

Primljen / Received: 23.9.2014.

Ispravljen / Corrected: 19.5.2015.

Prihvaćen / Accepted: 31.5.2015.

Dostupno online / Available online: 10.7.2015.

Nelinearna seizmička analiza čeličnog okvira s djelomično krutim priključcima

Autori:



Paulina Krolo, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Rijeci
Građevinski fakultet
paulina.krolo@gradri.uniri.hr



Prof.dr.sc. **Mehmed Čaušević**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Rijeci
Građevinski fakultet
mcausevic@gradri.uniri.hr



Doc.dr.sc. **Mladen Bulić**, dipl.ing.građ.
Sveučilište u Rijeci
Građevinski fakultet
mladen.bulic@gradri.uniri.hr

Pregledni rad

Paulina Krolo, Mehmed Čaušević, Mladen Bulić

Nelinearna seizmička analiza čeličnog okvira s djelomično krutim priključcima

U radu je prikazana nelinearna seizmička analiza čeličnog okvira bez dijagonala, pri čemu je uzeto u obzir stvarno ponašanje realnih djelomično krutih priključaka na način da je za odabrani priključak prethodno provedena numerička simulacija. Rezultat toga je dijagram odnosa momenta savijanja i rotacije priključka, koji je aproksimiran kao trilinearan, i uključen u seizmičku analizu primjenom nelinearne statičke metode N2. Određeni su apsolutni i relativni pomaci okvira te izvršena usporedba dobivenih rezultata s rezultatima za čelični okvir s apsolutno krutim priključcima.

Ključne riječi:

seizmička analiza, čelični okvir, djelomično kruti priključci, numerička analiza, nelinearna statička metoda N2

Subject review

Paulina Krolo, Mehmed Čaušević, Mladen Bulić

Nonlinear seismic analysis of steel frame with semi-rigid joints

The nonlinear seismic analysis of steel frame without diagonals is presented in the paper. The real behaviour of semi-rigid joints is taken into account through prior numerical simulation of the selected type of joint. The resulting bending moment and rotation curve is substituted with trilinear approximation and incorporated in seismic analysis according to the nonlinear static N2 method. Absolute and relative frame displacements are determined, and the corresponding results are compared with results for the steel frame with absolutely rigid joints.

Key words:

seismic analysis, steel frame, semi-rigid joints, numerical analysis, nonlinear static N2 method

Übersichtsarbeit

Paulina Krolo, Mehmed Čaušević, Mladen Bulić

Nichtlineare seismische Analyse eines Stahlrahmens mit teilweise steifen Anschlüssen

In dieser Arbeit wird die nichtlineare seismische Analyse eines Stahlrahmens ohne Diagonalen dargestellt, wobei das reale Verhalten teilweise steifer Anschlüsse in Betracht gezogen wird, so dass für den ausgewählten Anschluss zuvor eine numerische Simulation durchgeführt wurde. Als Resultat wurde das Verhältnis von Biegemoment und Krümmung ermittelt, das durch eine trilineare Approximation in der seismischen Analyse, die auf der nichtlinearen statischen N2 Methode beruht, angewandt wurde. Absolute und relative Verschiebungen des Rahmens wurden ermittelt und ein Vergleich mit Resultaten für einen Stahlrahmen mit vollständig steifen Anschlüssen wurde durchgeführt.

Schlüsselwörter:

seismische Analyse, Stahlrahmen, teilweise steife Anschlüsse, numerische Analyse, nichtlineare statische Methode N2

1. Uvod

Učinci potresnoga djelovanja mogu se odrediti na sljedeće načine: primjenom ekvivalentnog statičkog djelovanja, kada je odziv konstrukcije takav da ne postoji značajan doprinos viših oblika osciliranja (uzima se utjecaj samo prvoga oblika); modalnom analizom spektrima odziva, koja se primjenjuje bez ograničenja, znači za sve konstrukcije u zgradarstvu kod kojih postoji utjecaj viših oblika osciliranja na odziv konstrukcije; nelinearnom statičkom metodom postupnog guranja (eng. *pushover*) u kojoj se uzima utjecaj samo prvoga tona; nelinearnim dinamičkim proračunom u vremenu (eng. *time history*).

Dok su prve dvije od nabrojanih metoda linearne i otprije dobro poznate, njihovom primjenom se osjetila potreba za uvođenjem nelinearne statičke metode relativno jednostavne za primjenu. Postoji danas više takvih metoda izračuna, koje se različito nazivaju, a njihov pregled se može naći u [1-4]. One su uvedene u sve suvremene svjetske propise kojima se regulira proračun konstrukcija na djelovanje sila od potresa, na primjer [5, 6]. U europskim normama [6] uvedena je nelinearna statička metoda N2, a nastala je kao rezultat dugogodišnjeg rada grupe znanstvenika iz Slovenije [7-9]. Osnovna formulacija ove metode N2 se razvijala i dopunjavala, te se na taj način proširivala njena upotreba. Znači, od početne ideje u kojoj je bilo moguće primjenjivati tu metodu samo na regularne sustave, kod kojih ne postoji bitan utjecaj viših tonova osciliranja, nelinearna statička metoda se proširila na način da se najprije njezina primjena prenijela i na neregularne sustave kod kojih treba uzeti u obzir utjecaj viših tonova [10], kao i na sustave kod kojih je izražen utjecaj torzije [11]. Temeljna značajka svih ovih proširenja nelinearne statičke metode N2 jest u tome što je i dalje uporaba te metode ostala relativno jednostavna, pa se i dalje u puno slučajeva više isplati koristiti ovako proširenu metodu N2 u odnosu na primjenu nelinearnog dinamičkog proračuna u vremenu (*time history*). U istraživanjima čiji se dio izlaže u ovom radu, primjena nelinearne statičke metode N2 odnosi se na proračun okvirnih čeličnih konstrukcija koji uzima u obzir djelomično krute priključke. Naime, u ovom se radu izlaže nastavak istraživanja nakon što su neki rezultati prezentirani u [12, 13].

Tradicionalni pristup projektiranja čeličnih okvirnih konstrukcija razmatra priključke kao zglobne bez ikakve otpornosti i krutosti ili pak kao potpuno krute s punom otpornosti. Iako takav pristup pojednostavljuje postupak proračuna konstrukcije, on ne opisuje njeno stvarno ponašanje. U stvarnosti oba slučaja mogu biti netočna i samo su granični slučajevi realnog ponašanja gdje je rotacijsko ponašanje izvedenih priključaka najčešće u području između ta dva ekstrema. Moment savijanja i relativna rotacija djelomično krutog priključka povezani su odnosom koji ovisi o svojstvima priključka. Učinak koji imaju djelomično kruti priključci umjesto krutih ili zglobnih priključaka nije samo modificiranje pomaka nego i raspodjela i veličina unutarnjih sila i momenata savijanja u konstrukciji. Priključci imaju svoju stvarnu krutost te se stoga svrstavaju u djelomično krute, te njihovo ponašanje

ima značajan utjecaj na nosivost, krutost i stabilnost čitave konstrukcije kao i na razgradnju (trošenje) seizmičke energije koja se unosi u konstrukciju tijekom potresa.

Postoji vrlo velika sličnost između klasifikacije poprečnih presjeka konstrukcijskih elemenata i klasifikacije priključaka. Poprečni presjeci razvrstani su u četiri klase shodno njihovoj sposobnosti da se odupiru lokanoj nestabilnosti, kada su djelomično ili potpuno izloženi tlaku i/ili savijanju. Područje njihove otpornosti je od pune plastične otpornosti do elastične otpornosti ili reducirane elastične otpornosti. Za priključke, pojam rotacijske sposobnosti ekvivalentan je pojmu duktilnosti za poprečne presjeke. S obzirom na to, priključci se također klasificiraju prema duktilnosti ili rotacijskoj sposobnosti. Ta klasifikacija je mjera njihove sposobnosti da se odupru preranoj lokalnoj nestabilnosti i preranom krutom otkazivanju (naročito uslijed otkazivanja vijka), što je izravno povezano sa sposobnošću razgradnje seizmičke energije [14, 15].

Kriteriji za ispravan seizmički proračun vode k tome da se konstrukciji omogući da dobije otpornost i krutost kod umjerenih seizmičkih djelovanja s malim povratnim periodom, odnosno duktilnost i sposobnost razgradnje seizmičke energije kod jačih potresa s velikim povratnim periodom. U slučaju okvira bez dijagonala, djelomično kruti priključci na krajevima elementa predstavljaju djelotvoran mehanizam razgradnje seizmičke energije. S druge strane, okviri s centričnim dijagonalama karakterizirani su dovoljnom otpornošću i krutošću, ali njihovo neelastično ciklično ponašanje pokazuje smanjenu sposobnost razgradnje energije. U novije vrijeme primijenjena je konstruktivna tipologija okvira s ekscentričnim dijagonalama, koja se temelji na ukrućivanju okvira bez dijagonala pomoću ekscentrično priključenih dijagonala, a kod kojih je kombinirana krutost okvira s centričnim dijagonalama s duktilnošću i kapacitetom za razgradnju energije okvira bez dijagonala [16, 17]. Mehanizam razgradnje seizmičke energije koji jamči duktilno ponašanje razlikuje se kod okvira bez dijagonala s djelomično krutim priključcima i kod okvira s centričnim ili ekscentričnim dijagonalama. U slučaju okvira s centričnim ili ekscentričnim dijagonalama, priključci moraju jamčiti krajnju čvrstoću koja nije manja od granice popuštanja elementa u kojem se očekuje formiranje plastičnog zgloba.

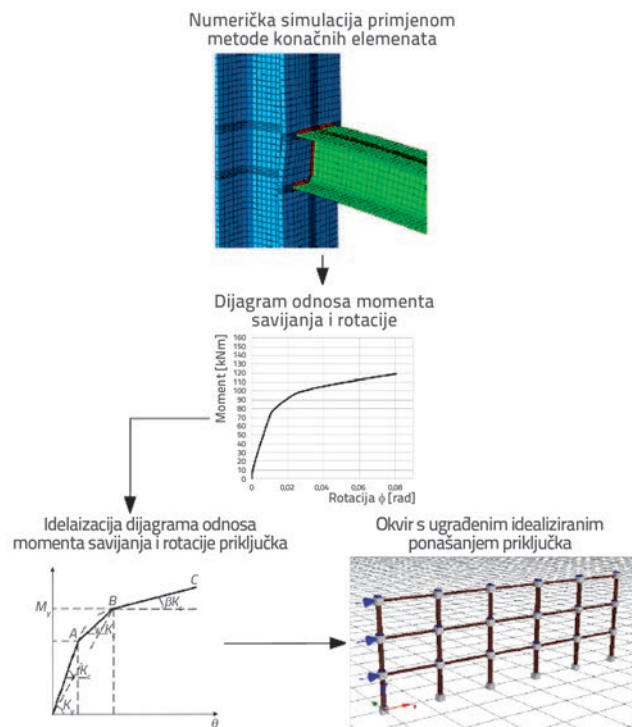
Eurokod 8 [6] propisuje pravila za proračun i oblikovanje priključaka prema rotacijskom kapacitetu, te nalaže da bi priključak trebao biti projektiran na način da rotacijski kapacitet područja plastičnog zgloba ne bude manji od 35 m/rad za konstrukcije visokog razreda duktilnosti (DCH), odnosno 25 m/rad za konstrukcije srednjeg razreda duktilnosti (DCM). Međutim, nisu dane detaljnije smjernice na koji način obuhvatiti stvarno ponašanje priključka u čeličnom okviru.

U ovom radu prikazana je analiza čelične okvirne konstrukcije s djelomično krutim priključcima. Rađena je analiza okvira na utjecaj djelovanja potresa primjenom nelinearne statičke metode N2. Budući da u samoj Europskoj normi [6] nisu dane detaljne smjernice o tome na koji način u analizi čeličnog okvira obuhvatiti stvarno ponašanje priključka, u ovom je

radu prikazano kako se to može postići te kakav je učinak uzimanjem u obzir djelomično krutih priključaka na sveukupno ponašanje čeličnih okvira izloženih silama od potresa. Najprije je numeričkom simulacijom primjenom metode konačnih elemenata [18] analizirano ponašanje djelomično krutog priključka u zavarenoj izvedbi. Kao rezultat takvog ponašanja dobiven je dijagram koji prikazuje odnos momenta savijanja i rotacije priključka. Kako bi se dobiveno ponašanje priključka moglo ugraditi u analizu čeličnog okvira, nelinearni odnos momenta savijanja i rotacije je idealiziran trilinearnom krivuljom. Na kraju je formiran model čeličnog okvira s trilinearnim ponašanjem priključka za koje je provedena *pushover* analiza u programu SeismoStruct.

2. Numerički model djelomično krutog priključka

Kako bi se u analizi okvira uzelo stvarno ponašanje priključaka, najprije je provedena numerička simulacija karakterističnog djelomično krutog priključka u zavarenoj izvedbi primjenom metode konačnih elemenata [18]. Rezultat numeričke analize dobiven u obliku dijagrama odnosa momenta savijanja i rotacije priključka ugrađen je u okvirnu čeličnu konstrukciju za koju je dalje proveden proračun na djelovanje sila od potresa. Slika 1. pokazuje shematski prikaz postupka proračuna okvira s djelomično krutim priključcima.



Slika 1. Prikaz analize okvira s djelomično krutim priključcima

Za potrebe proračuna okvira s djelomično krutim priključcima na djelovanje sila od potresa potrebno je provesti analizu ponašanja priključka. Za to je odabran numerički pristup primjenom

metode konačnih elemenata te je izvršeno simuliranje ponašanja priključka, koje opisuje kompleksne interakcije između njegovih pojedinih elemenata. Rezultati koji su proizašli iz te analize verificirani su s rezultatima eksperimentalnih i numeričkih ispitivanja [19]. U sljedećim poglavljima prikazane su geometrijske i materijalne karakteristike priključka stupa i grede, rubni uvjeti, plan opterećenja, te na kraju rezultati numeričke simulacije.

2.1. Geometrijske karakteristike priključka

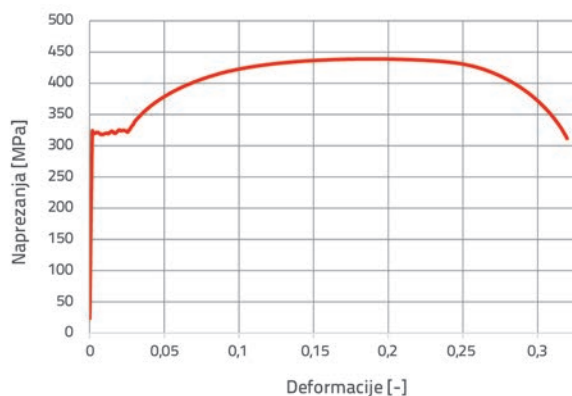
Numerička simulacija primjenom metode konačnih elemenata [18] provedena je za zavareni priključak stupa HEB 300 i grede HEB 200 na utjecaj monotonog savijanja. Debljina zavera uz pojasnice grede je 6 mm, a uz hrbat iznosi 5 mm. Odabrani poprečni presjeci stupa i grede s karakterističnim dimenzijama prikazani su u tablici 1. Oblik numeričkog modela definiran je prema obliku eksperimentalnog modela iz [19].

Tablica 1. Dimenzije poprečnog presjeka stupa i grede (mm)

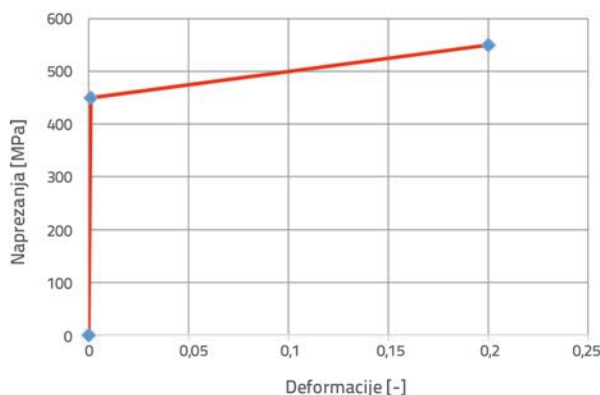
Karakteristike poprečnog presjeka	Visina poprečnog presjeka	Širina pojasnice	Debljina hrpta	Debljina pojasnice
Greda	200	200	9	15
Stup	300	300	11	19

2.2. Materijalne karakteristike

Pri konstruiranju zavarenog spoja stupa i grede, otkazivanje zavera se u svakom smislu mora izbjeći te ono ne doprinosi ukupnoj rotaciji priključka. Prema tome u analizi su korištena dva tipa materijala te dva materijalna modela. Nelinearni materijalni model odabran je za stup i gredu te je prikazan na slici 2., pri čemu je prikazani dijagram dobiven eksperimentalnim ispitivanjem uzorka čelika kvalitete S235. Bilinearni materijalni model odabran je za zavare te je prikazan na slici 3. za koje je odabrana bolja kvaliteta materijala kako bi se izbjeglo njegovo popuštanje prije popuštanja materijala u gredi ili stupu.



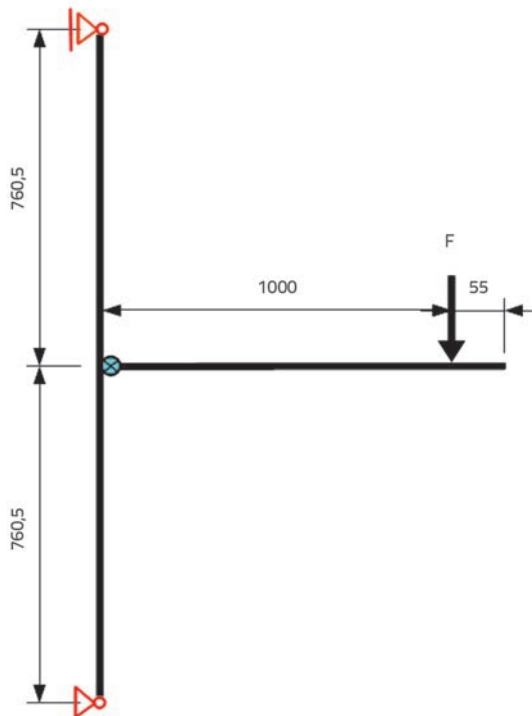
Slika 2. Materijalne karakteristike čelika za stup i gredu



Slika 3. Materijalne karakteristike čelika za zavare

2.3. Rubni uvjeti i plan djelovanja opterećenja

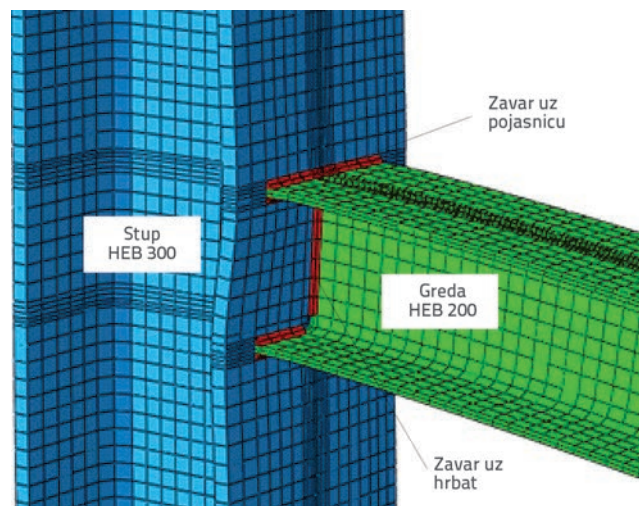
Oblik modela za numeričku simulaciju priključka odabran je prema [19] i prikazan na slici 4., pri čemu je visina stupa 1521 mm, a duljina grede iznosi 1055 mm. Model je analiziran na utjecaj savijanja na način da na udaljenosti 1000 mm od centra priključka odnosno 850 mm od spoja djeluje 14 koncentriranih sila. Položaj koncentrirane sile je na gornjoj pojasnici grede, koja djeluje monotono kroz 22 koraka, pri čemu je vrijednost sile u zadnjem koraku 140 kN. Donji dio stupa izveden je kao nepomičan zglobni ležaj, dok je gornji izveden kao klizni ležaj koji omogućuje slobodno vertikalno pomicanje, slika 4.



Slika 4. Oblik sustava s rubnim uvjetima i položajem opterećenja

Kontakt između stupa i grede ostvaren je samo na mjestima zavarana. Pri formiranju mreže konačnih elemenata bilo je

potrebno ostvariti spajanje konačnih elemenata stupa sa zavarom i grede sa zavarom. Mreža je progušćena u području ostvarivanja kontakta, te su za modeliranje stupa, grede i zavara odabrani konačni elementi (C3D8R) s osam čvorova. Detalj priključka s formiranom mrežom konačnih elemenata prikazan je na slici 5.



Slika 5. Detalj priključka s formiranom mrežom konačnih elemenata

2.4. Rezultat numeričke analize

Kao rezultat numeričke simulacije priključka dobiven je dijagram odnosa momenta savijanja i rotacije koji omogućuje vjerodostojan prikaz ponašanja priključka na utjecaj monotonog savijanja. Ukupna rotacija priključka ($Rot\ b$) može se izračunati iz vertikalnog pomaka točke ispod neposrednog djelovanja vertikalnog opterećenja d_1 , slika 7. Rotacija spoja ϕ se može dobiti iz izraza (1):

$$\phi = Rot\ b - b_{el} - Rot\ H1 \quad (1)$$

pri čemu su:

$Rot\ b$ - ukupna rotacija priključka s elastičnom rotacijom grede b_{el} , koja se računa prema izrazu (2),

b_{el} - elastična rotacija grede koja se računa prema izrazu (3),

$Rot\ H1$ - rotacija panela hrpta stupa uslijed posmika koji se računa prema izrazu (4).

$$Rot\ b = \frac{\delta_1}{850} \quad (2)$$

gdje je

δ_1 - vertikalni pomak u točki ispod djelovanja opterećenja;

$$b_{el} = \frac{FL_F^2}{2EI_b} \quad (3)$$

gdje je

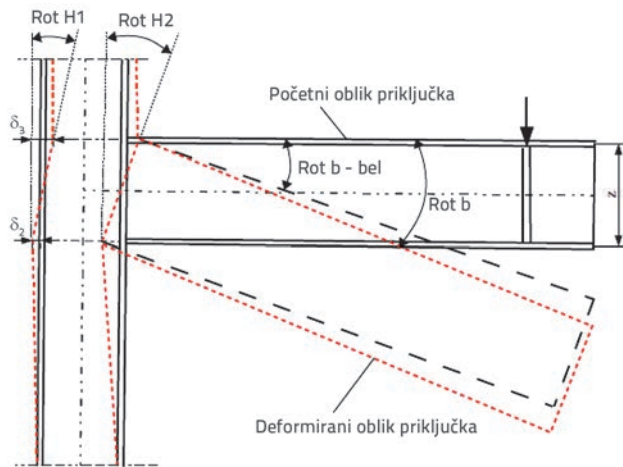
F - koncentrirana sila,

L_F - udaljenost između djelovanja opterećenja i vanjske površine stupa na koju je spojena greda,
 E - Youngov modul elastičnosti čelika,
 I_b - moment tromosti grede;

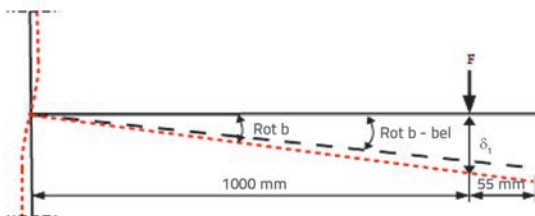
$$\text{Rot } H_1 = \frac{\delta_3 - \delta_2}{z} \quad (4)$$

gdje su

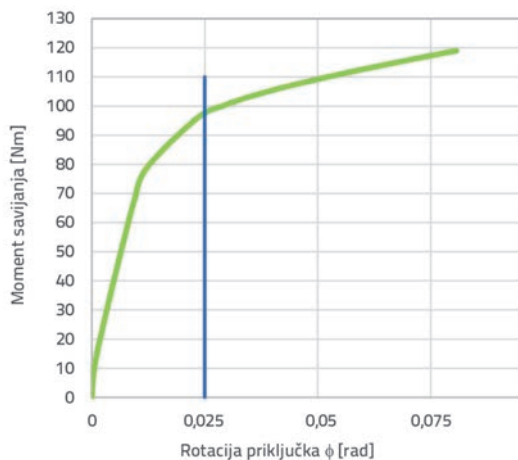
δ_2 i δ_3 - horizontalni pomaci pojasnica stupa uslijed djelovanja posmika, slika 6.



Slika 6. Početni i deformirani oblik priključka

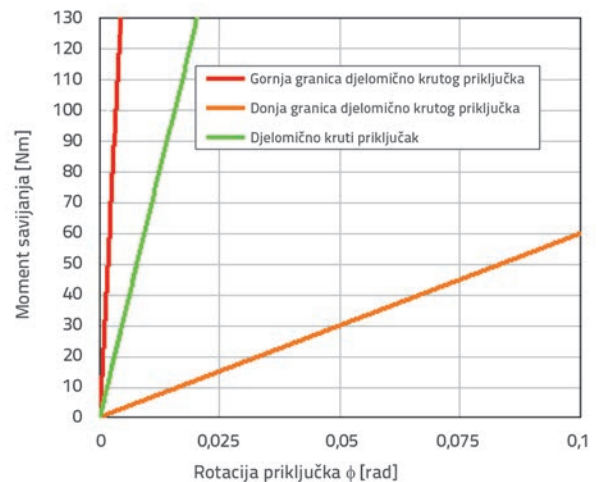


Slika 7. Ukupna rotacija priključka



Slika 8. Dijagram odnosa momenta savijanja i rotacije za djelomično kruti zavareni priključak s repnom dopuštenom rotacijom od 25 m/rad (DCM) prema [6]

Konačan rezultat prikazan je u obliku dijagrama kao odnos momenta savijanja i rotacije, a predočen je na slici 8. Početna rotacijska krutost iznosi 6464,5 kNm/rad. Prema europskoj normi [6] prihvaćeno je da se priključak, koji je gotovo krut ili gotovo zglobni, još uvijek može razmatrati kao potpuno krut ili potpuno zglobni u procesu dimenzioniranja. S obzirom na to dana je klasifikacija priključaka na krute, djelomično krute ili zglobne ovisno o usporedbi između krutosti priključka i krutosti nosača, koja ovisi o momentu tromosti i dužini nosača. Iz slike 9. je vidljivo da analizirani priključak pripada zoni djelomično krutih priključaka, koja je definirana gornjom i donjom granicom djelomično krutog priključka.



Slika 9. Klasifikacija priključka prema krutosti [6]

3. Seizmička analiza okvira

Kako je u uvodnom dijelu rečeno, dosada su se u analizama okvira razmatrali granični slučajevi ponašanja priključaka, zglobni i kruti, koji ne daju realnu sliku ponašanja okvira. Budući da nelinearna statička metoda N2 ne daje detaljne smjernice o tome na koji način obuhvatiti stvarno, odnosno djelomično kruto ponašanje priključaka, u ovom poglavlju prikazana je analiza čeličnog okvira metodom N2 u koju su uključene karakteristike realnih priključaka pri djelovanju monotonog savijanja. Prethodno provedena numerička simulacija dala je uvid u stanje ponašanja zavarenog priključka stupa i grede, koje je ugrađeno u čeličnu okvirnu konstrukciju i na taj način dobivene su realnije vrijednosti apsolutnih i relativnih (međukatnih) pomaka. Za usporedbu rezultata korišteni su rezultati pomaka dobiveni analizom istog okvira s krutim priključcima.

3.1. Karakteristike okvira i potresnog opterećenja

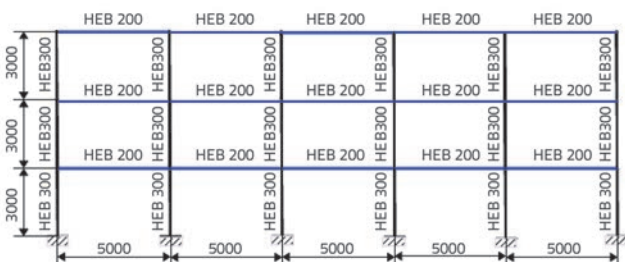
Postupak je proveden na primjeru "švedskog modela" čelične okvirne konstrukcije. Tipičan oblik švedskog modela sastoji se od čeličnih okvira s armiranobetonskom jezgrom. Međutim, kako bi se ostvarilo nelinearno ponašanje, konstrukcija je "omekšana"

na način da je armiranobetonska jezgra zamijenjena čeličnom stabilizacijom, slika 10.



Slika 10. Prikaz omekšanja "švedskog modela"

Potresna analiza provedena je na zamjenjujućem trokutnom ravninskom uzdužnom okviru koji je prikazan na slici 11., a karakteristike potresnog opterećenja navode se u tablici 2.



Slika 11. Geometrijske karakteristike ravninskog okvira s prikazom poprečnih presjeka

Tablica 2. Karakteristike potresnog opterećenja

Spektar potresa	Tip 1
Razred tla	B
Parametri tla	$S = 1,2; T_B = 0,15 \text{ s}; T_C = 0,5 \text{ s}; T_D = 2,0 \text{ s}$
Vršno ubrzanje podloge	$a_g = 0,254 \text{ g}$
Prigušenje	$\xi = 4 \%$

3.2. Nelinearna statička analiza okvira primjenom metode N2

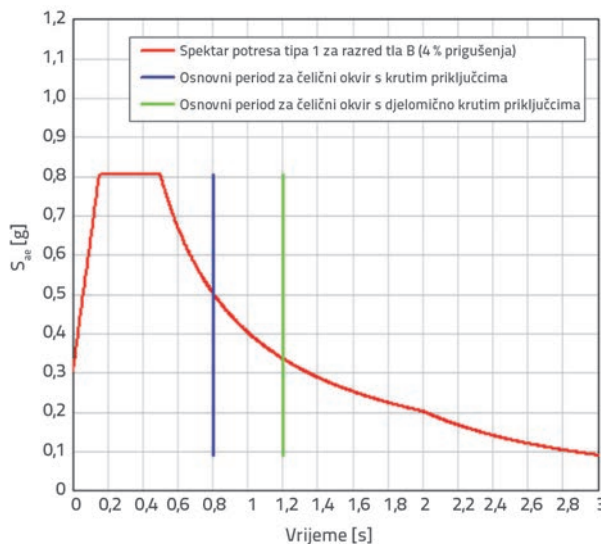
Ovdje je prikazan postupak formiranja dvaju modela čeličnih okvira za *pushover* analizu koja je provedena u programu SeismoStruct. Prvi čelični okvir modeliran je na tradicionalan način koji uzima u obzir krute priključke, dok drugi okvir uzima stvarno ponašanje priključaka za koje je prethodno provedena numerička simulacija primjenom metode konačnih elemenata. Ponašanje priključka prikazano u obliku dijagrama odnosa momenta savijanja i rotacije idealizirano je trilinearnom krivuljom prema [20]. Dobivena trilinearna aproksimacija ponašanja priključka ugrađena je u analizu okvira. U prvom slučaju su primijenjeni kriteriji "zgrade posmika" prema [1], dok su u drugom slučaju u obzir uzete i rotacije katova. Statičkom kondenzacijom [3] eliminirani su stupnjevi slobode s nultim vrijednostima masa. Rezultati primjene nelinearne statičke metode N2 prikazani su na

način kako je postupak prezentiran u [3, 7-9]. Tablica 3. prikazuje vrijednosti osnovnih perioda osciliranja za dva tipa okvira s različitim krutostima priključaka. Vrijednost osnovnog perioda od 0,802 s dobivena je za slučaj s krutim priključcima, dok vrijednost 1,200 s odgovara okviru s djelomično krutim priključcima.

Tablica 3. Vrijednosti osnovnog perioda u ovisnosti o tipu priključaka u okviru

Tip okvira	Čelični okvir s krutim priključcima	Čelični okvir s djelomično krutim priključcima
Osnovni period T_1 [s]	0,802 s	1,200 s

Na slici 12. prikazan je položaj dobivenih perioda na krivulji elastičnog spektra potresa formiranog prema tablici 2 i [6], te je vidljivo da se sa smanjenjem krutosti povećava osnovni period, ali smanjuje potresno opterećenje.



Slika 12. Položaj perioda okvira na krivulji elastičnog spektra potresa

Čelični okvir podvrgnut je monotono rastućem bočnom opterećenju (eng. *pushover*) koje predstavlja inercijalne sile, a one se u konstrukciji javljaju za vrijeme potresa kao posljedica ubrzanja temeljnog tla. Odabrana je trokutna raspodjela bočnog opterećenja, koja je standardna u metodi N2. Vektor bočnog opterećenja {P} određuje se prema izrazu (5)

$$\{P\} = p [m] \{\phi\} \tag{5}$$

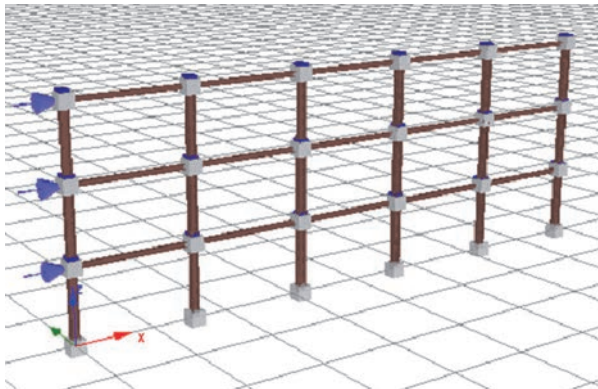
gdje je
 p - intenzitet bočnog opterećenja,
 [m] - dijagonalna matrica masa,
 {φ} - pretpostavljeni oblik pomaka.

Analiza je provedena u programu *SeismoStruct*, a na slici 13. je prikazan model okvira sa shemom unosa bočnog opterećenja.

Model je podvrgnut monotono rastućem bočnom opterećenju za vrijednost kontroliranog krovnog pomaka od 100 cm. Matrica masa je definirana u izrazu (6), a pretpostavljeni oblik pomaka u izrazu (7):

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 209,1 & 0 & 0 \\ 0 & 209,1 & 0 \\ 0 & 0 & 213,6 \end{bmatrix} [t] \quad (6)$$

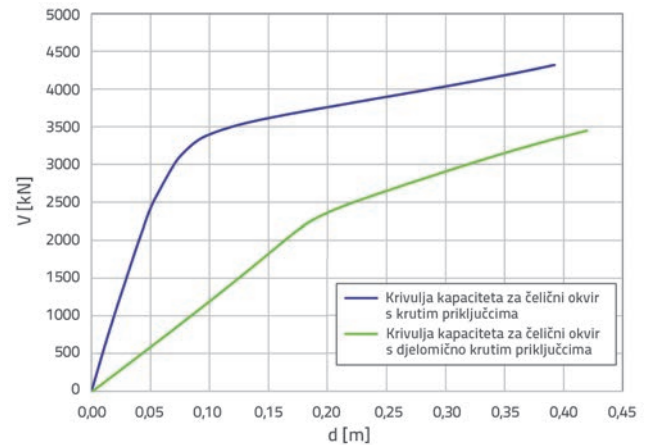
$$\phi^T = \{0,33 \ 0,67 \ 1,00\} \quad (7)$$



Slika 13. Model čeličnog okvira s prikazom unosa bočnog opterećenja

Kao rezultat *pushover* analize dobivaju se krivulje kapaciteta koje prikazuju odnos poprečne sile V u nivou gornjeg ruba temelja i krovnog pomaka d na vrhu čeličnog okvira. Na slici 14. prikazani

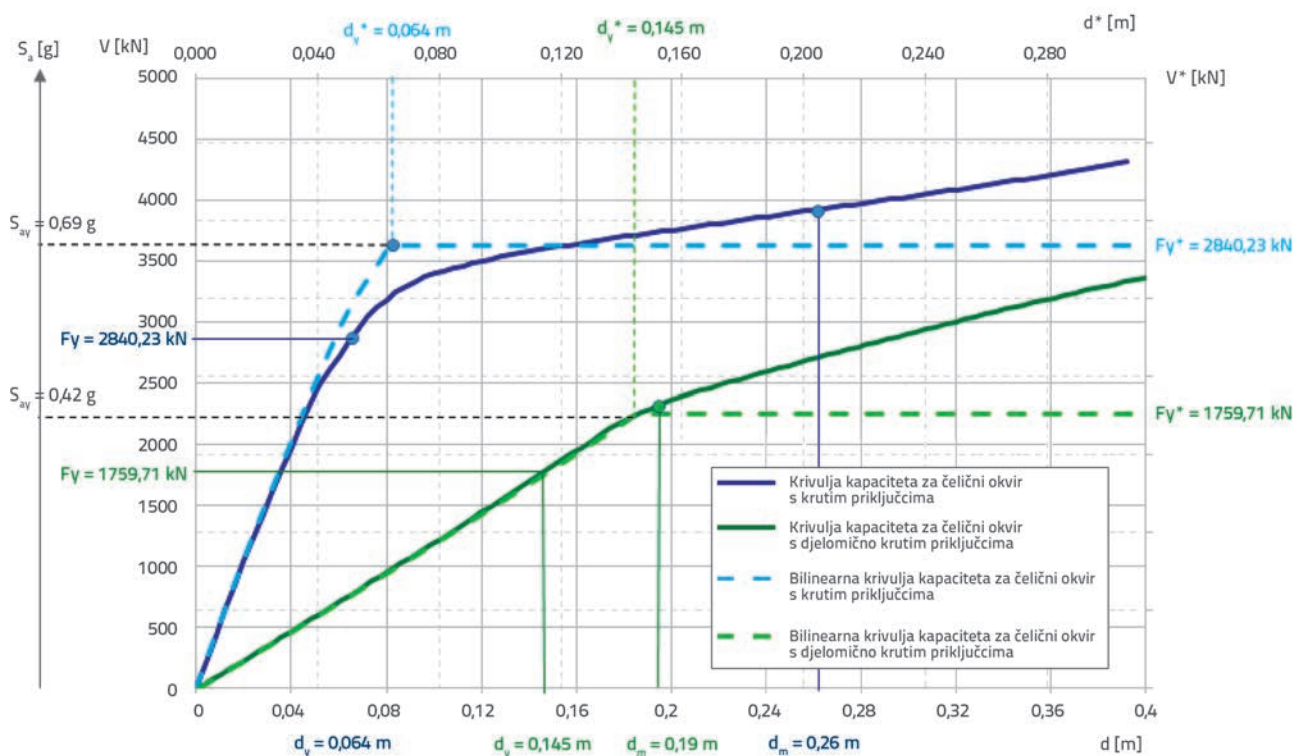
su dijagrami krivulja kapaciteta za slučaj čeličnog okvira s krutim priključcima i čeličnog okvira s djelomično krutim priključcima.



Slika 14. Krivulje kapaciteta dobivene *pushover* analizom

Budući da se seizmički zahtjev daje za sustave s jednim stupnjem slobode, sustav s tri stupnja slobode je transformiran u sustav s jednim stupnjem slobode. Ekvivalentna masa sustava s jednim stupnjem slobode dobivena je izrazom (8). Faktor transformacije, koji kontrolira prijelaz sustava s više stupnjeva slobode na sustav s jednim stupnjem slobode definiran je izrazom (9):

$$m^* = \sum m_i \phi_i = m_1 \phi_1 + m_2 \phi_2 + m_3 \phi_3 = 209,1 \cdot 0,33 + 209,1 \cdot 0,67 + 213,6 \cdot 1,00 = 422,7 \text{ t} \quad (8)$$



Slika 15. Formiranje elastoplastičnih (bilinearnih) krivulja kapaciteta

$$\Gamma = \frac{\begin{Bmatrix} \{\varphi\}^T [m] \{1\} \\ \{\varphi\}^T [m] \{\varphi\} \end{Bmatrix}}{\begin{Bmatrix} 209,1 & 0 & 0 \\ 0 & 209,1 & 0 \\ 0 & 0 & 213,6 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix}} = 1,28 \quad (9)$$

Krivulja kapaciteta, odnosno dijagram odnosa sile i pomaka ($V-d$) određen za sustav s više stupnjeva slobode, vrijedi i za ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode (V^*-d^*) pod uvjetom da su i sila i pomak podijeljeni s faktorom transformacije Γ . Početna krutost ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode jednaka je početnoj krutosti sustava s više stupnjeva slobode, te se određuje iz dijagrama $V-d$, slika 15. Upute za definiranje pojednostavljene krivulje elastične – idealno plastične veze između sile i pomaka dane su u Dodatku B, Eurokoda 8-1 prema [6]. Popuštanje okvira s krutim priključcima javlja se za vrijednost $F_v = 2840,23$ kN, pri čemu krovni pomak iznosi $d_v = 0,064$ m, dok te vrijednosti za okvir s djelomično krutim priključcima iznose $F_v = 1759,71$ kN i $d_v = 0,145$ m.

Elastični periodi T^* ekvivalentnih sustava s jednim stupnjem slobode za bilinearni odnos sile i deformacije definiran je prema (10). Prva vrijednost $T^* = 0,61$ s odgovara čeličnom okviru s krutim priključcima, dok druga vrijednost $T^* = 1,17$ s odgovara čeličnom okviru s djelomično krutim priključcima.

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* d_v^*}{F_v}} = 2\pi \sqrt{\frac{422,7 \cdot 0,064}{2840,23}} = 0,61 \text{ s}$$

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* d_v^*}{F_v}} = 2\pi \sqrt{\frac{422,7 \cdot 0,145}{1759,71}} = 1,17 \text{ s} \quad (10)$$

Ciljani pomak vrha građevine računa se ovisno o vrijednosti dobivenih perioda, za građevine s kratkima periodima kada je ($T^* < T_c$) i građevine sa srednjim i dugim periodima kada je ($T^* > T_c$). Pravila su definirana u Dodatku B, Eurokoda 8-1 prema [6]. Oba perioda ekvivalentnih sustava T^* veći su od $T_c = 0,5$ s i pripadaju području srednjih i dugih perioda, pa prema tome vrijedi pravilo jednakih pomaka prema (11):

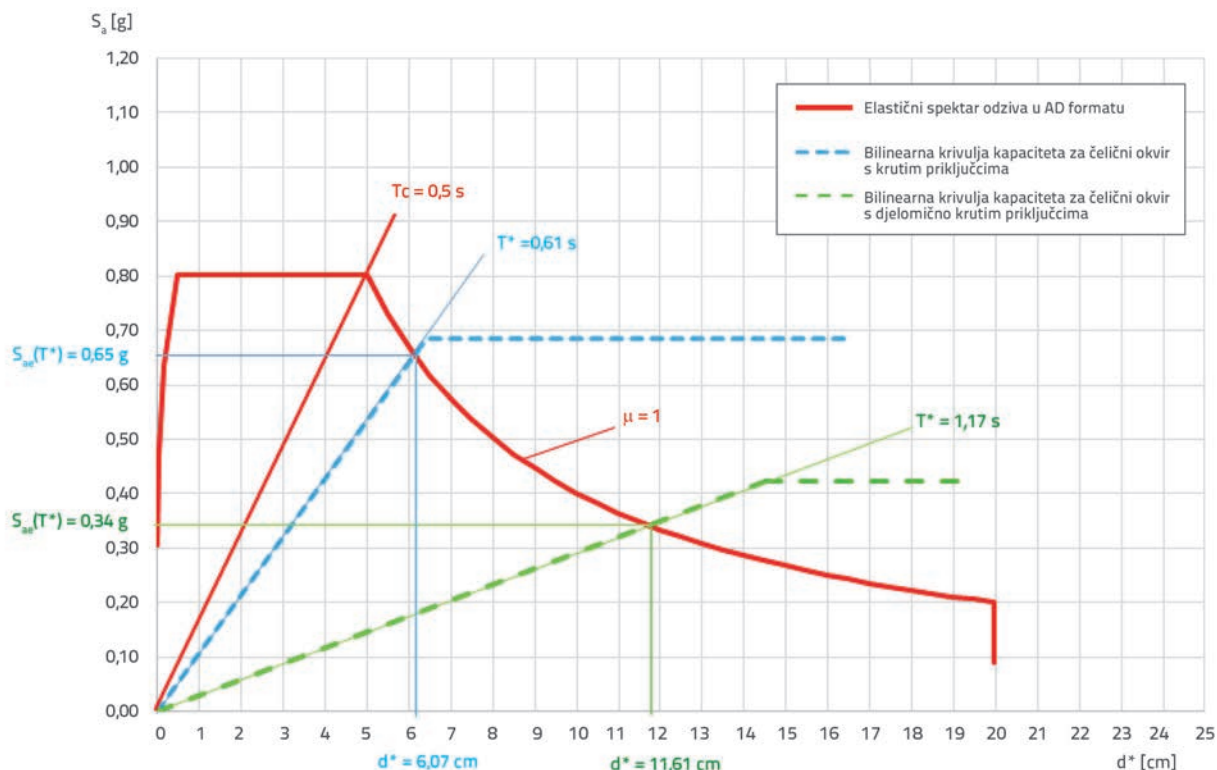
$$d_i^* = d^* \quad (11)$$

Ubrzanje na granici popuštanja dobije se iz krivulje kapaciteta u AD formatu dijeljenjem sile F^* s ekvivalentnom masom m^* prema izrazu (12). Prva vrijednost $S_{ay} = 0,69$ g odgovara okviru s krutim priključcima dok se vrijednost $S_{ay} = 0,42$ g odnosi na čelični okvir s djelomično krutim priključcima:

$$S_{ay} = \frac{F_v^*}{m^*} = \frac{2840,23}{422,7} = 0,69 \text{ g} \quad (12)$$

$$S_{ay} = \frac{F_v^*}{m^*} = \frac{1759,71}{422,7} = 0,42 \text{ g}$$

Sve vrijednosti se mogu dobiti numerički, ali zbog bolje vizualizacije i razumijevanja, prikazan je grafički postupak na slici 16. Zahtijevani spektar i bilinearna krivulja kapaciteta prikazani su na istom dijagramu. Radijalni pravci koji odgovaraju



Slika 16. Određivanje krovnog pomaka za ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode

Tablica 4. Vrijednosti apsolutnih i relativnih pomaka

Kat	Visina kata [m]	Apsolutni pomaci [cm]		Relativni pomaci (međukatni pomaci) [cm]	
		Čelični okvir s krutim priključcima	Čelični okvir s djelomično krutim priključcima	Čelični okvir s krutim priključcima	Čelični okvir s djelomično krutim priključcima
3	9	7,8	14,9	1,5	4,7
2	6	6,3	10,2	3,0	6,2
1	3	3,3	4,0	3,3	4,0

elastičnim periodima T^* idealiziranih bilinearnih sustava protežu se od ishodišta do točke s koordinatama koji se mogu odrediti prema (13):

$$\begin{aligned} (d^*, S_{ae}(T^*)) &= \left(S_{ae}(T^*) \left(\frac{T^*}{2\pi} \right)^2, S_{ae}(T^*) \right) \\ (d^*, S_{ae}(T^*)) &= \left(0,65g \left(\frac{0,61}{2\pi} \right)^2, 0,65g \right) = (6,07 \text{ cm}, 0,65g) \quad (13) \\ (d^*, S_{ae}(T^*)) &= \left(0,34g \left(\frac{1,17}{2\pi} \right)^2, 0,34g \right) = (11,61 \text{ cm}, 0,34g) \end{aligned}$$

gdje je

d^* - ciljani pomak (target displacement) ekvivalentnog sustava s jednim stupnjem slobode

$S_{ae}(T)$ - zahtijevano elastično ubrzanje.

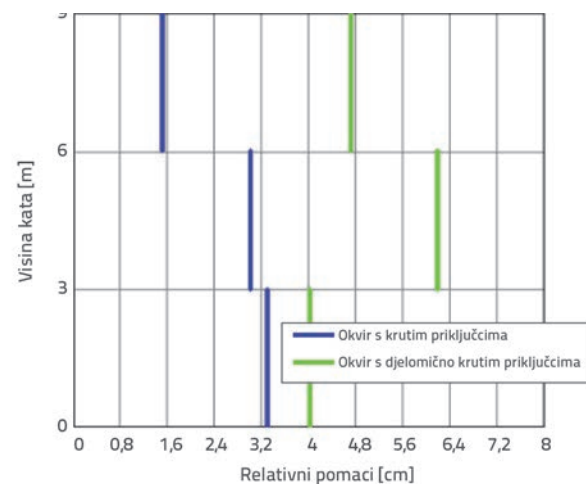
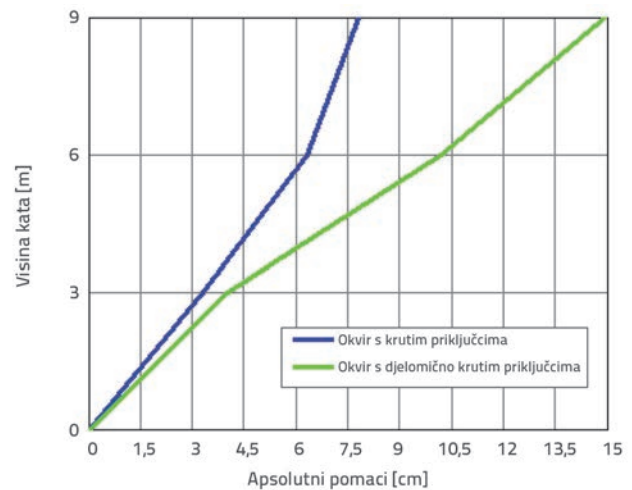
Vrijednosti ciljanih pomaka za ekvivalentni sustav s jednim stupnjem slobode iznose 6,07 cm za sustav s krutim priključcima, odnosno 11,61 cm za sustav s djelomično krutim priključcima. Zahtijevana duktilnost μ jednaka je faktoru redukcije R_μ te se dobije iz izraza (14).

$$\begin{aligned} R_\mu &= \frac{S_{ae}(T^*)}{S_{ay}} = \frac{0,65g}{0,685g} = 0,95; \quad \mu = R_\mu = 0,95 \\ R_\mu &= \frac{S_{ae}(T^*)}{S_{ay}} = \frac{0,34g}{0,424g} = 0,80; \quad \mu = R_\mu = 0,80 \quad (14) \end{aligned}$$

Vrijednosti ciljanih pomaka (eng. *target displacement*) za sustave s jednim stupnjem slobode transformirane su u globalni sustav, te se dobivaju sljedeće vrijednosti prema (15):

$$\begin{aligned} d &= d^* \Gamma = 6,07 \cdot 1,28 = 7,8 \text{ cm} \\ d &= d^* \Gamma = 11,61 \cdot 1,28 = 14,9 \text{ cm} \quad (15) \end{aligned}$$

Vrijednost ciljanog pomaka od 7,8 cm odgovara okviru s krutim priključcima, odnosno 14,9 cm okviru s djelomično krutim priključcima. Lokalni potresni zahtjev, odnosno apsolutni i relativni pomaci katova dobiveni su nakon što su okviri ponovno podvrgnuti monotono rastućem bočnom opterećenju (*pushover* analizi), ali za vrijednosti ciljanih pomaka (15). Rezultati su prikazani u tablici 4. i na slici 17.



Slika 17. Prikaz apsolutnih i relativnih pomaka okvira

Iz rezultata je vidljivo da su vrijednosti apsolutnih i relativnih pomaka čeličnog okvira s djelomično krutim priključcima veći u odnosu na pomake čeličnog okvira s krutim priključcima. Krovni pomak je za slučaj okvira s djelomično krutim priključcima veći za 52,3% od krovnog pomaka okvira s krutim priključcima. Najveći relativni pomak okvira s krutim priključcima na prvom je katu, dok se kod okvira s djelomično krutim priključcima vrijednosti smanjuju na prvom katu, a na ostalima povećavaju u odnosu na okvir s krutim priključcima. Prema dobivenim vrijednostima faktora redukcije R_μ iz izraza (14) uslijed duktilnosti, tj. uslijed histereznog trošenja energije kod duktilnih konstrukcija, može

se uočiti da se za oba slučaja dobivaju vrijednosti manje od jedan. To je vidljivo i na slici 16., što znači da ponašanje ostaje linearno. Priključci u zavarenoj izvedbi ne dopuštaju popuštanje u samom spoju, odnosno zavaru. Kako bi se zadovoljio takav zahtjev, zavari moraju imati dovoljnu otpornost kako ne bi došlo do sloma zavora uslijed rotacije priključka.

4. Kritički komentar dobivenih rezultata i opis daljnjih istraživanja

Za zavareni priključak najprije je provedena numerička simulacija primjenom metode konačnih elemenata u programu Abaqus. Rezultat numeričke simulacije priključka je dijagram odnosa momenta savijanja i rotacije čime je dobiven vjerodostojan prikaz ponašanja priključka na utjecaj monotonog savijanja. Dobiveni dijagram idealiziran je trilinearnom krivuljom te je ponašanje priključka u takvom obliku ugrađeno u analizu čeličnog okvira nelinearnom statičkom metodom N2. Za usporedbu rezultata korišteni su rezultati pomaka dobiveni analizom istog okvira s krutim priključcima. Usporedbom tih rezultata može se zaključiti da se kod čeličnog okvira s djelomično krutim priključcima dobivaju značajno veći apsolutni pomaci u odnosu na čelične okvire s krutim priključcima. Relativni pomak je najveći na prvom katu kod okvira s krutim priključcima, dok je kod okvira s djelomično krutim priključcima najveći relativni pomak na drugom katu, a najmanji na prvom katu.

U nastavku istraživanja obuhvatit će se veća diferencijacija priključaka i time će biti omogućena bolja usporedba rezultata. Provest će se parametarske analize priključaka te odrediti koji su značajni faktori kod djelomično krutih priključaka koji mijenjaju seizmički odgovor okvirne konstrukcije. Također će se daljnjim istraživanjima obuhvatiti procjena povećanja razgradnje (trošenja) seizmičke energije u slučaju kada se uzmu u analizu realni djelomično kruti priključci. Takva analiza do sada u literaturi nije objavljena. I na kraju će se umjesto nelinearne statičke raditi nelinearna dinamička analiza primjenom odabranih zapisa dogođenih potresa [4].

5. Zaključak

Prezentirane su dobivene vrijednosti apsolutnih i relativnih pomaka okvira te usporedba dobivenih rezultata za čelični okvir s apsolutno krutim priključcima i čelični okvir s djelomično krutim priključcima u zavarenoj izvedbi, kao i usporedba s dopuštenim vrijednostima prema konstrukcijskoj euronormi.

Analiza okvira s djelomično krutim priključcima pokazala je smanjenje kapaciteta konstrukcije, ali i povećanje njenog osnovnog perioda, što ima za posljedicu smanjenje vrijednosti potresnog opterećenja na konstrukciju. Dobiveni rezultati mogu se generalizirati samo za zavareni priključak. Na temelju dobivenih rezultata numeričke simulacije za djelomično kruti priključak moguće je procijeniti sposobnost razgradnje seizmičke energije u samom priključku kao i za konstrukciju u cjelini, što će biti predmetom daljnjih istraživanja.

Upotreba potpuno zavarenih okvira bez dijagonala pri potresnim opterećenjima u posljednje su vrijeme predmet brojnih istraživanja, budući da su mnoge čelične konstrukcije u zavarenoj izvedbi doživjele oštećenja upravo na mjestima priključaka. Više od 150 građevina doživjela je takav tip oštećenja u potresima Northridge, 1994. i Kobe, 1995. [21]. Oštećenja zavora nastala su uglavnom zbog uporabe niske čvrstoće zavora u kombinaciji s brojnim drugim detaljima priključka, svojstvima materijala i dr. Većina nastalih šteta, koje nisu uzrokovala rušenje konstrukcije, predstavljaju ozbiljan rizik u slučaju ponovnog djelovanja potresa. Popravak takvih oštećenja uključuje značajne troškove. U svijetu se rade mnoga istraživanja s ciljem boljšeg proračuna, projektiranja i izvođenja takvih priključaka. Mnoga istraživanja proizašla su upravo nakon potresa Northridge, 1994. [22-25] u kojima je uglavnom analizirano ponašanje zavarenih priključaka.

Zahvala

Rezultati prezentirani u ovom radu ostvareni su u sklopu istraživanja "Razvoj konstrukcija povećane pouzdanosti s obzirom na potres" uz financijsku potporu Sveučilišta u Rijeci (broj 402-01/14-01/11).

LITERATURA

- [1] Chopra, A. K.: Dynamics of Structures - Theory and Application to Earthquake Engineering, 4th Ed., Prentice Hall, New Jersey, 2012.
- [2] Chopra, A. K., Goel, R. K.: A modal pushover procedure to estimate seismic demands of buildings, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31, pp. 561-582., 2002., <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.144>
- [3] Čaušević, M.: Dinamika konstrukcija – Potresno inženjerstvo, Aerodinamika, Konstrukcijske euronorme, GOLDEN MARKETING-TEHNIČKA KNJIGA, drugo dopunjeno izdanje, Zagreb, 2014.
- [4] Causevic, M., Mitrovic, S.: Comparison between non-linear dynamic and static seismic analysis of structures according to European and US provisions, Bulletin of Earthquake Engineering, 9 (2), pp. 467-489, 2011., <http://dx.doi.org/10.1007/s10518-010-9199-1>
- [5] Federal Emergency Management Agency (FEMA), Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures - FEMA-440, Washington, DC, 2005.
- [6] Eurocode 8, Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, European Committee for Standardization, CEN, Brussels, EN 1998-1: 2004.

- [7] Fajfar, P., Gaspersic, P.: The N2 method for the seismic damage analysis of RC buildings, *Engineering & Structural Dynamics*, 25, pp. 23–67, 1996., [http://dx.doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9845\(199601\)25:1<31::aid-eqe534>3.0.co;2-v](http://dx.doi.org/10.1002/(sici)1096-9845(199601)25:1<31::aid-eqe534>3.0.co;2-v)
- [8] Fajfar, P.: Capacity Spectrum Method Based on Inelastic Demand Spectra, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 28, pp. 979–993, 1999., [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199909\)28:9<979::AID-EQE850>3.0.CO;2-1](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199909)28:9<979::AID-EQE850>3.0.CO;2-1)
- [9] Fajfar P.: A nonlinear analysis method for performance based seismic design, *Earthquake Spectra* 16(3), pp. 573–592, 2000., <http://dx.doi.org/10.1193/1.1586128>
- [10] Kreslin, M., Fajfar, P.: The extended N2 method considering higher mode effects in both plan and elevation, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(2), pp. 695–715, 2012., <http://dx.doi.org/10.1007/s10518-011-9319-6>
- [11] Fajfar, P., Marušić, D., Peruš, I.: Torsional effects in the pushover-based seismic analysis of buildings, *Journal of Earthquake Engineering*, 9(6), pp. 831–854, 2005., <http://dx.doi.org/10.1080/13632460509350568>
- [12] Krolo, P., Čaušević, M., Bulić, M.: The extended N2 method in seismic design of steel frames considering semi-rigid joints, *Proceedings of the Second European Conference on Earthquake Engineering*, paper 340, pp. 1–10, Istanbul, Turkey, August 24–29, 2014.
- [13] Krolo, P., Čaušević, M., Bulić, M.: Seismic analysis of framed steel structure with semi-rigid joints, *Proceedings of the 7th European Conference on Steel and Composite Structures*, Part 9: Seismic-resistant structures, paper 179, pp. 1–6, Napoli, Italy, September 10–12, 2014.
- [14] Eurocode 3 – Design of steel structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, EN 1993-1-1: 2005.
- [15] Eurocode 3 – Design of steel structures, Part 1-8: Design of Joints, European Committee for Standardization, EN 1993-1-8: 2005.
- [16] Mazzolani, F.M., et al.: Remarks on Behaviour of Concentrically and Eccentrically Braced Steel Frames, *Proceedings of the International Workshop organized by the European Convention for Constructional Steelwork in Timisoara, Romania*, E&FN SPON, An Imprint of Chapman & Hall, London, pp. 310–323, 1994.
- [17] Bulić, M., Čaušević, M., Androić, B.: Reliability of short seismic links in shear, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11, pp. 1083–1098, 2013., <http://dx.doi.org/10.1007/s10518-012-9419-y>
- [18] ABAQUS, Version 6.12, *Abaqus/CAE User's Manual*, SIMULIA Corp., 2012.
- [19] Skejić, D.: Reliability of semi-rigid beam-to-column welded joints. Master of Science thesis. Zagreb (Croatia) Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb; 2005 [in Croatian].
- [20] Wang, T., Wang, Z., Wang, J., Feng, J.: A Simplified Calculation Model for Moment-rotation Curve Used in Semi-rigid End-plate Connection, *Journal of Information & Computational Science*, 10:11, pp. 3529–3538, 2013., <http://dx.doi.org/10.12733/jics20101984>
- [21] Abolmaali, A., Kukreti, A.R., Motahari, A., Ghassemieh, M.: Energy dissipation characteristics of semi-rigid connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(5), pp. 1187–1197, 2009., <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.05.014>
- [22] Youssef, N. F. G., Bonowitz, D., Gross, J. L.: A Survey of Steel Moment-Resisting Frame Buildings Affected by the 1994 Northridge Earthquake, *National Institute of Standards and Technology*, 1995.
- [23] Gates, W. E., Morden, M.: Professional Structural Engineering Experience Related to Welded Steel Moment Frames Following the Northridge Earthquake. *The Structural Design of Tall Buildings*, 5(1), pp. 29–44, 1996., [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1794\(199603\)5:1<29::AID-TAL63>3.0.CO;2-V](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1099-1794(199603)5:1<29::AID-TAL63>3.0.CO;2-V)
- [24] Uang, C.M., Bondad, D.: Static Cyclic Testing of Pre-Northridge and Haunch Repaired Steel Moment Connections, SAC Report, 1996.
- [25] Civjan, S.A.: Investigation of Retrofit Techniques for Seismic Resistant Steel Moment Connections. U: PhD Dissertation. The University of Texas at Austin, 1998.
- [26] Bahaari, M.R., Sherbourne, A. N.: Behaviour of eight-bolt large capacity endplate connections. *Computer & Structures*, 77(3), pp. 315–325, 2000., [http://dx.doi.org/10.1016/S0045-7949\(99\)00218-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0045-7949(99)00218-7)