

Seizmički otporne armiranobetonske okvirne konstrukcije od montažnih elemenata

Ivan Tomičić

Ključne riječi

montažne okvirne konstrukcije, proračun na potres, metoda redukcije sila, metoda odabira međukatnog pomaka, duktilni spoj

Key words

prefabricated frame structures, seismic design, force reduction method, interstory displacement selection method, ductile joint

Mots clés

constructions à ossature préfabriquée, calcul de la résistance au séisme, méthode de la réduction des forces, méthode de choix du déplacement entre les étages, joint ductile

Schlüsselworte:

Montagerahmenkonstruktionen, seismische Berechnung, Methode der Kräftereduktion, Methode der Auswahl der Zwischenstockwerkverschiebung, duktile Verbindung

I. Tomičić

Seizmički otporne armiranobetonske okvirne konstrukcije

Prikazane su dvije metode proračuna okvira od predgotovljenih elemenata. Prva, nazvana metodom redukcije sila već je prihvaćena državnim i europskim normama, pa se često primjenjuje u praksi. Novija, metoda odabira međukatnog pomaka, rezultat je najnovijih istraživanja, a ima za cilj osigurati bitne performanse i konkurentnost armiranobetonskih okvira od predgotovljenih elemenata s duktilnim spojevima. Navedeni su zahtjevi i preporuke Europskih prednorma ENV 1992 i ENV 1998.

I. Tomičić

Earthquake resistant reinforced concrete frame structures

Two methods for the design of frames made of prefabricated elements are presented. The first one, the force reduction method, has already been accepted in national and European standards and is often applied in practice. The more recent method, i.e. the interstory displacement selection method, is the result of latest research efforts, and its objective is to ensure better performance and higher competitiveness of reinforced-concrete frames made of prefabricated elements with ductile joints. The requirements and recommendations given in European prestandards ENV 1992 and ENV 1998 are presented.

I. Tomičić

Constructions à ossature en béton armé résistantes aux séismes

L'article présente deux méthodes de calcul des cadres en éléments préfabriqués. La première, dite la méthode de la réduction des forces, a été déjà retenue par les normes nationales et européennes et elle est souvent utilisée dans la pratique. L'autre, plus récente, dite la méthode de choix du déplacement entre les étages, est le résultat des dernières recherches, dont le but consiste à assurer les performances essentielles et la compétitivité des ossatures en béton armé composées d'éléments préfabriqués par rapport aux joints ductiles. On cite aussi les exigences et les recommandations des prénormes européennes ENV 1992 et ENV 1998.

I. Tomičić

Seismisch widerstandsfähige Stahlbetonrahmenkonstruktionen

Dargestellt sind zwei Berechnungsmethoden für Rahmen aus vorgefertigten Elementen: die erste, Methode der Kräftereduktion genannt, ist schon durch staatliche und europäische Normen angenommen, deshalb wird sie in der Praxis häufig angewendet. Die neuere, Methode der Auswahl der Zwischenstockwerkverschiebung, ist das Ergebnis neuerer Forschungen und hat als Ziel die Sicherung der Haupteigenschaften und Konkurrenzfähigkeit von Stahlbetonrahmen aus vorgefertigten Elementen mit duktilen Verbindungen. Angeführt sind Forderungen und Empfehlungen der europäischen Vornormen ENV 1992 und ENV 1998.

Pregledni rad

Subject review

Ouvrage de synthèse

Übersichtsarbeit

Autor: Prof. dr. sc. Ivan Tomičić, dipl. ing. građ., Zagreb Vramčeva 21

1 Općenito

Znanstvena i tehnološka istraživanja, osobito posljednjih pedeset godina, omogućila su realizaciju sigurnih, racionalnih i uporabljivih armiranobetonskih i prednapetih konstrukcija. Za ovo razdoblje razvoja karakteristična je industrijalizacija i montažni način građenja.

Montažne armiranobetonske konstrukcije znatno su pogodnije za industrijalizaciju nego monolitne. Izvođenje konstrukcije građevine pretvara se u izradu predgotovljenih elemenata i njihovo spajanje u monolitnu cjelinu. Rad je moguć i zimi, pa se građevine završavaju u kraćem roku, što je velika prednost montažnoga građenja. Postiže se ušteda u materijalu i radnoj snazi. Montažnim načinom građenja izvode se konstrukcije zgrada i industrijskih građevina te, općenito, one konstrukcije gdje je potrebno malo vrsta standardnih elemenata.

Monolitne okvirne konstrukcije izvedene na gradilištu primjenjuju se u građenju gotovo od samog pronalaska armiranog betona. Tome je pomoglo što se tim materijalom vrlo lako dobivaju kruti čvorovi za razliku od drvenih i čeličnih konstrukcija, kada je to složenije.

Armiranobetonske konstrukcije od montažnih elemenata počinju se učestalije projektirati i izvoditi poslije Drugoga svjetskog rata. Glavni su čimbenici montažnoga građenja način izrade i montaže elemenata te izvedba spojeva. Općenit je zahtjev dobiti montažne okvirne konstrukcije karakteristika istih ili vrlo bliskih onima od monolitnog betona.

Okvirne armiranobetonske konstrukcije izvedene na gradilištu, kao i one od montažnih elemenata, valja projektirati da imaju, osim svojstva nosivosti, i duktilnost potrebnu za apsorpciju seizmičke energije, kako bi se mogle proračunavati na reducirane sile potresa.

Prijašnja istraživanja monolitnih armiranobetonskih okvira već su pokazala njihovo dobro ponašanje na djelovanje gravitacijskih i inercijalnih sila. Isto tako, nedavno provedena istraživanja u Novom Zelandu [7] armiranobetonskih okvira načinjenih od montažnih elemenata, međusobno kruto spojenih, potvrđuju također njihovo zadovoljavajuće ponašanje na djelovanje vertikalnih i horizontalnih sila ako se odgovarajuće konstruiraju i izvedu. Prema ovim istraživanjima, spojevi montažnih elemenata moraju se izvesti izvan kritičnih područja (položaja plastičnih zglobova), tako da ostaju u području elastičnog deformiranja. Povezivanjem armature elemenata preklapanjem ili zavarivanjem te betoniranjem spojeva na gradilištu postiže se kontinuitet sustava koji se, praktički, podudarno ponaša na seizmičke i ostale sile s konstrukcijom monolitno izvedenom u cijelosti na gradilištu. Ovakav spoj i drugi presjeci elemenata, izvan kritičnih područja, moraju se dimenzionirati prema kapacitetu nosivosti presjeka u području plastičnih zglobova.

Kada se odstupa od gornjeg zahtjeva i spojevi montažnih elemenata i plastični zglobovi predviđaju u kritičnim područjima, zbog lošijih histerezničkih karakteristika spojeva dobivenih eksperimentalnim istraživanjem, neće doći do predviđene apsorpcije seizmičke energije. Zbog te činjenice, američkim UBC-normama [5] i onima Europske unije ENV 1998-1-3 [3] predviđa se preko koeficijenta duktilnosti ili ponašanja manja redukcija seizmičkih sila. Prema tome, prednost montažnih konstrukcija bit će anulirana ili u najboljem slučaju umanjena.

Aktualna istraživanja u Sjedinjenim Američkim Državama pod nazivom "Sustavi seizmički otpornih montažnih konstrukcija" (PRESS) [9] imaju za cilj ponuditi konstruktorima novu filozofiju proračuna armiranobetonskih okvira od montažnih elemenata nazvanu "Metodom odabira međukatnog pomaka (nagiba elemenata)" koja je osobito podesna za montažne okvirne konstrukcije s duktilnim spojevima, odnosno sa spojevima u kritičnom području. Načela proračuna ove metode predviđaju apsorpciju seizmičke energije, ovisno o karakteristikama histereze, na direktan i jednostavan način ugrađen u postupak proračuna.

Svrha je ovog rada da se prikažu dosadašnji rezultati istraživanja provedenih u svijetu te, na temelju toga, dadu prijedlozi i upute za projektiranje i konstruiranje duktilnih i nosivih armiranobetonskih okvira načinjenih od montažnih elemenata. Rabiće se, sada već standardna, metoda proračuna po kojoj se duktilne armiranobetonske konstrukcije proračunavaju na reducirane sile potresa (*Force-Based Design*), a koja je unesena u današnje američke, novozelandske te europske norme. Osim toga, prikazat će se najnovija filozofija proračuna na osnovi nagiba elemenata *Drift-Based Design*. Također u ovom radu opisan će se zahtjevi i smjernice za proračun i konstruiranje otpornih armiranobetonskih okvirnih konstrukcija od montažnih elemenata prema europskoj prednormi Eurocode 8-1-3 [3].

2 Proračun i konstruiranje

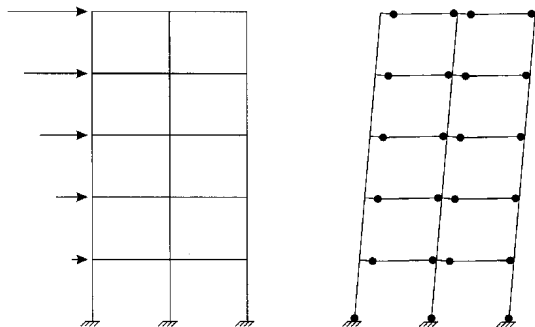
2.1 Metoda redukcije sila

2.1.1 Proračun prema ENV 1998

Metoda redukcije sila, prihvaćena vodećim državnim propisima te propisima Europske unije, primjenjuje se za monolitne armiranobetonske okvire izvedene na gradilištu i one od montažnih elemenata kruto spojenih. Proračunavaju se da budu sposobni prihvaćati vertikalna i horizontalna opterećenja te trošiti predviđeni dio seizmičke energije. Da bi se to ostvarilo, potrebno je, prije svega, konstrukcijskim mjerama osigurati duktilnost presjeka i konstrukcije u cjelini i prelazak sustava u "pravi" mehanizam sloma, kako bi se omogućila najveće

ća apsorpcija seizmičke energije. To znači da se presjeci plastičnih zglobova moraju dimenzionirati tako da u njima dođe do iskorištavanja čelika i do potrebnoga plastičnog deformiranja prije krhkog sloma betona od glavnih kosih tlačnih napona, izvijanja ili sloma zbog nedovoljnog sidrenja. Svi ostali presjeci konstrukcije, pa tako i spojevi montažnih elemenata, moraju se dimenzionirati prema kapacitetu nosivosti presjeka u području plastičnih zglobova.

Poželjan mehanizam sloma okvirnih sustava, pretežno opterećenih silama potresa, jest bočno-gredni mehanizam prikazan na slici 1. Njegove su prednosti u tome što se zglobovi stvaraju u gredama pretežno napreznim savijanjem gdje je lakše osigurati potrebnu duktilnost te zbog relativno malih plastičnih deformacija za traženu duktilnost konstrukcije. Zglobovi u podnožju stupova, prisutni u ovome mehanizmu, naprezani su na ekscentrični tlak, pa se potrebna duktilnost često mora postići ovijanjem betonske jezgre.



Slika 1. Opterećenje i bočno-gredni mehanizam sloma okvira

Bočno-gredni mehanizam postiže se oblikovanjem okvira po načelu: "jaki stupovi-slabе grede". Za stupove predlaže se 2 do 3 puta veća nosivost od one priključnih greda.

Za mjeru lokalne duktilnosti (duktilnost presjeka) rabi se *dogovoreni faktor duktilnosti preko zakrivljenosti* (CCDF) dan izrazom:

$$\mu_c = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{sy,k}} \cdot \frac{1 - \xi_{sy}}{\xi_{cu}} \quad (1)$$

gdje je:

ε_{cu} - deformacija betona koja odgovara napreznju $0,85 f_{ck}$ na padajućoj grani dijagrama $\sigma_c - \varepsilon_c$

$\varepsilon_{sy,k}$ - karakteristična deformacija čelika koja odgovara granici popuštanja

ξ_{sy} - koeficijent položaja neutralne osi kada napreznje u čeliku dostiže granicu popuštanja

ξ_{cu} - koeficijent položaja neutralne osi kada napreznje u betonu dostiže $0,85 f_{ck}$.

Valja osigurati najmanju vrijednost za CCDF, kako bi se zadovoljio zahtjev za plastično zakretanje predviđeno odabirom faktora ponašanja q .

Ako je za određenu vrijednost faktora duktilnosti potrebna tlačna deformacija betona veća od 0,0035, umanjena nosivost zbog otpadanja zaštitnog sloja nadoknađuje se povećanom čvrstoćom betona ovijenog sporama ili spiralom.

Potrebna armatura za ovijanje betonske jezgre određuje se preko mehaničkog koeficijenta armiranja danog izrazom:

$$\omega_{wd} \geq \frac{k_0}{\alpha} (v_d + 0,10) \left(0,35 \frac{A_c}{A_0} + 0,15 \right) \quad (2)$$

gdje je:

$$\omega_{wd} = \frac{\text{volumensponazaovijanje}}{\text{volumenbetonske jezgre}} \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \geq \omega_{wd, \min}$$

α - globalna djelotvornost ovijanja

k_0 - koeficijent ovisan o klasi duktilnosti [11]

v_d - računski bezdimenzijska uzdužna sila

A_c - površina elementa

A_0 - površina betonske jezgre.

Faktor ponašanja jest aproksimacija omjera seizmičkih sila na sustavu s potpuno elastičnim ponašanjem prema računskim silama potresa, odnosno on karakterizira duktilnost konstrukcije. Dobiva se po izrazu:

$$q = q_0 k_D k_R k_w \geq 1,5 \quad (3)$$

gdje je:

q_0 - osnovna vrijednost za visoku klasu duktilnosti

k_D - faktor koji odražava klasu duktilnosti

k_R - faktor koji odražava regularnost sustava

k_w - faktor koji odražava prevladavajući model sustava [11].

Računsko seizmičko djelovanje A_E izračunava se uporabom težina dobivenih iz sljedeće kombinacije djelovanja:

$$G_k + \Sigma \Psi_{E,i} Q_{k,i} \quad (4)$$

gdje je $\Psi_{E,i}$ koeficijent kombinacije za promjenjiva opterećenja.

Za slučaj seizmičke situacije djelovanja, računski učinak opterećenja izračunava se po izrazu:

$$S_d = S_d (\Sigma G_{k,i} + \gamma_l \cdot A_E + P_k + \Sigma \Psi_{2,i} Q_{k,i}) \quad (5)$$

gdje je:

$G_{k,i}$ - karakteristična veličina za stalno opterećenje

$Q_{k,i}$ - karakteristična veličina za promjenjivo opterećenje

γ_I - faktor važnosti

P_k - karakteristična veličina izazvana prednapinjanjem

$\psi_{2,i}$ - koeficijent kombinacije za promjenjivo djelovanje [11].

Za određivanje ukupne sile potresa dopušta se uporaba računskog spektra odziva normiranog na gravitacijsko ubrzanje zemlje ovisno o periodu osciliranja konstrukcije. Ukupna računska sila potresa dobije se po izrazu:

$$F_b = S_d(T) \cdot W \quad (6)$$

gdje je:

$S_d(T)$ - ordinata računskog spektra odziva za period T [3]

W - ukupna težina zgrade izračunana u skladu s izrazom (4).

Grede i stupove izvan kritičnih područja te čvorove okvirne konstrukcije valja dimenzionirati na povećane vrijednosti reznih sila odnosno prema kapacitetu nosivosti presjeka plastičnih zglobova.

Zbog povećane nosivosti u području plastičnih zglobova u odnosu prema nominalnim vrijednostima, pretpostavljenim pri provjeri ravnoteže sustava, doći će do manje redukcije seizmičkih sila, a time i do veće opasnosti od krhkog sloma izvan plastičnih zglobova. Do ovog povećanja dolazi zbog uporabe računskih čvrstoća gradiva pri dimenzioniranju, upotrebe čelika u području ojačanja te često zbog odabiranja zaokružene veće površine čelika od potrebne.

Koeficijent povećanja reznih sila γ_{Rd} kreće se od 1,25 za grede i čvorove do 1,35 za stupove, a za klasu duktilnosti "H", dok je za niže klase duktilnosti on manji i doseže vrijednost 1,0 za klasu duktilnosti "L".

2.1.2 Dodatne odredbe za okvirne konstrukcije od montažnih elemenata

Europskom prednormom ENV 1998-1-3 [3] predlaže se rabiti konstrukcije srednje (M) i niske (L) duktilnosti, a iznimno i, uz dodatne provjere, sustave visoke (H) duktilnosti. Uvjet primjene montažnih okvira jest pravilna konstrukcija i ona kojoj se nosivi vertikalni elementi ne prekidaju ni u jednom katu. Faktor ponašanja za montažne okvire proračunava se po izrazu:

$$q_p = k_p \cdot q \quad (7)$$

gdje je:

q - faktor ponašanja dan izrazom (3)

k_p - faktor redukcije ovisan o kapacitetu disipacije seizmičke energije montažnog sustava.

Faktor redukcije ima ove vrijednosti:

$k_p = 1,0$ za konstrukcije sa spojevima izvan kritičnog područja

$k_p = 0,75$ za konstrukcije s duktilnim spojevima unutar kritičnog područja.

Iz ove odredbe može se vidjeti da se monolitne konstrukcije i one od montažnih elemenata, ali sa spojevima izvan kritičnih područja, jednako tretiraju. Međutim, armiranobetonske konstrukcije od montažnih elemenata sa spojevima u području plastičnih zglobova računaju se s reduciranim koeficijentom ponašanja, što ovakve sustave, proračunane po navedenom postupku, čini manje konkurentnim.

Spojevi u kritičnim područjima, da bi mogli trošiti seizmičku energiju, moraju biti duktilni, što valja provjeriti preko faktora duktilnosti-izraz (1), te zadovoljiti druge odredbe, posebno za grede i stupove, koje vrijede za kritična područja monolitnih okvirnih konstrukcija i onih sa spojevima izvan kritičnih područja.

Nosivost spojeva u kritičnim područjima provjerava se prema općem izrazu:

$$S_d \leq R_{pd} = \frac{R_d}{(\gamma_{Rd} \cdot \gamma_{cycl})} \quad (8)$$

gdje je:

S_d - računska rezna sila izazvana seizmičkom situacijom djelovanja

R_{pd} - adekvatna računska nosivost spoja u kritičnom području za potresne uvjete

R_d - adekvatna računska nosivost spoja u kritičnom području za monotono opterećenje

γ_{Rd} - dodatni koeficijent nesigurnosti modela:

- $\gamma_{Rd} = 1,20/1,10/1,00$ za klase duktilnosti

DC H/M/L - uzdužne sile

- $\gamma_{Rd} = 1,35/1,25/1,15$ za klase duktilnosti

DC H/M/L - poprečne sile

γ_{cycl} - koeficijent redukcije zbog degradacije nosivosti spoja:

- $\gamma_{cycl} = 1,15$ - uzdužne sile

- $\gamma_{cycl} = 1,20$ - poprečne sile - vertikalni spoj

- $\gamma_{cycl} = 1 + 0,15q_p \geq 1,2$ - poprečne sile - horizontalni spoj.

Računska nosivost spoja izvan kritičnog područja ne smanjuje se, tj. $\gamma_{Rd} = \gamma_{cycl} = 1,0$.

Spoj u kritičnom području može zadržati elastično ponašanje ako se dodatnim armiranjem plastični zglob pomakne dalje od spoja. U tom slučaju računске rezne sile u kritičnom području, i malo izvan njega, valja povećati faktorom 2,0 za DC H i M odnosno 1,5 za DC L.

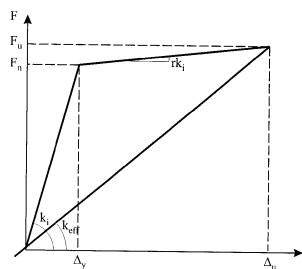
2.2 Metoda odabira međukatnog pomaka

Autori ove metode[9] smatraju da se uporabom smanjenog koeficijenta duktilnosti prema ACI-normama, a isto tako faktora ponašanja prema ENV 1998, kada se radi o armiranobetonskim okvirima od montažnih elemenata sa spojevima u kritičnim područjima, šteti konkurentnosti takvih konstrukcija prema monolitnim sustavima izvedenim na gradilištu. Stoga predlažu novu filozofiju proračuna montažnih konstrukcija na gravitacijske i inercijalne sile. Metoda je osobito podesna za okvirne konstrukcije od montažnih elemenata sa spojevima u kritičnim područjima sposobnim za trošenje seizmičke energije.

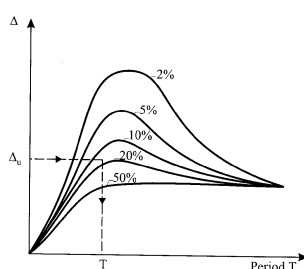
Kako je nagib elemenata (stupova), a time i pomak centra masa prema njihovu podnožju, bitan za trajnost konstrukcije, po ovoj metodi polazi se od računskog nagiba, odnosno graničnog stanja uporabljivosti, a završava dimenzioniranjem, odnosno kontrolom nosivosti i krutosti.

Postupak će biti prikazan na okvirnoj konstrukciji koja će se aproksimirati konzolom s jednim stupnjem slobode. Krutost sustava je određena preko sekantne krutosti K_{eff} (slika 2.) za najveći računski pomak, umjesto početne krutosti. Ovdje se rabe pojmovi: *razina ekvivalentnoga viskoznog prigušenja konstrukcije i očekivana duktilnost pri najvećem odzivu preko pomaka*. Na slici 3. jest set krivulja u koordinatnom sustavu: period konstrukcije T - računski pomak Δ za različite razine ekvivalentnoga viskoznog prigušenja (spektar odziva preko pomaka za različita prigušenja).

Proračun je moguć raspolaganjem dijagrama na slici 3. i 4. po koracima:



Slika 2. Efektivna krutost pri računskom pomaku



Slika 3. Računski pomak za više razina prigušenja u funkciji perioda

1. korak

Valja pretpostaviti pomak Δ_y koji odgovara popuštanju armature montažne konstrukcije. Kao početna veličina nagiba uzima se kut $\Theta_y = 0,003$ radijana.

2. korak

Odabire se računski kut nagiba Θ_u uvjetovan važnošću konstrukcije, odnosno ograničenjem oštećenja, a koji je još u funkciji geometrije presjeka i stupnja ovijenosti poprečnom armaturom područja plastičnih zglobova.

3. korak

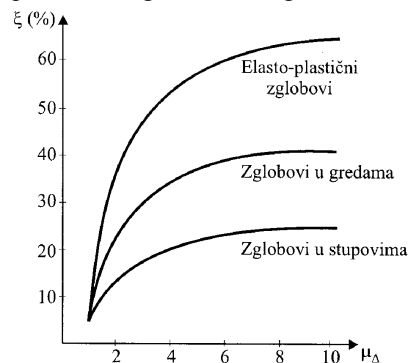
Izračunava se najveći prihvatljivi pomak Δ_u centra masa, a time i centra seizmičkih sila za zamjenjujući sustav konzola s plastičnim zglobom u njegovu podnožju:

$$\Delta_u = \Theta_u \cdot L \quad (9)$$

gdje je L visina od plastičnog zgloba do centra masa konzole.

4. korak

Valja procijeniti efektivno viskozno prigušenje konstrukcije na osnovi duktilnosti preko pomaka $\mu_\Delta = \Delta_u / \Delta_y$ uporabom dijagrama: koeficijent prigušenja ξ - koeficijent duktilnosti μ_Δ dan na slici 4. Krivulje dijagrama dobivene su na osnovi bitnih karakteristika histereza sustava s plastičnim zglobovima u gredama i stupovima.



Slika 4. Ekvivalentno viskozno prigušenje u funkciji duktilnosti

5. korak

Poznavanjem računskoga elastičnog spektra odziva preko pomaka za predviđeno područje građenja, kao što je onaj na slici 3., period efektivnog odziva, pri najvećem pomaku odziva, može se odrediti. Uporabom poznatog izraza za period: $T = 2\pi \sqrt{M / K_{eff}}$ izračunava se efektivna krutost:

$$K_{eff} = \frac{4\pi^2}{T^2} M \quad (10)$$

Uporabom slike 2. dobiva se potrebna nosivost ili kapacitet poprečne sile u podnožju zamjenjujućeg sustava:

$$F_u = K_{eff} \Delta_u \quad (11)$$

6. korak

Provodi se preliminarno dimenzioniranje elemenata okvira na osnovi sile F_u . Proračunava se elastična krutost K_i i točnije odredi pomak Δ_y , tj onaj kada armatura dostiže granicu popuštanja.

7. korak

Ukupni pomak, duktilnost konstrukcije i, prema tome, efektivno prigušenje ponovno se provjeravaju, a koraci 4÷6, u slučaju razlike, se ponavljaju. Ovaj iterativni postupak provodi se dok se ne dobije zadovoljavajuće rješenje. Pojedinačne nosivosti potencijalnih plastičnih zglobova na savijanje valja provjeriti primjenom uvjeta ravnoteže.

Postupak opisan preko 7 koraka vrlo je fleksibilan. Naime, kapacitet zakretanja plastičnog zgloba u funkciji je ovijanja presjeka sponama, i obrnuto, ovijanje je ovisno o kapacitetu rotacije.

Metoda odabira pomaka za višekratne okvire primjenjiva je uz poznavanje dodatnih parametara. Valja definirati odnos između najvećega međukatnog pomaka i konstrukcije u centru seizmičkih sila te raspodjelu horizontalnih sila potresa na konstrukciju. Te se veličine vide na slici 5. za idealizirani okvir od "n" katova, svaki visine h_s . Središte seizmičkih sila približno je na 2/3 visine zgrade, a najveći pomak kod te visine može se dobiti po izrazu:

$$\Delta_u = \Delta_y + 2/3n \cdot h_s \cdot \Theta_p \cdot K \quad (12)$$

gdje je:

$K \leq 1$ - koeficijent kojim se uzima u obzir nejednoliki nagib zgrade po visini

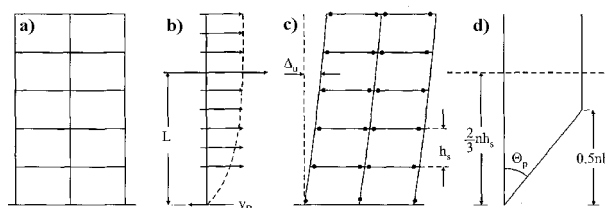
Θ_p - najveći usvojeni kut zakretanja plastičnog zgloba i prema tome najveći kut nagiba kata.

Kut nagiba ograničuje se dopuštenim pomakom konstrukcije zbog zahtjeva graničnog stanja uporabljivosti (ograničenja štete). Na primjer, za najveći "stvarni" katni nagib $\Theta_u = 0,02$, specificiran kao računski najveći otklon od potresnog djelovanja, dopušteni kut nagiba dobije se izrazom:

$$= \frac{0,02}{\omega} \quad (13)$$

gdje je ω_Θ dinamički faktor za kut nagiba ovisan o razini točnosti proračuna nagiba u konačnoj raščlambi. Ovaj se faktor kreće od $\omega_\Theta = 1,5$ za elastične konstruk-

cije i početnu krutost do $\omega_\Theta = 1,0$ za proračun po teoriji plastičnosti koja se zasniva na realnim karakteristikama histereze.



Slika 5. Najveći odziv okvirne konstrukcije:

a) sustav, b) raspodjela sila, c) mehanizam sloma i slika pomaka, d) aproksimacija dijagrama plastičnih pomaka

Ako se usvoji, na osnovi plastične analize, distribucija nagiba prema slici 5.d, gdje je nagib u donjoj polovici sustava jednak dvostrukom srednjem nagibu do krovne ravnine, te pretpostavi da se ta raspodjela može također primijeniti na komponentu nagiba od plastičnog deformiranja, jednadžba (12) može se pojednostavniti ($K = 0,75$) u oblik:

$$\Delta_u = \Delta_y + 0,5n \cdot h_s \cdot \Theta_p \quad (14)$$

Takav pristup prikladan je za proračun okvirnih konstrukcija sa spojevima u kritičnim područjima koji imaju lošije karakteristike histereze od onih monolitnih okvira izvedenih na gradilištu ili sastavljenih od montažnih elemenata, ali sa spojevima izvan kritičnih područja. Također ova metoda vrlo se lako može prilagoditi bilo kojim karakteristikama histereze.

Primjena navedenog postupka na okvirne konstrukcije s više stupnjeva slobode, za sada, nije primjenjiva.

3 Spojevi elemenata

Okvirne konstrukcije od montažnih elemenata ostvaruju se na građevini tako da se elementi međusobno spajaju u jednu monolitnu cjelinu. Prema ENV 1998-1-3 razlikuju se sljedeće vrste spojeva:

a) Spojevi koji se nalaze izvan kritičnog područja

Ne utječu na disipaciju seizmičke energije. Moraju biti udaljeni od najbližeg presjeka kritičnog područja više ili jednako većoj dimenziji presjeka elemenata koji se spajaju. Rezne sile u spoju proračunavaju se s faktorom $\gamma_{rd} \geq 1,1$. Jedan od niza mogućih spojeva prikazan je na slici 6.a.

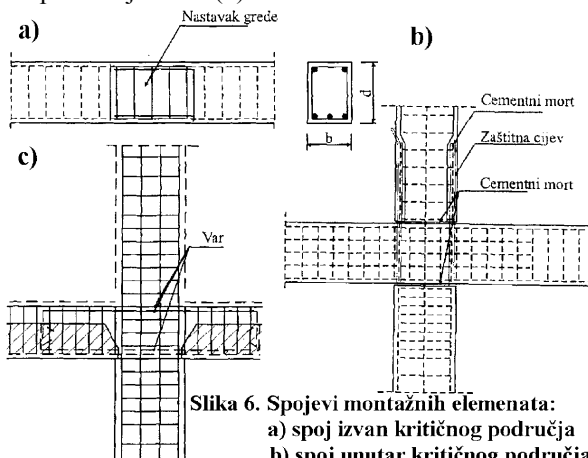
b) Spojevi koji se nalaze unutar kritičnog područja

Dimenzionirani su na povećanu nosivost, tako da ostaju u području elastičnog ponašanja, a područje plastičnog deformiranja i trošenja seizmičke energije pomaknuto je dalje od spoja. Takav spoj može se izvesti prema slici 6.b. Računske rezne sile u spoju, i dalje na duljini $1,5l_{cr}$,

množe se faktorom povećanja $\gamma_{rd} = 2,0$ za klase duktilnosti DC H i DC M, a faktorom $\gamma_{rd} = 1,5$ za klasu duktilnosti DC L.

c) *Duktilni spojevi koji se nalaze unutar kritičnog područja*

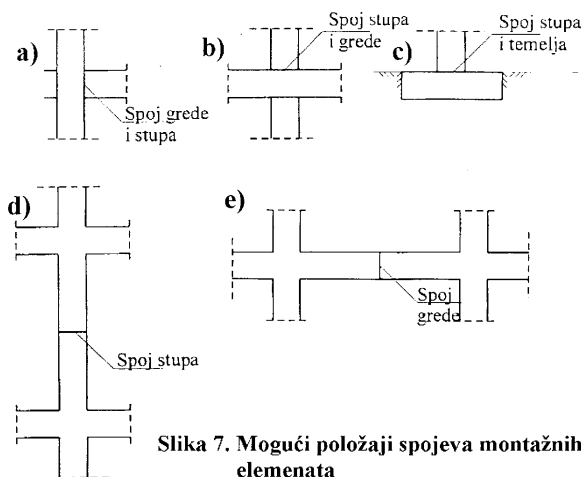
Mogu se plastično deformirati i trošiti seizmičku energiju. Zbog toga moraju zadovoljiti uvjete koji se traže za plastične zglobove monolitnih sustava. Primjer takvog spoja prikazan je na slici 6.c. Okvirna konstrukcija s takvim spojevima proračunava se s reduciranim faktorom ponašanja-izraz (7).



Slika 6. Spojevi montažnih elemenata:
a) spoj izvan kritičnog područja
b) spoj unutar kritičnog područja
c) duktilni spoj unutar kritičnog područja

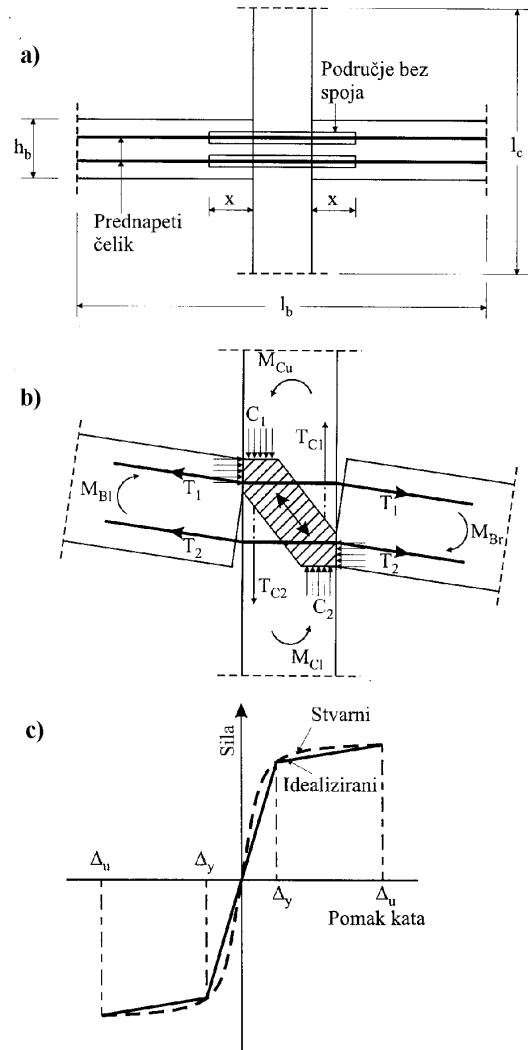
Vrste spojeva s obzirom na njihov položaj u okvirnoj konstrukciji prikazane su na slici 7. Veći broj ovih spojeva ne utječe na disipaciju seizmičke energije odnosno ostaju u području elastičnog ponašanja. To su spojevi izvan kritičnog područja ili su u tom području, ali s pomaknutim plastičnim zglobom dalje od spoja. Primjeri takvih spajanja navedeni su na slici 6.

Međutim, spojevi na istim lokacijama kao na slici 7. ako se odgovarajuće armiraju i ako se nalaze u kritičnom području, mogu imati svojstvo plastičnog deformiranja, odnosno zakretanja elemenata.



Slika 7. Mogući položaji spojeva montažnih elemenata

Primjer spoja za koji je dijagram sila-pomak nelinearan i u području elastičnosti dan je na slici 8.



Slika 8. Spoj montažnih elemenata koji se ponaša elastično:
a) spoj grede i stupa, b) nosivi mehanizam čvora,
c) dijagram sila-pomak

Ovaj spoj jest novost i od osobitog je zanimanja istraživača. Pod djelovanjem sila potresa, suhi se spoj otvori, ali kabeli ostaju u području elastičnog deformiranja. Prednosti spoja su: reducirani zaostali pomak, smanjena oštećenja za predviđeni nagib i vrlo jednostavno armiranje.

4 Zaključak

Monolitne armiranobetonske okvirne konstrukcije sastavljene od montažnih elemenata imaju više prednosti u odnosu prema monolitnim izvedenim na gradilištu. Najvažnije su: ekonomičnost, povećana kakvoća elemenata, brzina građenja i mogućnost rada zimi.

Okvirne armiranobetonske konstrukcije, i monolitne izvedene na gradilištu i one sastavljene od predgotovljenih elemenata, valja projektirati i izvesti da budu nosive i duktilne. Izjednačenost performansi okvira izvedenih

na gradilištu i onih od montažnih elemenata postiže se izvođenjem kvalitetnih spojeva sposobnih za prihvaćanje reznih sila koje se pojavljuju u presjecima tih spojeva, odnosno odgovarajućim presjecima monolitnih okvira.

Kod zgrada bez armiranobetonskih zidova, okviri moraju biti proračunani i konstruirani za prihvaćanje gravitacijskih i inercijalnih sila. Pri proračunu se pretpostavlja da će okvirna konstrukcija, pod seizmičkom kombinacijom djelovanja, prijeći u mehanizam sloma s plastičnim zglobovima u gredama i podnožju stupova kao najprikladnijim za apsorpciju seizmičke energije, što vrijedi za oba načina građenja okvira. To se postiže tako da stupovi imaju 2 do 3 puta veću nosivost od greda. Dalje, potrebno je osigurati okvirnu konstrukciju od prijevremenih krhkih lomova zbog savijanja, posmika, sidrenja i izvijanja te degradacije čvorova okvira. Upute za ta osiguranja poznate su iz projektiranja monolitnih i duktilnih armiranobetonskih okvirnih konstrukcija i mogu se bez dvojbe primjenjivati i za one sastavljene od montažnih elemenata.

Za proračun armiranobetonskih okvirnih konstrukcija od montažnih elemenata predlažu se dvije metode.

Prva metoda, ovdje nazvana *Metodom redukcije sila*, već se smatra standardnom, a rabi se za monolitne okvire izvedene na gradilištu i one sastavljene od montažnih elemenata. Po njoj se predviđa da se dio seizmičke energije troši na plastično deformiranje čelika u kritičnim područjima. Metoda se primjenjuje s istim faktorom ponašanja i na okvire od montažnih elemenata ako su spojevi elemenata izvan kritičnih područja, a s reduciranim faktorom ponašanja ako su spojevi u području plastičnih zglobova.

Druga metoda, ovdje nazvana *Metodom odabira nagiba elemenata*, nije u potpunosti još primjenjiva i nalazi se u

završnoj fazi istraživanja. Nastala je kako bi se održala ekonomska prednost montažnih okvirnih konstrukcija sa spojevima u kritičnim područjima. Po ovoj metodi odabire se nagib vertikalnih elemenata, a time i horizontalni pomak zbog djelovanja horizontalnih sila, prvenstveno izazvanih potresom, tako da oštećenja budu u granicama dopuštenih, a završava dimenzioniranjem elemenata. Pri proračunu rabe se pomoćna sredstva, kao što je spektar pomaka u funkciji perioda konstrukcije za više razina ekvivalentnog viskozno prigušenja, te dijagrami ekvivalentnog prigušenja u funkciji koeficijenta duktilnosti preko pomaka.

Najveća teškoća ovog načina proračuna i konstruiranja jest osiguranje spojeva za predviđeno zakretanje elemenata uz najmanja oštećenja. Za sada već postoje prijedlozi za duktilne spojeve, ali se istraživanja i dalje nastavljaju kako bi se dobilo više racionalnih rješenja.

Prednormama Europske unije ENV 1992 i ENV 1998 predviđa se građenje "monolitnih" armiranobetonskih okvirnih konstrukcija od predgotovljenih elemenata. Predlaže se standardna metoda proračuna te daju koeficijenti ponašanja za slučaj da su spojevi izvan kritičnih područja te smanjeni kada se predviđaju duktilni spojevi.

Autor ovoga rada predlaže graditi zgrade ukružene nosivim i duktilnim armiranobetonskim okvirima izvedenim na gradilištu i onima od montažnih elemenata, sposobnim za prihvaćanje vertikalnih i horizontalnih sila, tamo gdje se građevina ne može ukrotiti nosivim i duktilnim armiranobetonskim zidovima kao boljim rješenjem.

Primjenom modernih metoda proračuna i konstruiranja, opisanih skraćeno u ovom radu, mogu se graditi nosive, duktilne i uporabljive armiranobetonske okvirne konstrukcije sastavljene od predgotovljenih elemenata, sa svim prednostima u odnosu prema monolitnim.

LITERATURA

- [1] Eurocode 2, Design of Concrete Structures-Part 1-1, General Rules and Rules for Buildings, Revised final draft, CEN, Brüssel, October 1990.
- [2] Eurocode 2, Design of Concrete Structures-Part 1-3, General Rules, Precast Concrete Elements and Structures, CEN, Brüssel, October 1994.
- [3] Eurocode 8, Structures in Seismic Regions-Design, Part 1-1, Seismic Actions and General Requirements for Earthquake Resistance of Structures, Part 1-2, Buildings-General Rules, Part 1-3, Building-Specific Rules for Different Materials and Elements, Brüssel, February 1995.
- [4] ACI Committee 318-95, Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute, Detroit, 1995.
- [5] UBC, Uniform Building Code, Chapter 23, Section 2312, Earthquake Regulations, International Conference of Building Officials, USA 1988.
- [6] Code of Practice for the Design of Concrete Structures, (NZS 3101:1982), Standards Association of New Zealand, Wellington,
- [7] Park, R.: *Precast Concrete in Seismic-Resisting Building Frames in New Zealand*, Concrete International, November 1990., 43.-51.
- [8] Wong, P. K. C.; Priestley, M. J. N.; Park, R.: *Seismic Resistance of Frames with Vertically Distributed Longitudinal Reinforcement in Beams*, ACI Structural Journal, Vol. 87, No. 4, July-August 1990., 488.-498.
- [9] Priestley, M. J. N.: *Seismic Design Philosophy for Precast Concrete Frames*, Structural Engineering International, January 1996., 25.-31.
- [10] Tomičić, I.: *Nosive i duktilne armiranobetonske okvirne konstrukcije od montažnih elemenata*, HAZU, 457, knjiga XLI, Tehničke znanosti-svezak 6., Zagreb, 1992., 101.-114.
- [11] Tomičić, I.: *Betonske konstrukcije-odabrana poglavlja*, Zagreb, 1996.