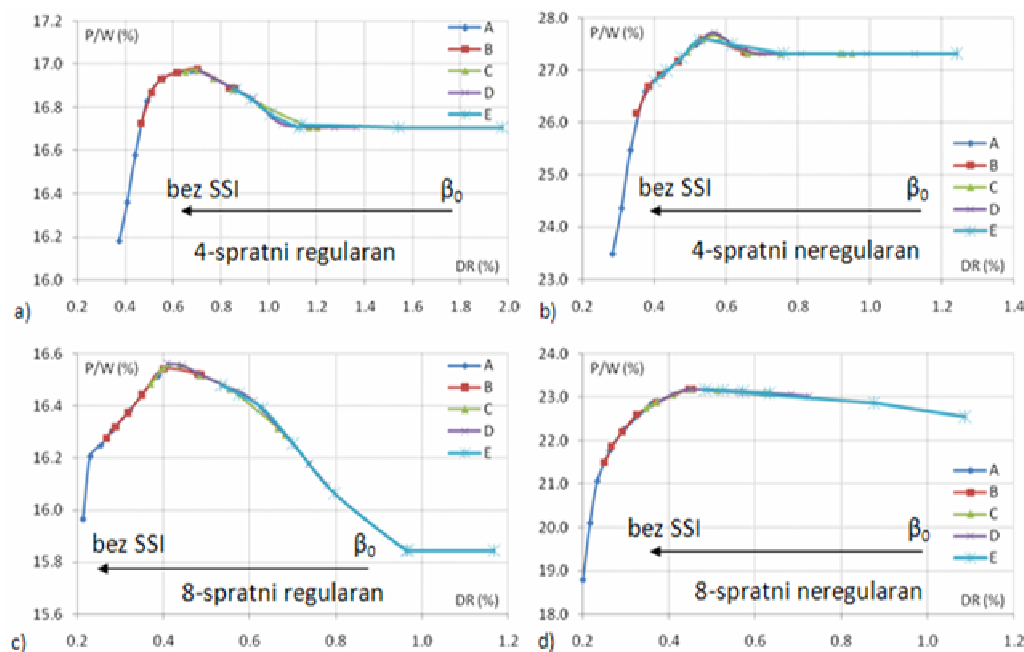
Na slici 3. su prikazane konstruisane anvelope ciljnih pomeranja za višespratne okvire u funkciji tipova tla i prigušenja β_0 .



Slika 2 - Dijagrami elastičnog spektra, spektra korigovanog kinematičkim efektima i spektra korigovanog kinematičkim efektima i prigušenjem temelja za tlo C: $v_s=564\text{m/s}^2$, $\text{PGA}=0.3\text{g}$, $n=0.65$, $\beta_0=0.1$: a) $e=0$, b) $e=9\text{m}$

Figure 2 - Elastic response spectrum, kinematics effects response spectrum, and kinematics and damping effects response spectrum of the foundations for soil C: $v_s=600\text{m/s}^2$, $\text{PGA}=0.3\text{g}$, $n=0.65$, $\beta_0=0.1$: a) $e=0$, b) $e=9\text{m}$

Preliminarne analize okvirnih sistema su sprovedene prema domaćim propisima i dimenzionisanje je izvršeno prema BAB'87 pravilniku, dok su NSPA sprovedene prema FEMA propisima. U obimnoj naučno-istraživačkoj studiji [8] za regularne okvire je konstatovano da razvijaju povoljan mehanizam loma sistema, dok kod neregularnih okvira to nije slučaj.

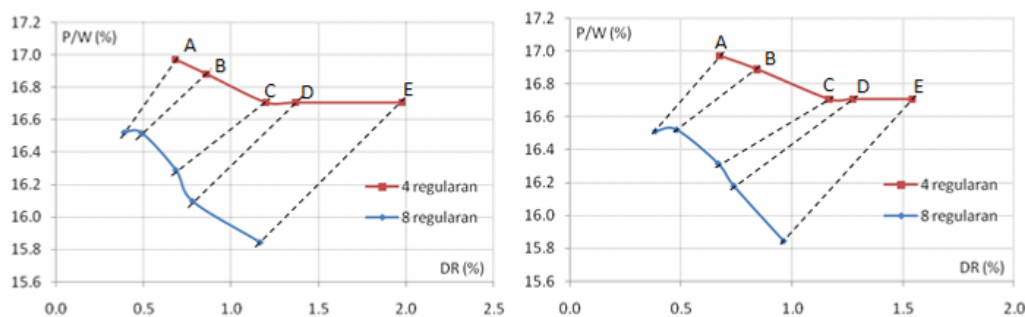


Slika 3 - Anvelope ciljnih pomeranja za višespratne okvire ($\text{PGA}=0.3\text{g}$, $n=0.65$, $e=3\text{m}$)
 Figure 3 - Target displacements envelope of multi-storey frames ($\text{PGA}=0.3\text{g}$, $n=0.65$, $e=3\text{m}$)

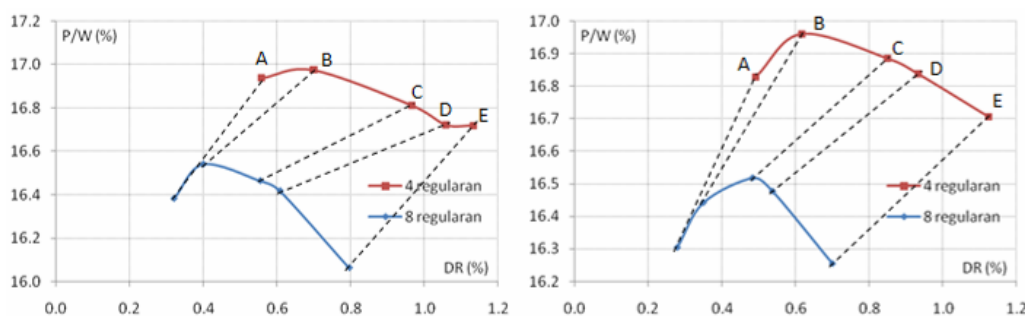
Kod neregularnih okvira se pojavljuje nepovoljan mehanizam loma kod stubova u novou prizemlja, tako da je ne uzimajući obzir *SSI* interakciju dobijena veća vrednost ukupne smičuće sile u osnovi. Ova konstatacija o nepovoljnosti mehanizma loma sistema kod neregularnih okvira takođe je izražena kada se uzima u obzir *SSI* interakcija.

Minimalne vrednosti globalnih *drift*-ova su u granicama 0.2-0.4% i odnose se na tip tla *A*, dok se maksimalne vrednosti znatnije razlikuju, a odnose se na tip tla *E*. Ovakvo veliki dijapazon vrednost ukazuje na razlike u ponašanju konstrukcije fundirane na različitim tipovima tla, nezavisno od tipa konstruktivnog sistema. Kod regularnih okvira za tip tla kod kojih je brzina smičućeg talasa niža, dobijaju se niže vrednosti ukupne smičuće sile u osnovi objekta. U slučaju neregularnih okvira ovakva promena je znatno blaža. Posebno je značajan efekat povećanja globalnog *drift*-a ukoliko se primeni tip tla *E* kod koga se smičući talas prostire nižom brzinom, u odnosu na ostale tipove tla.

Pošto je anvelope ciljnih pomeranja konstruisana za različite tipove tla i različite nivoe prigušenja β_0 to se u određenim situacijama preklapaju vrednosti. Kao primer, navodi se preklapanje vrednosti za tip tla *A* pri $\beta_0=15\%$ i tip tla *B* pri $\beta_0=25\%$ za 4-spratni regularni okvir. Zbog ovakve nemogućnosti vizuelnog sagledavanja diskretnih vrednosti, konstruisane su posebno anvelope ciljnih pomeranja za tipove okvira i nivoe prigušenja β_0 (slike 4-11.). Ovi dijagrami su prikazani u funkciji promene tipova tla za 4 i 8-spratne okvire.

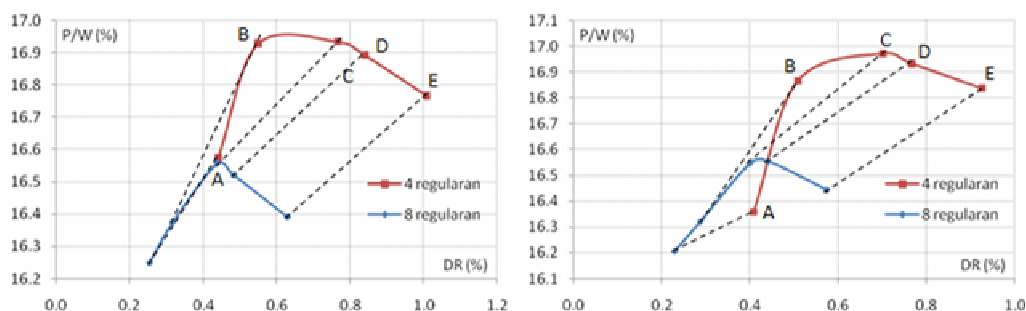


Slika 4 - Anvelope ciljnih pomeranja za regularne okvire: a) bez *SSI*, b) $\beta_0=5\%$
 Figure 4 - Target displacements envelope for regular frames: a) no *SSI*, b) $\beta_0=5\%$

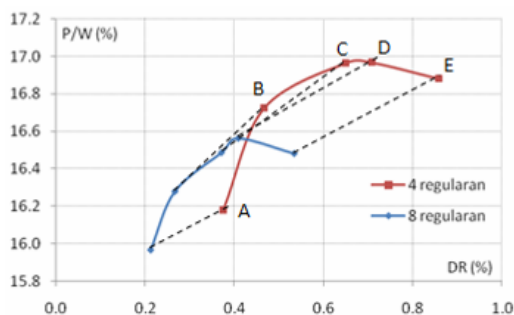


Slika 5 - Anvelope ciljnih pomeranja za regularne okvire: a) $\beta_0=10\%$, b) $\beta_0=15\%$
 Figure 5 - Target displacements envelope for regular frames: a) $\beta_0=10\%$, b) $\beta_0=15\%$

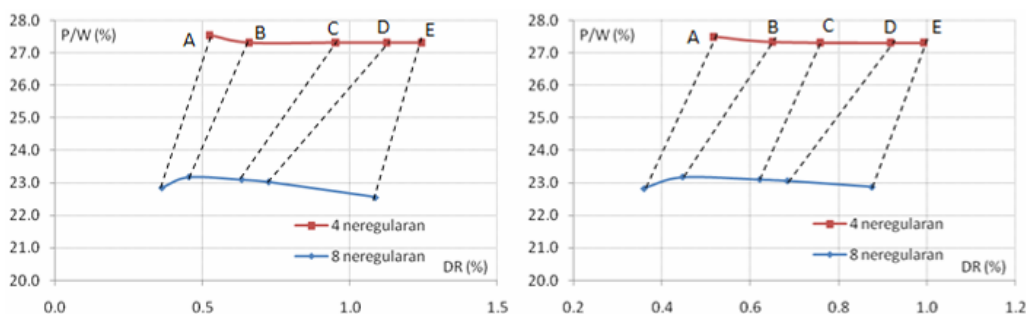
Na dijagramima su povezane vrednosti (isprekidano) za isti tip tla, a različitu spratnost kako bi se mogli sagledati i nivoi *drift*-ova okvira sa manje od 8 i više od 4 sprata. Kod regularnih okvira promenu tipa tla od A do E prati povećanje *drift*-ova, dok kod neregularnih okvira ovakva zakonitost nije uvek izražena. Ovo je posebno izraženo kod neregularnih 8-spratnih okvira za tip tla E i pri $\beta_0=15\div 25\%$, a što je posledica odgovora sistema pri razvoju nelinearnih deformacija.



Slika 6 - Anvelope ciljnih pomeranja za regularne okvire: a) $\beta_0=20\%$, b) $\beta_0=25\%$
Figure 6 - Target displacements envelope for regular frames: a) $\beta_0=20\%$, b) $\beta_0=25\%$

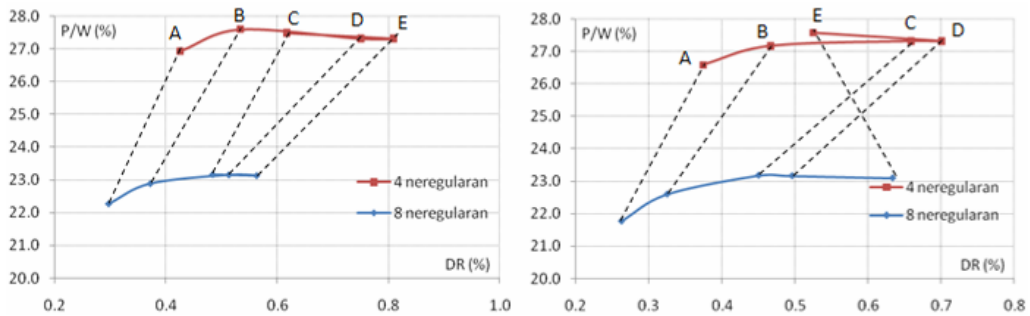


Slika 7 - Anvelope ciljnih pomeranja za regularne okvire $\beta_0=30\%$
Figure 7 - Target displacements envelope for regular frames $\beta_0=30\%$

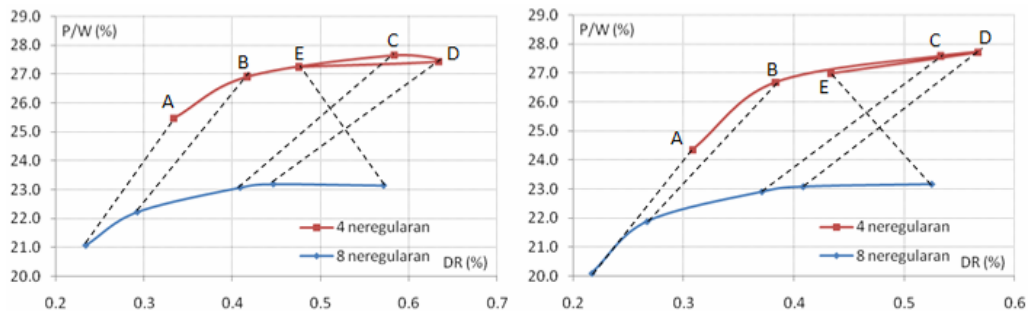


Slika 8 - Anvelope ciljnih pomeranja za neregularne okvire: a) bez SSI, b) za $\beta_0=5\%$
Figure 8 - Target displacements envelope for non-regular frames: a) no SSI, b) $\beta_0=5\%$

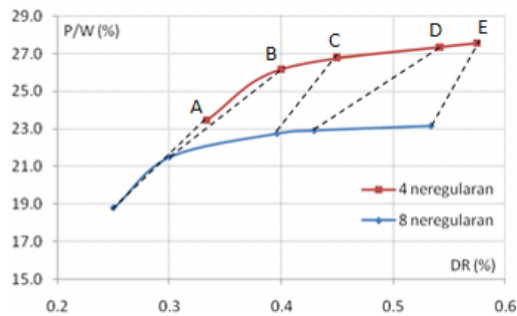
Promena ukupne smičuće sile je znatno manja od promene pomeranja, odnosno *drift*-ova, jer je u nelinearnom domenu sistem znatno manje krutosti. U određenim situacijama krutost u nelinearnom domenu je jednaka nula, tako da mali priraštaj opterećenja može proizvesti znatno veće deformacije.



Slika 9 - Anvelope ciljnih pomeranja za neregularne okvire: a) $\beta_0=10\%$, b) $\beta_0=15\%$
 Figure 9 - Target displacements envelope for non-regular frames: a) $\beta_0=10\%$, b) $\beta_0=15\%$



Slika 10 - Anvelope ciljnih pomeranja za neregularne okvire: a) $\beta_0=20\%$, b) $\beta_0=25\%$
 Figure 10 - Target displacements envelope for non-regular frames: a) $\beta_0=20\%$, b) $\beta_0=25\%$



Slika 11 - Anvelope ciljnih pomeranja za neregularne okvire $\beta_0=30\%$
 Figure 11 - Target displacements envelope for non-regular frames $\beta_0=30\%$

4 ZAKLJUČAK

Istraživanjem je utvrđeno da se uvođenjem *SSI* interakcije može znatno uticati na povećanje globalnog *drift*-a, a delimično na korekciju merodavne vrednosti ukupne smičuće sile u osnovi objekta. Osetljivost promene merodavne ukupne smičuće sile je znatno manja od promene pomeranja, jer je u nelinearnom domenu sistem znatno manje krutosti, čak je u određenim situacijama krutost jednaka nula, tako da mali priraštaj opterećenja može proizvesti znatno veće deformacije.

Pri većim vrednostima koeficijenta e zakon promene globalnih *drift*-ova u funkciji tipova tla nije jednoznačan. U slučaju redukcije prigušenja znatno se povećavaju vrednosti globalnih *drift*-ova. Uzimajući u obzir i kinematičke efekte i prigušenje temelja pri različitim nivoima prigušenja, postoje znatne razlike u ponašanju konstrukcije fundirane na različitim tipovima tla, nezavisno od tipa konstruktivnog sistema, pri čemu se vrednosti globalnih *drift*-ova kreću u granicama 0.2÷2%.

LITERATURA

- [1] FEMA 440, *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*, Applied Technology Council (ATC-55 Project), Federal Emergency Management Agency, Washington D. C., 2005, 392p.
- [2] FEMA 273, *NEHPR Guidelines for the Seismic Rehabilitation of the Buildings*, Building Seismic Safety Council, Applied Technology Council, Federal Emergency Management Agency, Washington D. C., 1997, 398p.
- [3] Folić B.: *Značaj analize interakcije tla i konstrukcije pod dinamičkim dejstvima*, Zemljotresno inženjerstvo i inženjerska seizmologija, Prvo naučno-stručno savetovanje, Soko Banja, 2008, str. 85-94.
- [4] Kim S., Stewart J.P.: *Kinematic Soil-Structure Interaction from Strong Motion Recordings*, J.Geotech. & Geoenv. Engrg., Vol. 129, No. 4, American Society of Civil Engineers, 2003, pp. 323-335.
- [5] FEMA 356, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, American Society of Civil Engineers, Federal Emergency Management Agency, Washington D. C., 2000, 518p.
- [6] ATC-40, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Volumes 1. and 2., Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996, 346p.
- [7] Ćosić M.: *Analiza interakcije konstrukcija-tlo nelinearnom statičkom seizmičkom metodom*, Geotehnički aspekti građevinarstva, III naučno-stručno savetovanje, Zlatibor, Srbija, 2009, str. 137-142.
- [8] Ćosić M.: *Nelinearna statička seizmička analiza višespratnih okvira*, Magistarska teza, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad, 2010, 230str.