

# Modeliranje seizmički otpornih armiranobetonskih okvira

Ivan Tomičić

**Ključne riječi**

armiranobetonski okvir,  
seizmička otpornost,  
teorija plastičnosti,  
plastični zglobovi,  
mehanizam sloma,  
duktilnost,  
propisi

**Key words**

reinforced-concrete  
frame, seismic resistance,  
plastic theory,  
plastic hinge,  
failure mechanism,  
ductility,  
regulations

**Mots clés**

cadre en béton armé,  
résistance sismique,  
théorie de la plasticité,  
articulation plastique,  
mécanisme de rupture,  
ductilité,  
réglementation

**Ключевые слова**

железобетонная рама,  
сейсмостойкость,  
теория пластичности,  
пластмассовый шарнир,  
механизм разрыва,  
дуктильность,  
правила

**Schlüsselworte:**

Stahlbetonrahmen,  
seismische  
Widerstandsfähigkeit,  
Plastizitätstheorie,  
plastisches Gelenk,  
Bruchmechanismus,  
Duktilität, Vorschriften

I. Tomičić

Pregledni rad

**Modeliranje seizmički otpornih armiranobetonskih okvira**

Analizira se preuzimanje potresnog opterećenja s pomoću armiranobetonskih okvira, kada to nije moguće postići zidovima. Opisuje se primjena teorije plastičnosti pri proračunu, ističu se njezine prednosti i posebno se prikazuju mogući mehanizmi sloma konstrukcije. Daju se prijedlozi o modeliranju sustava da bi prešao u poželjni mehanizam sloma. Prikazuju se neka najnovija teorijska istraživanja, rezultati kojih se doveli i do promjena u nekim normama, prije svega američkim.

I. Tomičić

Subject review

**Modeling earthquake-resistant reinforced-concrete frames**

The assumption of seismic load by reinforced concrete frames, in cases when load can not be assumed by walls, is analyzed. The use of plastic theory in calculation is described and advantages of this theory are outlined. A special account is given of possible structural failure mechanisms. System modeling proposals aimed at obtaining the desired failure mechanism are presented. The author presents some recent theoretical studies, results of which have brought about changes in some standards, especially in the U.S.A.

I. Tomičić

Ouvrage de synthèse

**Modélisation des cadres en béton armé résistants aux séismes**

L'article analyse l'amortissement des sollicitations sismiques par des cadres en béton armé lorsque cela ne peut pas être réalisé par des murs. On décrit l'application de la théorie de la plasticité lors du calcul, tout en soulignant ses avantages. On présente particulièrement les mécanismes possibles de rupture de la construction, avec des propositions pour la modélisation du système qui lui permettraient de passer en un mécanisme souhaitable de rupture. On cite des recherches théoriques les plus récentes dont les résultats ont entraîné des changements dans certaines normes, en premier lieu dans les normes américaines.

И. Томичич

Обзорная работа

**Моделирование сейсмостойких железобетонных рам**

Производится анализ принятия сейсмической нагрузки с помощью железобетонных рам, когда это невозможно осуществить с помощью стен. Описывается применение теории пластичности при расчете, выделяются ее преимущества и отдельно представляются возможные механизмы разрыва конструкции. Приводятся предложения по моделированию системы с целью перехода в требуемый механизм разрыва. Приведены некоторые последние теоретические исследования, результаты которых привели к изменению некоторых норм, прежде всего американских.

I. Tomičić

Übersichtsarbeit

**Modellieren seismisch widerstandsfähiger Stahlbetonrahmen**

Analysiert ist die Übernahme der seismischen Belastung mittels Stahlbetonrahmen im Fall das man das mit Wänden nicht erreichen kann. Beschrieben ist die Anwendung der Plastizitätstheorie bei der Berechnung, deren Vorteile werden hervorgehoben und besonders die möglichen Bruchmechanismen dargestellt. Dargestellt sind einige der neuesten theoretischen Forschungen deren Ergebnisse zu Änderungen in einigen Normen führten, vor allem in den USA.

Autor: Dr. sc. **Ivan Tomičić**, dipl. ing. građ., sveučilišni profesor u mirovini, Vramčeva 21, Zagreb

## 1 Uvod

Za gradnju seizmički otpornih građevina Europska prednorma ENV 1998, dio 1.1 [3], propisuje ispunjenje sljedećih zahtjeva:

- Do rušenja građevine kao cjeline ne smije doći, niti pojedinih njenih dijelova, pri potresnom djelovanju.
- Konstrukcija građevine kao cjelina, uključujući i nenosive elemente, s velikom vjerojatnošću, ne smije pretrpjeti oštećenja koja bi ograničila njezinu upotrebu, a troškovi obnove bili neproporcionalni cijeni same konstrukcije.
- Građevine važne za zaštitu stanovništva moraju ostati upotrebive, za i poslije potresa.

Pouzdanost od rušenja i ograničenje oštećenja za pojedine vrste građevina, svaka država utvrđuje Državnim dokumentom za primjenu (DDP), na osnovi posljedica rušenja ili oštećenja, gdje je faktor važnosti u skladu s gospodarskim mogućnostima.

Proračunom potresno otpornih armiranobetonskih zgrada mora se osigurati prikladan kapacitet disipacije (trošenja) seizmičke energije, bez bitnog smanjenja nosivosti na horizontalno i vertikalno opterećenje pri potresnom djelovanju. Stoga se primjenjuju temeljni zahtjevi i kriteriji koji će omogućiti trošenje energije u kritičnim područjima (plastični zglobovi) i opću duktilnost pretpostavljenu proračunom, a u skladu s odabranim *faktorom ponašanja* (faktor koji u većini državnih normi ima značajne faktora duktilnosti). Duktilnost konstrukcije bit će primjerenija i djelotvornija ako ima više kritičnih područja za trošenje energije i ako su ona što ravnomjernije raspoređena po elementima sustava.

Horizontalno i vertikalno opterećenje na zgrade može se prihvatiti:

- okvirnim sustavima,
- dvojnim sustavima (kombinacija okvira i zidova),
- zidnim sustavima,
- sustavima jezgri.

Kako je poznato, zgrade ukružene armiranobetonskim zidovima ili jezgrama, za prihvat sila potresa i vertikalnog opterećenja, zadovoljavajuće se ponašaju i pri vrlo jakim potresima. Osim velike nosivosti, oni imaju i veliku krutost, pa do oštećenja nosivih i nenosivih elemenata neće doći ili će ona biti vrlo mala. Dalje, armiranobetonski zidovi mogu se projektirati da budu duktilni te sposobni apsorbirati seizmičku energiju na plastično deformiranje armature, zbog čega se mogu proračunavati na umanjene sile potresa.

Ipak, nismo uvijek u mogućnosti projektirati zgrade ukružene zidovima zbog funkcijskih zahtjeva. Vrlo često u gradnji zgrada, zbog boljeg iskorištavanja prostora, osobito u prizemlju i I. katu, primjenjuju se okvirne konstrukcije. One se mogu tako konstruirati da budu ne samo nosive, već i duktilne te sposobne trošiti seizmičku energiju i omogućiti proračun nosivog sustava na reducirane inercijalne sile. Međutim, okvirne konstrukcije imaju i nedostataka. Jedan od ozbiljnih može biti suviše velika deformabilnost, pa se pri snažnom potresu mogu očekivati, osim predviđenih i tolerantnih oštećenja u području plastičnih zglobova, veća oštećenja nenosivih elemenata, instalacija, pa čak i opreme. Zbog toga valja ograničiti međukatne pomake, ovisno o prisutnosti nenosivih elemenata, što se obično propisuje normama.

U nedostatak okvirnih konstrukcija ubraja se i mogućnost "mekog kata" (stupovi male krutosti) koji može biti uzrok slabog iskorištenja konstrukcije, velikih deformacija u kritičnom katu i s tim u svezi oštećenja, te potrebe proračuna takvih stupova po teoriji II. reda. Dalje, nenosivi elementi uzrok su neregularnosti djelovanja okvirnih sustava, a time i pojavi momenata torzije. Osim toga, kratka efektivna duljina okvirnog elementa može biti uzrok posmičnog sloma i prije predviđene apsorpcije seizmičke energije.

Modeliranje okvirnih konstrukcija, osobito u seizmičkim područjima, nije još uvijek dostatno regulirano. Tako na primjer, kod zgrada kojima su stropovi od greda i ploče, pojavljuje se problem sudjelovanja ploče u nosivosti i krutosti prečke na spoju sa stupom, pri seizmičkoj kombinaciji djelovanja, kada naprezanje u ploči, alternativno, može biti tlačno i vlačno. Isto tako, pojavljuje se pitanje kako osigurati, pri seizmičkom djelovanju, poželjan mehanizam sloma, tj. onaj sa zglobovima u gredama i u podnožju stupova najniže etaže. Upravo ovim nedorečenostima, bit će, u ovom radu, posvećena glavna pažnja, iz čega će proizići preporuke konstruktorima kako projektirati okvirne konstrukcije koje uspješno odolijevaju potresnom djelovanju.

## 2 Primjena teorije plastičnosti i mehanizmi sloma

Prema usvojenim pretpostavkama o ponašanju konstrukcija i građiva razvile su se razne metode proračuna sustava. Za rješavanje okvirnih konstrukcija primjenjuju se: linearna teorija elastičnosti, zasnovana na idealno elastičnom ponašanju materijala, teorija plastičnosti, koja pretpostavlja da se radi o idealno elasto-plastičnom materijalu ili idealno kruto-plastičnom, te nelinearna teorija koja se zasniva na fizikalnoj i geometrijskoj nelinearnosti.

Odabiranje metode proračuna ovisi o mogućnostima analize i njenoj cijeni prema vrijednosti konstrukcije, utjecaju nelinearnosti i vrsti graničnog stanja. Za rješa-

vanje potresno otpornih okvira vrlo je prikladna, i dovoljno točna, primjena teorije plastičnosti, koja je s toga i najčešća.

U teoriji plastičnosti, slično kao i u teoriji elastičnosti, idealizira se ponašanje materijala, te pretpostavlja geometrijska linearnost. Po njoj se mogu dobiti realne vrijednosti za sile u stanju granične ravnoteže kada se radi o konstrukcijama s plastičnim ponašanjem. Kako po ovoj teoriji nisu poznate vrijednosti za naprezanja i deformacije za uporabno opterećenje, to granično stanje uporabivosti ima veliko značenje. Dalje, proračunom po ovoj teoriji dopušta se naprezanje gradiva u području plastičnosti, što ima za posljedicu pojavu trajnih deformacija, ako se konstrukcija nađe u graničnom stanju nosivosti, kao što je slučaj pri djelovanju potresa.

Uvjet za primjenu teorije plastičnosti u proračunu konstrukcija je duktilnost presjeka, osobito u području potencijalnih plastičnih zglobova, a time i cijelog sustava.

Ekstremni momenti savijanja, kod statički neodređenih duktilnih konstrukcija, su ravnomjernije raspoređeni u graničnom stanju ravnoteže. Približnu, ali dovoljno točnu, raspodjelu momenata savijanja moguće je dobiti primjenom teorije plastičnosti. Jednoličnija raspodjela momenata savijanja omogućuje ravnomjerniju raspodjelu armature u konstrukciji, kvalitetnije betoniranje elemenata, a osobito čvorova te općenito pridonosi ekonomičnijem građenju. Dalje, primjena teorije plastičnosti je u prednosti pred primjenom teorije elastičnosti kada se konstrukcije dimenzioniraju metodom graničnih stanja, jer je ta metoda logičan nastavak teorije plastičnosti.

Primijenjena teorija plastičnosti na okvire promatra ravnotežu konstrukcije neposredno pred slom, odnosno nakon prelaska sustava u mehanizam sloma. Pri tome se pretpostavlja da su svi kritični presjeci iscrpljeni, pa se po ovoj metodi mogu projektirati racionalne konstrukcije, za prihvatljivu vjerojatnost nosivosti i uporabivosti.

Građenje duktilnih armiranobetonskih konstrukcija nije samo uvjet za primjenu teorije plastičnosti za iznalaženje sila, već i za građenje objekata u potresnim područjima. Kod duktilnih armiranobetonskih okvira veći dio seizmičke energije se troši na plastično deformiranje u području plastičnih zglobova, što omogućuje proračun na reducirane sile potresa, čime se direktno pridonosi ekonomičnosti građenja.

Proračun prema teoriji plastičnosti temelji se na ponašanju materijala od početnog opterećenja pa do graničnog. Algoritmi za proračun sustava zasnivaju se na klasičnim postavkama, a to su: idealno elasto-plastično ili kruto-plastično ponašanje materijala, homogenost i geometrijska linearnost. Sigurnost konstrukcije, odnosno kapacitet nosivosti definira se za stanje prelaska konstrukcije u mehanizam s jednim stupnjem slobode.

U proračunu prema teoriji plastičnosti rabi se referentni moment savijanja ili, pod drugim nazivom, moment plastičnosti ovisan o dimenzijama i kakvoći gradiva.

Pri malim opterećenjima, okvirna konstrukcija se ponaša elastično. Naprezanja i deformacije proporcionalni su opterećenju. Povećanjem djelovanja (opterećenja), u području najviše napreznog presjeka (kritično područje), dolazi do oblikovanja plastičnog zgloba. Statički neodređenom sustavu smanjuje se stupanj statičke neodređenosti za jedan. Daljnji porast opterećenja prihvaća zamjenjujući sustav dok se ne stvori drugi plastični zglob. I tako se nastavlja lančani proces otvaranja plastičnih zglobova, a sustav postaje sve "mekši" i u jednom trenutku zamjenjujući sustav postaje statički određen, a otvaranjem još jednog plastičnog zgloba, prelazi u mehanizam sloma s jednim stupnjem slobode. Ovaj proces jedino je moguć ako je konstrukcija osigurana od krhkog sloma posmikom, izvijanjem i nedovoljnim sidrenjem koji bi mogao sustav dovesti ranije do sloma. Prema tome, u  $n$  puta statički neodređenom sustavu formira se  $n+1$  plastičnih zglobova, nakon čega je konstrukcija nesposobna prihvatiti porast opterećenja.

Kod okvirnih sustava, zbog jednostavnosti, uzima se da je moment savijanja dominantan za stvaranje plastičnog zgloba. Kod prostornih okvira to pojednostavnjenje nije moguće jer je oblikovanje plastičnog zgloba uvjetovano i drugim utjecajima. Problem postaje nelinearan. Prostorne okvire ovdje se neće razmatrati.

Mehanizam sloma ovisi o geometrijskim karakteristikama sustava te vrsti i položaju opterećenja. Os rotacije plastičnog zgloba uzima se da je okomita na ravninu sustava, a prolazi plastičnim zglobom.

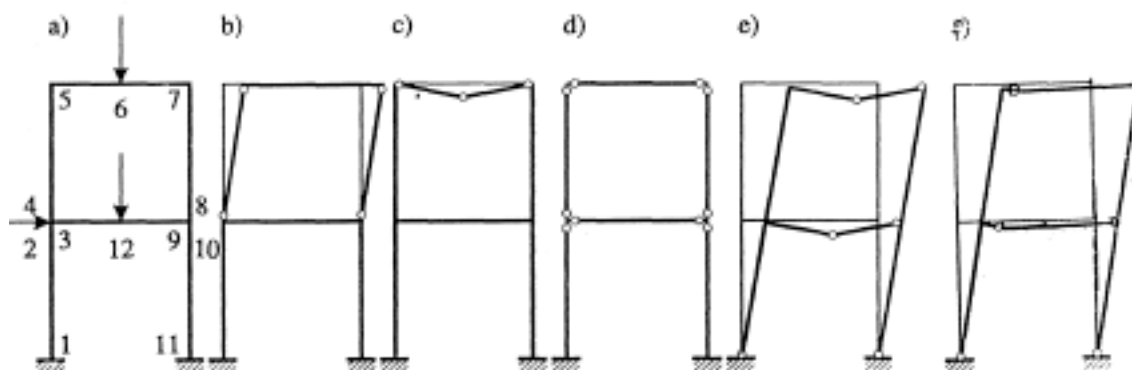
Kod jednostavnih sustava i koncentriranih opterećenja mehanizmi sloma mogu se unaprijed predvidjeti, dok se kod složenih sustava i opterećenja oni prognoziraju, primjenjujući postupke teorije plastičnosti. Razlikuju se bočni, gredni i zglobni kao osnovni mehanizmi sloma te kombinirani (slika 1.).

Broj osnovnih mehanizama  $s$  moguće je odrediti na  $n$  puta statički neodređenom sustavu sa  $r$  potencijalnih zglobova izrazom:

$$s = r - n \quad (1)$$

Okvir prikazan na slici 1. koji je 6 puta statički neodređen i u kojem se može formirati 12 plastičnih zglobova ima 6 mehanizama sloma.

Pri potresnoj kombinaciji djelovanja, vrlo su vjerojatni, a i poželjni kombinirani bočno-gredni mehanizmi sloma (slika 1.e i 1.f). Da bi se oni i ostvarili, potrebno je pri projektiranju odabrati omjer sume nosivosti momenata savijanja stupova prema onoj greda, na njihovu spo-



Slika 1. Primjeri mehanizama sloma: a) okvir i opterećenje, b) bočni mehanizam sloma, c) gredni mehanizam sloma, d) zglobni mehanizam sloma, e i f) Kombinirani mehanizmi sloma

ju, prema izrazu:  $\Sigma M_{Rdc} / \Sigma M_{Rdb} \geq 1,2$ , odnosno, jednostavnije rečeno, projektirati okvir s "jakim" stupovima i "slabim" gredama. Prednost je ovakvog mehanizma sloma u tome što kod njega neće doći do formiranja plastičnih zglobova u stupovima, osim u podnožju najdonje etaže, pa u njima nije potrebno ograničavati uzdužnu silu kako bi se duktilno ponašali, niti ih je potrebno dodatno ojačavati poprečnom armaturom. Lokalnu duktilnost u gredama mnogo je lakše postići jer je uzdužna sila u njima najčešće mala.

Utvrđivanje duktilnosti armiranobetonskih konstrukcija, zbog velikog broja faktora, koji ju uvjetuju, kompleksan je zadatak. Danas se uglavnom primjenjuju približni postupci koji daju dosta grube, ali dostatno točne procjene duktilnosti.

Oblikovanjem okvirnih konstrukcija, kako je već rečeno, primjenom omjera nosivosti na savijanje njenih elemenata u pojedinim čvorovima, može se utjecati na vrstu mehanizma sloma. To je od velike važnosti za građenje objekata u seizmički aktivnim područjima, kada se dopušta rad konstrukcije u postelastičnom području pri seizmičkoj kombinaciji djelovanja. Poželjni su oni mehanizmi kod kojih će doći do što većeg broja otvaranja plastičnih zglobova, osobito u gredama, a time i do veće disipacije energije, kao što je kombinirani bočno-gredni mehanizam sloma.

Posljednjih godina teorijska i eksperimentalna istraživanja usredotočena su prema utvrđivanju omjera nosivosti sume momenata stupova i greda na njihovu spoju, kako bi okvirna konstrukcija prešla u poželjan mehanizam sloma, odnosno kombinirani bočno-gredni mehanizam. Rezultati nekih novijih istraživanja te zahtjevi propisa u svezi omjera sume nosivosti momenata, bit će dani u nastavku.

Pri određivanju krutosti elemenata, potrebnih u analizi monolitnih okvirnih sustava, pojavljuje se problem određivanja momenta tromosti grede rebrastog stropa (T-presjek) na spoju sa stupom za djelovanje pozitivnog ili ne-

gativnog momenta savijanja, što je slučaj pri potresnoj kombinaciji djelovanja.

Prema *Pravilniku za građenje objekata visokogradnje u seizmičkim područjima* [1] te prema europskoj prednormi ENV 1998 [4 i 6] tradicijski se uzima da je moment tromosti grede T-presjeka na spoju takve grede i stupa, za pozitivni moment savijanja, jednak momentu tromosti T-presjeka, a za negativni moment (ploča u vlačnom području) momentu tromosti samo rebra (dio ploče uz rebro i njena armatura se isključuju). Za omjer nosivosti sume momenata savijanja stupova prema onoj greda ne daju se preporuke, već se usvaja projektirano stanje, predviđeno prema iskustvu ili drugim zahtjevima. Slične su preporuke i u mnogim drugim zemljama. Prema američkim ACI-normama iz 1999. godine [8] te novozelandskim propisima uvedena su poboljšanja. Naime, ove norme se kontinuirano dopunjuju i moderniziraju, tako da se u njih redovito unose rezultati najnovijih istraživanja, pa su tako ušli i oni iz problematike navedene u ovom radu, na prijedlog više istraživača. Neka od ovih istraživanja bit će skraćeno ovdje predočena.

### 3 Teorijska i eksperimentalna istraživanja

Nedavna istraživanja sudjelovanja ploče stropa ojačanog gredama u proračunu krutosti prečke okvira na spoju sa stupom, te određivanje omjera sume nosivosti momenata savijanja stupova prema onoj greda na licu čvora, vrlo su značajna za osiguranje poželjnog mehanizma sloma pri potresnoj kombinaciji djelovanja.

Istraživanja Durranija i Wighta [2] provedena 1987. godine imala su za cilj pronaći učinke prisutne ploče stropa na ponašanje unutrašnjeg čvora greda-stup, pri potresnom djelovanju. Na osnovi eksperimentalnih istraživanja autori su došli do sljedećih zaključaka:

- Za međukatni pomak stropa manji od 2%, ponašanje unutrašnjeg (srednjeg) čvora stup-greda nije osjetljivo na variranje poprečne armature i razine posmika.

- Kod velike razine deformiranja (međukatni pomak  $\geq 2\%$ ), poprečna armatura dobiva znatno veći utjecaj na ponašanje čvora, nego razina posmika u čvoru.
- Armatura u čvoru počinje popuštati kod međukatnog pomaka 1,5%, a kod pomaka 4%, i armatura paralelna s rebrom popušta na cijeloj sudjelujućoj širini ploče, što znači da ju ne valja ignorirati.
- Kod grede s pločom i jačom gornjom armaturom od donje, pri seizmičkoj kombinaciji djelovanja (naizmjenično cikličko naprezanje), doći će do većeg oštećenja prionljivosti donje armature (klizanje šipki).

Iz ovih zaključaka može se vidjeti da ploča stropa sudjeluje u nošenju i to, za pozitivni moment savijanja, prihvaćanjem tlačnih naprezanja, a za negativni moment, prihvaćanjem vlačnih naprezanja, osim gornjom armaturom rebra i armaturom pripadajuće ploče u smjeru rebra, koja dosižu granicu popuštanja. Ovi rezultati utjecali su na kasnije moderniziranje ACI-normi.

Poboljšanja u ACI-normama, što se tiče kapaciteta nosivosti grede s pločom (T-presjek), pri seizmičkoj kombinaciji djelovanja, uz čvorove okvira, bio je poticaj Pantazopoulou i Frenchu [9] da eksperimentalno istraže učinke ploče na nosivost i krutost greda. Oni zaključuju da dosadašnja praksa, kada se uzima za nosivost grede uz stup samo rebro i eventualno doprinos ploče, za slučaj pozitivnog momenta, podcjenjuje nosivost grede u području plastičnog zgloba bočno-grednog mehanizma. Ovakav tretman ima ozbiljnih posljedica pri određivanju kapaciteta nosivosti okvira, osiguranja plastičnih zglobova te dimenzioniranja, prema kapacitetu nosivosti, čvorova i elemenata izvan plastičnih zglobova.

Rezultati ispitivanja pokazuju da pri međukatnom pomaku od 2%, ploča u vlačnom području pridonosi krutosti i nosivosti preko njene armature, paralelne s rebrom u kojoj naprezanja dostižu granicu popuštanja na cijeloj sudjelujućoj širini, a kada je ploča u tlačnom području, ona također pridonosi krutosti i nosivosti, kako se to i dosada uzimalo, preko sudjelujuće širine ploče (T-presjek).

Dooley i Bracci [10] proveli su analitička istraživanja na temelju rezultata eksperimentalnih istraživanja mnogih znanstvenika, kako bi utvrdili ovisnost svojstava okvirnih konstrukcija zgrada s različitim omjerima sume nosivosti momenata savijanja stupova prema onoj greda, primjenjujući probabilistički pristup. Dvjestu studijama zgrada od 3 i 6 katova, za omjere nosivosti stupova i greda od 0,8 do 2,4, to je istraženo. Na osnovi tih istraživanja, autori zaključuju:

- Postupno povećanje omjera sume nosivosti stupova prema onoj greda ( $\Sigma M_{Rdc}/\Sigma M_{Rdb}$ ) armiranobetonskih okvira, vodi prelasku konstrukcije u bočno-gredni

mehanizam sloma, a time i do poboljšane zaštite ljudi i materijalnih dobara pri djelovanju potresa.

- Omjerom  $\Sigma M_{Rdc}/\Sigma M_{Rdb} = 1,2$ , usvojenim ACI-318-99-normama, osigurava se 90-postotna vjerojatnost prelaska okvirnog sustava u bočno-gredni mehanizam sloma.
- Za postizanje visoke vjerojatnosti formiranja poželjnog mehanizma sloma, pri seizmičkoj kombinaciji djelovanja, potrebno je zahtijevati minimalni omjer  $\Sigma M_{Rdc}/\Sigma M_{Rdb} = 2,0$ .
- Poboljšanje svojstava okvira, povećanjem omjera nosivosti  $\Sigma M_{Rdc}/\Sigma M_{Rdb}$ , djelotvornije je nego istodobno povećanje omjera nosivosti i krutosti.

Osim ovih triju navedenih istraživanja, postoje i druga s rezultatima koji se dobro podudaraju s navedenim i koji su također poslužili za osuvremenjivanje državnih propisa, prvenstveno američkih.

#### 4 Zahtjevi i preporuke propisa

U američkim ACI-normama za zgrade iz 1971. godine (ACI 318-71) prvi put su izašle preporuke da omjer  $\Sigma M_{Rdc}/\Sigma M_{Rdb}$  bude 1,4, pri seizmičkoj kombinaciji djelovanja, kod bilo kojeg čvora stup-greda i za oba glavna smjera. Cilj toga zahtjeva bio je osigurati stvaranje plastičnih zglobova u gredama prije nego u stupovima, osim u podnožju najdonje etaže. Osim toga, zahtijevalo se ovijanje greda i stupova u blizini čvorova (područje potencijalnog plastičnog zgloba) poprečnom armaturom (sponama) većom od one potrebne pri standardnoj situaciji djelovanja.

U ACI 318-83-normama zahtijeva se da omjer nosivosti  $\Sigma M_{Rdc}/\Sigma M_{Rdb}$  bude jednak 1,2 s ciljem da se reducira vjerojatnost popuštanja stupova okvirnih konstrukcija. Premda je namjera propisa bila projektirati "jake" stupove i "slabe" grede, dolazilo je do zabuna zbog nedefiniranih odredbi za proračun nosivosti stupova i greda te mjesta gdje treba zadovoljiti traženi omjer nosivosti (središte čvora ili mjesto spoja).

Prema ACI-ASCE 352-85-normama zahtijeva se da omjer sume momenata nosivosti stupa, iznad i ispod čvora, prema sumi momenata nosivosti greda, lijevo i desno od čvora, promatranog čvora, bude 1,4, s tim da se uzima u obzir samo nosivost rebra, odnosno da se za pozitivni moment savijanja zanemaruje doprinos ploče, a armatura ploče za negativni moment savijanja grede. Valja naglasiti koliko je to nerealno, kada se zna da stvarna nosivost grede zajedno s pločom može biti najmanje 40% veća od nosivosti rebra.

Mnoge znanstvene studije, načinjene poslije 1970. godine, na armiranobetonskim okvirima, potvrđuju opravdanost uzimanja u proračun nosivost ploče na tlak, odnos-

no njene armature na vlak. Prema njima nosivost rebra s pločom može biti više od 50% veća od nosivosti rebra, što je utjecalo na autore novih američkih ACI-ASCE 352-91-normi kojima se preporučuje da omjer  $\Sigma M_{Rdc}/\Sigma M_{Rdb}$  bude 1,4, s tim da u nosivost rebra bude uključen doprinos sudjelujuće širine ploče.

Na osnovi svih dosadašnjih rezultata istraživanja i iskustva primjene prethodnih ACI-normi, najnovije ACI 318-99-norme donose preporuke da omjer  $\Sigma M_{Rdc}/\Sigma M_{Rdb}$  bude veći ili jednak 1,2, s tim da nominalna nosivost greda treba sadržavati doprinos ploče za pozitivni moment savijanje, a armaturu ploče, paralelne s rebrom i unutar sudjelujuće širine za negativni moment savijanja.

Propisima Novog Zelanda [7 i 10] predlaže se da omjer  $\Sigma M_{Rdc}/\Sigma M_{Rdb}$  bude između 1,5 i 2,0, kako ne bi, s velikom vjerojatnošću, došlo do formiranja plastičnih zglobova u stupovima, osim u podnožju najdonje etaže, što je potrebno za prelazak sustava u bočno-gredni mehanizam sloma. Izborom ovako visokog omjera nosivosti omogućuje armiranje stupova prema zahtjevima koji se propisuju za okvire naprezane standardnom kombinacijom opterećenja. Plastične zglobove u podnožju stupova najdonje etaže, zbog prisutnosti vjerojatno velike uzdužne sile, biti će potrebno jače poprečno armirati, kako bi se osigurala potrebna lokalna duktilnost i nosivost. Za područja plastičnih zglobova greda posebni su zahtjevi uglavnom blaži. Osim toga, propisima se preporučuje dodatno armirati stupove u blizini čvorova i samog čvora poprečnom armaturom u obliku zatvorenih spona i onih za proplitanje.

U europskoj prednormi za građenje u potresnim područjima ENV 1998 [3, 4, 6] nema zahtjeva kako adekvatnije modelirati seizmički otporne armiranobetonske okvire. Međutim, postoje druge mjerodavne odredbe kako bi se izbjegli plastični zglobovi u stupovima, osim u onima najdonje etaže, kao i zahtjevi kojima će se osigurati plastično deformiranje i disipacija seizmičke energije u kritičnim područjima, a prije krhkih slomova zbog posmičnih naprezanja, izvijanja, sidrenja i lokalnih naprezanja. Prema ovim normama to se postiže dimenzioniranjem presjeka okvirnih elemenata na momente savijanja i poprečne sile, izvan područja plastičnog deformiranja, prema kapacitetu nosivosti u plastičnim zglobovima. Osim ovog osnovnog zahtjeva, u ENV 1998 postoje i neke druge preporuke za građenje seizmički otpornih okvirnih konstrukcija.

Tako se u ENV 1998, dio 1.2 traži uzimanje u obzir omjera krutosti stupova prema krutosti greda u svakom čvoru, utjecaj nekonstrukcijskih elemenata te krutost horizontalne armiranobetonske dijafragme (stropa). Za zgrade koje zadovoljavaju pravilnost tlocrta, te za one s krutim

dijafragmama, dopuštaju se pojednostavnjenja, kao što je modeliranje ravninskih sustava, umjesto prostornih.

Prednormom ENV 1998, dio 1.3 zahtjeva se osigurati prikladan kapacitet disipacije seizmičke energije bez bitnog smanjenja nosivosti na seizmičku kombinaciju djelovanja. S tim u svezi, dopuštaju se nelinearne deformacije u kritičnim područjima, u skladu s predviđenom duktilnošću, odnosno dopuštenom deformacijom betona, bez oštećenja, osim u području plastičnih zglobova, koje se manifestiraju u otpadanju zaštitnog sloja. Predlaže se da plastični zglobovi budu jednolično raspoređeni po cijeloj konstrukciji, odnosno valja izbjegavati koncentraciju zglobova u jednoj etaži (mehanizam mekog kata) i da se javljaju, s velikom vjerojatnošću, u gredama. Područja potencijalnih plastičnih zglobova, greda i stupova, moraju imati visok stupanj plastičnog deformiranja, bez obzira što valja izbjegavati plastične zglobove u stupovima.

Iako se u ENV 1998 izričito ne zahtijeva konstruirati armiranobetonske okvire po načelu "jaki" stupovi, "slabe" grede, iz pojedinih zahtjeva i preporuka, može se zaključiti da se to indirektno traži, a prvenstveno preko dimenzioniranja elemenata izvan plastičnih zglobova prema kapacitetu nosivosti, kao i čvorova stup-greda te plastičnih zglobova na posmična naprezanja.

## 5 Zaključak

Kada se za prihvaćanje horizontalnog opterećenja na zgrade, sila potresa ili vjetra, odaberu armiranobetonski okviri, oni moraju biti, osim dostatno nosivi i duktilni, odnosno sposobni apsorbirati seizmičku energiju. To se postiže smišljenim odabirom dimenzija pojedinih elemenata i omjerom njihovih krutosti, armiranjem, odnosno odabirom omjera njihovih nosivosti u pojedinim čvorovima, te primjerenim metodama proračuna.

Na osnovi eksperimentalnih i teoretskih istraživanja, predlaže se suvremenim normama da omjer sume nosivosti momenata savijanja stupova prema onoj greda, na njihovu spoju, bude veći od 1,2. Konkretno prema ACI 318-99-normama omjer  $\Sigma M_{Rdc}/\Sigma M_{Rdb}$  treba biti 1,2, a prema normama Novog Zelanda taj omjer valja odabrati između 1,2 i 2,0 ili čak 2,4.

Ovom odredbom postiže se, s velikom vjerojatnošću, da će okvirni sustav prijeći, pri potresnoj kombinaciji opterećenja, u poželjan mehanizam sloma, tj. bočno-gredni. Pri tome valja uzeti u obzir doprinos armiranobetonske ploče, ako je ona predviđena, ovisno o predznaku momenta savijanja, na spoju sa stupom, prečki okvira. Za slučaj pozitivnog momenta savijanja, nosivosti grede uz čvor valja dodati doprinos sudjelujuće širine ploče, a za

negativni moment savijanja u gredi T-presjeka, doprinos armature ploče, paralelne s rebrom i na istoj širini.

Tim mjerama dobiva se realnija distribucija momenata savijanja po cijelom sustavu, mogućnost pouzdanijeg osiguranja plastičnih zglobova i visoka vjerojatnost da do krhkog sloma neće doći prije predviđene apsorpcije seizmičke energije.

Kada se okvirna konstrukcija proračunava prema europskim normama, u kojima nema ovih preporuka istraživača i zahtjeva suvremenih normi, prelazak u poželjni mehanizam sloma se osigurava indirektno dimenzioniranjem elemenata, izvan plastičnih zglobova, na savijanje

i posmično naprezanje, prema kapacitetu nosivosti na savijanje plastičnih zglobova. S druge strane, sugerira se projektirati armiranobetonske okvire po načelu "jaki" stupovi, "slabe" grede, ali bez konkretnih prijedloga za omjer sume nosivosti ili krutosti stupova prema onoj greda na njihovu spoju.

Za proračun armiranobetonskih okvira, napreznih potresnom kombinacijom djelovanja, primjereno je rabiti teoriju plastičnosti, ali se propisima dopušta primjenjivati i linearnu teoriju elastičnosti s ograničenom preraspodjelom, s tim da se osiguraju područja plastičnih zglobova i nešto izvan njih za nelinearno deformiranje i apsorpciju seizmičke energije.

## LITERATURA

- [1] *Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima*, Službeni list, br. 31, 1981.
- [2] Durrani, A. J.; Wight, J. K.: *Earthquake Resistance of Reinforced Concrete Interior Connections Including a Floor Slab*, ACI Structural Journal, Vol. 84, No. 5, September-October, 1987, 400.-406.
- [3] ENV 1998, Part 1.1, *Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures*, General Rules-Seismic Actions and General Requirements for Structures, CEN, Brussels, September, 1994.
- [4] ENV 1998, Part 1.2, *Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures*, General Rules, General Rules for Buildings, CEN, Brussels, September, 1994.
- [5] ENV 1992, Part 1.1, *Design of Concrete Structures*, General Rules and Rules for Buildings, Revised final draft, CEN, Brussels, October, 1994.
- [6] ENV 1998, Part 1.3, *Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures*, General Rules, Specific Rules for Various Materials and Elements, CEN, Brussels, February, 1995.
- [7] Tomičić, I.: *Betonske konstrukcije-odabrana poglavlja*, Zagreb, 1996.
- [8] Committee 318, 1999, *Building Code Requirements for Structural Concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 391 pp.
- [9] Pantazopoulou, S. J.; French, C. W.: *Slab Participation in Practical Earthquake Design of Reinforced Concrete Frames*, ACI Structural Journal, Vol. 98, No. 4, July-August, 2001, 479.-489.
- [10] Dooley, K. L.; Bracci, J. M.: *Seismic Evaluation of Column-to-Beam Strength Ration in Reinforced Concrete Frames*, ACI Structural Journal, Vol. 98, No. 6, November-December, 2001, 843.-851.
- [11] Tomičić, I.: *Primjena betona visokih svojstava u građenju okvirnih konstrukcija*, Građevinar 54 (2002)10, 585.-591.