

Proračun pomaka nesimetričnih višekatnih zgrada izloženih potresu

Mustafa Hrasnica, Josip Dvornik

Ključne riječi

potres,
približna metoda,
nelinearna dinamička
analiza,
ekvivalentna krutost,
nesimetrične višekatnice

Key words

earthquake,
approximate method,
nonlinear dynamic
analysis,
equivalent stiffness,
unsymmetrical multistory
buildings

Mots clés

séisme, méthode
approximative,
analyse dynamique non
linéaire,
rigidité équivalente,
bâtiments dissymétriques
à plusieurs étages

Schlüsselworte:

Erdbeben,
Annäherungsmethode,
unlineare dynamische
Analyse,
äquivalente Steifigkeit,
unsymmetrische
Mehrstockgebäude

M. Hrasnica, J. Dvornik

Izvorni znanstveni rad

Proračun pomaka nesimetričnih višekatnih zgrada izloženih potresu

Predložena je približna metoda za proračun maksimalnih horizontalnih pomaka nesimetričnih višekatnica izloženih potresu, a nazvana je metodom ekvivalentne elastične krutosti. Promatrana je višekatnica malog, srednjeg i većeg ekscentriciteta. Dobiveni pomaci uspoređuju se sa odgovarajućim rezultatima nelinearnog dinamičkog proračuna. Rezultati se veoma dobro slažu u srednjim katovima, na vrhu zgrade približna metoda daje nešto nepovoljnije rezultate, ali u prihvatljivim granicama.

M. Hrasnica, J. Dvornik

Original scientific paper

Calculating displacement of unsymmetrical multistory buildings exposed to seismic action

Authors propose an approximate method for calculating maximum horizontal displacement of unsymmetrical multistory buildings exposed to earthquake action. The method is known as the method of equivalent flexural stiffness. The multistory building of low, medium and high eccentricity is monitored. The obtained data are compared with appropriate results of nonlinear dynamic analysis. A very good correspondence has been registered for stories in the middle of the building, while results are somewhat less favorable for the top of the buildings, although they are still within acceptable limits.

M. Hrasnica, J. Dvornik

Ouvrage scientifique original

Calcul du déplacement des bâtiments dissymétriques à plusieurs étages exposés au séisme

L'on propose une méthode approximative de calcul des déplacements horizontaux maximaux des bâtiments dissymétriques à plusieurs étages exposés au séisme, nommée la méthode de rigidité élastique équivalente. On a observé les bâtiments à plusieurs étages de petite, moyenne et grande excentricité. Les déplacements obtenus ont été comparés aux résultats correspondants du calcul dynamique non linéaire. Les résultats se correspondent très bien pour les étages de milieu, tandis que les résultats fournis par la méthode approximative pour le sommet du bâtiment sont quelque peu moins sûrs, mais toujours dans des limites acceptables.

M. Hrasnica, J. Dvornik

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Berechnung der Verschiebung unsymmetrischer mehrstöckiger Gebäude bei Erdbeben

Es ist eine Annäherungsmethode vorgeschlagen für die Berechnung der grössten horizontalen Verschiebungen unsymmetrischer Mehrstockgebäude bei seismischer Belastung, genannt Methode der äquivalenten elastischen Steifigkeit. Betrachtet waren Mehrstockgebäude mit kleiner, mittlerer und grösserer Exzentrizität. Die so berechneten Verschiebungen verglich man mit den entsprechenden Ergebnissen der unlinearen dynamischen Berechnung. Für die mittleren Stockwerke übereinstimmen die Ergebnisse sehr gut, am Höhepunkt des Gebäudes ergibt die Annäherungsmethode etwas ungünstigere Ergebnisse, doch in annehmbaren Grenzen.

Autori: Dr. sc. **Mustafa Hrasnica**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sarajevo, BiH;
prof. dr. sc. **Josip Dvornik**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb

1 Uvod

Jedna od najvažnijih zadataka u analizi utjecaja potresa na višekratne zgrade jest proračun pomaka katova. Presječne sile u nosivim elementima svakako su važne za njihovo dimenzioniranje, međutim deformacije, točnije u ovom slučaju pomaci katova kod zgrada, fizikalne su veličine koje daju jasniju sliku odziva promatrane građevine. Dok su presječne sile više "unutarnji" problem neke konstrukcije, pomaci su veličine koje je povezuju s "vanjskim svijetom". Poznavanje veličine pomaka katova i njihovih relativnih odnosa omogućava proračun ili pak procjenu mogućih šteta i na nosivom sustavu tako i na nekonstruktivnim elementima. Novi trendovi u proračunu zgrada na utjecaj potresa [7] u prvi plan stavljaju upravo pomake, tzv. "Displacement based approaches". Veličine pomaka su dobri pokazatelji i za naknadno ojačanje konstrukcija [2]. U gusto izgrađenim gradskim sredinama često se nove višekratnice "ubacuju" u rijetke preostale slobodne prostore ili se grade na mjestima starih i dotrajalih objekata. U tu svrhu već je u idejnoj fazi projektiranja neophodno poznavati red veličine mogućih pomaka stropova. Neugodan problem koji se može pojaviti jest međusobni sudar dvaju susjednih zgrada zbog različitih horizontalnih pomaka.

Pri proračunu pomaka nesimetričnih višekratnica proračun se dodatno otežava zbog torzijskog odgovora konstrukcije. Najzanimljiviji su pomaci na rubovima katnih ploha, na tzv. gipkom rubu koji je najudaljeniji od centra krutosti i na tzv. krutom rubu na strani bližoj centru krutosti. Poradi dinamičkog odgovora, odnosno torzijskih vibracija, može se dogoditi da u nekom trenutku tijekom trajanja potresa pomak na krućoj strani bude veći nego na rubu najudaljenijem od centra krutosti. Inženjere projektante najčešće zanimaju najveće veličine pomaka koje se mogu pojaviti zbog nekog potresa.

Nelinearna dinamička analiza daje svakako najtočnije rezultate [3]. Međutim, ovaj proračunski postupak zahtijeva podosta vremena, a rezultati su točni samo za strogo odabrane ulazne parametre. Rezultati prije svega ovise o odabranom akcelerogramu. Za poopćenje rezultata bilo bi potrebno izraditi veliki broj proračuna za različite dinamičke pobude za što u inženjerskoj praksi uglavnom nema vremena. Stoga se nastoje primijeniti različite približne metode koje trebaju omogućiti relativno brz proračun uz zadovoljavajuću točnost rezultata.

Ovdje je opisana približna metoda za proračun pomaka općenito nesimetričnih višekratnica srednje visine. Uvodi se zamjenjujuća (ekvivalentna) krutost, a proračun se provodi spektralnom analizom.

2 Usporedba elastičnog i neelastičnog odgovora

Realno je očekivati da dijelovi nosivih konstrukcija zgrada već pri srednje jakim potresima prelaze u područje nelinearnog ponašanja materijala. Projektirati neku konstrukciju tako da se i za vrijeme najjačeg potresa ponaša linearno-elastično nema opravdanja ni s ekonomske ni s estetske točke gledišta. Nastoji se iskoristiti i poboljšati duktilnost nosive konstrukcije. Stupanj smanjenja pune (elastične) nosivosti ovisi o stupnju duktilnosti [4].

Smanjenje elastičnog nivoa nosivosti obično se izražava koeficijentom umanjenja ili njegovom recipročnom vrijednosti.

$$F_y = \alpha_\mu \cdot F_{el} = \frac{F_{el}}{q}, \quad (1)$$

F_y - nosivost na granici plastifikacije (umanjena elastična nosivost)

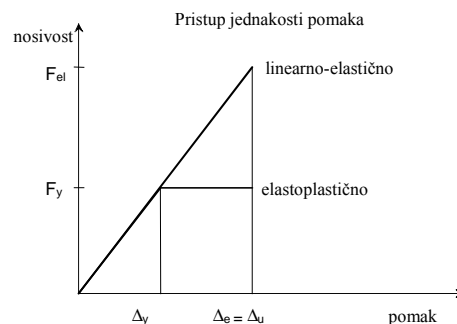
F_{el} - nosivost koju bi imao nosač da se i pri najjačem potresu ponaša elastično

α_μ - koeficijent umanjenja

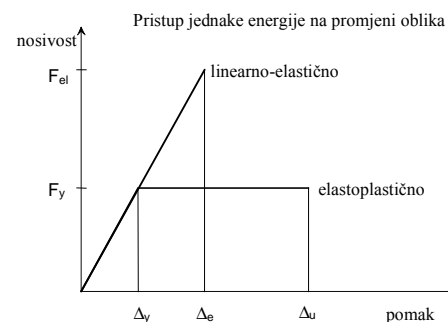
q - faktor odnosa dviju nosivosti ili faktor ponašanja konstrukcije.

U potresnom inženjerstvu [6] uobičajena su dva pristupa za utvrđivanje odnosa između elastične i elastoplastične nosivosti, odnosno za usporedbu najvećih elastičnih i elastoplastičnih pomaka:

- jednakost najvećih pomaka (slika 1.)
- jednakost mehaničkog rada (energije) na promjeni oblika (slika 2.),



Slika 1. Pristup jednakosti pomaka



Slika 2. Pristup jednake energije na promjeni oblika

gdje su:

Δ_u - ukupni elastoplastični pomak

Δ_y - pomak na granici plastifikacije

Δ_e - najveći linearno-elastični pomak

Odnos između ukupnog elastoplastičnog pomaka i pomaka na granici plastifikacije jest koeficijent duktilnosti μ_Δ .

U prvom pristupu (slika 1.) izjednačavaju se najveći elastični i elastoplastični pomaci:

$$\alpha_\mu = \frac{F_y}{F_{el}} = \frac{1}{\mu_\Delta} \rightarrow q = \mu_\Delta \quad (2)$$

Elastoplastična nosivost jednaka je linearno-elastičnoj nosivosti podijeljenoj sa faktorom ponašanja koji je ovdje jednak koeficijentu duktilnosti.

U drugom pristupu (slika 2.) izjednačava se rad koji izvrše elastična i elastoplastična sila (izjednačavaju se površine ispod odgovarajućih dijagrama). Nakon jednostavnih matematičkih transformacija dobiva se koeficijent umanjenja.

$$\alpha_\mu = \frac{F_y}{F_{el}} = \frac{\Delta_y}{\Delta_e} = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \mu_\Delta - 1}}, \quad (3)$$

odnosno faktor odnosa nosivosti:

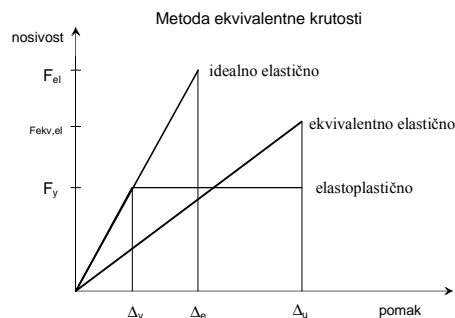
$$q = \sqrt{2 \cdot \mu_\Delta - 1}. \quad (4)$$

Autori Newmark i Hall [6] promatraju linearne i nelinearne spektre odgovora za utjecaj istog akcelerograma potresa. Usporedbe pokazuju da niskim frekvencijama osciliranja, $f < 0,7$ Hz (odnosno period osciliranja $T > 1,43$ s), bolje odgovara pristup jednakosti ukupnih pomaka, dok srednjim frekvencijama, $f = 2 - 10$ Hz (odnosno period $T = 0,1 - 0,5$ s) bolje odgovara pristup izjednačavanja rada na promjeni oblika. Između 0,7 Hz i 2,0 Hz (odnosno $T = 0,5 - 1,43$ s) jest prijelazno područje kao i između 10 i 33 Hz ($T = 0,03 - 0,1$ s). Konstrukcije osnovna frekvencija kojih je iznad 33 Hz su toliko krute da i nemaju plastične deformacije. Također je i područje između 10 i 33 Hz, odnosno $T < 0,1$ s, malo zanimljivo za realne građevinske konstrukcije budući da se radi o nosivim sustavima iznadprosječne krutosti; vidjeti i [1].

Može se reći da nosivim sustavima kojih je osnovni period niži od $T = 1,0$ s bolje odgovara pristup jednake energije, a "mekšim" nosivim sustavima ($T > 1,0$ s) pristup jednakih pomaka.

3 Metoda ekvivalentne elastične krutosti

Velik broj građevina može se svrstati u zgrade srednje visine (4-12 katova). Osnovni period osciliranja obično se kreće u rasponu $T = 0,3 - 1,0$ sekunda. Uzimajući u obzir razmatranja iz prethodnog odjeljka, može se reći da je za to područje mjerodavan pristup jednakosti energije na promjeni oblika.



Slika 3. Dijagram za približnu metodu

Na slici 3. označena su dva granična oblika ponašanja konstrukcije, idealno elastično (najstrijmiji pravac) i elastoplastično (bilinearni poligon). Može se definirati ekvivalentni elastični sustav predstavljen pravcem nagib kojega je manji od nagiba pravca koji predstavlja krutost idealno elastičnog sustava. (Ovo je istodobno početna krutost elastoplastičnog sustava.) Ekvivalentni sustav dostiže iste najveće pomake kao i nelinearna konstrukcija. Primjenjuje se pristup jednake energije na promjeni oblika, odnosno jednakog rada elastičnog i elastoplastičnog sustava. Nagib novog pravca odnosno efektivna krutost ekvivalentnog sustava dobiva se izjednačavanjem ploština dijagrama koji s apscisom zatvara ovaj pravac i površine ispod elastoplastične krivulje. Ova je druga ploština već prije izjednačena s ploštinom koju zaklapa idealno elastični pravac (vidjeti i prethodnu točku).

Promatrajući dijagram na slici 3. i uzimajući u obzir formule iz točke 2. može se omjer između idealno elastične nosivosti i nosivosti na granici tečenja te odnos između odgovarajućih deformacija pisati:

$$\frac{F_{el}}{F_y} = \frac{\Delta_e}{\Delta_y} = \sqrt{2 \cdot \mu_\Delta - 1}. \quad (5)$$

Uvrštavanjem prethodnog u poznatu relaciju za elastoplastični pomak $\Delta_u = \mu_\Delta \Delta_y$, dobivamo:

$$\Delta_u = \mu_\Delta \frac{\Delta_e}{\sqrt{2 \cdot \mu_\Delta - 1}}, \quad (6)$$

odnosno

$$\frac{\Delta_e}{\Delta_u} = \frac{\sqrt{2 \cdot \mu_\Delta - 1}}{\mu_\Delta}.$$

Izjednačavanjem odgovarajućih ploština na $F - \Delta$ dijagramu koje prikazuju energiju utrošenu na promjenu oblika:

$$\Delta_u F_{ekv,el} = \Delta_e F_{el} \quad (8)$$

$$F_{ekv,el} = F_{el} \frac{\Delta_e}{\Delta_u} = F_{el} \frac{\sqrt{2 \cdot \mu_\Delta - 1}}{\mu_\Delta} \quad (9)$$

Ovdje je $F_{ekv,el}$ nosivost ekvivalentnoga elastičnoga sustava pri dostizanju graničnih elastoplastičnih deformacija.

Početna je krutost idealno elastičnog sustava:

$$k_0 = \frac{F_{el}}{\Delta_e}, \quad \text{tj.} \quad F_{el} = k_0 \Delta_e \quad (10)$$

a krutost ekvivalentnoga elastičnog sustava slično:

$$k_{ekv,el} = \frac{F_{ekv,el}}{\Delta_u} \quad (11)$$

Uzimajući u obzir izraz za $F_{ekv,el}$ možemo pisati:

$$k_{ekv,el} = \frac{F_{el} \frac{\sqrt{2 \cdot \mu_\Delta - 1}}{\mu_\Delta}}{\Delta_u} \quad (12)$$

Koristeći se jednadžbom (10) za krutost nekog elastičnog sustava može se ekvivalentna krutost $k_{ekv,el}$ izraziti početnom krutosti k_0 ,

$$k_{ekv,el} = k_0 \frac{\sqrt{2 \cdot \mu_\Delta - 1}}{\mu_\Delta} \cdot \frac{\Delta_e}{\Delta_u} \quad (13)$$

Uvrštavanjem odnosa najveće elastične i elastoplastične deformacije, Δ_e/Δ_u , (jednadžba 6) slijedi:

$$k_{ekv,el} = k_0 \left(\frac{\sqrt{2 \cdot \mu_\Delta - 1}}{\mu_\Delta} \right)^2, \quad \text{tj.} \quad (14)$$

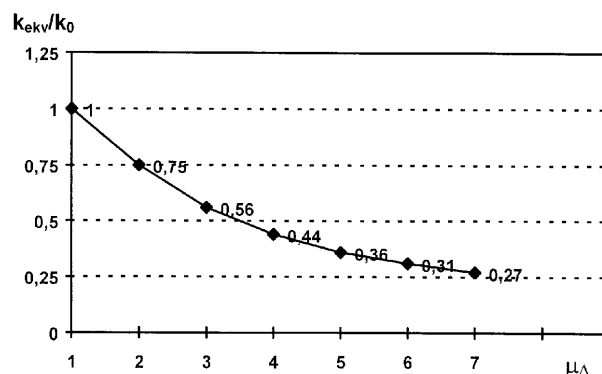
$$k_{ekv,el} = k_0 \frac{2 \cdot \mu_\Delta - 1}{\mu_\Delta^2} \quad (15)$$

Transformacijom desne strane jednadžbe (15) dobiva se konačni izraz za ekvivalentnu elastičnu krutost:

$$k_{ekv,el} = k_0 \left(\frac{2}{\mu_\Delta} - \frac{1}{\mu_\Delta^2} \right) \quad (16)$$

S ovako izračunanom ekvivalentnom elastičnom krutosti provodi se proračun metodom spektralne analize. Ovaj približni postupak nazvan je metodom ekvivalentne elastične krutosti.

Za razne veličine koeficijenta duktilnosti mogu se proračunati ekvivalentne krutosti kao dijelovi idealno elastične odnosno početne krutosti (slika 4.).



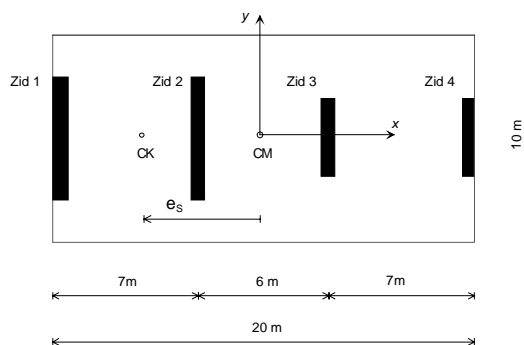
Slika 4. Odnos ekvivalentne i početne krutosti ovisno o koeficijentu duktilnosti

Kao komentar gornjeg dijagrama može se reći da za neke očekivane veličine globalnog koeficijenta duktilnosti ekvivalentna krutost za približni proračun može pasti gotovo do četvrtine početne (elastične) krutosti. Već kod koeficijenta duktilnosti $\mu_\Delta = 3$, a koji se može realno postići kod armiranobetonskih zidova, ekvivalentna krutost iznosi nešto više od polovine početne krutosti (točnije 56%).

Smanjenjem krutosti povećava se period osciliranja ekvivalentnoga elastičnog sustava. To odgovara ponašanju realne konstrukcije kod koje prelaskom u nelinearno područje dolazi do povećanja osnovnog perioda osciliranja. Međutim, ovo je produženje perioda dovoljno da u spektralnoj analizi budu mjerodavne neke druge vrijednosti spektralnog ubrzanja. O svemu će još biti riječi kod analize konkretnih primjera.

4 Primjeri

Kao primjer promatra se nesimetrična devetokatnica s nosivim sustavom sastavljenim od zidova (slika 5.). Tlocrtne dimenzije su 20x10m, a katna visina je 3 m. Radi jednostavnosti pretpostavlja se da je konstrukcija u x -smjeru simetrična i da zidovi položeni u tom smjeru ne pridonose ukupnoj torzijskoj krutosti nosivog sustava.



Slika 5. Osnovni tlocrt promatranih zgrada

Razmatrano je nekoliko primjera zgrada različitog stupnja nesimetričnosti. Osnovne dimenzije su prikazane u tablici 1. Parovi zidova 1 i 2 te 3 i 4 imaju jednaka geometrijsko-elastična svojstva. Ukupna tlocrtna površina zidova u svakom od četiri slučaja iznosi 1,92 % od ukupne tlocrtno površine karakterističnoga kata.

Tasblica 1.

Ekscentricitet	Dimenzije zidova [cm]			
	zid 1	zid 2	Zid 3	zid 4
$e_s/d = 0,0$	20/480	20/480	20/480	20/480
$e_s/d = 0,04$	20/500	20/500	20/460	20/460
$e_s/d = 0,12$	20/540	20/540	20/420	20/420
$e_s/d = 0,21$	20/600	20/600	20/360	20/360

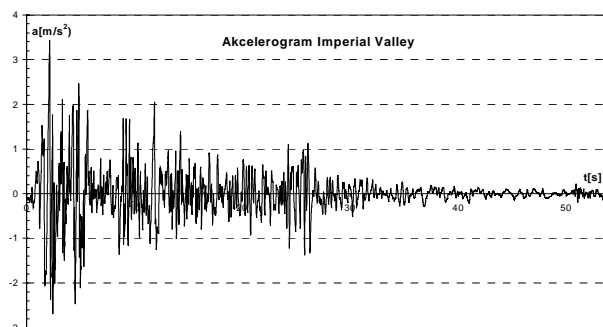
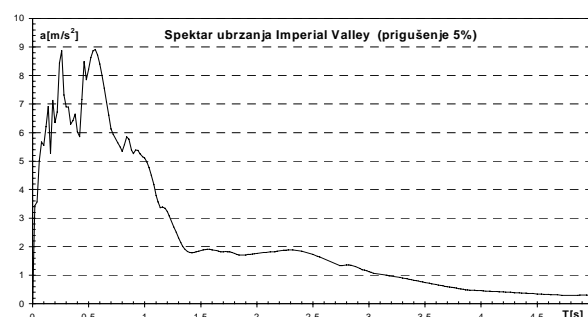
Prvi slučaj $e_s/d = 0,0$ jest primjer simetrične konstrukcije zgrade, dok se idući mogu označiti kao zgrade s malim, srednjim i velikim ekscentricitetom. Ovdje je:

e_s/d - relativni statički ekscentricitet

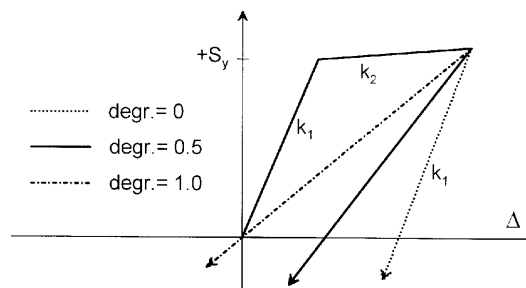
e_s - statički ekscentricitet, jednak razmaku centra mase i centra krutosti

d - promatrana tlocrtna dimenzija zgrade (u ovom slučaju duljina).

Za proračun ekvivalentnom statičkom metodom pretpostavljena je seizmička zona IX, a horizontalno opterećenje djeluje u centru masa katova koji se ovdje poklapaju s težištem pravokutne katne plohe. Ukupna potrebna nosivost dobivena proračunom raspodijeljena je tako da zidovi jednakih dimenzija imaju i jednaku nosivost. S tako dimenzioniranom konstrukcijom provedena je nelinearna dinamička analiza. Za dinamičku pobudu, odabran je akcelerogram potresa *Imperial Valley* 1940., zapis *El Centro*, gdje najveće ubrzanje tla iznosi $3,417 \text{ m/s}^2$, dužina zapisa je 53,76 s, a interval zapisa ubrzanja 0,02 s (slika 6.). Akcelerogram potječe iz biblioteke *National Information Service for Earthquake Engineering, Berkeley, California*. Pripadajući spektar ubrzanja koji se primjenjuje u približnoj metodi predočen je na slici 7. Pri proračunu spektralnom analizom obuhvaćeno je prvih 6 vlastitih forma osciliranja.

Slika 6. Akcelerogram *Imperial Valley*Slika 7. Spektar ubrzanja za akcelerogram *Imperial Valley*, prigušenje 5%

Pri dimenzioniranju i oblikovanju vertikalnih nosivih elemenata primijenjene su osnovne postavke metode kapacitativnog dimenzioniranja [8]. Zidovi su simetrično armirani, dakle nosivost je jednaka i u pozitivnom i u negativnom dijelu radnog dijagrama. Za nelinearni radni dijagram materijala, neophodan za nelinearnu dinamičku analizu, odabran je bilinearni histerezni dijagram (slika 8.). Postelastična krutost k_2 iznosi 2% od početne ili elastične krutosti k_1 , a obuhvaćeno je i smanjenje ili degradacija krutosti nakon dostizanja nelinearnih deformacija. Stupanj smanjenja 0,5 jest srednja veličina degradacije krutosti. Smanjenje krutosti nakon dostizanja određenih nelinearnih pomaka potvrđeno je i pokusima na armiranobetonskim elementima koji su bili opterećivani cikličkim opterećenjem, npr [1].



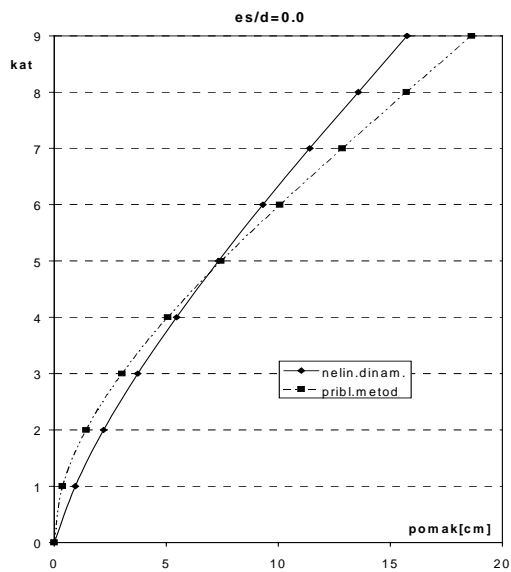
Slika 8. Radni dijagram materijala

Nelinearna dinamička analiza izrađena je uz pomoć računalnog programa DRAIN-3DX razvijenog na *University of California Berkeley* [9]. Prigušenje je odabrano tako da odgovara ekvivalentnom viskoznom prigušenju od 5%.

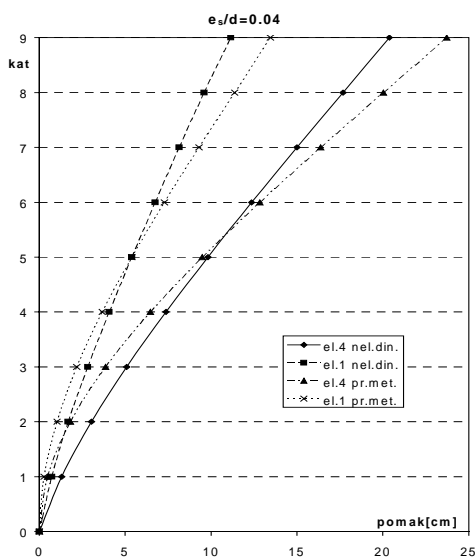
5 Prikaz rezultata

Kao usporedna veličina promatraju se najveći horizontalni pomaci katnih ploha, i to pomaci na relativno krutom i relativno gipkom rubu zgrade. U razmatranim primjerima to su pomaci zidova 1 i 4. Pomaci su veličine koje veoma dobro opisuju odgovor zgrade na utjecaj potresa, a kod jedne višekatne zgrade posebice su zanimljivi pomaci najvišega kata jer su to u pravilu i maksimalni horizontalni pomaci.

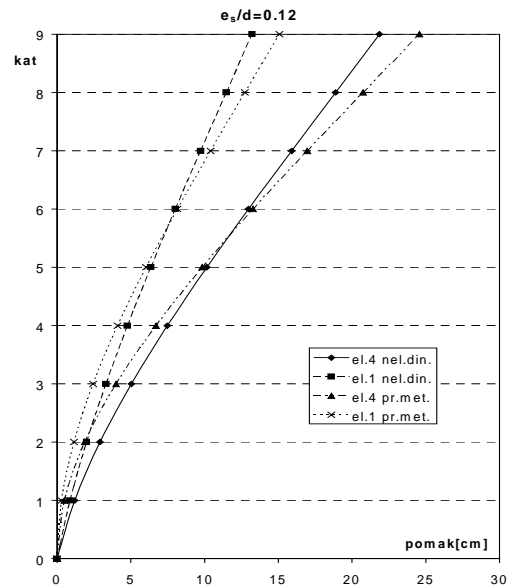
Za primjere višekatnih zgrada opisanih u prethodnom poglavlju napravljeni su proračuni metodom nelinearne dinamičke analize i predloženim približnim postupkom, metodom ekvivalentne elastične krutosti. U okviru približne metode pretpostavljena je globalna duktilnost nosivog sustava sa zidovima $\mu_{\Delta} = 3.0$ što odgovara i preporukama iz propisa i literature [1 i 4] za srednji stupanj duktilnosti. Rezultati su prikazani na slikama 9. do 12. za primjere simetrične zgrade te višekatnica maloga, srednjega i velikog ekscentriciteta, respektivno. Krivulje na dijagramima povezuju najveće horizontalne pomake na katovima koji nastaju tijekom djelovanja odabranog zapisa potresa.



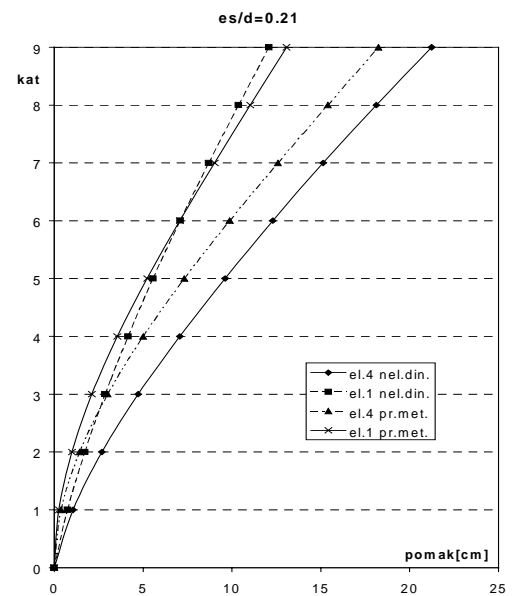
Slika 9. Usporedba najvećih pomaka, $e_s/d = 0,0$



Slika 10. Usporedba najvećih pomaka, $e_s/d = 0,04$



Slika 11. Usporedba najvećih pomaka, $e_s/d = 0,12$



Slika 12. Usporedba najvećih pomaka, $e_s/d = 0,21$

Općenito se može zaključiti da je aproksimacija pomaka primjenom približne metode zadovoljavajuća. Veoma dobro su aproksimirani pomaci u sredini zgrade, dok su pomaci na najnižim katovima manji od rezultata dobivenih nelinearnom dinamičkom analizom. Najzanimljivije veličine, pomaci vrha zgrade, dobiveni metodom ekvivalentne elastične krutosti, u većini slučajeva su do 20% veći nego odgovarajući pomaci dobiveni nelinearnom dinamičkom analizom. Ovo razmatranje vrijedi i za kruti i za gipki rub zgrade. Jedino su pomaci na gipki rubu za slučaj velikog ekscentriciteta $e_s/d = 0,21$ podcijenjeni (na najvišem katu za ca. 16%) Za promatrane

primjere i odabrano opterećenje potresom pomaci na rubu bližem centru krutosti su bolje aproksimirani od odgovarajućih pomaka na suprotnom rubu. Netočnost rezultata na vrhu zgrade ne mora biti veliki nedostatak jer se nalazimo na strani sigurnosti, a proračunane veličine pomaka su ipak vezane za specifično odabrane ulazne parametre, prije svega odabrani akcelerogram potresa.

Proračun većeg broja primjera višekratnica izrađen je u [5], gdje su uzeti u obzir akcelerogrami različitih potresa, a razmatran je i mješoviti nosivi sustav sastavljen od zidova i okvira. Nakon usporedbe "točnih" rezultata nelinearne dinamičke analize i približne metode došlo se do sličnih zaključaka kao i za opisane primjere.

Za analizu predložene približne metode zanimljivo je promotriti i utjecaj harmonijske pobude. Odabran je jedan sinusni val perioda $T = 0,6$ sekunda (ukupno trajanje $t = 0,6$ s), a amplituda ubrzanja iznosi 0,35 g. Rezultati su veoma slični onima prikazanim na slikama 9. do 12., posebice u srednjim i donjim katovima. Jedino su veličine pomaka zadnjeg kata na gipkom rubu zgrade proračunane približnom metodom prevelike. Za primjer zgrada malog i srednjeg ekscentriciteta povećanje iznosi i do 50% u odnosu prema nelinearnoj dinamičkoj analizi.

6 Zaključak

Analizirana je približna metoda za proračun horizontalnih pomaka općenito nesimetrične višekratnice izložene utjecaju potresa, nazvana metodom ekvivalentne elastič-

ne krutosti. Na osnovi hipoteze o jednakosti energije elastičnoga, elastoplastičnoga i zamjenjujućega elastičnog sustava, i uz uvjet jednakih najvećih pomaka elasto-plastičnog i zamjenjujućeg elastičnog sustava proračunava se ekvivalentna (zamjenjujuća) elastična krutost. S ovako dobivenom krutošću radi se proračun spektralnom analizom gdje se uzima u obzir nekoliko prvih vlastitih forma osciliranja. Veličine pomaka dobivene približnim postupkom zatim su uspoređene s rezultatima nelinearne dinamičke analize, koja se smatra "točnom" za odabrane ulazne parametre. Pritom se prije svega misli na odabrani akcelerogram potresa.

Usporedba dviju metoda pokazuje zadovoljavajuće rezultate. Pogreška na vrhu zgrade, gdje približna metoda precjenjuje iznose horizontalnih pomaka, ne mora biti veliki nedostatak. Rezultati su na strani sigurnosti, a inženjer se uglavnom ne želi osloniti na mogući utjecaj samo jednog potresa.

Predložena približna metoda za proračun pomaka nesimetričnih višekratnica mogla bi biti korisna u svakodnevnoj inženjerskoj praksi, gdje je često nužno brzo procijeniti veličine deformacija koje može prouzročiti djelovanje potresa. Metoda bi mogla naći svoje mjesto i u okviru suvremenih trendova u potresnom inženjerstvu, tzv. "Push-over analysis" i "Capacity Spectrum Method" u kojima je potrebno brzo doći do takozvanog. ciljnog pomaka koji služi kao granica provedbe nelinearne statičke analize.

LITERATURA

- [1] Bachmann, H.: *Erdbebensicherung von Bauwerken*, Birkhäuser Verlag Basel, 1995.
- [2] Badoux, M.: *Comparison of seismic retrofitting strategies with the capacity spectrum method*, 11th European Conference on Earthquake Engineering, 1998.
- [3] Chopra, A. K.: *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall 1995.
- [4] Eurocode No 8 (EC 8), European Prestandard (ENV 1998), *Design Provisions for earthquake resistance of structures, Part 1 General and building*, European Committee for Standardization, 1994.-1996.
- [5] Hrasnica, M.: *Nelinearni odgovor višekratnih zgrada izloženih utjecaju potresa*, doktorska disertacija, Građevinski fakultet, Zagreb, 1999.
- [6] Newmark, N. M.; Hall, W.J.: *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California, 1982.
- [7] Otani, S.: *Development of performance-based design methodology in Japan*, Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes, Fajfar&Krawinkler(eds), Balkema Rotterdam 1997.
- [8] Paulay, T.: *The Design of Ductile Reinforced Concrete Structural Walls for Earthquake Resistance*, *Earthquake Spectra Vol. 2, No. 4, 1986*.
- [9] Prakash, V.; Powell, G. H.: *DRAIN-2DX, DRAIN-3DX and DRAIN-BUILDING: Base Program Design Documentation, Structural Engineering, Mechanics, and Materials, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, Report No. UCB/SEMM-93/16, 1993*.