



Mladen Josić¹

O POTREBNOM BROJU I VELIČINI INKREMENTATA U INKREMENTALNOJ NELINEARNOJ DINAMIČKOJ ANALIZI

Rezime

U ovom radu prikazan je postupak kojim se utvrđuje potreban broj inkremenata u inkrementalnoj nelinearnoj dinamici koje analiziraju višespratnih zgrada okvirnih sistema. Postupak se zasniva na primeni razvijene *pushover* krive iz nelinearne statičke *pushover* analize, utvrđivanjem granica linearnog, nelinearnog domena i veličine maksimalnih deformacija. Veličina maksimalne deformacije u jednom koraku analize koja se dozvoljava je u funkciji međuspratnog otklona, a koji je u funkciji spratnosti objekta. Potreban broj inkremenata određen prema ovom postupku i razvijen prema izrazima datim u radu predstavlja minimalan broj.

Cljučne riječi

inkrementalna dinamika analiza, nelinearna statička *pushover* analiza

ABOUT THE REQUIRED NUMBER AND SIZE OF INCREMENTS IN INCREMENTAL NONLINEAR DYNAMIC ANALYSIS

Summary

This paper presents a procedure that determines the required number of increments in incremental nonlinear dynamic analysis of multi-storey building frame systems. The procedure is based on the application of developed pushover curves from nonlinear static pushover analysis, establishing the boundaries of linear, nonlinear domain and size of maximum displacements. The size of the maximum displacement in one step of the analysis is the function of interstorey drift, which is the function of the building floors. Required number of increments determined by this procedure and developed according to the expressions given in this paper represents the minimum number.

Key words

incremental dynamic analysis, nonlinear static pushover analysis

¹ dipl.inž.gra., student posleđiplomac, Fakultet tehničkih nauka - Novi Sad, lična adresa: Marka Milanovića 17, 15300 Loznica, Srbija, mladen165@info.net

1. UVOD

Razvoj savremenih hardverskih i softverskih rešenja otvara mogu nosti za znatno realisti niju analizu objekata u uslovima seizmi kog dejstva. Dosadašnje analize objekata u uslovima seizmi kog dejstva zasnivaju se na primeni linearnih stati kih ili spektralno-modalnih analiza. Pošto se ove analize zasnivaju na elasti nom modelu ponašanja materijala, pa shodno tome i elasti nom odgovoru sistema, to se iste ne mogu koristiti za procenu performansi pri nelinearnom ponašanju sistema. Modeliranje ponašanja objekata uz razvoj geometrijske i materijalne nelinearnosti može se kvalitetno sprovesti primenom nelinearne dinami ke analize (*NDA-nonlinear dynamic analysis*), a tako e u poslednjoj deceniji je intenziviran razvoj i poboljšanje nelinearne stati ke *pushover* analize (*NSPA-nonlinear static pushover analysis*).

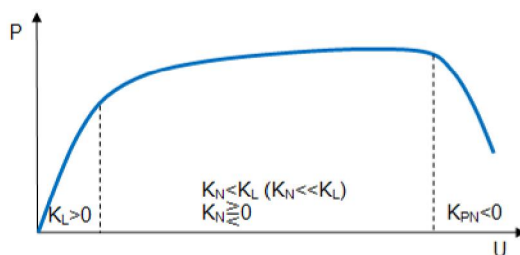
Da bi se mogao analizirati kapacitet raspoloživih nelinearnih deformacija sistema, potrebno je primeniti analizu sa vremenskim zapisom ubrzanja tla i inkrementalnim priraštajem akceleracija. U tu svrhu razvijena je inkrementalna dinami ka analiza (*INDA-incremental nonlinear dynamic analysis*) [1].

2. PROBLEMATIKA INDA ANALIZE

Postupak izvršavanja NDA analize kompleksnih 3D modela objekata pri nelinearnom ponašanju sistema gotovo je nemogu e sprovesti na personalnim *desktop* ra unarima. Step ena primenjivosti zavisi od kompleksnosti geometrije modela koji se analizira, step ena aproksimacije i diskretizacije FEM modela, modela razvoja nelinearnih deformacija i broja NDA analiza. Ukoliko se izvršava serija NDA analiza (INDA) onda je potreban znatan kapacitet hardvera za fazu procesiranja. Tako e, javlja se i potreba za memorisanjem podataka dobijenih iz NDA analiza, a ija vrednost može pre i i nekoliko stotina GB. Nakon izvršavanja faze procesiranja potrebno je dobijene podatke obraditi i pripremiti za prezentaciju u postprocesorskoj fazi. Efikasno rešavanje ovakvih problema sprovodi se primenom postupka paralelnog procesiranja, povezivanjem kompjutera (kompjuterski klaster) koji istovremeno vrše procesiranje INDA analiza [2]. Istraživanja koja se vrše u CALTECH institutu [3] sa 77 procesora (*dual core*) i za svaki ra unar po 8GB RAM i 148GB HDD, omogu avaju efikasnu INDA analizu na kompleksnim 3D modelima objekata. Za faze procesiranja i postprocesiranja potrebne su posebni uslovi rada hardvera, tako da izvršenja ovih analiza zahteva i posebnu pripremu. Ova priprema se odnosi ne samo na kreiranje modela, ve i na odre ivanje potrebnog broja i intenziteta inkremenata kojim se skalira akcelerogram u INDA analizi. Pretpostavke o veli ini inkremenata mogu e je doneti na osnovu sprovedenih pojednostavljenih analiza, kao što je seizmi ka analiza konstrukcija zasnovana na pomeranju (*DBSD-displacement based seismic design*) [4]. Drugi postupak se zasniva na primeni rešenja NSPA kojom se dobija i znatno realisti niji odgovor sistema, a procesorska faza traje relativno kratko. Ukoliko se primeni adaptivna analiza (*NSAPA-nonlinear static adaptive pushover analysis*), i to analiza zasnovana na pomeranju (*DBA-displacement based adaptive*), onda se dobijaju rešenja na izuzetno visokom nivou upore uju i sa INDA analizom [5]. Ideja za odre ivanje potrebnog broja inkremenata u INDA analizi je da se iskoristi rešenje NSPA analize kojoj je potrebno znatno manje vremena za fazu procesiranja i za obradu podataka.

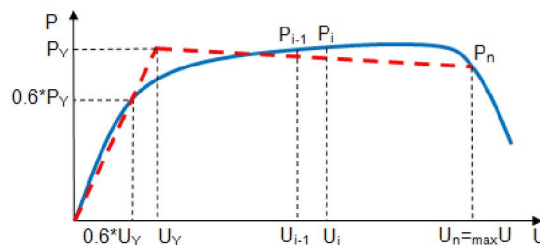
3. O POTREBNIM INKREMENTIMA INDA ANALIZE

Određivanje potrebnog broja i veličine inkrementa INDA analize, kao što je već spomenuto, zasniva se na prethodnom utvrđivanju nelinearnog ponašanja realnog MDOF sistema (MDOF-*multi degree of freedom*) NSPA analizom. Na osnovu razvoja geometrijske i materijalnosti MDOF sistema i sprovođenjem NSPA analize konstruiše se *pushover* kriva. Ova kriva predstavlja odnos ukupne sile u osнови objekta za odgovarajuće nivo horizontalnog pomeranja najvišeg vora. Analizom višespratnih regularnih i neregularnih okvira [6, 7] uz obezbećen razvoj nelinearnih deformacija u plastičnim zglobovima prema FEMA 356 [8], utvrđen je generalni oblik *pushover* krive sa tri različite oblasti ponašanja (slika 1.). Prvu oblast karakteriše linearno-elastično ponašanje sistema pri čemu je krutost $K_L > 0$. Drugu oblast karakteriše nelinearno ponašanje pri znatnom razvoju materijalne nelinearnosti u plastičnim zglobovima, tako da je krutost sistema redukovana u odnosu na krutost u linearno-elastičnoj oblasti $K_N < K_L$ ($K_N \ll K_L$). Treću oblast karakteriše postnelinearno ponašanje pri čemu sistem naglo gubi krutost $K_{PN} < 0$, odnosno nosivost i nastupa kolaps.



Slika 1. Karakteristične oblasti pushover krive

Na osnovu sprovedene NSPA i razvijene *pushover* krive konstruiše se bilinearna kriva kako bi se odredila granica maksimalnih raspoloživih deformacija sistema (slika 2.) [9]. Princip bilinearizacije je univerzalan za sve oblike *pushover* kriva. Postupak određivanja merodavnih parametara se zasniva na izjednačavanju energija deformacija *pushover* krive i bilinearnog elastoplastičnog modela ponašanja. Pošto se razvoj nelinearnih deformacija odvija u plastičnim zglobovima, kao vrednost $0.6 \cdot P_Y$ se može usvojiti situacija pri kojoj se formira prvi plastični zglob.



Slika 2. Bilinearizacija pushover krive

Površina ispod *pushover* krive se određuje na osnovu površina pojedinačnih trapeza koji se dobijaju iz dve uzastopne diskretne vrednosti pomeranja U_{i-1} i U_i ($i=1, \dots, n$), tako da

se izjednačavanjem površina dobija:

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (P_i + P_{i-1}) \cdot (U_i - U_{i-1}) = \frac{1}{2} \cdot (P_Y \cdot U_Y + (P_Y + P_n) \cdot (U_n - U_Y)). \quad (1)$$

Kao nepoznate se pojavljuju P_n i U_n , pa se dalja procedura sprovodi iterativno, a nakon sređivanja prethodnog izraza konačno se dobija:

$$U_n = \max U = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (P_i + P_{i-1}) \cdot (U_i - U_{i-1}) \right] - P_Y \cdot U_Y}{P_Y + P_n} + U_Y. \quad (2)$$

U linearnoj oblasti se može koristiti manji broj inkremenata INDA analize pošto se sistem linearno-elastično ponaša, dok je u nelinearnoj oblasti potreban veći broj inkremenata. Ukoliko se primeni veći broj inkremenata u INDA analizi dobija se veći broj diskretnih vrednosti odgovora sistema, na osnovu kojih se kasnije može sprovesti regresiona analiza uz minimalna odstupanja. Dakle, na osnovu ovakvih konstatacija razmatrane su dve solucije: sa jednakom $I_L = I_N$ i sa različitim veličinama inkremenata I_L i I_N , pri čemu su I_L i I_N veličine inkrementa u linearnoj i nelinearnoj oblasti.

Za slučaj da se primenjuju iste veličine inkremenata $I_L = I_N$, onda je veličina inkremenata nelinearne oblasti merodavna za analizu $I = I_N$. Ovakav uslov je postavljen jer je potreban strožiji kriterijum za ograničavanje deformacija sistema pri nelinearnom ponašanju, nego pri linearnom. Potreban broj inkremenata za nelinearnu oblast je $N_N > 1$, dok je za linearnu oblast $N_L > 1$. Takođe, potreban je veći broj inkremenata u nelinearnoj oblasti u odnosu na linearnu $N_N > N_L$ usled razvoja nelinearnih deformacija, obzirom da se za sistem zahteva duktilno ponašanje. Potreban broj inkrementa sada se može odrediti iz uslova odnosa $\max U$ i merodavnog drifta (*interstorey drift*) IDR:

$$N_{L=N} = \frac{\max U}{I_N} = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (P_i + P_{i-1}) \cdot (U_i - U_{i-1}) \right] - P_Y \cdot U_Y}{IDR_{EC8} \cdot (P_Y + P_n)} + U_Y, \quad (3)$$

gde je h - visina sprata, a IDR_{EC8} se određuje prema EC 8 [10] za objekte koji poseduju nenoseće elemente od krutih materijala koji su vezani za konstrukciju:

$$IDR_{EC8} \leq \frac{0.005 \cdot h}{v}, \quad (4)$$

gde je v - faktor redukcije kojim se uzima u obzir niži povratni period seizmičkog događaja koji se odnosi na stanje upotrebljivosti, a može takođe da zavisi od kategorije značajnog objekta ($v=0.4$ za kategoriju I i II, $v=0.5$ za kategoriju III i IV).

Za slučaj da se primenjuju različite veličine inkremenata I_L i I_N , u linearnoj oblasti je potreban minimalno jedan inkrement $N_{L=\min} = 1$. Ovim inkrementom se dostiže granica težnja P_Y , tako da je $I_L = 0.6 \cdot U_Y$, dok je u nelinearnoj oblasti potreban veći broj inkremenata $N_N > 1$. Uslov koji takođe mora biti ispunjen za I_L i I_N je odnos veličina inkrementa $I_L > I_N$. Ovakav uslov je postavljen jer se uz samo jedan inkrement u linearnoj

oblasti može javiti znatna deformacija sistema. Potreban broj inkrementa sada se može odrediti iz uslova odnosa U_{\max} i me ispratnog drifta (*interstorey drift*) IDR:

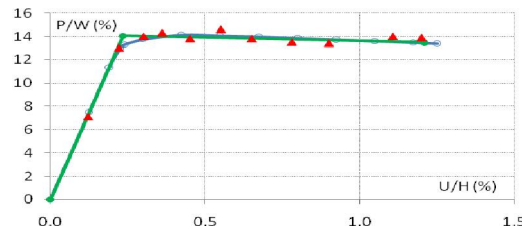
$$N_{L \neq N}^{\text{potr}} = 1 + \frac{U_{\max} - 0.6 \cdot U_y}{I_N} = 1 + \frac{\left[\sum_{i=1}^n (P_i + P_{i-1}) \cdot (U_i - U_{i-1}) \right] - P_y \cdot U_y}{I_{DR_{EC8}} \cdot (P_y + P_n)} + 0.4 \cdot U_y \quad (5)$$

Maksimalna vrednost me uspratnog drifta U_{\max} može se odrediti preko lokalnih parametara seizmi kog odgovora: kapaciteta plasti ne rotacije ρ_{pu} i indeksa ošte enja DI [11]. Relacije izme u U_{\max} IDR s'jedne strane i ρ_{pu} i DI s'druge strane su uspostavljene pomo u NDA analiza 4, 6, 8 i 12-to spratnih armiranobetonskih okvira projektovanih prema EC 8. Maksimalni kapacitet U_{\max} IDR za stanje kolapsa DI=0 za 4-spratni objekat iznosi 3.98%, 6-spratni 4.53%, 8-spratni 4.05% i 12-spratni 4.31%, dok za kapacitet plasti ne rotacije ρ_{pu} za 4-spratni objekat iznosi 5.68%, 6-spratni 6.82%, 8-spratni 7.32% i 12-spratni 6.97%. Potreban broj inkremenata se odre uje tako da bude u funkciji $f(I_{DR_{EC8}})$ kao maksimalna vrednost i u funkciji $f(U_{\max} \text{ IDR})$ kao minimalna vrednost:

$$N_{L=N}^{\text{potr}} f(I_{DR_{EC8}}) > N_{L=N}^{\text{potr}} > N_{L=N} f(U_{\max} \text{ IDR}), \quad (6)$$

$$N_{L \neq N}^{\text{potr}} f(I_{DR_{EC8}}) > N_{L \neq N}^{\text{potr}} > N_{L \neq N} f(U_{\max} \text{ IDR}). \quad (7)$$

Radi ilustracije i primene prethodno izvedenih izraza, analiziran je 8-spratni 4-brodni regularni okviri sistem koji je prethodno dimenzionisan prema BAB87. Razvijena je *pushover* kriva sprovedenom NSAPA analize i to analiza zasnovana na pomeranju DBA, a kojom se dobijaju najmanja odstupanja od diskretnih vrednosti INDA analize (slika 3.). Zatim je izvršena bilinearizacija prema (1). Potreban broj inkremenata je odre en iz uslova jednakosti veli ina inkremenata $I_L = I_N$ u linearnoj i nelinearnoj oblasti, a u funkciji $f(I_{DR_{EC8}})$. U linearnoj oblasti su dobijene dve diskretne vrednosti sa gotovo jednakim intervalom rastojanja, dok se u nelinearnoj oblasti ovi intervali razlikuju, a što je posledica nelinearnog odgovora sistema. Ukoliko bi se redukovao potreban broj inkremenata INDA analize, onda bi razlike izme u diskretnih vrednosti bile znatno ve e, a što bi uticalo na kvalitet korelacije u regresionoj analizi koja se naknadno sprovodi. Tako e, smanjenjem potrebnih inkremenata, odnosno pove anjem razlike izme u diskretnih vrednosti neomogu ava se kvalitetan monitoring nelinearnih deformacija, jer su iste ve e od jednog IDR-a.



Slika 3. Razvijena *pushover* kriva i INDA diskretne vrednosti za 8-spratni 4-brodni regularni okviri sistem

4. ZAKLJUČAK

Istraživanje prezentovano u ovom radu bazirano je na problematici INDA analiza sprovedenoj za nekoliko stotina višespratnih zgrada sa kojima se autor susretao u toku postdiplomskih studija. Kako bi se maksimalno eliminisalo vreme u fazi predprocesiranja, a isto tako i u fazi postprocesiranja, predložen je postupak koji se zasnovan na NSPA analizama. Potreban broj inkremenata određen prema ovakvom postupku prikazan je na izdvojenom reprezentativnom primeru višespratnog okvirnog sistema i daje zadovoljavajuće rezultate.

LITERATURA

- [1] D. Vamvatsikos, A. Cornell: "Incremental Dynamic Analysis", Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.31, No.3, 2001, p.491-514
- [2] D. Vamvatsikos: "Performing Incremental Dynamic Analysis in Parallel Using Computer Clusters", Proceedings of the COMPDYN2007 Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Rethymno, Greece, 2007, 12p
- [3] http://krishnan.caltech.edu/garuda_homepage.html
- [4] M. Priestley, G. Calvi, M. Kowalsky: "Displacement-Based Seismic Design of Structures", IUSS Press, Pavia, Italy, 2007, 721p
- [5] S. Antoniou., R. Pinho: "Advantages and Limitations of Adaptive and Non-Adaptive Force Based Pushover Procedures", Journal of Earthquake Engineering, Vol.8, No.4, 2004, p.497-522
- [6] . La inovi , M. osi : "*Pushover* analiza višespratnih armiranobetonskih okvira", Zemljotresno inženjerstvo i inženjerska seizmologija, Soko Banja, Srbija, 2008, str.113-120
- [7] . La inovi , M. osi : "Seizmi ka analiza okvirnih konstrukcija primenom nelinearne statičke metode", DIMK Simpozijum, Divulbare, Srbija, 2008, str.215-222
- [8] FEMA 356, "Pre-Standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", American Society of Civil Engineers, FEMA, Washington D. C., 2000, 519p
- [9] FEMA 274, "NEHPR Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of the Buildings", Building Seismic Safety Council, ATC, FEMA, Washington D. C., 1997, 398p
- [10] Eurocode 8, "Design of Structures for Earthquake Resistance", Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, European Committee for Standardization, Brussels, 2003, 224p
- [11] S. Janković : "Određivanje kapaciteta relativnog spratnog pomeranja AB ramova pomoću lokalnih parametara seizmičkog odgovora", Internacionalni naučno-stručni skup, Građevinarstvo – nauka i praksa, Žabljak, Crna Gora, 2008, p.395-400