

# Seizmički proračun predgotovljenih betonskih konstrukcija

---

**Meštrović, Darko; Simmoneti, Danijel**

*Source / Izvornik:* **Građevinar, 2010, 62, 991 - 1000**

**Journal article, Published version**

**Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:323336>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



# Seizmički proračun predgotovljenih betonskih konstrukcija

Darko Meštrović, Danijel Simonetti

## Ključne riječi

predgotovljena betonska konstrukcija, seizmički proračun, Eurokod 8, metoda sila, metoda pomaka, usporedba metoda

## Key words

precast concrete structure, seismic analysis, Eurocode 8, force method, displacement method, comparison of methods

## Mots clés

construction préfabriquée en béton, analyse sismique, Eurocode 8, méthode des forces, méthode des déplacements, comparaison des méthodes

## Ключевые слова

предварительно изготовленная бетонная конструкция, сейсмический расчет, Eurokod 8, метод сил, метод перемещений, сравнение методов

## Schlüsselworte

vorgefertigte Betonkonstruktion, seismische Berechnung, Eurokode 8, Kraftgrößenverfahren, Verschiebungsmethode, Methodenvergleich

D. Meštrović, D. Simonetti

Pregledni rad

## Seizmički proračun predgotovljenih betonskih konstrukcija

U radu su uz osnovni opis predgotovljenih betonskih konstrukcija prikazane odredbe Eurokoda 8 za projektiranje takvih konstrukcija. Opisane su metode koje se primjenjuju na seizmičke proračune: metoda sila i metoda pomaka. Za metodu sila su navedeni proračunski koraci koji se provode, a metoda pomaka je podrobno opisana. Prikazana je usporedba primjene tih metoda. Zaključak je autora da je za seizmički proračun predgotovljenih betonskih konstrukcija prikladnija metoda pomaka.

D. Meštrović, D. Simonetti

Subject review

## Seismic analysis of precast concrete structures

After basic description of precast concrete structures, the paper continues with presentation of Eurocode 8 provisions for the design of such structures. Methods applied in seismic analysis, i.e. the force method and the displacement method, are described. Steps used in the analysis according to the force-based method are presented, and the displacement-based method is described in full detail. The comparison of practical use of these methods is given. In conclusion, the authors assert that the displacement-based method is more appropriate for the seismic design of precast concrete structures.

D. Meštrović, D. Simonetti

Ouvrage de synthèse

## Analyse sismique des constructions préfabriquées en béton

Après la description de base des constructions préfabriquées en béton, l'ouvrage continue avec la présentation des dispositions d'Eurocode 8 portant sur l'étude de ces constructions. Les méthodes utilisées dans l'analyse sismique, c'est-à-dire la méthode des forces et la méthode des déplacements, sont décrites. Les étapes utilisées dans l'analyse selon la méthode des forces sont présentées, tandis que la méthode des déplacements est décrite en détail. La comparaison de l'emploi pratique de ces méthodes est présentée. En conclusion, les auteurs affirment que la méthode des déplacements est plus appropriée pour l'étude sismique des constructions préfabriquées en béton.

Д.Мештрович, Д. Симонетти

Обзорная работа

## Сейсмический расчет предварительно изготовленных бетонных конструкций

В работе помимо основного описания предварительно изготовленных бетонных конструкций приведены положения Eurokod 8 для проектирования таких конструкций. Описаны методы, применяемые при сейсмических расчетах: метод сил и метод перемещений. По методу сил указаны проводимые расчетные шаги, а метод перемещений описан подробно. Приведено сравнение применения этих методов. Приходится к заключению, что более пригодным для сейсмического расчета предварительно изготовленных бетонных конструкций является метод перемещений.

D. Meštrović, D. Simonetti

Übersichtsarbeit

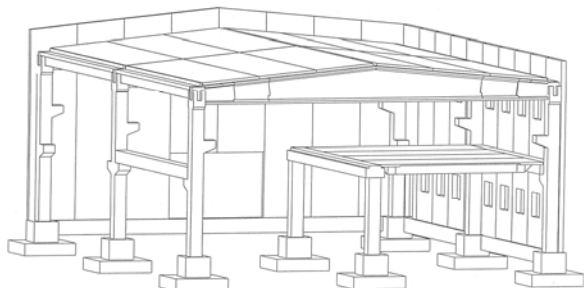
## Seismische Berechnung vorgefertigter Betonkonstruktionen

Im Artikel sind neben der Grundbeschreibung vorgefertigter Betonkonstruktionen die Verordnungen des Eurokode 8 für den Entwurf solcher Konstruktionen dargestellt. Beschrieben sind die Methoden die für seismische Berechnungen angewendet werden: Kraftgrößenverfahren und Verschiebungsmethode. Für das Kraftgrößenverfahren sind die Berechnungsschritte angegeben die durchgeführt werden, dagegen ist die Verschiebungsmethode detailliert beschrieben. Dargestellt ist ein Vergleich der Anwendung dieser Methoden. Die Autoren schliessen dass für die seismische Berechnung vorgefertigter Betonkonstruktionen die Verschiebungsmethode besser geeignet ist.

Autori: Prof. dr. sc. **Darko Meštrović**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet; mr. sc. **Danijel Simonetti**, dipl. ing. građ., Istra inženjering d.o.o., Poreč

## 1 Uvod

Kad govorimo o predgotovljenim betonskim konstrukcijama (slika 1.) kao specifičnom obliku industrijalizacije u graditeljstvu, onda se pod time podrazumijeva proizvodnja pojedinih dijelova građevine (predgotovljenih



Slika 1. Primjer predgotovljene betonske konstrukcije

betonskih elemenata), organizirana izvan mjesta ugradnje, pretežno u velikim serijama i u posebnim proizvodnim uvjetima koji su znatno povoljniji od uvjeta proiz-



(a) Tangshan, Kina 1976. godine



(b) Leninakan, Armenija 1988. godine

Slika 2. Posljedice djelovanja jakih potresa na „loše“ konstrukcije od predgotovljenih betonskih elemenata

vodnje na samom gradilištu. Danas u graditeljskoj praksi proizvodnja predgotovljenih armiranobetonskih elemenata, konstrukcija i građevina uzima sve više maha. Razlozi su višestruki - od bolje kvalitete i veće brzine proizvodnje te u konačnosti smanjenih troškova izgradnje. Nadalje, predgotovljene su betonske konstrukcije znatno pogodnije za industrijalizaciju od monolitnih, što omogućava izradu predgotovljenih elemenata i njihovo spajanje u monolitnu konstrukcijsku cjelinu. Glavni su čimbenici predgotovljenog načina izgradnje izrada i montaža konstrukcijskih elemenata te izvedba spojeva. Predgotovljene su betonske konstrukcije prikladan način građenja za budućnost. Materijali koji se rabe su jeftini, a metode građenja, uključujući tvorničku izradu elemenata i sama brza montaža na gradilištu, pružaju mogućnost unapređenja i modernizacije, osobito uvođenjem

kompjutorizacije i robotizacije. Jedinu prepreku napredovanju predgotovljenog načina izgradnje može predstavljati nesigurnost projektanta u stvarno ponašanje predgotovljenih betonskih konstrukcija zbog djelovanja potresa.

Ovim radom namjeravaju se utvrditi sve prednosti koje pružaju duktilne predgotovljene betonske konstrukcije u odnosu na monolitne, što će se u zaključnim razmatranjima i navesti.

Na slici 2. prikazani su primjeri katastrofalnih urušavanja loše projektiranih i konstruiranih građevina od predgotovljenih betonskih elemenata zbog djelovanja jakih potresa.

Projektant kao i izvođač predgotovljenih betonskih konstrukcija mora imati znanje o mogućnostima i ograničenjima predgotovljenih konstrukcija, te u skladu s time razumjeti kako adekvatno sklopiti pojedine elemente u konstrukcijsku cjelinu koja se može oduprijeti snažnim djelovanjima potresa.

## 2 Odredbe Eurokoda 8 za projektiranje predgotovljenih betonskih konstrukcija

### 2.1 Opće odredbe

Europska norma *Eurokod 8* [3], odredbe za predgotovljene betonske konstrukcije u seizmičkim područjima, daje posebna pravila koja se primjenjuju na betonske konstrukcije u seizmičkim područjima.

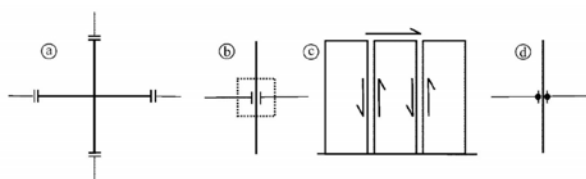
Obuhvaćene su sljedeće vrste konstrukcijskih sustava:

- okvirni sustavi
- zidni sustavi
- dvojni sustavi (mješovite predgotovljene okvirne konstrukcije i predgotovljeni ili monolitni zidovi)
- konstrukcije od zidnih panela

- čelijaste konstrukcije (sustavi predgotovljenih monolitnih prostorija).

Pri modeliranju predgotovljenih konstrukcija potrebno je provesti sljedeće provjere:

- utvrđivanje različitih uloga konstrukcijskih elemenata koji mogu biti:
  - elementi koji nose samo vertikalna opterećenja (zglobno vezani stupovi oko armiranobetonske jezgre)
  - elementi koji nose vertikalna i horizontalna opterećenja potresom (okviri ili zidovi)
  - elementi koji osiguravaju adekvatno povezivanje konstrukcijskih elemenata (stropne ili krovne dijaframe)
- utvrđivanje sposobnosti ispunjavanja odredaba *Eurokoda 8* o potresnoj otpornosti betonskih konstrukcija u općem smislu, gdje su obuhvaćeni sljedeći predgotovljeni sustavi:
  - predgotovljeni sustavi koji mogu zadovoljiti sve odredbe
  - predgotovljeni sustavi koji su izvedeni kombinacijom monolitnih stupova ili zidova betoniranih *in situ*, kako bi mogli zadovoljiti sve odredbe
  - predgotovljeni sustavi koji odstupaju od propisanih odredaba, za koje su potrebni dodatni proračunski kriteriji i imaju manje faktore ponašanja konstrukcije  $q$
- utvrđivanje nekonstrukcijskih elemenata koji mogu biti:
  - takvi da su u cijelosti nepovezani s konstrukcijom
  - takvi da se djelomično odupiru deformiranju konstrukcije
- utvrđivanje učinaka spojeva na disipaciju seizmičke energije, koji prema tome mogu biti:
  - spojevi locirani izvan kritičnih područja koji ne utječu na disipaciju seizmičke energije koja se unosi u konstrukciju tijekom djelovanja potresa (slika 3.a).
  - spojevi locirani u kritičnom području, ali imaju povećanu nosivost u odnosu na ostatak konstrukcije tako da se u potresu ponašaju elastično, dok je neelastično ponašanje pomaknuto u područje izvan spojeva (slika 3.b).
  - spojevi locirani u kritičnom području, ali posjeduju znatnu duktilnost čiji su primjeri prikazani na slici 3.c (duktilni posmični spoj velikih panela) i slici 3.d (duktilni kontinuirani spoj kod okvira).



Slika 3. Tipovi spojeva prema sposobnosti disipacije seizmičke energije

Kod predgotovljenih elemenata i njihovih spojeva, degradacija odziva zbog cikličkih deformacija nakon dostignute granice popuštanja materijala mora se uzeti u obzir. Obično je takva degradacija odziva pokrivena parcijalnim koeficijentima sigurnosti materijala (betona i armaturnog čelika). Ako nije tako, potrebno je reducirati proračunsku otpornost spojeva opterećenih monotonim opterećenjem, kako bi ih se moglo provjeriti na djelovanje seizmičkih sila. Osnovni mehanizam disipacije seizmičke energije trebao bi kod predgotovljenih betonskih konstrukcija biti kroz plastičnu rotaciju unutar kritičnih područja. Osim kapaciteta rotacije plastičnih područja, disipacija seizmičke energije može se ostvariti plastičnim posmičnim mehanizmima uzduž spojeva, uz uvjet da su zadovoljena sljedeća dva uvjeta:

- da nosivost spojeva ne opada znatno tijekom djelovanja potresa.
- da se moguće nestabilnosti spriječe na prikladan način.

Sva tri razreda duktilnosti (DCL –razred male duktilnosti, DCM –razred srednje duktilnosti i DCH –razred velike duktilnosti) koji se predviđaju kod monolitnih betonskih konstrukcija ovisno o histereznom kapacitetu trošenja seizmičke energije, mogu se primjenjivati i na predgotovljene betonske konstrukcije.

## 2.2 Faktor ponašanja konstrukcije

Vrlo važnu ulogu pri proračunu seizmički otpornih konstrukcija ima faktor ponašanja konstrukcije  $q$  koji uvodi duktilnost konstrukcije i njezinu sposobnost disipacije seizmičke energije u poslijeelastičnom području. Vrijednost faktora ponašanja predgotovljene betonske konstrukcije  $q_p$  može se proračunati iz jednadžbe:

$$q_p = k_p q \quad (1)$$

$k_p$  - faktor smanjenja ovisan o konstrukcijskoj sposobnosti disipacije seizmičke energije

$q$  - faktor ponašanja za monolitne betonske konstrukcije

Gornja granična vrijednost faktora ponašanja  $q$  određena je izrazom:

$$q = q_0 k_W \geq 1,5 \quad (2)$$

$q_0$  - osnovna vrijednost faktora ponašanja ovisno o vrsti konstrukcije

$k_w$  - faktor koji odražava prevladavajući oblik sloma konstrukcije.

Osnovna vrijednost faktora ponašanja  $q_0$  i faktor koji odražava prevladavajući oblik sloma konstrukcije  $k_w$  dani su tablično u europskim normama.

### 3 Prikaz metoda proračuna

#### 3.1 Metoda sila

Metoda sila dobro je poznati postupak u seizmičkom proračunu konstrukcija. Proračun za djelovanje potresa provodi se u sljedećim koracima:

1. Proračunati vlastiti period osciliranja konstrukcije  $T$  (vlastitu frekvenciju osciliranja  $f$  ili vlastitu kružnu frekvenciju osciliranja  $\omega$ ).
2. Odrediti prigušenje  $\xi$  konstrukcije.
3. Odabrati mjerodavni potres s pripadajućim spektrima odziva.
4. Prema spektrima odziva za odabrani potres i proračunatu vrijednost vlastitog perioda osciliranja konstrukcije  $T$ , očitavaju se vrijednosti za spektralni pomak  $S_d$ , spektralnu brzinu  $S_v$  i spektralno ubrzanje  $S_a$ .
5. Maksimalni pomak  $u_{\max}$  određuje se relacijom:

$$u_{\max} = S_d = \frac{S_v}{\omega} = \frac{S_a}{\omega^2}$$

6. Maksimalna vrijednost posmične sile na razini temelja određuje se na sljedeći način:

$$Q_{0,\max} = kS_d = m\omega S_v = mS_a = \left(\frac{S_a}{g}\right)W = (B, S)W$$

$B.S.$  = Base Shear koeficijent

7. Vrijednost maksimalnog momenta na razini temelja iznosi:

$$M_{0,\max} = Q_{0,\max}h$$

gdje su:

$Q_{0,\max}$  - maksimalna vrijednost poprečne sile na razini temelja

$h$  - visina djelovanja statičke sile  $F(t)$  mjerena od razine temelja.

#### 3.2 Metoda pomaka

Metoda pomaka primjenjuje se i pri seizmičkim proračunima tako da se za prosudbu prihvatljivosti ponašanja konstrukcije u potresu rabe parametri vezani

uz pomake konstrukcije. Jednostavan je pristup proračunu konstrukcija primjenom metode pomaka da se odredi međukatni pomak, koji odgovara definiranoj razini oštećenja konstrukcije te prema tako definiranom međukatnom pomaku dimenzionira konstrukcija. Primjenom metoda koje se zasnivaju na ponašanju konstrukcije projektant mora voditi računa da konstrukcija bude u stanju postići predviđenu razinu ponašanja. Jedan je od uvjeta ograničenje oštećenja, ne samo konstrukcije već i nekonstrukcijskih elemenata, kako bi određena građevina bila uporabljiva i nakon potresa. U novije se vrijeme pri proračunu predgotovljenih betonskih konstrukcija na djelovanje potresa rabi metoda pomaka, koja je predložena kao nova filozofija proračuna predgotovljenih betonskih okvira u programu istraživanja u Sjedinjenim Američkim Državama, pod nazivom „Sustavi seizmički otpornih predgotovljenih konstrukcija“. Otpornost konstrukcije se racionalno odabire u svrhu dostizanja željenih pomaka. Proračunski pomaci obuhvaćaju ukupne pomake, dakle elastičnu i plastičnu komponentu pomaka, što odgovara nelinearnom proračunu. U osnovi je ovaj pristup obrnut od pristupa metodom sila kod kojeg se prvo dobiju seizmička djelovanja, a potom iz njih proračunavaju pomaci.

Dvije osnovne pretpostavke karakteriziraju metodu pomaka:

- Odziv konstrukcije predstavljen je deformiranim oblikom koji odgovara osnovnom obliku osciliranja (oblik osciliranja konstrukcije u prvom obliku). To je u naravi ista pretpostavka kao i kod metode sila (metoda ekvivalentnoga statičkog opterećenja). U osnovi ova pretpostavka daje prihvatljiv opis deformiranja konstrukcije, međutim ne može biti uzeta kao jedina pri proračunu djelovanja na razini pojedinog kata te djelovanja na spojeve okvirnih konstrukcija. Oblik se odabire tako da se aproksimira deformirani oblik konstrukcije zbog seizmičkog djelovanja.
- Maksimalni pomak sustava s jednim stupnjem slobode jednak je onom kod matematičkog modela slobodnih prigušenih oscilacija ako imaju istu krutost te sposobnost disipacije seizmičke energije pri svakom ciklusu osciliranja.

Metodom pomaka konstrukcija je karakterizirana sekantnom krutošću (krutost koja je ovisna o pomaku konstrukcije) te prigušenjem  $\zeta$  pri maksimalnom odzivu pomaka ako se u proračunu rabi elastični spektar odziva pomaka za odabranu mjeru prigušenja. Proračun je moguć i primjenom nelinearnih spektara odziva pomaka. U proračunu se rabi spektar odziva pomaka, što naknadno omogućava pronalaženje proračunske seizmičke sile. Sustavi s više stupnjeva slobode svode se na ekvivalentni sustav

s jednim stupnjem slobode s koncentriranom ekvivalentnom masom na vrhu. Kod metode pomaka, granično stanje uporabljivosti definirano je ograničenjem maksimalnoga međukatnog pomaka, što je početni uvjet koji je potrebno zadovoljiti. Ograničenje maksimalnoga međukatnog pomaka, između ostalog, definirano je i odredbama Eurokoda 8. Konstrukcijski sustav s  $n$  stupnjeva slobode potrebno je svesti na ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode. U nastavku će se prikazati koraci proračuna primjenom metode pomaka.

### 3.2.1 Određivanje proračunskog pomaka

Za proračunski pomak  $\Delta_d$  ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode višekratne građevine, vrijedi izraz:

$$\Delta_d = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i^2)}{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)} \quad (1)$$

gdje su:

$n$  - katnost sistema

$m_i$  - masa  $i$ -tog kata

$\Delta_i$  - međukatni pomak  $i$ -tog kata.

Za proračun potrebnih međukatnih pomaka potrebno je poznavanje profila pomaka po visini građevine, koji se može dobiti iz dopuštenoga međukatnog pomaka za karakteristični oblik pomaka (sukladan osnovnom obliku osciliranja konstrukcije). Dopušteni relativni međukatni pomak  $\theta_c$  propisan je normama za projektiranje seizmički otpornih konstrukcija kao granično stanje uporabljivosti građevine, a njegove tipične vrijednosti iznose 2 – 2,5 %.

Za maksimalni relativni međukatni pomak  $\theta_d$  vrijedi relacija:

$$\theta_d = \theta_y + \theta_p \leq \theta_c \quad (2)$$

gdje je:

$\theta_y$  - elastična komponenta relativnoga međukatnog pomaka

$\theta_p$  - plastična komponenta relativnoga međukatnog pomaka

$\theta_c$  - dopušteni relativni međukatni pomak.

Poželjno je da se kritične vrijednosti relativnoga međukatnog pomaka  $\theta_d$  javljaju u nižim katovima građevine. Elastična komponenta relativnoga međukatnog pomaka  $\theta_y$  (relativnog međukatnog pomaka na granici plastifikacije), za armiranobetonske okvirne konstrukcije, definirana je izrazom:

$$\theta_y = 0,5\varepsilon_y \frac{l_b}{h_b} \quad (3)$$

gdje su:

$\varepsilon_y$  - deformacija na granici popuštanja

$l_b$  - raspon okvira

$h_b$  - visina grede.

Tipične vrijednosti elastične komponente relativnoga međukatnog pomaka  $\theta_y$  prema jednadžbi (3) iznose 0,6-12 %, što je mnogo više u odnosu na vrijednosti koje se obično uzimaju kod armiranog betona. U slučaju prednapetih betonskih okvirnih konstrukcija, elastična komponenta relativnog međukatnog pomaka  $\theta_y$  može se s dovoljnom točnošću proračunati s pomoću sljedećeg izraza:

$$\theta_y = 0,0004 \frac{l_b}{h_b} \quad (4)$$

Dopuštene vrijednosti relativnoga međukatnog pomaka moguće je proračunati i prema odredbama Eurokoda 8, u skladu s točkom 4.4.3 Ograničenje oštećenja te točkom 4.4.3.2 Ograničenje međukatnog pomaka, europske norme EN 1998-1:2004.

Dopušteni međukatni pomaci, ovisno o vrsti nekonstrukcijskih elemenata, određuju se iz sljedećih relacija:

- Zgrade koje imaju za konstrukciju pričvršćene nekonstrukcijske elemente od krhkih materijala prema izrazu:

$$d_r v \leq 0,005h \quad (5)$$

gdje su:

$d_r$  - međukatni pomak

$v$  - redukcijfski faktor

$h$  - katna visina.

- Zgrade koje imaju duktilne nekonstrukcijske elemente prema izrazu:

$$d_r v \leq 0,0075h \quad (6)$$

- Zgrade koje imaju nekonstrukcijske elemente pričvršćene tako da na njih ne utječu deformacije konstrukcijskog sustava, ili nemaju nekonstrukcijskih elemenata, prema sljedećem izrazu:

$$d_r v \leq 0,01h \quad (7)$$

Redukcijskim faktorom  $v$  uzima se u obzir manje povratno razdoblje potresa koje je u vezi sa zahtjevom ograničenja oštećenja. Vrijednost redukcijfskog faktora  $v$  također može ovisiti o razredu važnosti zgrade. Redukcijski faktori  $v$  koji se primjenjuju u pojedinim zemljama mogu se pronaći u nacionalnim dokumentima za primjenu. Vrijednosti mogu biti različite za pojedina seizmička područja u zemlji, ovisno o riziku koji se prihvaća, odnosno o razini zaštite građevina.

Preporučuju se vrijednosti redukcijskog faktora  $\nu$ , ovisno o razredu važnosti građevine, prema tablici 2.

Tablica 2. Vrijednost faktora redukcije

Razred važnosti građevine	I	II	III	IV
Faktor redukcije $\nu$	0,50	0,50	0,40	0,40

Nakon određivanja dopuštenog, odnosno maksimalnoga relativnog međukatnoga pomaka, moguće je proračunati međukatne pomake  $\Delta_i$  ovisno o katnosti okvira, iz sljedećih izraza:

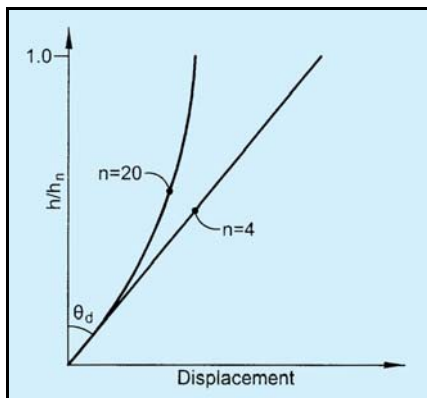
- za  $n < 4$ :  $\Delta_i = \theta_d h_i$  (8)  
 $h_i$  - visina  $i$ -tog kata

- za  $4 < n < 20$ :  $\Delta_i = \theta_d h_i \left[ 1 - \frac{0,5 h_i (n-4)}{16 h_n} \right]$  (9)

$h_n$  - ukupna visina građevine.

- za  $n > 20$   $\Delta_i = \theta_d h_i \left( 1 - 0,5 \frac{h_i}{h_n} \right)$  (10)

Iz izraza (8), (9) i (10) vidljivo je da se profil pomaka mijenja od linearnog za niže građevine do paraboličnog za više građevine, što je prikazano dijagramom na slici 4.



Slika 4. Profil pomaka u ovisnosti o katnosti građevina

### 3.2.2 Spektar odziva pomaka

Za razliku od metode sila, kod koje se rabi projektni spektar odziva ubrzanja  $S_d(T)$ , kod metode pomaka se za proračun konstrukcija u seizmičkim područjima primjenjuje spektar odziva pomaka. Elastični spektar odziva pomaka  $S_{De}(T)$  (ako se rabi u proračunu) za utvrđeno prigušenje  $\zeta$  moguće je dobiti iz elastičnog spektra odziva pomaka za prigušenje  $\zeta = 5\%$ , na način kako je prikazano u nastavku. Elastični spektar odziva pomaka  $S_{De}(T)$  (za mjeru prigušenja  $\zeta = 5\%$ , za elastični sustav s jednim stupnjem slobode, dobije se iz elastičnog spektra odziva ubrzanja  $S_{ae}(T)$  primjenom sljedećeg izraza:

$$S_{De}(T) = \omega^2 S_{ae}(T) = \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae}(T) \quad (11)$$

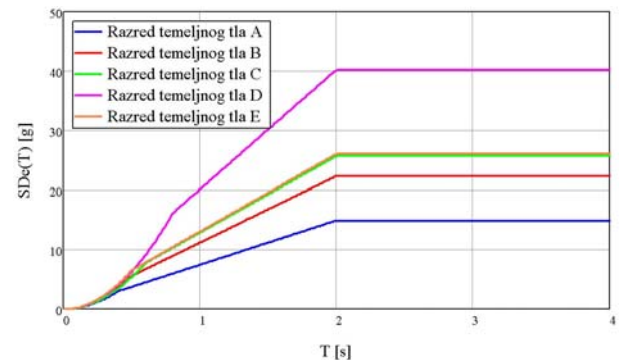
gdje su:

$\omega$  - kružna frekvencija neprigušenih oscilacija

$T$  - vlastiti period osciliranja konstrukcijskog sustava

$S_{ae}(T)$  - elastični spektar odziva ubrzanja

Na slici 5. prikazani su elastični spektri odziva pomaka  $S_{De}(T)$  za tip 1 potresa i proračunsko ubrzanje tla  $a_g = 0,30$  g, za različite razrede temeljnog tla (prema Eurokodu 8).



Slika 5. Elastični spektri odziva pomaka

Krivulje elastičnog spektra odziva pomaka  $S_{De}(T)$  za mjere prigušenja različite od  $\zeta = 5\%$ , mogu se prikazati izrazom:

$$S_{De}(T, \zeta) = S_{De}(T, 5) \left[ \frac{10}{5 + \zeta} \right]^{1/2} \quad (12)$$

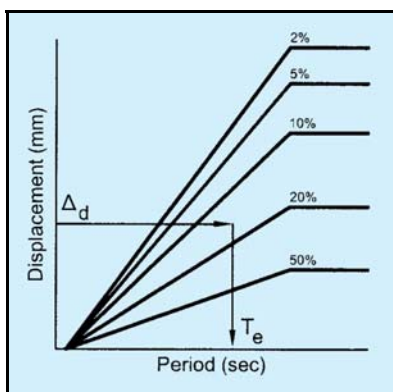
$S_{De}(T, \zeta)$  - elastični spektar odziva pomaka za različita prigušenja

$S_{De}(T, 5)$  - elastični spektar odziva za prigušenje  $\zeta = 5\%$ .

### 3.2.3 Period osciliranja

Period osciliranja  $T_e$  ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode, koji odgovara proračunskom pomaku  $\Delta_d$ , moguće je dobiti na sljedeće načine:

- Očitavanjem iz dobivenoga elastičnog spektra odziva pomaka  $S_{De}(T, \zeta)$  za odabrani intenzitet potresa i razred temeljnog tla, u koji se ulazi s vrijednošću proračunskog pomaka  $\Delta_d$ , kako je prikazano na slici 6. Utvrđeno prigušenje  $\zeta$  služi za redukciju elastičnog spektra odziva pomaka (simuliranje nelinearnog spektra).
- Očitavanjem iz dobivenog nelinearnog spektra odziva pomaka  $S_D(T)$  za odabrani intenzitet potresa i razred temeljnog tla, u koji se ulazi s vrijednošću proračunskog pomaka  $\Delta_d$ . Potrebno je napomenuti da vrijednost nelinearnog spektra odziva pomaka  $S_D(T)$ , za periode veće od graničnog perioda  $T_C$ , ne ovise više o duktilnosti konstrukcije  $\mu_\Delta$ , dakle pojedini spektri se podudaraju (princip jednakosti pomaka).



Slika 6. Očitavanje vrijednosti perioda osciliranja iz elastičnog spektra odziva pomaka za različita prigušenja

### 3.2.4 Krutost

Krutost  $K_e$  ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode proračunava se primjenom sljedeće jednadžbe:

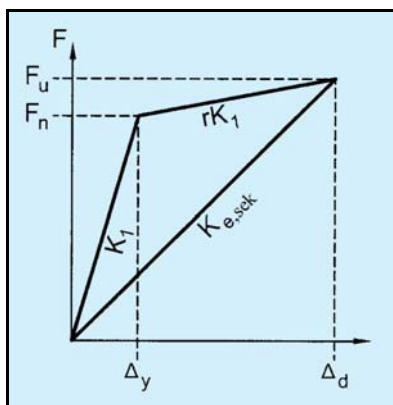
$$K_e = \frac{4\pi^2}{T_e^2} m_e \quad (13)$$

gdje su:

$T_e$  - period osciliranja ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode

$m_e$  - masa ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode.

Sekantna krutost konstrukcije  $K_{e,sek}$ , zbog njezina nelinearnog ponašanja, prikazana je na slici 7.



Slika 7. Sekantna krutost

Ako se rabi nelinearni spektar odziva pomaka  $S_D(T)$ , za utvrđenu duktilnost konstrukcije  $\mu_\Delta$ , dobivena vrijednost krutosti predstavlja elastičnu krutost  $K_{e,el}$ , dakle krutost konstrukcije kad je dosegnut pomak na granici popuštanja  $\Delta_y$  (elastični pomak). Razlog tomu je što se nelinearni spektri pomaka kod konstrukcija sa srednjim i većim periodima osciliranja podudaraju s elastičnim spektrom (princip jednakosti pomaka). Jednom kad se proračuna potrebna krutost sustava, mogu se proračunati potrebne veličine konstrukcijskih elemenata (dimenzije poprečnih presjeka).

Masa  $m_e$  ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode, proračunava se primjenom sljedećeg izraza:

$$m_e = \sum_{i=1}^n \frac{(m_i \Delta_i)}{\Delta_d} \quad (14)$$

Tipičnu vrijednost mase  $m_e$  ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode moguće je za građevinske konstrukcije aproksimirati sljedećim izrazom:

$$m_e \approx 0,8 \sum_{i=1}^n m_i \quad (15)$$

Vrijednost maksimalne horizontalne seizmičke sile  $F_{b,u}$ , koja je potrebna da se postigne proračunski pomak, dobije se iz sljedeće jednadžbe:

$$F_{b,u} = K_{e,sek} \cdot \Delta_d \quad (16)$$

gdje je:

$K_{e,sek}$  - sekantna krutost ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode.

### 3.2.5 Horizontalna seizmička sila na granici popuštanja

Vrijednost horizontalne seizmičke sile na granici popuštanja  $F_{b,y}$ , proračunava se iz sljedeće jednadžbe:

$$F_{b,y} = K_{e,el} \Delta_y \quad (17)$$

gdje su:

$K_{e,el}$  - elastična krutost ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode

$\Delta_y$  - pomak na granici popuštanja (plastifikacije).

Vrijednost pomaka na granici popuštanja  $\Delta_y$  ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode može se proračunati iz izraza:

$$\Delta_y = \frac{\Delta_d}{\mu_\Delta} \quad (18)$$

Raspodjela horizontalne seizmičke sile  $F_b$  po visini građevine dobiva se na osnovi profila pomaka jednadžbom:

$$F_i = F_b \frac{\Delta_i m_i}{\sum_{i=1}^n \Delta_i m_i} \quad (19)$$

$F_i$  - vrijednost horizontalne seizmičke sile  $i$ -tog kata

$F_b$  - ukupna vrijednost horizontalne seizmičke sile.

Konačno je moguće proračunati konstrukciju na djelovanje horizontalne seizmičke sile  $F_b$  te dobiti rezultirajuće rezne sile. Na kraju proračuna dimenzioniraju se konstrukcijski elementi na proračunane seizmičke sile (odabir potrebne armature), čime je proračun gotov.



### 3.3 Usporedba metode sila i metode pomaka

Usporedba dobivenih rezultata, s jedne strane metodom sila i s druge strane metodom pomaka, za dvije razine seizmičkog intenziteta (za područje VIII i područje IX seizmičkog intenziteta prema seizmološkoj karti koja je propisana za područje Republike Hrvatske) te za slučajeve predgotovljenih betonskih konstrukcija čiji su spojevi u skladu sa odredbama Eurokoda 8, kao i onih čiji spojevi nisu u skladu s odredbama Eurokoda 8, prikazana je u tablici 3.

Promatrajući dobivene rezultate, moguće je primijetiti da je kod metode sila period osciliranja konstrukcije neovisan o proračunskom ubrzanju tla. Kod metode pomaka ovisi o intenzitetu potresa jer su periodi osciliranja konstrukcije dobiveni iz nelinearnog spektra odziva pomaka (za određenu vrijednost proračunskog pomaka) koji je izravno ovisan o projektnom ubrzanju tla. Za veće intenzitete potresa vrijednosti perioda osciliranja su manje, što znači da je zahtijevana krutost konstrukcije veća, a samim time su i vrijednosti horizontalne seizmičke sile na konstrukciju veće. Vrijednosti perioda osciliranja konstrukcije dobivene metodom pomaka su veće u odnosu na metodu sila, što znači da su konstrukcije projektirane primjenom metode pomaka duktilnije, što je povoljna karakteristika za sposobnost disipacije seizmičke energije. Kod metode pomaka pomaci su neovisni o proračunskom ubrzanju tla zato što su proračunski pomaci definirani prema odredbama koje ograničavaju maksimalne međukatne pomake konstrukcije. Prema tim se pomacima određuje potrebna krutost konstrukcije te horizontalna seizmička sila. Kod metode sila se pomaci proračunavaju na kraju, prema dobivenim vrijednostima horizontalne seizmičke sile, te moraju biti unutar granica dopuštenih pomaka. Kod metode sila su odnosi pomaka za različite seizmičke intenzitete proporcionalni odnosima proračunskog ubrzanja tla za zadane seizmičke intenzitete. Također je potrebno napomenuti da metoda sila ne daje podatak o vrijednosti ukupnog (nelinearnog) pomaka, već samo vrijednost pomaka na granici plastifikacije (elastični pomak). Razlog je tome što je

metoda sila linearna statička metoda, za razliku od metode pomaka koja preko ukupnog pomaka konstrukcije uvodi u proračun nelinearnost. Kod obje su metode odnosi horizontalnih seizmičkih sila, za različite seizmičke intenzitete, proporcionalni odnosima proračunskog ubrzanja tla za zadane seizmičke intenzitete. Metoda pomaka daje manje vrijednosti horizontalne elastične seizmičke sile (vrijednosti manje približno 130 %) u odnosu prema proračunu metodom sila. Navedeno znači da se za očekivani intenzitet potresa, koji je određen proračunskim ubrzanjem  $a_g$  metodom pomaka ostvaruje „poddimensionirana“ konstrukcija u odnosu na metodu sila. Na taj se način pri proračunu metodom pomaka pruža mogućnost konstrukciji da ostvari znatno veće pomake u odnosu na metodu sila, što je povoljno za disipaciju seizmičke energije koja je u konstrukciju unijeta tijekom potresa, a što je dokazano proračunanim vrijednostima horizontalnoga elastičnog pomaka (pomak na granici popuštanja) vrha okvira. Metoda pomaka dopušta konstrukciji nelinearno ponašanje, što je veoma važno za konstrukcije u seizmičkim područjima. Ako se analiziraju odnosi vrijednosti elastičnih pomaka vrha okvira i elastičnih seizmičkih sila na konstrukciju, moguće je zaključiti kako konstrukcija koja je proračunana metodom pomaka ima manju krutost u odnosu na konstrukciju proračunanu metodom sila, što znači da je takva konstrukcija duktilnija. Isto je moguće zaključiti i iz perioda osciliranja konstrukcije. Analizom vrijednosti elastičnih seizmičkih sila koje djeluju na konstrukciju, u jednom slučaju kada su spojevi u skladu s odredbama Eurokoda 8 te u drugom slučaju kad oni nisu u skladu s tim odredbama, kod obje je metode moguće primijetiti da su obrnuto proporcionalne, s jedne strane globalnoj duktilnosti konstrukcije  $\mu_\Delta$  kod metode pomaka, odnosno s druge strane faktoru ponašanja konstrukcije  $q$  kod metode sila. Navedeno znači da su duktilne predgotovljene betonske konstrukcije, koje ujedno imaju i veću vrijednost faktora ponašanja, ekonomičnije što se tiče troškova izgradnje (manja količina armature u elementima), a samim time i konkurentnije monolitnim konstrukcijama. Ujedno se duktilnije konstrukcije mnogo bolje ponašaju u potresu

Tablica 3. Proračunske veličine analiziranog okvira prema FBD-u i DBD-u

Metoda seizmičkog proračuna	Spojevi između elemenata	Proračunsko ubrzanje podloge $\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Period osciliranja okvira [s]	Elastična seizmička sila [kN]	Elastični pomak vrha okvira [cm]	Ukupni pomak vrha okvira [cm]
Metoda sila FBD-a	Spojevi u skladu sa EC8	0,30 g	0,63	806,72	1,96	-
		0,20 g	0,63	537,81	1,31	-
	Spojevi suprotno EC8	0,30 g	0,63	1613,44	3,92	-
Metoda pomaka DBD-a	Spojevi u skladu sa EC8	0,30 g	1,32	346,53	4,22	16,50
		0,20 g	1,61	232,94	4,22	16,50
	Spojevi suprotno EC8	0,30 g	1,32	693,07	8,44	16,50

zbog veće sposobnosti disipacije seizmičke energije. Pri proračunu objema metodama potrebno je pridržavati se odredaba kapacitativnog projektiranja, kako bi bilo moguće osigurati da se plastični zglobovi formiraju samo na određenim mjestima u konstrukciji. Također je potrebno spriječiti neduktilno deformiranje te otkazivanje konstrukcije posmičnim mehanizmom.

#### 4 Zaključak

Najvažniji korak pri projektiranju seizmički otpornih konstrukcija jest utvrđivanje činjenice da konstrukcija ima odgovarajuću kombinaciju otpornosti i duktilnosti. Obje metode proračuna, metodu sila i metodu pomaka, moguće je rabiti za procjenu ponašanja konstrukcije u potresu. U metodi pomaka za prosudbu prihvatljivosti ponašanja konstrukcije u potresu upotrebljavaju se parametri vezani uz pomake konstrukcije. Jednostavan pristup primjenom metode pomaka jest da se odredi specifičan međukatni pomak koji odgovara definiranoj razini oštećenja konstrukcije, pa se prema tako definiranom međukatnom pomaku dimenzionira konstrukcija. Navedeno se razlikuje od pristupa metodom sila, gdje su parametri za prosudbu prihvatljivosti seizmički otporne konstrukcije, zasnovani na intenzitetu seizmičkog djelovanja. Kao što je već rečeno, većina norma za projektiranje seizmički otpornih konstrukcija u svijetu propisuje metodu sila za proračun konstrukcija na djelovanje potresa. Veličina proračunskih seizmičkih sila zasniva se na reduciranom elastičnom spektru odziva ubrzanja, za prigušenje  $\zeta = 5\%$ , takozvanom „proračunskom spektru“. Reduciranje elastičnog spektra provodi se uvođenjem faktora ponašanja konstrukcije  $q$ , koji ovisi o duktilnosti

konstrukcije. Rezultirajuće sile uvelike ovise o početnom periodu vibracije konstrukcije te o faktoru ponašanja  $q$ . Period vibracije konstrukcije ovisi pak o odabranim karakteristikama konstrukcije, odnosno o krutosti konstrukcije. Pomaci (granično stanje uporabljivosti) se provjeravaju na kraju proračuna konstrukcijskog sustava. Ako se ustanovi da pomaci premašuju maksimalne pomake dopuštene normom, primjerice ograničavanjem maksimalnoga međukatnog pomaka, potrebno je povećati krutost konstrukcije te revidirati cijeli proračun sustava. Metodom sila dobivaju se zadovoljavajući rezultati razine seizmičkog opterećenja kod monolitnih armiranobetonskih konstrukcija. Kod predgotovljenih je betonskih konstrukcija situacija nešto drukčija zato što je za takve konstrukcije normama definirana manja veličina faktora ponašanja konstrukcije  $q$ , što dovodi do predimenzioniranih i ekonomski manje isplativih konstrukcija. Manje se reduciraju proračunske seizmičke sile, zato što je teško odrediti točne veličine faktora ponašanja  $q$ , zbog nepredvidivosti duktilnog ponašanja spojeva kod predgotovljenih konstrukcija. Budući da je normama definirano granično stanje uporabljivosti konstrukcija, ograničavanjem maksimalnog međukatnog pomaka, time su izravno ograničeni maksimalni pomaci konstrukcije zbog djelovanja seizmičkih sila. Poradi tog je razloga, za proračun seizmički otpornih predgotovljenih betonskih konstrukcija, pogodna metoda pomaka. Za iste vrijednosti krutosti i nosivosti, kod predgotovljenih konstrukcija javljaju se veći pomaci u odnosu na pomake kod monolitnih konstrukcija, što rezultira i većim oštećenjima. Iz tog su razloga, kod predgotovljenih betonskih konstrukcija, pomaci bolji pokazatelj oštećenja u odnosu na sile.

#### LITERATURA

- [1] CEN – European Committee for Standardization: *Eurokod ENV 1992-1-3, Proračun konstrukcija od armiranoga i prednapetoga betona, dio 1-3: Opća pravila, Predgotovljeni betonski elementi i konstrukcije*, ožujak 2001.
- [2] CEN – European Committee for Standardization: *Eurokod ENV 1998-1-3:1995, Dodatak B (obavijesni), Proračun na potres predgotovljenih betonskih zgrada*, 2005.
- [3] CEN – European Committee for Standardization: *Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings – EN 1998-1:2004*, Brussels, 2004.
- [4] Cheok, G. S.; Lew, H. S.: *Performance of Precast Concrete Beam-to-Column Connections Subject to Cyclic Loading*, PCI Journal, May-June 1991.
- [5] Čaušević, M.: *Potresno inženjerstvo*, Predavanja dodiplomskog studija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2000.
- [6] Čaušević, M.: *Seizmički proračun montažne betonske konstrukcije garaže prema europskoj normi EN 1998-1:2004 (Eurokod 8-1)*, Stručni seminar – Projektiranje čeličnih konstrukcija prema europskim normama, Poreč, rujan 2007.
- [7] Čaušević, M.: *Dinamika i stabilnost konstrukcija*, Predavanja dodiplomskog studija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 1999.
- [8] Čaušević, M.: *Dinamika konstrukcija – diskretni sustavi*, Školska knjiga, Zagreb, 2005.
- [9] Čaušević, M.: *Elastična seizmička analiza zgrada prema europskoj normi EN 1998-1:2004 (Eurokod 8-1)*, Stručni seminar – Projektiranje čeličnih konstrukcija prema europskim normama, Poreč, rujan 2007.

- [10] Čaušević, M.; Fajfar, P.; Isaković, T.: *Proračun vijadukta na djelovanje sila potresa prema Eurokodu 8/2*, Građevinar 55 (2003) 3, pp. 43-153.
- [11] Čaušević, M.; Zehenter, E.: *Nelinearni seizmički proračun konstrukcija prema normi EN 1998-1:2004*, Građevinar 59 (2007) 9, pp. 767-777.
- [12] Čaušević, M.: *Potresno inženjerstvo (odabrana poglavlja)*, Školska knjiga, Zagreb, 2001.
- [13] Meštrović, D.: *Predgotovljene betonske konstrukcije*, Predavanja poslijediplomskog znanstvenog studija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2006.
- [14] Priestley, M. J. N.: *Direct Displacement-Based Design of Precast/Prestressed Concrete Buildings*, PCI Journal, 2002.
- [15] Radić, J. i suradnici; *Betonske konstrukcije – priručnik*, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, 2006.
- [16] Radić J. i suradnici: *Betonske konstrukcije – riješeni primjeri*, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, 2006.
- [17] Simonetti, D.: *Analiza predgotovljenih betonskih konstrukcija u seizmičkim područjima*, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2010.
- [18] Tomičić, I.: *Seizmički otporne armiranobetonske okvirne konstrukcije od montažnih elemenata*, Građevinar 52 (2000) 1, pp. 25-32.
- [19] Tomičić, I.: *Modeliranje seizmički otpornih armiranobetonskih okvira*, Građevinar 55 (2003) 8, pp. 449-455.

