

Nelinearni seizmički proračun konstrukcija prema normi EN 1998-1:2004

Mehmed Čaušević, Elizabeta Zehentner

Ključne riječi

seizmički proračun, konstrukcijski eurokodovi, nelinearno ponašanje, metoda N2, metoda postupnoga guranja, spektralni proračun

Key words

seismic analysis, structural Eurocodes, nonlinear behaviour, method N2, pushover method, spectral analysis

Mots clés

analyse sismique, Eurocodes structurels, comportement non-linéaire, méthode N2, méthode de poussée progressive, analyse spectrale

Ключевые слова

сейсмический расчёт, конструкционные еврокоды, нелинейное поведение, метод N2, метод постепенного толкания, спектральный анализ

Schlüsselworte

seismische Berechnung, Eurokode für Konstruktionen, nichtlineares Verhalten, Methode N2, Verfahren des stufenweisen Schiebens, Spektralanalyse

M. Čaušević, E. Zehentner

Pregledni rad

Nelinearni seizmički proračun konstrukcija prema normi EN 1998-1: 2004

Prikazana je nelinearna metoda N2 za ocjenu seizmičkog ponašanja konstrukcija. Kombinira se metodu postupnoga guranja sa spektralnim proračunom, a formulirana je u formatu ubrzanje - pomak. Ovom se metodom dobiju prihvatljivi rezultati ako konstrukcija pretežno oscilira u prvom obliku vibracija. Primjena metode N2 je ilustrirana primjerom armiranobetonske okvirne konstrukcije četverokatne zgrade. Uspoređeni su rezultati s nelinearnim postupcima koji se primjenjuju u SAD-u.

M. Čaušević, E. Zehentner

Subject review

Nonlinear seismic analysis of structures according to EN 1998-1:2004

The nonlinear method N2 for the analysis of seismic behaviour of structures is presented. The pushover method is combined with spectral analysis, and is presented in the acceleration - displacement format. The results obtained by this method are acceptable if the structure dominantly oscillates in the first tone. The application of the method N2 is illustrated by an example of a four-storey building with the reinforced-concrete frame structure. The results are compared with the nonlinear procedures FEMA 273 and ATC 40 that are currently applied in the U.S.A.

M. Čaušević, E. Zehentner

Ouvrage de synthèse

Analyse sismique non-linéaire des structures selon EN 1998-1:2004

La méthode non-linéaire N2 pour l'analyse de comportement sismique des structures est présentée. La méthode de poussée progressive est combinée avec l'analyse spectrale et est présentée dans le format accélération - déplacement. Les résultats obtenus par cette méthode sont acceptables si la structure oscille principalement dans le premier ton. L'application de la méthode N2 est illustrée par l'exemple d'un bâtiment à quatre étages avec la structure-cadre en béton armé. Les résultats sont comparés avec les procédures non-linéaires FEMA 273 et ATC 40 qui sont couramment appliquées aux Etats-Unis.

M. Чаушевич, Е. Зехентнер

Обзорная работа

Нелинейный сейсмический расчёт конструкций по нормe EN 1998-1: 2004

В работе показан нелинейный метод N2 для оценки сейсмического поведения конструкций. Комбинируется метод постепенного толкания со спектральным анализом, а формулирован в формате ускорение-сдвиг. Этим методом получают приемлемые результаты, если конструкция преимущественно осциллирует в первом тоне. Применение метода N2 иллюстрировано на примере железобетонной рамной конструкции четвероэтажного здания. Сравнены результаты с нелинейными способами FEMA 273 и ATC 40, применяемыми в США.

M. Čaušević, E. Zehentner

Übersichtsarbeit

Nichtlineare seismische Berechnung von Konstruktionen nach der Norm EN 1998-1: 2004

Dargestellt ist die nichtlineare Methode N2 für die Bewertung des seismischen Verhaltens von Konstruktionen. Man kombiniert das Verfahren des stufenweisen Schiebens mit der Spektralanalyse, und die Formulierung erfolgt im Format Beschleunigung - Verschiebung. Mit dieser Methode erhält man annehmbare Ergebnisse wenn die Konstruktion überwiegend im ersten Ton oszilliert. Die Anwendung der Methode N2 ist am Beispiel einer Stahlbetonrahmenkonstruktion illustriert. Die Ergebnisse sind mit den nichtlinearen Verfahren FEMA 273 und ATC 40 verglichen, die in den USA angewendet werden.

Autori: Prof. dr. sc. **Mehmed Čaušević**, dipl. ing. građ.; **Elizabeta Zehentner**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, V. C. Emina 5, Rijeka

1 Uvod

U europskoj su normi EN 1998-1: 2004 (točka 4.3.3) [14] propisane sljedeće metode proračuna konstrukcija zgrada u seizmičkim područjima (tablica 1.):

- proračun primjenom ekvivalentnoga statičkog djelovanja koji se primjenjuje kada je odziv konstrukcije takav da ne postoji znatan doprinos viših oblika osciliranja, već se uzima utjecaj samo prvog oblika
- modalni proračun spektrima odziva koji se primjenjuje bez ograničenja, znači za sve konstrukcije u zgradarstvu kod kojih postoji utjecaj viših oblika osciliranja na odziv konstrukcije
- nelinearna statička metoda postupnoga guranja (*pushover*)
- nelinearni dinamički proračun uporabom vremenskog zapisa (*time history*).

Tablica 1. Seizmički proračuni konstrukcija prema EN 1998-1: 2004

Proračun konstrukcija	Statički	Dinamički
linearan	linearni proračun primjenom ekvivalentnoga statičkog djelovanja	modalni proračun spektrima odziva
nelinearan	nelinearna statička metoda postupnoga guranja	nelinearni dinamički proračun uporabom vremenskog zapisa

Odavno je uočena potreba za nelinearnim seizmičkim proračunom građevinskih konstrukcija i temeljni se pojmovi takvog proračuna u posljednje vrijeme već opisuju i u knjigama, npr. [6] i [7]. U svijetu su se vodila i u tijeku su opsežne znanstvena istraživanja na o ovoj temi. Razvijena je nova generacija postupaka za projektiranje novih i saniranje oštećenih građevina, koji sadrže inženjerske koncepte osnovane na ponašanju konstrukcije (*performance based engineering concept*). Uvidjelo se da prilikom projektiranja treba posvetiti veću pažnju kontroli oštećenja, a to se može postići samo uvođenjem nelinearnog proračuna u metodologiju potresnih proračuna. Jedan od najprikladnijih pristupa jest kombiniranje nelinearne statičke metode postupnoga guranja s metodologijom spektralnog odziva.

U ovom ćemo članku obrazložiti temeljne pojmove koji će pridonijeti razumijevanju onih odredaba europske norme EN 1998-1: 2004 koje uvode nelinearni proračun konstrukcija, za što je dano objašnjenje u dodatku B (*Annex B*) ove norme pod nazivom: Proračun ciljanog pomaka (*target displacement*) za nelinearnu statičku metodu postupnoga guranja. Ovaj se postupak u normi temelji na radovima [3, 4, 5] koji opisuju metodu N2

(slovo N označuje da se radi o nelinearnom proračunu, a broj 2 da su primijenjena dva matematička modela).

Ovdje će dakle biti izložena nelinearna metoda N2 za proračun ciljanog pomaka konstrukcija izloženih potresnim djelovanjima. Metoda N2 kombinira metodu postupnog guranja modela s više stupnjeva slobode sa spektralnim proračunom ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode. Metoda je formulirana u formatu ubrzanje – pomak, koji omogućava vizualnu interpretaciju postupka i odnosa između osnovnih vrijednosti koje utječu na seizmički odziv konstrukcije.

Općenito, rezultati metode N2 prihvatljivo su točni ako konstrukcija oscilira pretežno u prvome obliku oscilacija. U ovome je članku opisana metoda N2 i navedeni neki važniji zaključci, a na kraju je primjena metode N2 prikazana numeričkim primjerom.

Za razumijevanje problema koji će biti izložen u nastavku dovoljno je predznanje iz dinamike konstrukcija u opsegu danom u literaturi [1, 2].

U skladu s temeljnim uvjetom konstrukcijskih eurokodova da učinci djelovanja moraju biti manji od otpornosti konstrukcije ($E_d \leq R_d$) može se napisati:

$$\gamma_{dem} \cdot \text{seizmički zahtjev (seismic demand)} \\ \leq \frac{1}{\gamma_{cap}} \cdot \text{kapacitet (capacity)}$$

Seizmički zahtjev predstavlja učinke djelovanja na konstrukciju, što je dano spektrom određenog potresa ili spektrom propisanim u tehničkom propisu ili normi.

Kapacitet je otpornost konstrukcije koja se dobije metodom postupnoga guranja.

U posljednjoj su nejednadžbi koeficijenti sigurnosti za djelovanja na konstrukciju γ_{dem} i otpornost konstrukcije

γ_{cap} dani provizorno, u skladu s uvedenim obilježavanjem u svim konstrukcijskim eurokodovima, i oni su veći od jedinice.

Iz točke 4.3.3. norme EN 1998-1: 2004 navodimo objašnjenje spomenutih pojmova.

4.3.3.4.2.3 Krivulja kapaciteta

Odnos između ukupne poprečne sile u nivou temelja i kontroliranog pomaka (*the capacity curve*) treba biti određen metodom postupnoga guranja za vrijednosti kontroliranih pomaka koje se kreću između nule i 150 % od vrijednosti ciljanog pomaka (*the target displacement*), definiranog u točki 4.3.3.4.2.6 norme.

4.3.3.4.2.6 Ciljani pomak

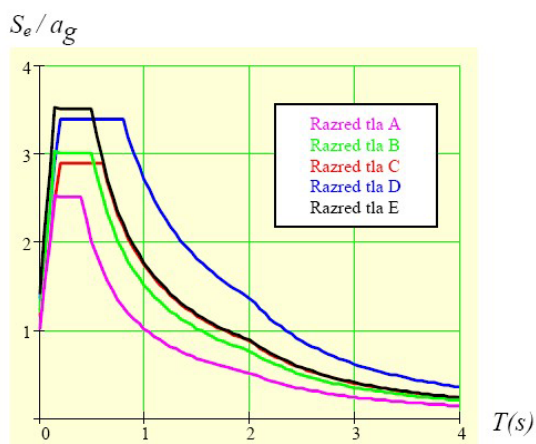
Ciljani se pomak definira kao seizmički zahtjev (*the seismic demand*) proizišao iz elastičnog spektra odziva (*the elastic response spectrum*) definiranog u točki 3.2.2.2 norme, a u zavisnosti od pomaka ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode.

Dodatak: Obavijesni dodatak B Eurokoda 8-1 [14] opisuje proceduru određivanja ciljanog pomaka iz elastičnog spektra odziva.

2 Definiranje seizmičkog opterećenja

Prije same metode N2 potrebno je definirati seizmičko opterećenje. Teritorij države u kojoj će se primjenjivati europska norma EN 1998-1: 2004 [14] treba podijeliti u seizmička područja (*seismic zones*) ovisno o tektonskim karakteristikama tih područja u odnosu na njihovu lokalnu seizmičku aktivnost u prošlosti, što se naziva lokalnom opasnošću. U sklopu svakoga seizmičkog područja u nacionalnom se dodatku utvrđuje konstantna vrijednost proračunskog ubrzanja α_g u tlu razreda A. Ta uvedena najveća vrijednost ubrzanja α_g predstavlja dovoljan parametar opisa jakosti seizmičkog događaja.

Kao što je u uvodu rečeno postoji nekoliko mogućnosti definiranja seizmičkih utjecaja na konstrukciju. U sklopu Eurokoda 8-1 za linearni se proračun konstrukcija (metodom ekvivalentnoga statičkog djelovanja) seizmičko opterećenje definira primjenom zadanih spektara odziva. Horizontalna gibanja tla na površini Zemlje u potresu modeliraju se elastičnim spektrima ubrzanja podloge ovisnima o spomenutim seizmičkim područjima i razredima tla. Horizontalna seizmička djelovanja predstavljena su s dvije međusobno okomite neovisne komponente koje su dane istim spektrom odziva, a treća je komponenta u vertikalnom pravcu i ima svoj poseban spektar odziva.

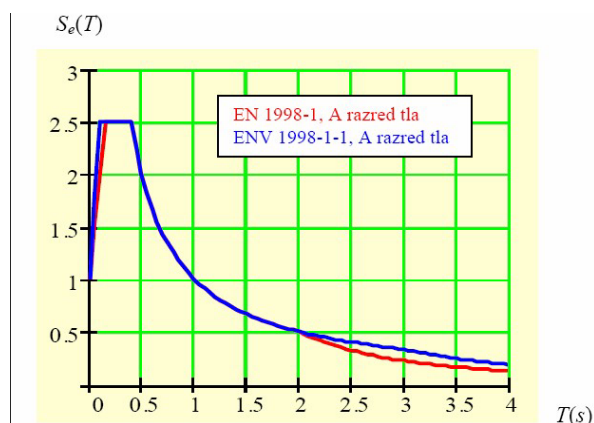


Slika 1. Elastični spektar odziva $S_e(T)$ za sve razrede temeljnog tla i $\zeta = 5\%$ (spektar tipa 1)

Elastični spektar odziva $S_e(T)$ definira se analitički za četiri područja perioda vibracija sustava, te modificira sukladno razredima tla, za koje su u Eurokodu 8-1 dani svi potrebni parametri. Za vrijednosti površinske magnitude veće od 5,5 elastični spektri su nazvani spektrima tipa 1 (slika 1.).

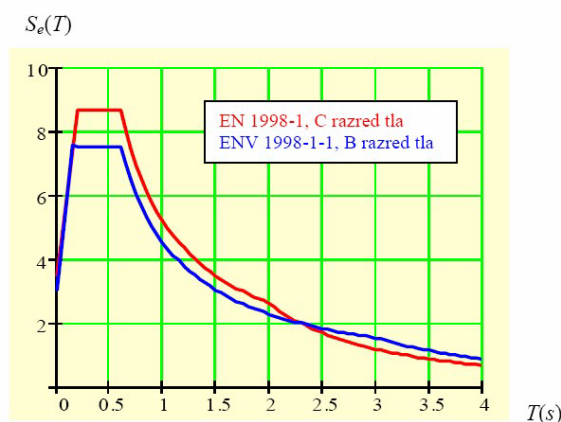
Potrebno je reći da je u Hrvatskoj trenutno vrijedeća prednorma HRN ENV 1998-1-1, koja se razlikuje od europske norme EN 1998-1: 2004. Na slikama 2., 3. i 4. prikazani su elastični spektri odziva prema hrvatskoj i europskoj normi. Njihovom usporedbom uočavaju se razlike koje ovise o osnovnom periodu vibracija sustava T .

Za tla čija svojstva odgovaraju razredu A (slika 2.) i u hrvatskoj i u europskoj normi najveće vrijednosti ordinata su jednake. Za područje $T > 2$ s, vrijednosti elastičnog spektra su manje ako se primjenjuje europska norma.



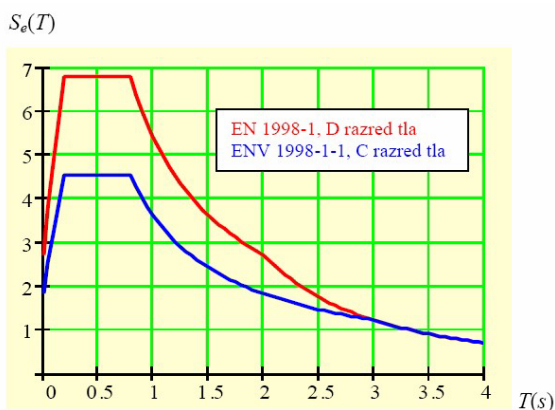
Slika 2. Elastični spektri odziva za $a_g = 0,1$ g i razred tla A

Na slici 3. prikazani su elastični spektri odziva za tlo razreda B prema hrvatskoj normi odnosno tlo razreda C prema europskoj. Uočava se da su vrijednosti elastičnog spektra prema europskoj normi do perioda $T > 2,3$ s veće, a nakon tog perioda manje od vrijednosti prema hrvatskoj normi.



Slika 3. Elastični spektri odziva za $a_g = 0,3$ g i razrede tla B odnosno C

Za tla svojstva kojih odgovaraju razredu C prema hrvatskoj normi odnosno razredu D prema europskoj (slika 4.) do perioda $T > 3$ s ordinate elastičnog spektra prema europskoj normi su bitno veće, a za $T > 3$ s vrijednosti elastičnih spektara prema europskoj i hrvatskoj normi su jednake.



Slika 4. Elastični spektri odziva za $a_g = 0,2$ g i razrede tla C odnosno D

Iz opisanih se primjera uočava da su u području kratkih i srednjih perioda ordinate elastičnog spektra odziva prema europskoj normi veće ili jednake ordinatama prema hrvatskoj normi. S druge strane, u području dugih perioda, vrijednosti spektra prema europskoj normi su jednake ili manje od vrijednosti koje se dobivaju prema hrvatskoj normi.

3 Opis metode N2

Radi boljeg razumijevanja metodu N2 prikazat ćemo u koracima [3]. Treba napomenuti da se predloženi postupci, uporabljeni u pojedinim koracima, mogu zamijeniti drugim dostupnim postupcima.

1. KORAK: PODACI

Upotrijebljen je ravninski model s više stupnjeva slobode. Osim podataka potrebnih za uobičajeni elastični proračun, potreban je i podatak o nelinearnom odnosu sila - pomak za konstrukcijske elemente opterećene monotnim opterećenjem.

Seizmički zahtjev (*seismic demand*), koji predstavlja učinke djelovanja na konstrukciju od potresa, obično se definira u obliku elastičnog spektra pseudoubrzanja S_{ae} ("pseudo" će se izostaviti u daljnjem tekstu, a objašnjenje njegova značenja dano je u [1]). Spektralna su ubrzanja dana kao funkcije prirodnih perioda konstrukcije T , a spektrom je uzet u obzir i određeni koeficijent prigušenja.

2. KORAK: SEIZMIČKO OPTEREĆENJE U FORMATU AD

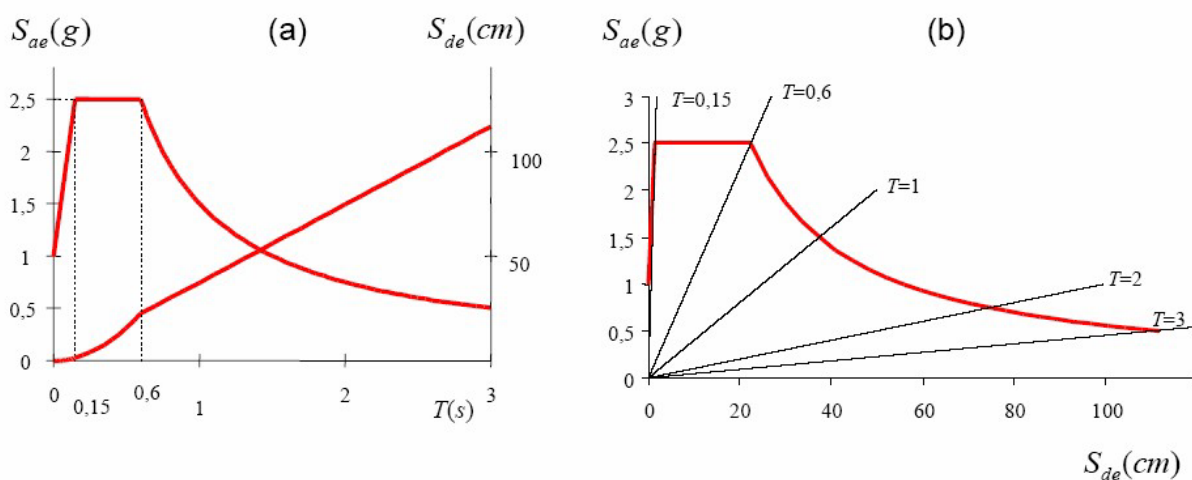
Počevši od spektralnog ubrzanja, odredit će se nelinearni spektar u formatu ubrzanje - pomak (*Acceleration - Displacement: AD*).

Za elastični sustav s jednim stupnjem slobode primjenjuje se sljedeća relacija:

$$S_{de} = \omega^2 S_{ae} = \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae} \quad (1)$$

gdje su S_{ae} i S_{de} vrijednosti iz elastičnih spektara ubrzanja i pomaka, za odgovarajući period T i određeni stupanj viskoznog prigušenja. Uobičajeni zaglađeni elastični spektar ubrzanja i odgovarajući elastični spektar pomaka prikazani su prema europskoj normi [14] na slici 5.a. Oba su spektra prikazana u formatu AD na slici 5.b.

Za nelinearni sustav s jednim stupnjem slobode i bilinearnim odnosom između sile i pomaka, spektralno ubrzanje S_a i spektralni pomak S_d mogu se odrediti na sljedeći način:



Slika 5. Elastični spektri ubrzanja S_{ae} i pomaka S_{de} : (a) tradicionalni pomak, (b) format AD

$$S_a = \frac{S_{ae}}{R_\mu} \quad (2)$$

$$S_d = \frac{\mu}{R_\mu} S_{de} = \frac{\mu}{R_\mu} \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae} = \mu \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad (3)$$

gdje je μ koeficijent duktilnosti definiran kao omjer između najvećeg pomaka i pomaka na granici popuštanja, a R_μ faktor redukcije zbog duktilnosti, tj. poradi histereznog trošenja energije kod duktilnih konstrukcija.

Za faktor redukcije R_μ poznato je u literaturi nekoliko prijedloga. U jednostavnoj će se verziji metode N2 rabiti bilinearni spektar za određivanje faktora redukcije R_μ :

$$R_\mu = (\mu - 1) \frac{T}{T_C} + 1 \quad T < T_C \quad (4)$$

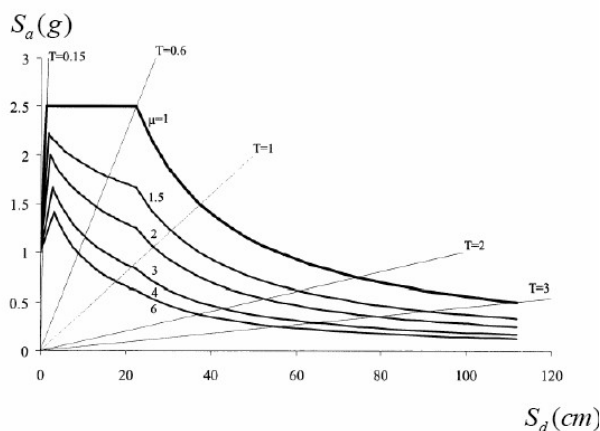
$$R_\mu = \mu, \quad T \geq T_C \quad (5)$$

gdje je T_C karakteristični period gibanja podloge. Obično se T_C definira kao prijelazni period za koji segment konstantnog ubrzanja spektra odziva (područje kratkih perioda) prelazi u segment s konstantnom brzinom (područje srednjih perioda).

Iz jednadžbi (3) i (5) uočava se da u području srednjih i dugih perioda vrijedi pravilo jednakih pomaka, tj. pomak neelastičnog sustava jednak je pomaku odgovarajućega elastičnog sustava s istim periodom:

$$S_d = S_{de}$$

Počevši od elastičnog spektra, prikazanog na slici 5.b i primjenom jednadžbi (2) do (5), može se dobiti zahtijevani spektar u formatu AD (slika 6.) za konstantne koeficijente duktilnosti μ .



Slika 6. Zahtijevani spektar za konstantne vrijednosti koeficijenta duktilnosti u formatu AD, normalizirano s 1,0 g [3]

3. KORAK: METODA POSTUPNOGA GURANJA (PUSHOVER)

Metoda postupnoga guranja provodi se tako da se konstrukcija podvrgne monotono rastućim bočnim silama, koje predstavljaju inercijske sile što će se javiti u konstrukciji pri pomicanju podloge. Postupnim povećanjem bočnih sila pojedini konstrukcijski elementi počinju redom popuštati. Kao posljedica tih pojava, konstrukcija doživljava smanjivanje krutosti.

Uporabom metode postupnog guranja može se odrediti karakteristični nelinearni odnos sila – pomak sustava s više stupnjeva slobode. U principu, može se odabrati bilo koja sila i pomak. Ovdje će poprečna sila V u razini temelja (*base shear*) predstavljati silu, a pomak vrha zgrade D_i (*top displacement*) predstavljat će pomak.

Odabir prikladne raspodjele bočnog opterećenja važan je korak unutar metode postupnog guranja. U metodi N2, vektor bočnog opterećenja P koji se primjenjuje u metodi postupnog guranja, određen je na ovaj način:

$$P = p \Psi = p m \Phi \quad (6)$$

Intenzitet bočnih opterećenja određuje se s vrijednošću p . Raspodjela bočnih opterećenja dana je s Ψ i povezana je s pretpostavljenim oblikom pomaka Φ .

Iz jednadžbe (6) slijedi da je bočna sila na i -tom katu proporcionalna komponenti Φ_i pretpostavljenog oblika pomaka Φ , pomnožena s vrijednošću mase kata m_i :

$$P_i = p m_i \Phi_i \quad (7)$$

Takav pristup za određivanje raspodjele bočnog opterećenja ima fizikalnu podlogu: ako je pretpostavljeni oblik pomaka točan i nepromjenljiv tijekom pomicanja podloge, tada bi raspodjela bočnih sila bila jednaka raspodjeli efektivnih potresnih sila p_{ef} . Nadalje, uporabom bočne sile prema jednadžbi (6), prijelaz sa sustava s više stupnjeva slobode na ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode i obratno (koraci 4 i 6 u nastavku) proizlazi čisto matematički.

Na ovaj se način određuje odnos poprečne sile u nivou temelja V prema pomaku vrha zgrade D_i .

4. KORAK: EKVIVALENTNI MODEL SUSTAVA S JEDNIM STUPNJEM SLOBODE I DIJAGRAM KAPACITETA

Kod metode N2 potresni je zahtjev određen uporabom spektra odziva, a poznato je da su takvi spektri dobiveni za sustav s jednim stupnjem slobode. Zbog toga bi i konstrukciju trebalo modelirati ekvivalentnim sustavom s jednim stupnjem slobode i uspoređivati takva dva sustava (od kojih je svaki s jednim stupnjem slobode).

Polazište je jednadžba gibanja ravninskog modela s više stupnjeva slobode koja eksplicitno uzima u obzir samo bočno translacijske stupnjeve slobode (pojam zgrade koja se posmično deformira - engl. *shear building*):

$$\mathbf{m} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{R} = -\mathbf{m} \mathbf{1} a \quad (8)$$

gdje su \mathbf{u} i \mathbf{R} vektori koji predstavljaju pomake i unutarnje sile, $\mathbf{1}$ je jedinični vektor, simbol "a" je ubrzanje podloge kao funkcija vremena. Zbog pojednostavljenja, u ovome izrazu prigušenje nije uzeto u obzir. Utjecaj prigušenja bit će uključen u proračunskom spektru.

Pretpostavit će se da je oblik pomaka Φ nepromjenljiv, tj. da se ne mijenja za odziva konstrukcije zbog pomicanja podloge. To je osnovna i najkritičnija pretpostavka unutar samog postupka. Vektor pomaka \mathbf{u} definiran je sljedećim izrazom:

$$\mathbf{u} = \Phi D_t \quad (9)$$

gdje je D_t pomak vrha zgrade u ovisnosti o vremenu. Vektor Φ je zbog jednostavnosti normaliziran tako da je vrijednost na vrhu zgrade jednaka jedinici.

Budući da su unutarnje sile \mathbf{R} jednake statičkim vanjskim opterećenjima \mathbf{P} ,

$$\mathbf{P} = \mathbf{R} \quad (10)$$

uvrštavanjem jednadžbi (6), (9) i (10) u jednadžbu (8), i množenjem s lijeve strane s transponiranim vektorom Φ^T , dobiva se:

$$\Phi^T \mathbf{m} \Phi \ddot{D}_t + \Phi^T \mathbf{m} \Phi p = -\Phi^T \mathbf{m} \mathbf{1} a \quad (11)$$

Nakon množenja i dijeljenja lijeve strane s $\Phi^T \mathbf{m} \mathbf{1}$, dobije se jednadžba gibanja ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode:

$$m^* \ddot{D}^* + F^* = -m^* a \quad (12)$$

gdje je m^* ekvivalentna masa sustava s jednim stupnjem slobode:

$$m^* = \Phi^T \mathbf{m} \mathbf{1} = \sum m_i \Phi_i \quad (13)$$

a D^* i F^* su pomaci i sile ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode:

$$D^* = \frac{D_t}{\Gamma} \quad (14)$$

$$F^* = \frac{V}{\Gamma} \quad (15)$$

V je poprečna sila u nivou temelja sustava s više stupnjeva slobode:

$$V = \sum P_i = \Phi^T \mathbf{m} \mathbf{1} p = p \sum m_i \Phi_i = p m^* \quad (16)$$

Konstanta Γ naziva se faktor transformacije i kontrolira prijelaz sustava s više stupnjeva slobode na sustav s jednim stupnjem slobode i obratno. Ona ima sljedeću vrijednost:

$$\Gamma = \frac{\Phi^T \mathbf{m} \mathbf{1}}{\Phi^T \mathbf{m} \Phi} = \frac{\sum m_i \Phi_i}{\sum m_i \Phi_i^2} = \frac{m^*}{\sum m_i \Phi_i^2} \quad (17)$$

Valja napomenuti da je pretpostavljeni oblik pomaka Φ normaliziran: vrijednost na krovnoj razini jednaka je jedinici. Isto tako treba napomenuti da se može upotrijebiti bilo koji razumni oblik Φ . Kao poseban slučaj, može se pretpostaviti prvi elastični vlastiti oblik.

Može se primijetiti da se ista konstanta Γ rabi za transformaciju i pomaka i sila, jednadžbe (14) i (15). Kao posljedica toga, odnos sila – pomak određen za sustav s više stupnjeva slobode ($V - D_t$ dijagram) primijenjen je i na sustav s jednim stupnjem slobode ($F^* - D^*$ dijagram), pod uvjetom da su i sila i pomak podijeljeni s Γ . To se postiže mijenjanjem mjerila na obje osi sila – pomak dijagrama (slika 9.). Uzima se da je početna krutost k_{init}^* ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode jednaka krutosti sustava s više stupnjeva slobode koja je definirana sa $V - D_t$ dijagramom.

Kako bi se odredila pojednostavnjena elastična – idealno plastična veza između sile i pomaka za ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode, mora se upotrijebiti inženjerska prosudba. U dodatku B Eurokoda 8 [14] za to postoji određena uputa.

Postupak koji se primjenjuje u metodi N2 zahtijeva da krutost nakon postignute granice popuštanja ima nultu vrijednost.

Elastični period T^* idealiziranog sustava s jednim stupnjem slobode, s bilinearnim odnosom sile i pomaka, ima vrijednost:

$$T^* = \frac{2\pi}{\omega^*} = 2\pi \sqrt{\frac{m^* D_y^*}{F_y^*}} \quad (18)$$

gdje su F_y^* i D_y^* redom čvrstoća i pomak na granici popuštanja.

Na kraju se dobije dijagram kapaciteta (*capacity diagram*) u formatu AD dijeljenjem dijagrama sila u sila – deformacija ($F^* - D^*$) s ekvivalentnom masom m^* :

$$S_a = \frac{F^*}{m^*} \quad (19)$$

5. KORAK: POTRESNI ZAHTJEV ZA EKVIVALENTNI SUSTAV S JEDNIM STUPNJEM SLOBODE

Potresni zahtjev za ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode može se odrediti grafičkim postupkom prikazanim na slici 7.a za konstrukcije sa srednjim i dugim periodima. Za konstrukcije s kratkim periodima vidi sliku 7.b. I zahtijevani spektar i dijagram kapaciteta crtani su na istoj slici 7. Presjecište radijalnog pravca koji odgovara elastičnom periodu T^* idealiziranog bilinearnog sustava, s elastičnim zahtijevanim spektrom, određuje zahtijevano ubrzanje (čvrstoću) S_{ae} potrebno za elastično ponašanje i odgovarajući zahtijevani elastični pomak S_{de} .

Ubrzanje na granici popuštanja S_{ay} predstavlja i zahtijevano ubrzanje i kapacitet neelastičnog sustava. Faktor redukcije R_μ može se odrediti kao omjer između ubrzanja koja odgovaraju elastičnom i neelastičnom sustavu:

$$R_\mu = \frac{S_{ae}(T^*)}{S_{ay}} \quad (20)$$

Proračunsko ubrzanje S_{ad} redovito je manje od ubrzanja na granici popuštanja S_{ay} (slika 7.).

Ako je period T^* veći ili jednak T_C , zahtijevani neelastični pomak S_d jednak je zahtijevanom elastičnom pomaku S_{de} (jednadžbe (3) i (5) i slika 7.). Iz trokuta na slici 7. slijedi da je zahtijevana duktilnost, definirana kao omjer $\mu = S_d / D_y^*$, jednaka R_μ :

$$S_d = S_{de}(T^*) \quad T^* \geq T_C \quad (21)$$

$$\mu = R_\mu \quad (22)$$

Ako je elastični period sustava manji od T_C , zahtijevana duktilnost može se proračunati iz preoblikovane jednadžbe (4):

$$\mu = (R_\mu - 1) \frac{T_C}{T^*} + 1 \quad T^* < T_C \quad (23)$$

Zahtijevani pomak može se odrediti ili iz definicije duktilnosti ili iz jednadžbi (3) i (23):

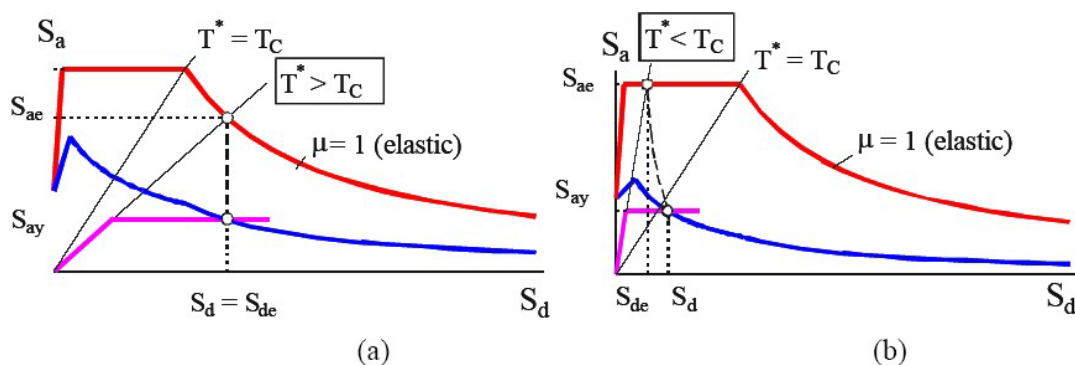
$$S_d = \mu D_y^* = \frac{S_{de}}{R_\mu} \left(1 + (R_\mu - 1) \frac{T_C}{T^*} \right) \quad (24)$$

U oba slučaja ($T^* \geq T_C$ i $T^* < T_C$) neelastični zahtjev, u smislu ubrzanja i pomaka, odgovara presječnoj točki dijagrama kapaciteta sa zahtijevanim spektrom koji odgovara zahtijevanoj duktilnosti μ . U ovoj su točki koeficijent duktilnosti određen iz dijagrama kapaciteta i koeficijent duktilnosti povezan s presjekom zahtijevanog spektra jednaki.

6. i 7. KORAK: GLOBALNI I LOKALNI POTRESNI ZAHTJEV - SUSTAV S VIŠE STUPNJEVA SLOBODE

Zahtijevani pomak sustava s jednim stupnjem slobode S_d transformira se u globalni zahtijevani najveći pomak vrha zgrade D_i sustava s više stupnjeva slobode uporabom jednadžbe (14). Taj najveći pomak vrha zgrade D_i predstavlja ciljani pomak (*target displacement*) iz dodatka B Eurokoda 8 [14].

Lokalni potresni zahtjev (npr. relativni pomaci katova, rotacija čvorova) može se također odrediti pomoću proračuna postupnog guranja. Zbog monotono rastućih bočnih opterećenja s nepromijenjenom funkcijom raspodjele (kao u 3. koraku), konstrukcija se "gura" sve dok ne dostigne ciljani pomak D_i određen u 6. koraku. Pretpostavlja se da raspodjela pomaka kroz čitavu konstrukciju kod statičkog proračuna postupnog guranja približno odgovara onoj koja bi se dobila dinamičkim proračunom. Treba napomenuti da D_i predstavlja prosječnu vrijednost za primijenjeno potresno opterećenje i da postoji znatno rasipanje oko prosječne vrijednosti. Zbog toga je prikladno



Slika 7. Elastični i neelastični zahtijevani spektri u odnosu na dijagram kapaciteta za: a) konstrukcije sa srednjim i dugim periodima; b) konstrukcije s kratkim periodima

spitati moguće ponašanje konstrukcije zbog ekstremnih slučajeva opterećenja koja prelaze proračunske vrijednosti. To se može postići povećanjem vrijednosti ciljanog pomaka, kao što je propisano u točki 4.3.3.4.2.3. Eurokoda 8-1 [14].

8. KORAK: PROCJENA PONAŠANJA (ANALIZA OŠTEĆENJA)

U posljednjem se koraku očekivano ponašanje može procijeniti uspoređivanjem potresnih zahtjeva (globalnih i lokalnih), određenih u 7. koraku, s kapacitetima odgovarajućih razina ponašanja. Određivanje potresnog kapaciteta ovdje nije obrađeno. Globalno ponašanje može se vidjeti uspoređivanjem kapaciteta pomaka i pomaka prema seizmičkom zahtjevu.

4 Numerički primjer

Kao primjer, prikazat će se odziv četverokatnoga armiranobetonskog okvira koji je podvrgnut trima razinama pomicanja podloge. Građevina u prirodnoj veličini ispitana je pseudo-dinamički u *European Laboratory for Structural Assessment (ELSA)* Udruženoga istraživačkog centra Europske komisije iz Ispre (u Italiji). Rezultati ispitivanja iskorišteni su za vrednovanje matematičkog modela.

Građevina je bila projektirana prema europskoj prednormi [15], kao konstrukcija s velikom duktilnošću za vršno ubrzanje podloge (*peak ground acceleration*) od 0,3 g. Mase katova, počevši od dolje prema gore, imaju vrijednosti 87, 86, 86 i 83 tone, a rezultirajući *base shear* koeficijent ima vrijednost 0,15. Detaljniji opis konstrukcije i matematičkog modela mogu se naći u literaturi.

$$m = \begin{bmatrix} 87 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 86 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 86 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 83 \end{bmatrix}; \quad B. S. = 0,15$$

Proračun će se provesti za tri razine pomicanja podloge, kako bi se provjerila različita ponašanja. Pomicanje podloge definirano je elastičnim spektrom odziva ubrzanja prema slici 5.a, koji je normaliziran s vršnim ubrzanjima a_g koja imaju vrijednosti 0,6 g, 0,3 g (proračunske vrijednosti) i 0,15 g.

Pretpostavlja se linearni oblik pomaka:

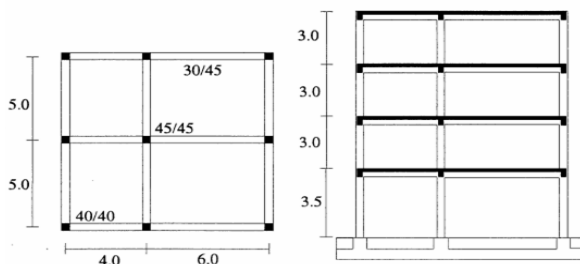
$$\Phi^T = [0,28 \quad 0,52 \quad 0,76 \quad 1,00]$$

Oblik raspodjele bočnih sila dobiva se iz jednadžbe (6) i normalizira tako da sila na krovu ima jediničnu vrijednost, tako da bočne sile po katovima imaju sljedeće vrijednosti:

$$\frac{87 \cdot 0,28}{83} = 0,293; \quad \frac{86 \cdot 0,52}{83} = 0,539;$$

$$\frac{86 \cdot 0,76}{83} = 0,787; \quad \frac{83 \cdot 1}{83} = 1,000$$

$$P^T = [0,293 \quad 0,539 \quad 0,787 \quad 1,000]$$



Slika 8. Primjer konstrukcije

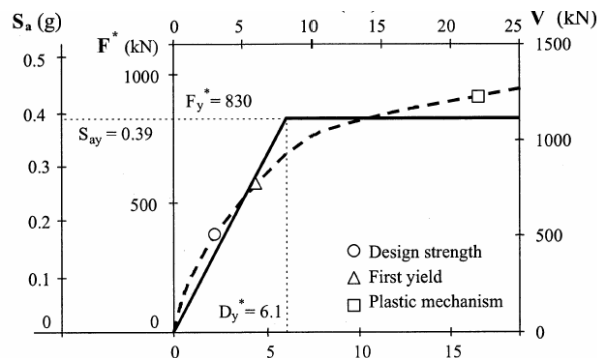
S ovakvim oblikom raspodjele bočnih sila, program DRAIN-2DX [13] daje kao rezultat vezu ukupne sile u nivou temelja V i pomaka vrha zgrade D_t , što je prikazano na slici 9. isprekidanom krivuljom.

Sustav s više stupnjeva slobode transformira se u sustav s jednim stupnjem slobode uporabom jednadžbi (14) i (15). Prema jednadžbama (13) i (17) ekvivalentna masa m^* i faktor transformacije Γ imaju sljedeće vrijednosti:

$$m^* = 87 \cdot 0,28 + 86 \cdot 0,52 + 86 \cdot 0,787 + 83 \cdot 1 = 24,36 + 44,72 + 65,36 + 83 = 217t$$

$$\Gamma = \frac{217}{87(0,28)^2 + 86(0,52)^2 + 86(0,787)^2 + 83(1)^2} = 1,34$$

Na slici 9. ista krivulja definira oba odnosa: $V - D_t$ za sustav s više stupnjeva slobode i $F^* - D^*$ odnos ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode. Međutim, mjerila na osima su različita za ova dva sustava. Faktor između dva mjerila je prema jednadžbama (14) i (15) jednak $\Gamma = 1,34$.



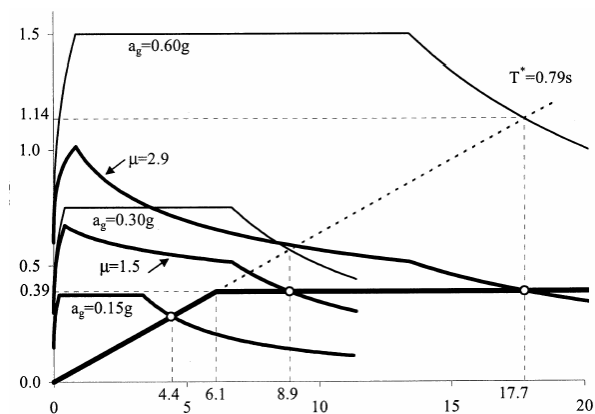
Slika 9. Krivulja postupnoga guranja i odgovarajući dijagram kapaciteta za armiranobetonski okvir s četiri kata (uočiti različita mjerila) [3]

Bilinearna idealizacija krivulje postupnoga guranja prikazana je na slici 9. punom crtom te se mogu očitati vrijednosti otpornosti i pomaka na granici popuštanja: $F_y^* = 830$ kN i $D_y^* = 6,1$ cm. Elastični se period dobije iz jednadžbe (18):

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* D_y^*}{F_y^*}} = 0,79 \text{ s}$$

Dijagram kapaciteta (slika 9.) dobije se dijeljenjem sila F^* u idealiziranom *pushover* dijagramu s vrijednošću ekvivalentne mase, jednadžba (19). Ubrzanje na granici popuštanja ima vrijednost:

$$S_{ay} = \frac{F_y^*}{m^*} = \frac{830}{217} = 3,82 \text{ ms}^{-2} = 0,39 \text{ g}$$



Slika 10. Zahtijevani spektar za tri razine pomicanja tla i dijagram kapaciteta za ovaj primjer [3]

Dijagram kapaciteta i zahtijevani spektar uspoređeni su na slici 10. Za dobivanje neelastičnoga zahtijevanog spektra upotrijebljene su jednadžbe od (1) do (6). U slučaju neograničenoga elastičnog ponašanja konstrukcije, potresni zahtjev predstavljen je presjecištem elastičnoga zahtijevanog spektra i pravca koji odgovara elastičnom periodu ($T^* = 0,79$ s) ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode. Vrijednosti $S_{ae} = 1,14$ g i $S_{de} = 17,7$ cm dobivene su za slučaj najjačeg pomicanja podloge $a_g = 0,6$ g). Faktor redukcije R_μ ima vrijednost, jednadžba (20):

$$R_\mu = \frac{S_{ae}}{S_{ay}} = \frac{1,14 \text{ g}}{0,39 \text{ g}} = 2,9$$

Period ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode $T^* = 0,79$ veći je od $T_C = 0,6$ te se stoga primjenjuje pravilo jednakih pomaka, jednadžbe (21) i (22):

$$\mu = R_\mu = 2,9; S_d = S_{de} = 17,7 \text{ cm}$$

Potresni zahtjev za ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode grafički je predstavljen presjecištem krivulje kapaciteta sa zahtijevanim spektrom za $\mu = 2,9$.

U sljedećem koraku zahtijevani pomak ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode transformira se natrag u pomak vrha zgrade (*target displacement*) sustava s više stupnjeva slobode, jednadžba (14):

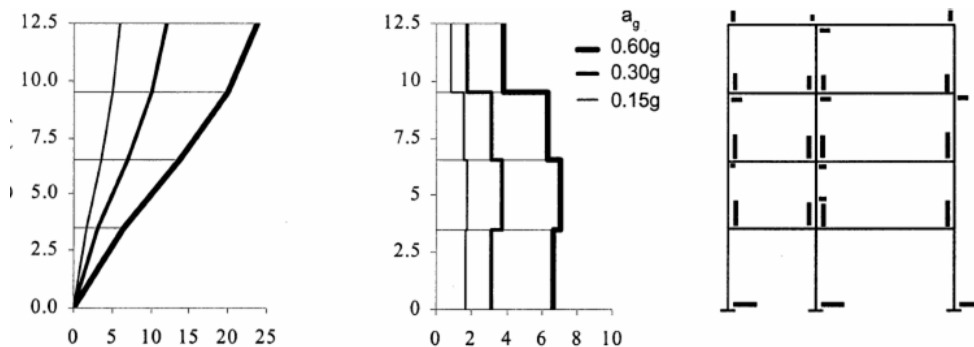
$$D_t = \Gamma \cdot D^* = 1,17 \cdot 17,7 = 23,7 \text{ cm}$$

Proračun postupnim guranjem proveden na sustavu s više stupnjeva slobode, uz pomak vrha zgrade u vrijednosti D_t , daje oblik pomaka za cijelu konstrukciju (po visini), lokalne potresne zahtjeve u smislu relativnih pomaka katova i rotacije čvorova, kao što je prikazano na slici 11. Prikazane su anvelope rezultata koji su dobiveni prilikom postupnoga guranja modela s lijeva na desno i obratno. Rezultati dobiveni ispitivanjem i iz nelinearnog dinamičkog proračuna su slični.

U slučaju kada je $a_g = 0,3$ g postupak je identičan kao za $a_g = 0,6$ g i daje sljedeće rezultate: $S_d = S_{de} = 8,9$ cm; $\mu = 1,5$ i $D_t = 11,9$ cm.

Za $a_g = 0,15$ g dobiva se: $S_{de} = 4,4$ cm i $D_t = 5,9$ cm.

Idealizirana elastoplastična konstrukcija ostaje u elastičnom području. Izvorna krivulja postupnog guranja (slika 9.) ukazuje da je zahtijevani pomak približno jednak pomaku pri prvoj plastifikaciji.



Slika 11. Pomaci, relativni pomaci katova i rotacije u elementima vanjskog okvira (rotacije su proporcionalne duljinama oznaka; najveća rotacija ima vrijednost 2,2 %; naznačeni su samo elementi koji se plastificiraju) [3]

5 Usporedba metode N2 s nelinearnim statičkim postupkom u FEMA 273 [17] i s metodom spektralnog kapaciteta u ATC 40 [16]

U ovom poglavlju će se ukratko usporediti metoda za određivanje ciljanog pomaka N2, koja je propisana u Eurokodu 8-1, s postupcima propisanim u SAD-u: nelinearnim statičkim postupkom prema FEMA 273 [17] i metodom spektralnog kapaciteta u ATC 40 [16].

I u [17] i u [16] radi se i na razvijanju novih metoda nelinearnog seizmičkog proračuna konstrukcija.

- Metoda postupnoga guranja

U [17] i u [16] predloženo je nekoliko različitih raspodjela bočnog opterećenja. U metodi N2 raspodjela bočnog opterećenja određena je jednadžbom (6). Međutim, pretpostavljanjem odgovarajućeg oblika pomaka može se dobiti bilo koja raspodjela bočnog opterećenja, uključujući i one u [17] i u [16].

- Transformacija u ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode

U [17] pomaci i sile transformiraju se s pomoću faktora modifikacije C_0 . Faktor transformacije Γ u metodi N2 se određuje prema istoj jednadžbi [jednadžba (17)], što znači da ako se pretpostavi isti oblik pomaka, u obje metode primjenjuje se isti faktor transformacije. U [16] faktor transformacije za pomake jest faktor udjela za prvi oblik oscilacija PF_1 , a oblik pomaka odgovara prvom vlastitom obliku. Taj faktor PF_1 predstavlja poseban slučaj faktora C_0 i Γ , primijenjenih u [17] i metodi N2, u kojima se, osim prvoga vlastitog oblika, mogu pretpostaviti i drugi oblici pomaka.

U metodi spektralnog kapaciteta sile sustava s više stupnjeva slobode izravno se transformiraju u ubrzanja sustava s jednim stupnjem slobode, pri čemu je faktor transformacije α_1 . U metodi N2 ova se transformacija radi u dva koraka, jednadžbe (15) i (19). Rezultirajući faktor transformacije jednak je umnošku $m \cdot \Gamma$, što je jednako α_1 ako se za oblik pomaka pretpostavi prvi vlastiti oblik. Dakle, transformacija u [16] jest poseban slučaj transformacije u metodi N2.

Pretpostavljeni oblik pomaka u metodi N2 kontrolira i raspodjelu bočnih sila. Posljedica toga jest da se vrijednost Γ (17) dobiva čisto matematički i nisu potrebne dodatne aproksimacije. To nije slučaj u [17] a niti u [16], gdje raspodjela bočnih sila i oblik pomaka nisu povezani.

- Određivanje zahtijevanog pomaka

U [17] zahtijevani se neelastični pomak određuje iz zahtijevanoga elastičnog pomaka uz uporabu četiri faktora

modifikacije. Faktor C_0 već je objašnjen. Faktor C_1 uvodi razliku u zahtijevanim pomacima za neelastični i linearni odziv građevina s kratkim početnim periodom oscilacija i ima isti učinak kao faktor redukcije u predloženoj verziji metode N2 (4) i (5). U [17] uvode se i dva dodatna faktora modifikacije: C_2 i C_3 . Oni uzimaju u obzir povećanje zahtijevanog pomaka ako histerezne petlje pokazuju značajno križanje (C_2) i ako je nagib nakon popuštanja negativan (C_3). U slučaju građevina s relativno stabilnim i punim histereznim petljama jest $C_2 = 1$, a u slučaju pozitivnog nagiba nakon popuštanja $C_3 = 1$. Ti efekti nisu razmatrani u predloženoj verziji metode N2. Međutim, mogu se lako uzeti u obzir množenjem zahtijevanog pomaka s odgovarajućim faktorom modifikacije ili dijeljenjem faktora redukcije (4) i (5) s odgovarajućim faktorom modifikacije.

Određivanje seizmičkog zahtjeva u metodi spektralnog kapaciteta u [16] bitno se razlikuje. Seizmički se zahtjev određuje iz ekvivalentnoga elastičnog spektra, a neelastično ponašanje građevine uzima se u obzir koristeći se ekvivalentnim prigušenjem i periodom.

- Komentar

Nelinearni statički postupak u [17] i predložena jednostavna verzija metode N2 vrlo su slični i mogu postići jednake rezultate, uz uvjet da se pretpostavi isti oblik pomaka i bočnog opterećenja. Glavna je razlika u jednostavnom vizualnom predstavljanju koje pruža metoda N2. U [16] prijelaz sa sustava s više stupnjeva slobode na sustav s jednim stupnjem slobode usporediv je s druge dvije metode. Međutim, pretpostavljeni oblik pomaka, koji je glavna vrijednost u jednadžbi za transformaciju sustava, ograničen je na prvi vlastiti oblik. Stoga je prijelaz sa sustava s više stupnjeva slobode na sustav s jednim stupnjem slobode u [16] ekvivalentan transformaciji u [17] i metodi N2 jedino u posebnom slučaju. Nadalje, u metodi N2 pretpostavljeni oblik pomaka i raspodjela bočnih sila povezani su, što nije slučaj u [17] niti u [16].

6 Zaključak

Metoda N2 može se smatrati okvirom koji povezuje proračun metodom postupnog guranja s proračunom s pomoću spektra odziva. Ona predstavlja praktičan postupak za procjenu ponašanja konstrukcija različitih karakteristika. Formulacija metode u formatu ubrzanje – pomak omogućava vizualnu interpretaciju postupka i odnosa između osnovnih vrijednosti koje utječu na potresni odziv. Rezultati dobiveni uporabom te metode dovoljno su točni ako konstrukcija pretežno oscilira u prvome obliku oscilacija.

Za sada je primjena metode N2 ograničena na ravninsku analizu konstrukcija. Neelastični zahtijevani spektri, upo-

trijebjeni u predloženoj jednostavnoj verziji, nisu prikladni za razmatranja pri pomicanju tla u blizini epicentra, za lokacije s mekim tlima, za histerezne petlje sa značajnim križanjem ili znatnim gubitkom krutosti i/ili čvrstoće te za sustave s malom čvrstoćom.

Odziv konstrukcija koje se neelastično deformiraju od središnje je važnosti u potresnom inženjerstvu. Moderni postupci proračuna konstrukcija, uz podršku suvremenih računalnih programa i strogost suvremenih norma, sigurno jamče bolje razumijevanje ponašanja konstrukcije, a s

time u svezi i otpornije građevine na seizmička opterećenja.

Međutim, u praksi je primijećeno da postoji nesklad između znanstvenih postignuća u teorijskom i eksperimentalnom istraživanju ponašanja konstrukcija zgrada u potresu sa stvarnim ponašanjem konstrukcija u potresu. Za praktičnu primjenu znanstvenih spoznaja treba imati kvalitetne norme i zakone o građenju. Eurokod 8 je znanstveno utemeljen, a njegova primjena bi trebala pridonijeti dobrom ponašanju konstrukcija u seizmičkim uvjetima.

Istraživanja izložena u ovome radu provedena su u sklopu znanstvenoistraživačkog projekta Razvoj konstrukcija povećane pouzdanosti s obzirom na potrese, koji se izvodi uz potporu Ministarstva znanosti i tehnologije Republike Hrvatske (broj projekta: 114-0821466-1470).

LITERATURA

- [1] Čaušević, M.: *Dinamika konstrukcija – Diskretni sustavi*, Školska knjiga, Zagreb, 2005.
- [2] Čaušević, M.: *Potresno inženjerstvo*, Sveučilišni udžbenik, Školska knjiga, Zagreb, 2001.
- [3] Fajfar, P., *A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design*, EARTHQUAKE SPECTRA 16, No. 3, pp 573-592, 2000.
- [4] Fajfar, P.: *Structural Analysis in Earthquake Engineering - A Breakthrough of Simplified Non-linear Methods*, 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, paper reference 843, Elsevier Science, 2002.
- [5] Fajfar, P.; Gašperšić, P.: *The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings*, Earthquake engineering and structural dynamics 25, 31-46, 1996.
- [6] Chopra, A. K.: *Dynamics of structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Second edition, Prentice Hall, New Jersey, 2001.
- [7] Chopra, A. K.: *Dynamics of structures: A Primer*, Second Edition, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California, 2005.
- [8] Chopra, A. K.; Goel, R. K.: *A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings*, Earthquake engineering and structural dynamics 31, pp. 561-582, 2002.
- [9] Chopra, A. K., and Chintanapakdee, C.: *Inelastic deformation ratios for design and evaluations of structures: Single-degree-of-freedom bilinear systems*, Journal of structural engineering 130 (9), pp. 1309-1319, 2004.
- [10] Goel, R. K.; Chopra, A. K.: *Evaluation of Modal and FEMA Pushover Analyses – SAC Buildings*, Earthquake spectra 20, No. 1, 2004, pp. 225-254.
- [11] Goel, R. K.: *Evaluation of Modal and FEMA Pushover Procedures Using Strong-Motion Records of Buildings*, Earthquake spectra 21, No. 3, 2005, pp. 653-684.
- [12] Saiidi, M.; Sozen, M. A.: *Simple nonlinear seismic analysis of R/C structures*, Journal of structural division 107, ASCE, pp. 937-952, 1981.
- [13] Prakash, V.; Powel, G. H.; Campbell, S.: *DRAIN-2DX Base program description and user guide*, Version 1.10, Report No. UCB/SEMM-93/17&18, University of California, Berkeley, CA., 1993.
- [14] Eurocode 8 – *Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, EN 1998-1: 2004, CEN, Brussels, November 2004.
- [15] Eurocode 8 – *Design provisions for earthquake resistance of structures – Part 1-1: General rules – Seismic actions and general requirements for structures*, ENV 1998-1-1, CEN, Brussels, May 1994.
- [16] Applied Technology Council (ATC), *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*, Report No. ATC-40, Redwood City, California, 1996.
- [17] Federal Emergency Management Agency (FEMA), *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*, FEMA 273 i *NEHRP Commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*, FEMA 274, Washington, D.C., 1997.