

POBOLJŠANJE ADAPTIVNE FBA *PUSHOVER* ANALIZE PRIMENOM NEELASTIČNOG SPEKTRA ODGOVORA U SPEKTRALNOJ AMPLIFIKACIJI SEIZMIČKIH SILA

Mladen Ćosić

Marka Milanovića 17, 15300 Loznica, mladen165@inffo.net

REZIME

Istraživanje prikazano u ovom radu uvodi dodatnu korekciju adaptivne FBA *pushover* analize koja se zasniva na proračunu prema silama. U odnosu na klasičnu adaptivnu FBA *pushover* analizu sa elastičnim spektrom odgovora za amplifikaciju seizmičkih sila, poboljšanje je sprovedeno primenom neelastičnog spektra odgovora. Ovakva korekcija je moguća obzirom da se za formulaciju jednačina ravnoteže primenjuje inkrementalno-iterativna koncepcija. Sa druge strane adaptivna analiza se sastoji iz niza konvencionalnih *pushover* analiza koje se sukcesivno izvršavaju, a korekcija lateralnih sila se sprovodi nakon završetka svake analize.

KLJUČNE REČI: neelastični spektar odgovora, adaptivna analiza, inkrementalno-iterativna procedura

IMPROVEMENT OF THE ADAPTIVE FBA *PUSHOVER* ANALYSIS USING INELASTIC RESPONSE SPECTRUM FOR SPECTRAL AMPLIFICATION OF SEISMIC FORCES

ABSTRACT

The research presented in this paper introduces an additional correction of adaptive FBA *pushover* analysis based on the calculation of the forces. In relation to the classical adaptive FBA *pushover* analysis with the elastic response spectrum for the amplification of seismic forces, the improvement was carried out using inelastic response spectrum. This correction is possible since the formulation of equilibrium equations applied incremental-iterative conception. On the other hand, adaptive analysis consists of a series of conventional *pushover* analysis that are successively executed, and the correction of lateral forces are carried out after each analysis.

KEY WORDS: inelastic response spectra, adaptive analysis, incremental-iterative procedure

UVOD

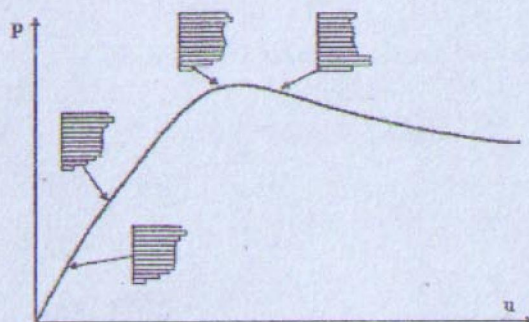
Analiza objekata za uslove seizmičkog dejstva u svakodnevnoj inženjerskoj praksi sprovodi se primenom ekvivalentne statičke analize (LSA-*linear static analysis*) ili primenom spektralno-modalne analize. U izuzetnim slučajevima primenjuje se dinamička analiza (LDA-*linear dynamic analysis*) kod koje se proračun sprovodi primenom numeričke integracije, a ubrzanje tla se određuje prema

merodavnom akcelorogramu zemljotresa za datu lokaciju objekta. Ukoliko se uzme u obzir razvoj i geometrijske i materijalne nelinearnosti (NDA-*nonlinear dynamic analysis*), tada se proračun 3D modela objekta znatno komplikuje i gotovo nije moguće sprovesti na personalnom računaru. U tu svrhu su razvijene nelinearne statičke analize (NSPA-*nonlinear static seismic analysis*) kojima je proračun moguće sprovesti znatno brže, a samo rešenje je na visokom stepenu tačnosti.

NSPA analiza može biti konvencionalna (NSPA-*nonlinear static conventional analysis*) sa konstantnom raspodelom lateralnog seizmičkog opterećenja, ili adaptivna (NSAPA-*nonlinear static adaptive pushover analysis*) sa korekcijom lateralnog seizmičkog opterećenja. U zavisnosti od toga kako se određuje lateralno seizmičko opterećenje NSAPA analize, generalno se može izvršiti podela na proračun prema silama (FBA-*force based analysis*) i prema pomeranju (DBA-*displacement based analysis*). Obimnim numeričkim istraživanjem (Papanikolaou i sar, 2005) utvrđeno je da se najbolja slaganja rezultata sa inkrementalnom dinamičkom analizom (INDA-*incremental nonlinear dynamic analysis*) dobijaju za NSAPA-DBA analizu, dok se dosta dobra slaganja postiže i sa NSAPA-FBA analizom.

KONCEPT ADAPTIVNE FBA PUSHOVER ANALIZE

Adaptivnom analizom se uzima u obzir korekcija lateralnog opterećenja, u skladu sa svojstvenim oblikom i faktorima participacije proračunatim iz analiza svojstvenih oblika, a za svaki korak adaptivne analize. Ovaj metod je potpuno multimodalan i uzima u obzir omekšanje sistema i modifikaciju inercijalnih sila, usled spektralne amplifikacije koja se uvodi preko spektra odgovora. Adaptivnom analizom se koriguje lateralni raspored opterećenja prema konstantnoj promeni modalnih parametara sistema (slika 1.) (Pinho i sar, 2005). U elastičnom domenu modalna raspodela lateralnih sila aproksimativno reprezentuje uticaj inercijalnih sila, dok se u neelastičnom domenu uticaj lateralnih sila aproksimira ravnomernom raspodelom po visini okvira.



Slika 1. Korekcija lateralnih sila u fazama inkrementalnog priraštaja
Figure 1. Correction of lateral forces in stages of incremental increase

Četiri osnovne faze proračuna prema adaptivnoj analizi su (Antoniou i sar, 2004):

- definisanje nominalnog vektora opterećenja (*nominal load vector*) P_0 i inercijalnih masa,
- proračun faktora opterećenja (*load factor*) λ ,
- proračun normalizovanog vektora skaliranja (*normalized scaling vector*) \bar{F} ;
- korekcija vektora apliciranih sila (*loading force*) P_1 .

Dok se prvi korak proračunava samo jednom na početku analize, preostale tri faze proračuna se izvršavaju za svako ravnotežno stanje nelinearne statičke analize. Primenom inkrementalne procedure kontrolom opterećenja povećava se vrednost vektora opterećenja, do dostizanja unapred definisanog nivoa ciljnog pomeranja (*target displacement*) ili gubitka numeričke stabilnosti sistema. Kontrola opterećenja odgovara slučaju kada je faktor opterećenja direktno kontrolisan algoritmom nelinearne statičke analize, kao što je slučaj kod proračuna prema silama (FBAP-*force based adaptive pushover*). Drugačije rečeno, FBAP analiza koristi faktor opterećenja za skaliranje apliciranog vektora sila do

dostizanja maksimalnog kapaciteta konstrukcije. Kod konvencionalne analize nominalni vektor opterećenja P_0 se definiše na početku analize i njegova vrednost je konstantana tokom proračuna, dok se kod adaptivne analize oblik vektora opterećenja konstantno koriguje za svaki korak analize zadržavajući konstantnu vrednost nominalnog vektora opterećenja. U ovom slučaju se varira faktor opterećenja λ od nula do jedan. Da bi se uzelo u obzir što realnije ponašanje konstrukcije u uslovima seizmičkog dejstva modeliraju se uticaji inercijalnih masa M konstrukcije, uzimajući u obzir i raspodeljene (*distributed mass*) i koncentrisane (*lumped mass*) mase sistema.

Vektor opterećenja P za bilo koji korak analize dobija se kao proizvod faktora opterećenja λ i nominalnog vektora opterećenja P_0 :

$$P = \lambda \cdot P_0 \quad (1)$$

Normalizovan vektor skaliranja \bar{F} se koristi za definisanje oblika raspodele vektora opterećenja po spratovima za svaki korak analize, a proračunava se na početku svakog inkrementa opterećenja. Pre toga se izvršava analiza svojstvenih vrednosti za koju se koristi korigovano stanje krutosti sistema. Primenom nekog od razvijenih algoritma dobijaju se svojstveni oblici i faktori participacije, posle čega se modalne spratne sile određuju prema:

$$F_{ij} = \Gamma_j \cdot \Phi_{ij} \cdot M_i \quad (2)$$

gde je:

- o i - sprat,
- o j - svojstveni oblik,
- o Γ_j - faktor participacije za j -ti svojstveni oblik,
- o Φ_{ij} - vrednost normalizovanog svojstvenog oblika za i -ti sprat i j -ti svojstveni oblik,
- o M_i - masa i -tog sprata.

Pošto se koristi spektralna amplifikacija za odgovarajući period vibracija j -tog svojstvenog oblika, izraz (2) sada glasi (Mwafy i sar, 2001):

$$F_{ij} = \Gamma_j \cdot \Phi_{ij} \cdot M_i \cdot S_{a,j} \quad (3)$$

gde je:

- o $S_{a,j}$ - ordinata (ubrzanje) spektra odgovora za j -ti svojstveno oblik.

Modalne spratne sile su multiplicirane sa S_a kako bi se uzeli u obzir efekti spektra odgovora na analizu ponašanja višespratnog okvira. Spektralne krive, kao što je poznato, konstruišu se na osnovu akcelorograma zapisa zemljotresa uzimajući u obzir uticaj 5%-tno prigušenje kao inicijalno. Ovako generisan spektar predstavlja elastičan sektor odgovora (*elastic response spectrum*).

Raspodela lateralnih horizontalnih sila svakog svojstvenog oblika se kombinuje primenom principa kvadratni koren sume kvadrata (*SRSS-square root of sum squares*):

$$F_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ij}^2} \quad (4)$$

ili primenom kompletne kvadratne kombinacije (*CQC-complete quadratic combination*):

$$F_j = \sqrt{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n (F_{ij} \cdot \rho_{jk} \cdot F_{ik})} \quad (5)$$

pri čemu se viskozno prigušenje uzima u obzir preko:

$$\rho_{jk} = \frac{8 \cdot \xi^2 \cdot (1+r) \cdot r^{1.5}}{(1-r^2)^2 + 4 \cdot \xi^2 \cdot r \cdot (1+r)^2}, \quad r = \frac{\omega_k}{\omega_j} \quad (6)$$

Pošto su samo relativne vrednosti spratnih sila F_i od interesa za definisanje normalizovanog vektora skaliranja \bar{F} koji definiše oblik, a ne veličinu opterećenja, sile dobijene jednačinama (4) ili (5) se normalizuju u odnosu na ukupnu vrednost prema:

$$\bar{F}_i = \frac{F_i}{\sum F_i} \quad (7)$$

Kada su određeni normalizovan vektor skaliranja, faktor opterećenja ili inkrement faktora opterećenja i ukoliko je poznata vrednost inicijalnog nominalnog vektora opterećenja, aplicirani vektor opterećenja za dati proračunski korak koriguje se primenom inkrementalne korekcije (*incremental updating*).

Totalnom korekcijom za t korak analize vektor opterećenja P_t se dobija potpunom substitucijom postojećeg izbalansiranog opterećenja (vektor opterećenja iz prethodnog koraka analize) novim vektorom opterećenja, a koji se proračunava kao proizvod između tekućeg faktora totalnog opterećenja λ_t , tekućeg normalizovanog modalnog vektora skaliranja \bar{F}_t i nominalnog vektora opterećenja P_0 :

$$P_t = \lambda_t \cdot \bar{F}_t \cdot P_0. \quad (8)$$

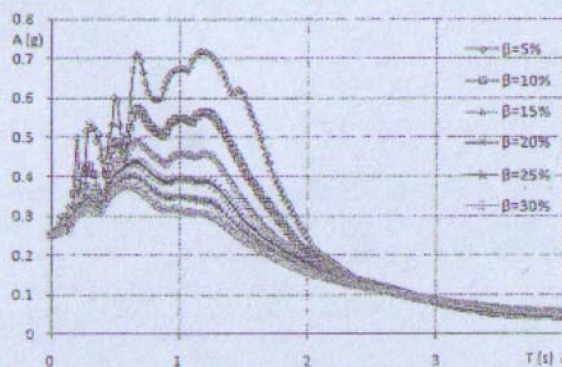
Inkrementalnom korekcijom za t korak analize se vektor opterećenja P_t dobija dodavanjem na vektor opterećenja prethodnog koraka P_{t-1} (postojeće izbalansirano opterećenje) novi inkrement vektora opterećenja, koji se proračunava kao proizvod tekućeg inkrementa faktora opterećenja $\Delta\lambda_t$, tekućeg modalnog vektora skaliranja \bar{F}_t i nominalnog vektora opterećenja P_0 :

$$P_t = P_{t-1} + \Delta\lambda_t \cdot \bar{F}_t \cdot P_0. \quad (9)$$

Uzimajući u obzir korekciju lateralnih sila primenom prethodno opisanog postupka gde se uvodi efekat spektralne amplifikacije na odziv sistema, razvijena *pushover* kriva se koriguje u odnosu na krivu dobijenu konvencionalnom analizom. Ovaj efekat korekcije se ogleda u povećanju ukupne smičuće sile u osnovi objekta u nelinearnom domenu, dok se kod sistema kod kojih postoji određena neregularnost delimično povećava, a delimično smanjuje ukupna smičuća sila u osnovi objekta.

KONCEPT POBOLJŠANJA ADAPTIVNE FBA *PUSHOVER* ANALIZE

U prethodnom poglavlju je prikazan postupak određivanja spratnih sila (3) gde je $S_{a,j}$ ordinata (ubrzanje) spektra odgovora za j -ti svojstveno oblik. Određivanje parametra ubrzanja kojim se amplifikuju seizmičke sile sprovodi se primenom elastičnog spektra odgovora, a u funkciji koeficijenta β koji predstavlja viskozno prigušenje (slika 2.).



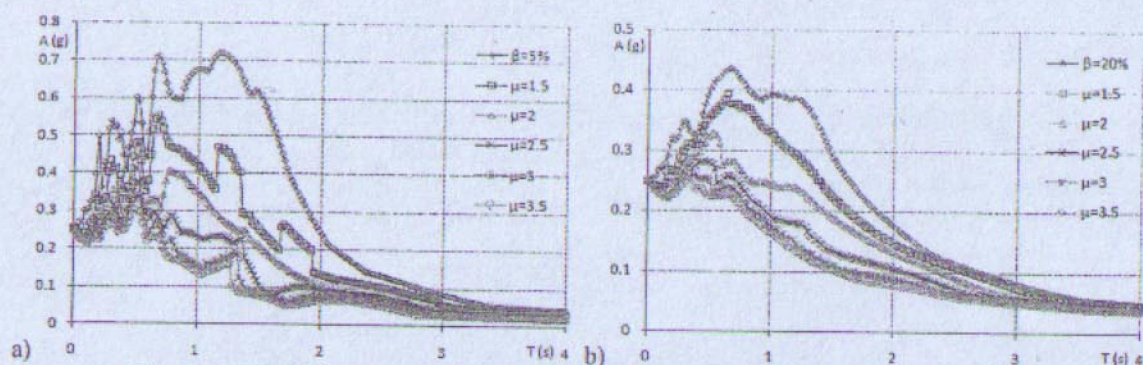
Slika 2. Elastični spektri odgovora za različite nivoe prigušenja
Figure 2. Elastic response spectrum for different level of damping

Kompletna procedura adaptivne analize sprovodi sukcesivnim izvršavanjem konvencionalnih *pushover* analiza, a koje su zasnovane na primeni inkrementalno-iterativnog koncepta (*Newton-Raphson*). Proračun zasnovan na participaciji viših svojstvenih oblika (multimodalna analiza) je prednost ovakve analize, dok je nedostatak određivanje ubrzanja primenom elastičnog spektra odgovora.

Na prethodnoj slici je prikazan spektar odgovora generisan iz akcelerograma zemljotresa Loma Prieta iz 1989.godine, zapis stanice Emeryville. U domenu perioda vibracija $T=0-2$ s promena parametra ubrzanja je značajna. Pri nelinearnom ponašanju sistema redukuje se krutost, a povećava period vibracija. Sad druge strane menja se i vrednost viskoznog prigušenja sistema, tako da je generalno

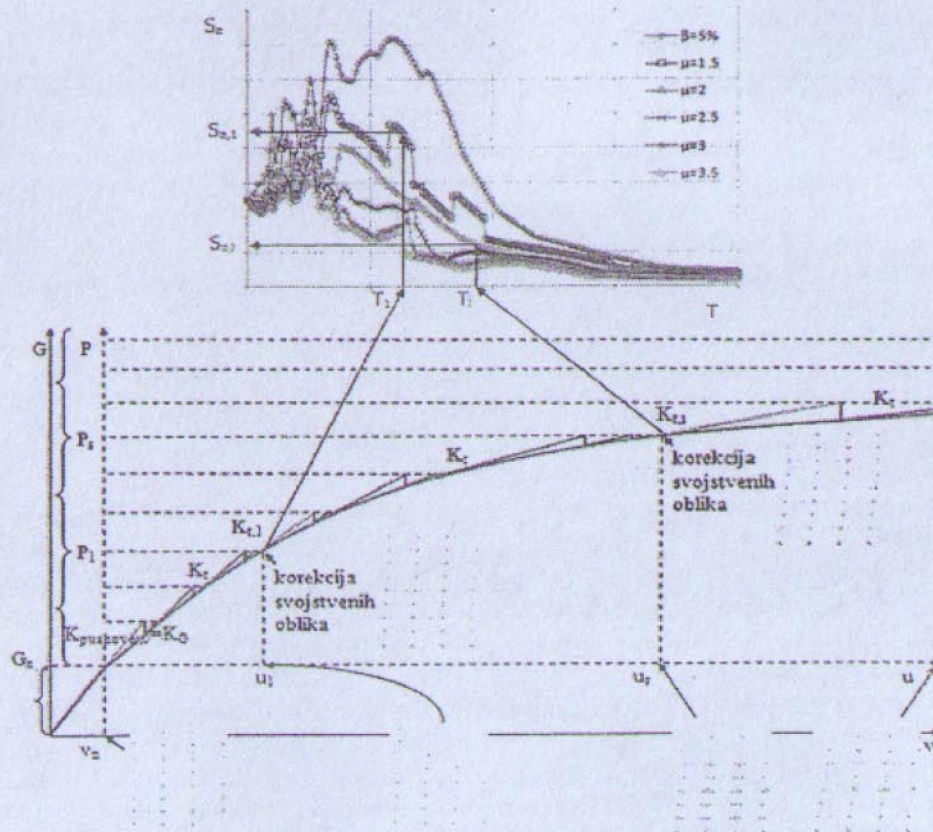
promena seizmičke sile značajna. Prigušenje sistema takođe se može predstaviti i primenom ekvivalentnog koeficijenta viskoznog prigušenja kojim se uvodi i histerezisno prigušenje. Ovakav postupak poznat je kao postupak za ekvivalentnim prigušenjem (*over-damped inelastic spectra*) u kome je sadržano i viskozno i histerezisno prigušenje za analizu sistema pri nelinearnom ponašanju. Ovakav model proračuna generalno se primenjuje kod DBA analiza, a posebno kod analiza gde se vrši direktan proračun bez iteracija (*DDBA-direct displacement based analysis*) (Priestley i sar, 2007). U procesu određivanja celokupnog prigušenja uzima se u obzir da je ponašanje sistema nelinearno sa disipacijom energije kroz histerezisno prigušenje. Period vibracija u ovoj analizi određuje se iz maksimalnog pomeranja sistema i predstavlja efektivan period vibracija. Dobijene visoke vrednosti ekvivalentnog viskoznog prigušenja posledica su odgovora sistema u izraženoj nelinearnoj oblasti sa znatnim uticajem histerezisnog prigušenja. Ukoliko je odgovor konstrukcije linearno-elastičan onda se primenjuje elastičan spektar odgovora, dok se za neelastičnu fazu rada koristi neelastičan spektar odgovora za trenutnu duktilnost.

Drugi postupak je da se neelastični spektar odgovora prikaže u funkciji konstantne duktilnosti (*constant-ductility inelastic spectra*) uzimajući u obzir da je koeficijent ojačanja u postelastičnoj oblasti (*post-yield kinematic hardening ratio*) 0 (slika 3.). Na taj način se uzima u obzir da je sistem savršeno elastoplastičan. Ovakva pretpostavka je sasvim opravdana za modeliranje čelika na nivou konstitutivnih relacija napon-deformacija. U slučaju interakcije čelik-beton potrebno je dodatno razmotriti globalan konstitutivni model ponašanja armiranog betona, pa se vrednost ovog koeficijenta može dodatno korigovati u granicama od 0 do 1. Ukoliko se usvoji vrednost 1, to faktički znači da je krutost u nelinearnoj fazi rada jednaka krutosti u elastičnoj fazi rada, pa bi ovakvo ponašanje odgovaralo linearno-elastičnom konstitutivnom modelu ponašanja. Modeliranje histerezisnog ponašanja sistema se kod ovakvog spektra odgovora uzima u obzir eksplicitno, a pa ovakav postupak predstavlja trenutni nelinearni odgovor sistema. Energija disipiranja kroz histerezisni model ponašanja eksplicitno se modelira, uzimajući u obzir relativno malu veličinu viskoznog prigušenja (obično ne više od 5%). Na slici 3. prikazani su neelastični spektri odgovora generisani iz akcelerograma zemljotresa Loma Prieta iz 1989.godine, zapis stanice Emeryville. Prvi dijagram je prikazan za vrednost koeficijenta viskoznog prigušenja od 5%, dok je drugi za vrednost od 20%.



Slika 3. Neelastični spektri odgovora za različite nivoe duktilnosti: a) $\beta=5\%$, b) $\beta=20\%$
Figure 3. Inelastic response spectrum for different level of ductility: a) $\beta=5\%$, b) $\beta=20\%$

Postupak sa neelastičnim spektrom odgovora u funkciji konstantne duktilnosti sprovodi se tako što se nakon svake završene konvencionalne *pushover* analize, koristi matrica krutosti za analizu vibracija sistema naredne analize. Zatim se određuju seizmičke sile sa korigovanim parametrom ubrzanja. Na slici 4. su prikazana dva uzastopna koraka T_i i T_{i+1} korekcije seizmičkih sila sa znatnom promenom parametra ubrzanja. Za i -ti korak $S_{a,i}$ je znatno veće sa manjim koeficijentom duktilnosti μ_i , dok je u slučaju $i+1$ koraka $S_{a,i+1}$ znatno manje sa većim koeficijentom duktilnosti sistema. Promena parametra ubrzanja iz dva uzastopna koraka analize smanjuje se sa povećanjem perioda vibracija sistema.



Slika 4. Inkrementalno-iterativni koncept za adaptivnu *pushover* analizu
 Figure 4. Incremental-iterative concept for adaptive pushover analysis

ZAKLJUČAK

Prikazano istraživanje predstavlja osnovu za dalje istraživanje i verifikaciju poboljšanja adaptivne FBA *pushover* analize. U ovom konceptu potrebno je dodatno razmotriti uticaj viših svojstvenih oblika, pošto su prethodna istraživanja sprovedena samo na prvom svojstvenom obliku vibracija. Glavna prednost ovog postupka je što se umesto elastičnog spektra odgovora koristi neelastičan spektar u funkciji trenutne duktilnosti sistema, tako da se može pratiti promena viskoznog, odnosno histerezisnog prigušenja.

LITERATURA

- Antoniou S., Pinho R., (2004) *Advantages and Limitations of Adaptive and Non-Adaptive Force Based Pushover Procedures*, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 8, No. 4, Imperial College Press
- Mwafy A., Elnashai A., (2001) *Static Pushover Versus Dynamic Collapse Analysis of RC Buildings*, Engineering Structures, Vol. 23, Elsevier
- Papanikolaou V., Elnashai A., Pareja J., (2005) *Limits of Applicability of Conventional and Adaptive Pushover Analysis for Seismic Response Assessment*, Mid-America Earthquake Center, Civil and Environmental Engineering Department, University of Illinois at Urbana-Champaign
- Pinho R., Antoniou S., Casarotti C., Lopez M., (2005) *A Displacement-Based Adaptive Pushover for Assessment of Buildings and Bridges*, NATO SFP977231, Istanbul
- Priestley M., Calvi G., Kowalsky M., (2007) *Displacement-Based Seismic Design of structures*, IUSS Press, Pavia