

Mladen Ćosić<sup>1</sup>

## ANALIZA CILJNOG POMERANJA 3D MODELA OBJEKTA I TLA ZA USLOVE SEIZMIČKOG DEJSTVA

### Rezime

Istraživanje prikazano u ovom radu tretira problematiku interakcije objekat-temeljna konstrukcija-3D model tla primenom nelinearne statičke seizmičke analize. *Pushover* krive su razvijene uzimajući u obzir da lateralno seizmičko opterećenje deluje pod različitim uglovima, u odnosu na objekat koji je asimetričan u osnovi. Nivo ciljnog pomeranja je utvrđen metodom modifikacije pomeranja prema FEMA 440, a dodatno je korigovan na osnovu ovako definisanog numeričkog modela.

### Ključne reči

*pushover* analiza, interakcija konstrukcija-tlo, metoda modifikacije pomeranja.

## TARGET DISPLACEMENT ANALYSIS OF 3D MODEL OF BUILDING AND SOIL FOR SEISMIC EFFECTS

### Abstract

The research presented in this paper treats the problem of interaction between building-foundation structure-3D model of soil using nonlinear static seismic analysis. Pushover curves have been developed taking into account that lateral seismic load acting at different angles, relative to the object that is asymmetrical at the base. The level of target displacement is determined by the Displacement Modification Method toward FEMA 440, and further adjusted on the basis of defined numerical model.

### Key words

pushover analysis, soil-structure interaction, Displacement Modification Method

<sup>1</sup> Mr, dipl.inž.građ., mladen165@inffo.net

## 1. UVOD

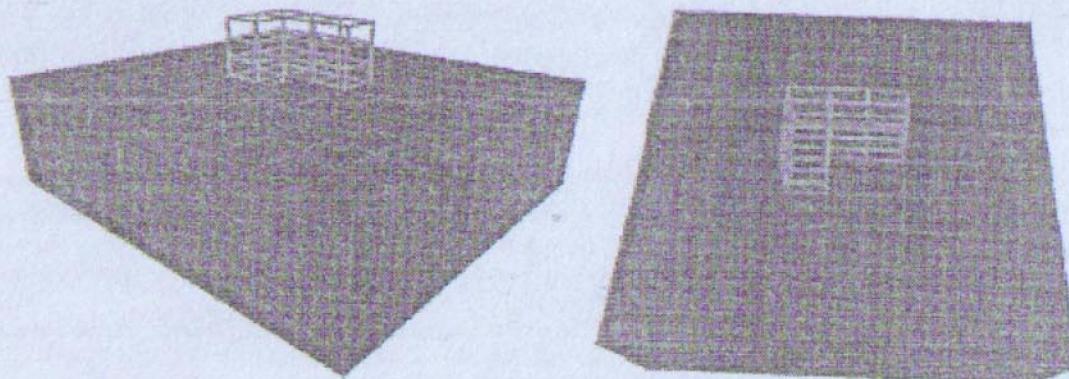
U poslednje dve decenije formulisana je i u toku su istraživanja na poboljšanju nove metode za analizu objekata u uslovima seizmičkog dejstva, a koja se zasniva na nelinearnom odgovoru sistema za uticaje statičkih seizmičkih sila (NSPA- *Nonlinear Static Pushover Analysis*). Brojna istraživanja su sprovedena u cilju poboljšanja NSPA analize uzimajući u obzir da se najpouzdanija rešenja dobijaju primenom nelinearne dinamičke analize (NDA- *Nonlinear Dynamic Analysis*). Realno ponašanje objekta u uslovima seizmičkog dejstva zahteva modeliranje fleksibilnosti temeljne konstrukcije i tla kako na nivou matematičkog modela tako i na nivou kreiranja realističnog geometrijskog modela. Analiza objekta koji bi bio definisan prema prethodno postavljenim uslovima i primenom NDA analize još uvek nije u domenu prakse, već se ovakva razmatranja vrše samo u naučne svrhe. Efikasno sprovođenje NDA analiza na kompleksnim 3D modelima jedino je moguće tehnikom paralelnog procesiranja gde su kompjuterski procesori povezani u klastere [1]. Alternativa za NDA analize je primena NSPA analiza modelirajući objekat u interakciji sa temeljnom konstrukcijom i tлом, a uz znatno kraće vreme proračuna i dovoljno kvalitetan nivo dobijenih rezultata.

## 2. NUMERIČKI SFSI MODEL

Klasični matematički modeli za proračun konstrukcija ili ne uzimaju u obzir interakciju konstrukcije objekta sa temeljnom konstrukcijom i tлом, ili ovu interakciju uvode indirektno uz veliku aproksimaciju. Problematika interakcije konstrukcija-tlo (SSI- *Soil Structure Interaction*) 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 objekat-temelj-tlo za SSI interakciju. Uvođenje uticaja SSI interakcije u proračun NSPA analizama moguće je na više različitih nivoa prema FEMA 440 [2]: uvođenje fleksibilnosti temeljna konstrukcija-tlo (FFE- *Flexible Foundation Effects*), filtriranje zapisa kretanja tla u prenošenju do konstrukcije (KIE- *Kinematic Interaction Effects*) i disipacija energije iz sistema konstrukcija-tlo radijacijom i histerezisnim prigušenjem tla (FDE- *Foundation Damping Effects*). Uzimajući u obzir da se u formulaciji problema SSI interakcije u ovom istraživanju razmatra temeljna konstrukcija kao podsistem i prelazna zona na kontaktu temeljna konstrukcija-tlo, to će se u daljoj formulaciji koristiti terminologija objekat-temeljna konstrukcija-tlo (SFSI- *Soil Foundation Structure Interaction*) [3].

U ovom istraživanju sistem je modeliran sa fleksibilnom temeljnom konstrukcijom i 3D modelom tla (FBM- *Flexible Base Model*), za razliku od klasičnih proračunskih modela sa nepomičnom osnovom (RBM- *Rigid Base Model*). Prostorni model višespratnog okvira se formira primenom grednih linijskih konačnih elemenata, pri čemu se na krajevima štapova postavljaju plastični zglobovi. Geometrijski nelinearni efekti se uvode preko P- $\Delta$  efekata i inkrementalnog određivanja pomeranja, dok se razvoj materijalne nelinearnosti uvodi primenom nelinearne veze sila-deformacija u plastičnim zglobovima [4]. Okvirni sistem je asimetričan u osnovi sa tri sprata i jednom podrumskom etažom. Temeljna konstrukcija se formira kao temeljni nosač modeliran linijskim konačnim elementima, dok se tlo modelira primenom trodimenzionalnih (*solid*) konačnih elemenata. Za uspostavljanje kontinuiteta veze u interakciji temeljna konstrukcija-tlo primenjuje se diskretan model kontaktnog elementa (*gap element*) kojim se vrši povezivanje čvorova konačnih elemenata i čime se

uzimaju u obzir samo naponi pritiska u prelaznoj zoni [5]. Konstitutivni model ponašanja tla je homogeni elastičan izotropan poluprostor (HEIS- *Homogeneous Isotropic Elastic Semi-Space*), a čije su dimenzije određene iz uslova ravnomerne raspodele napona u tlu i propagacije seizmičkih talasa (slika 1.).



Slika 1. 3D SFSI numerički model

### 3. NSPA ANALIZE. NUMERIČKI TESTOVI

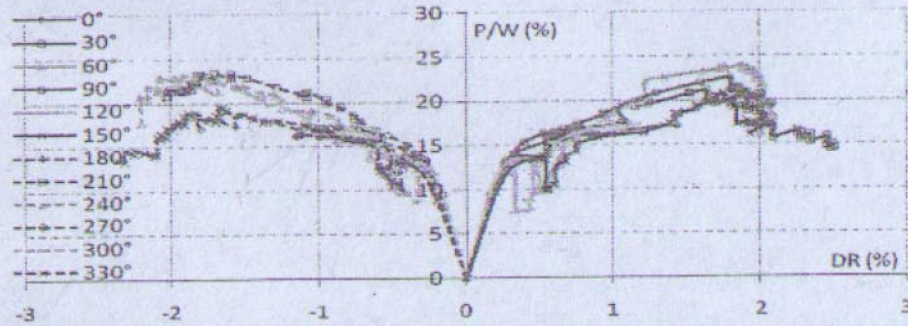
NSPA analiza izvršava se primenom inkrementalno-iterativnog koncepta, pri čemu se celokupno lateralno seizmičko opterećenje zamenjuje inkrementima manjeg intenziteta [6]. Dakle, celokupan sistem se zamenjuje inkrementalnim konfiguracijama u kojim se jednačine problema rešavaju za inkrementalno opterećenje, a formulisanje uslova ravnoteže odvija primenom korigovane *Lagrange*-ove formulacije. Lateralno seizmičko opterećenje je uvedeno kao multimodalno uzimajući u obzir uticaj viših svojstvenih oblika i faktora participacije [7]. Ovakav tip generisanog lateralnog opterećenja daje nešto veće vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta i iste se približavaju silama dobijenim za odgovor konstrukcije prema ravnomernoj raspodeli.

Generalna procedura za određivanje nivoa ciljnog pomeranja zasnovana je na konceptu metode koeficijenata (DCM- *Displacement Coefficient Method*) prema FEMA 356, a koja je modifikovana i predstavljena kao metoda modifikacije pomeranja (DMM- *Displacement Modification Method*) u FEMA 440 [2]. Nivo ciljnog pomeranja (TD- *Target Displacement*) po DMM metodi se određuje prema:

$$\delta_{i,SFSI} = C_0 C_1 C_2 R_{max} S_e \frac{T_{e,SFSI}^2}{4\pi^2} g, \quad (1)$$

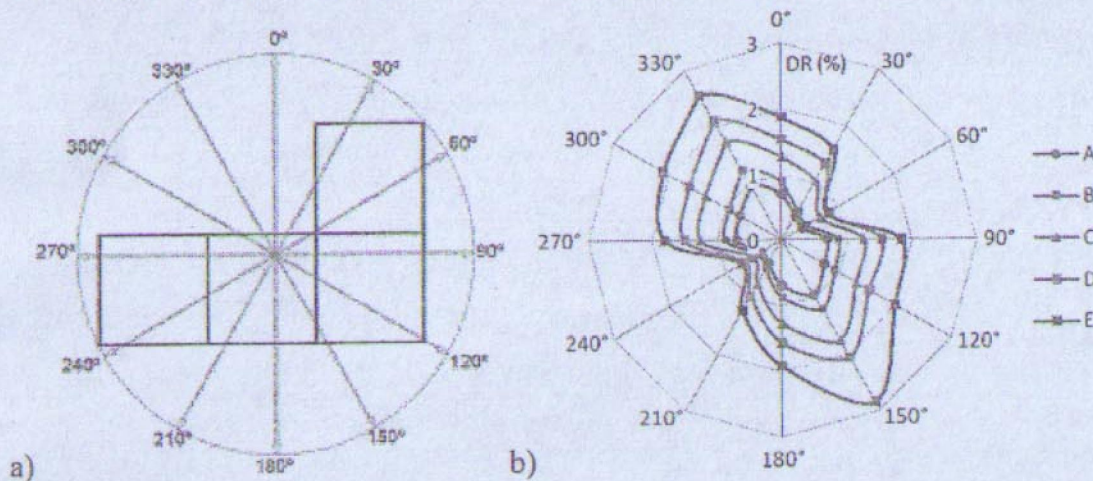
gde je  $C_0$  koeficijent kojim se uspostavlja veza spektralnog pomeranja ekvivalentnog SDOF sistema sa pomeranjem najvišeg čvora MDOF sistema objekta,  $C_1$  koeficijent kojim se uspostavlja veza očekivanog maksimalnog nelinearno pomeranje sa pomeranjem linearno elastičnog odgovora,  $C_2$  koeficijent koji predstavlja efekat uštinuća histerezisne petlje, degradaciju krutosti i deterioraciju nosivosti pri maksimalnom odgovoru pomeranja,  $R_{max}$  koeficijent redukcije projektne seizmičke sile kojim se sprečava dinamička nestabilnost sistema,  $T_{e,SFSI}$  efektivan period vibracija sistema za razmatrani pravac dejstva seizmičkih sila. Određivanje perioda vibracija  $T_{i,SFSI}$  i inicijalne krutosti  $K_{i,SFSI}$  sistema sprovodi se na kompletnom SFSI modelu, a čije se proračunske vrednosti razlikuju u odnosu na RBM model sa  $T_{i,RBM}$  i  $K_{i,RBM}$ .

Pošto se razmatra trodimenzionalni model objekta koji je asimetričan u osnovi, to su NSPA analize izvršene uzimajući u obzir da lateralno seizmičko opterećenje deluje pod različitim uglovima u odnosu na osnovu objekta. *Pushover* krive su razvijane sukcesivno pri priraštaju ugla dejstva lateralnog seizmičkog opterećenja od 30°. Zbog alternativnog dejstva zemljotresa za svaki pravac su razmatrana dva suprotna smera (slika 2.).



Slika 2. Pushover krive generisane za različite uglove dejstva lateralnog seizmičkog opterećenja

Nakon sprovedene NSPA analize izvršene su TD analize prema DMM metodi za različite tipove tla prema FEMA 273 [8]. Ovako dobijene diskretne vrednosti su povezivane i predstavljaju anvelopu TD pomeranja (TDE- *Target Displacement Envelope*) za jedan tip tla i različite uglove dejstva lateralnih seizmičkih sila (slika 3.) [9].



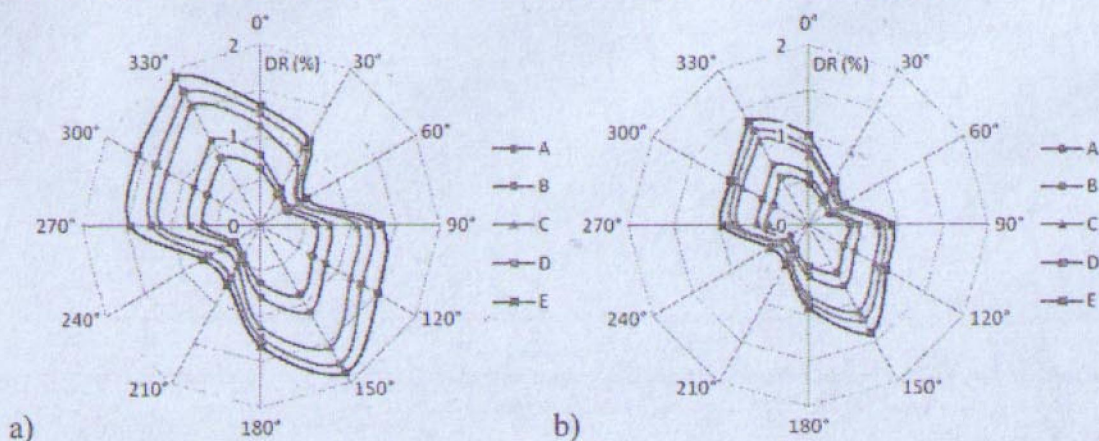
Slika 3. a) položaj razmatranih uglova dejstva lateralnog seizmičkog opterećenja u odnosu na geometriju osnove objekta, b) TDE za različite tipove tla bez SFSI interakcije

Uvođenje SFSI interakcije vrši se preko redukcije ordinate spektra odgovora koji se generiše za sistem koji je pobuđen kretanju slobodne površine tla (FFM- *Free Field Motion*) sa konvencionalnim prigušenjem i KIE i FDE efektima [2]. Vrednost koeficijenta prigušenja sistema  $\beta_0$  kojim se uzima u obzir SFSI interakcija sastoji se iz inicijalnog prigušenja  $\beta_i$  i prigušenja temeljne konstrukcije i tla  $\beta_f$  [10]:

$$\beta_0 = \beta_f + \frac{\beta_i}{\left(\frac{T_{e,SFSI}}{T_{e,RBM}}\right)^3}, \quad (2)$$

gde je  $T_{e,RBM}$  efektivna period vibracija RBM modela. Spektar odgovora je skaliran na

vrednost  $PGA=0.3g$  ( $PGA$ - *Peak Ground Acceleration*), dok je vrednost koeficijenta ukupnog prigušenja razmatrana za  $\beta_0=10\%$  i  $\beta_0=20\%$ . Na taj način je obuhvaćen i uticaj inicijalnog (viskozno) prigušenja od 5%, pri čemu je ukupan broj sprovedenih TD analiza 120 (slika 4.). Odgovor sistema je predstavljen preko globalnog drifta (DR).

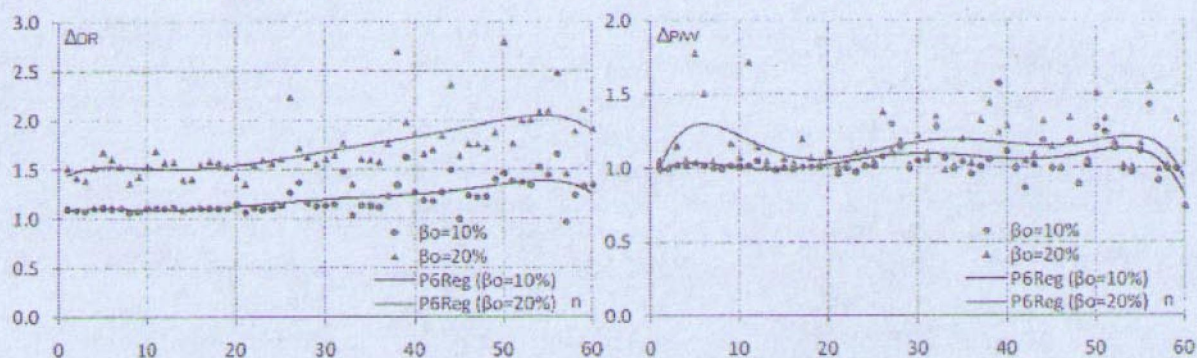


Slika 4. TDR za različite tipove tla za SFSI model ( $PGA=0.3g$ ): a)  $\beta_0=10\%$ , b)  $\beta_0=20\%$

Efekat SFSI interakcije u analizi odgovora sistema je razmatran uvođenjem koeficijenta odnosa TD pomeranja i ukupne smičuće sile u osnovi objekta  $(P/W)_i$ , RBM i SFSI modela:

$$\Delta_{DR} = \frac{\delta_{i,RBM}}{\delta_{i,SFSI}} \quad \Delta_{P/W} = \frac{(P/W)_{i,RBM}}{(P/W)_{i,SFSI}} \quad (3)$$

Koeficijenti  $\Delta_{DR}$  i  $\Delta_{P/W}$  su prvo određeni tako što su razmatranja vršena samo za promenu ukupnog prigušenja  $\beta_0=10\%$  i  $\beta_0=20\%$  za sve diskretne vrednosti TD analiza (slika 5.).

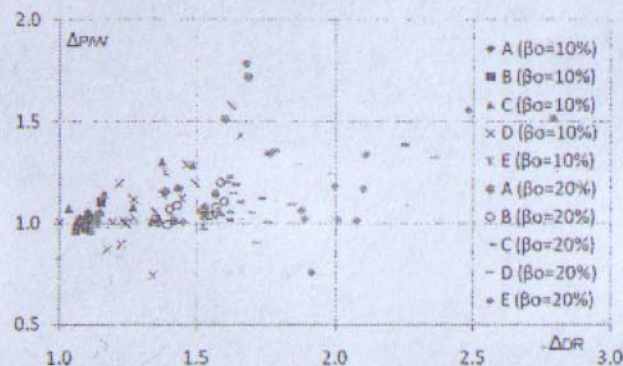


Slika 5. Diskretne vrednosti i regresione krive P6Reg za: a)  $\Delta_{DR}$ , b)  $\Delta_{P/W}$

Zatim su sprovedene regresione analize primenom polinoma 6-og stepena (P6Reg) i određene srednje vrednosti i standardne devijacije iz ovako dobijenih P6Reg kriva:

$$\begin{aligned} \Delta_{DR,m} = 1.21 \quad \delta_{\Delta_{DR}} = 0.16 \quad \Delta_{(P/W),m} = 1.05 \quad \delta_{\Delta_{P/W}} = 0.31 \quad \text{za } \beta_0 = 10\% \\ \Delta_{DR,m} = 1.72 \quad \delta_{\Delta_{DR}} = 0.13 \quad \Delta_{(P/W),m} = 1.16 \quad \delta_{\Delta_{P/W}} = 0.19 \quad \text{za } \beta_0 = 20\% \end{aligned} \quad (4)$$

Razmatranja su takode vršena i za koeficijente  $\Delta_{DR}$  i  $\Delta_{P/W}$  u funkciji tipa tla (slika 6.).



Slika 6. Diskretne vrednosti  $\Delta_{DR}$  i  $\Delta_{P,W}$  za različite tipove tla

#### 4. ZAKLJUČAK

Istrazivanjem u ovom radu se želi prikazati problematika kompleksnijeg modeliranja i analize konstrukcija, 3D modela tla i kontaktnih elemenata za procenu SFSI interakcije NSPA analizom. Istraživanjem je utvrđeno da se uvođenjem SFSI interakcije može znatnije redukovati vrednost globalnog drifta DR, u odnosu na redukciju ukupne smičuće sile u osnovi objekta P/W. Ovo je posledica toga što je krutost sistema u nelinearnom domenu je znatno niža nego u linearnom domenu, tako da mali priraštaj opterećenja može znatno povećati globalni DR. Uvođenje prigušenja koje potiče od KIE i FDE efekata preko ukupnog prigušenja  $\beta_0$  za analizu SFSI interakcije, predstavlja veoma praktičnu i dovoljno pouzdanu proceduru za primenu u svakodnevne inženjerske svrhe.

#### LITERATURA

- [1] Krishnan S. *Three-Dimensional Nonlinear Analysis of Tall Irregular Steel Buildings Subject to Strong Ground Motion*, Pasadena, California Institute of Technology, 2003, 503.
- [2] FEMA 440, *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. Washington D. C.: Federal Emergency Management Agency, 2005, 392.
- [3] Moghaddasi K., Cubrinovski M., Pampanin S., Carr A., Chase J. „Soil-Foundation-Structure Interaction Effects on Nonlinear Seismic Demand of Structures“, New Zealand Society Earthquake Engineering Conference, Wellington, 2010, 1-9.
- [4] Ladinović Đ., Čosić M.: „Pushover analiza višespratnih armiranobetonskih okvira“, Zemljotresno inženjerstvo i inženjerska seizmologija, Soko Banja, 2008, 113-120.
- [5] Čosić M.: „Model interakcije višespratni okvir-poluprostor tla za pushover analizu“, XXIV kongres DIMK, Divčibare, 2008, 187-192.
- [6] Ladinović Đ., Folić R., Čosić M.: „Comparative Analysis of Seismic Demands of Regular Multi-Story Concrete Frames“, Banja Luka Earthquake-40 years of Construction Experience, International Conference on Earthquake Engineering, Banja Luka, 2009, 129-143.
- [7] Barros R., Almeida R.: „Pushover Analysis of Asymmetric Three-Dimensional Frames“, Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 11., No. 1., 2005, 3-12.
- [8] FEMA 273, *NEHPR Guidelines for the Seismic Rehabilitation of the Buildings*. Washington D. C.: Federal Emergency Management Agency, 1997, 398.
- [9] Čosić M.: „Anvelopa ciljnih pomeranja okvirnih sistema u interakciji sa tlom za uslove seizmičkog dejstva“, TEIK 2010, Niš, 2010, D39-48.
- [10] Čosić M.: „Pushover Analysis of MDOF System with SSI Effects and According to FEMA 440“, III Symposium for Geotechnics, Ohrid, 2010, 1-8.