

Pouzdanost seizmičkih spona kod čeličnih okvira s ekscentričnim dijagonalama

Boris Androić, Mladen Bulić, Mehmed Čaušević

Ključne riječi

seizmičke spona,
čelični okvir,
duktilnost, indeks
pouzdanosti,
nelinearni proračun,
seizmička energija

Key words

seismic connections,
steel frame,
ductility,
reliability index,
nonlinear analysis,
seismic energy

Mots clés

connexion sismiques,
cadre d'acier,
ductilité,
indice de fiabilité,
analyse non-linéaire,
énergie sismique

Ключевые слова

сейсмические скобы,
стальная рама,
дуктильность,
индекс надёжности,
нелинейный расчёт,
сейсмическая энергия

Schlüsselworte

seismische Spangen,
Stahlrahmen,
Dehnbarkeit,
Zuverlässigkeitsindex,
nichtlineare Berechnung,
seismische Energie

B. Androić, M. Bulić, M. Čaušević

Izvorni znanstveni rad

Pouzdanost seizmičkih spona kod čeličnih okvira s ekscentričnim dijagonalama

Prikazani su rezultati teorijskog istraživanja seizmičkih spona, koje su najduktilniji elementi sustava okvira s ekscentričnim dijagonalama. Provedeno je numeričko modeliranje metodom konačnih elemenata. Dobiveni su rezultati na temelju kojih je na probabilističkoj razini istražena veličina indeksa pouzdanosti β u odnosu na njegovu ciljanu vrijednost za klasu konstrukcija RC2. Pokazano je da se za seizmičku sponu s tri para ukrucenja dobiva najpovoljniji indeks pouzdanosti.

B. Androić, M. Bulić, M. Čaušević

Original scientific paper

Reliability of seismic connection in steel frames with eccentric diagonals

Results obtained by the theoretical study of seismic links, which are the most ductile elements of frame systems with eccentric diagonals, are presented. Numerical modelling was conducted by means of the finite element method. The results obtained were used to determine, on the probabilistic level, the reliability index value β as related to its target value for the structural class RC2. It was demonstrated that the reliability index is the most favourable for the seismic link with three pairs of bracing.

B. Androić, M. Bulić, M. Čaušević

Ouvrage scientifique original

La fiabilité des connexions sismiques dans les cadres d'acier à diagonales excentriques

Les résultats obtenus par l'étude théorique des connexions sismiques, qui sont les éléments les plus ductiles des systèmes des cadres à diagonales excentriques, sont présentés. Le modèle numérique a été conduit à l'aide de la méthode des éléments finis. Les résultats obtenus ont été utilisés pour déterminer, sur le niveau probabiliste, la valeur de l'indice de fiabilité β par rapport à sa valeur cible pour la classe structurelle RC2. Il a été démontré que l'indice de fiabilité est le plus favorable pour la connexion sismique à trois paires de raidisseurs.

Б. Андроић, М. Булич, М. Чаушевић

Оригинална научна работа

Надёжность сейсмических скоб у стальных рам с эксцентрическими диагоналями

В работе показаны результаты теоретического исследования сейсмических соединений, являющиеся самыми дуктильными элементами системы рам с эксцентрическими диагоналями. Проведено числовое моделирование методом конечных элементов. Получены результаты, на основании которых на probabilistическом уровне исследована величина индекса надёжности β по отношению к его прицеливаемому значению для класса конструкций RC2. Показано, что для сейсмического соединения с тремя парами жёстких связей получается самый подходящий индекс надёжности.

B. Androić, M. Bulić, M. Čaušević

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

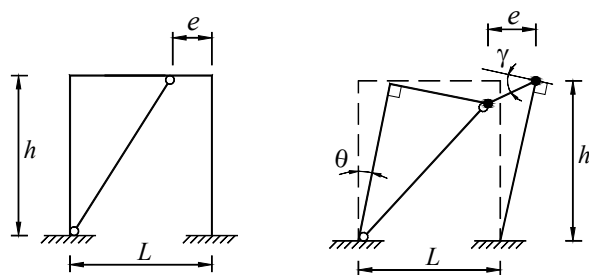
Zuverlässigkeit seismischer Spangen bei Stahlrahmen mit exzentrischen Diagonalen

Dargestellt sind Ergebnisse einer theoretischen Forschung betreffend seismische Spangen, die die dehnbarsten Systemelemente des Rahmens mit exzentrischen Diagonalen sind. Das numerische Modellieren wurde mit der Methode der endlichen Elemente durchgeführt. Man erhielt Ergebnisse auf Grund deren am probabilistischen Niveau die Größe des Zuverlässigkeitsindex β im Verhältnis zu seinem Zielwert für die Konstruktionsklasse RC2 erforscht wurde. Es zeigte sich dass man den günstigsten Zuverlässigkeitsindex für die seismische Spange mit drei Paar Aussteifungen erhält.

Autori: Prof. dr. sc. **Boris Androić**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu;
mr. sc. **Mladen Bulić**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Mehmed Čaušević**, dipl. ing. građ.,
Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci

1 Uvod

Okvir s ekscentričnim dijagonalama hibridni je sustav u kojem je kombinirana krutost okvira s centričnim dijagonalama s duktilnošću i kapacitetom za trošenje energije okvira bez dijagonala [18], kod kojeg je najmanje jedan kraj dijagonale povezan s gredom, tako da se u gredi formira segment koji je nazvan seizmičkom sponom¹ (slika 1.).



Slika 1. Jednostavni okvir s ekscentričnim dijagonalama i njegov mehanizam kolapsa

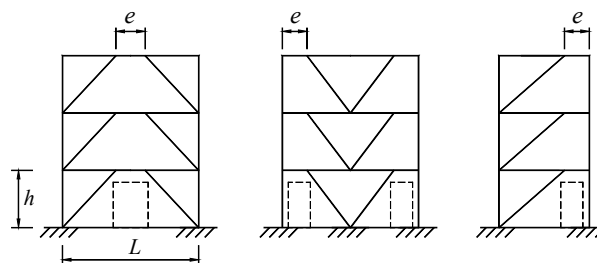
Mehanizam trošenja energije okvira s ekscentričnim dijagonalama sličniji je onom za okvire bez dijagonala, nego onom za okvir s centričnim dijagonalama [3]. Taj mehanizam jamči duktilno ponašanje koje se razlikuje od onog za okvire bez dijagonala zbog temeljne uloge posmičnog djelovanja. Povrh toga, još jedna važna razlika između okvira s ekscentričnim dijagonalama i okvira bez dijagonala jest u činjenici da se kod ovih drugih, zbog geometrijskog oblika okvira, može očekivati veliki omjer duktilnosti elementa i duktilnosti konstrukcije. Elastična se krutost okvira može poboljšati smanjenjem duljine spone, ali se time i duktilnost smanjuje.

Okviri s ekscentričnim dijagonalama općenito se projektiraju prema načelu "jak stup – slaba greda", što znači da stup, greda bez spone i dijagonala sustava moraju imati veću otpornost od spone, tako da neelastične deformacije nastaju u sponi kao najduktilnijem elementu sustava [6].

Postupak projektiranja sustava provodi se tako da se najprije odredi najveća posmična sila i momenti savijanja koji se mogu ostvariti u sponi, a zatim se na temelju tako dobivenih reznih sila spone definiraju uzdužne sile i momenti savijanja u gredi i dijagonali, na osnovi kojih se provede i njihovo dimenzioniranje.

Geometrijski oblik okvira znatno utječe na ponašanje okvira s ekscentričnim dijagonalama. Na temelju rezul-

tata eksperimentalnih ispitivanja predlaže se smještaj spone samo na jednoj strani svake dijagonale (slika 2.). Naročito je preporučljiva za upotrebu konfiguracija kada je spona smještena na sredini grede u kojoj ne postoje izravne veze spone sa stupom.



Slika 2. Najčešće primjenjivi tipovi okvira s ekscentričnim dijagonalama u praksi

U sustavu s ekscentričnim dijagonalama neelastična aktivnost okvira zbog cikličnog horizontalnog opterećenja velikog intenziteta orijentirana je na seizmičku sponu koju treba tako projektirati i izvesti da može podnijeti velike neelastične deformacije bez gubitka otpornosti [12].

2 Seizmičke spone

Seizmičke se spone projektiraju tako da ostanu u elastičnom području pri uobičajenom opterećenju, a da se deformiraju neelastično pri preopterećenju konstrukcije te da se preko njih troši velika količina seizmičke energije. Znači da je kritični faktor koji utječe na neelastično ponašanje spone njezina duljina, a toj su duljini u korelaciji kapacitet gubljenja energije i mehanizam rušenja sustava [13].

Kod takvog sustava se opasnost od izvijanja dijagonale može spriječiti budući da seizmička spona djeluje kao osigurač koji ograničava uzdužnu silu u dijagonali.

Većina seizmičke energije kod okvira s ekscentričnim dijagonalama se troši u seizmičkim sponama. Eksperimentalna su ispitivanja pokazala da se u pravilno projektiranoj sponi može utrošiti velika količina seizmičke energije tako da izdrži znatne neelastične deformacije pod velikim cikličnim opterećenjem bez gubljenja otpornosti. Prednost se daje formiranju plastičnih zglobova zbog posmika jer pružaju veću sposobnost trošenja energije.

Seizmičke se spone dimenzioniraju za proračunsko seizmičko djelovanje u posmiku ili savijanju tako da vrijedi

$$V_{Ed} \leq V_{p,link} \quad M_{Ed} \leq M_{p,link} \quad (1)$$

gdje su $V_{p,link}$ i $M_{p,link}$ poprečna sila potpune plastičnosti i moment potpune plastičnosti u sponi.

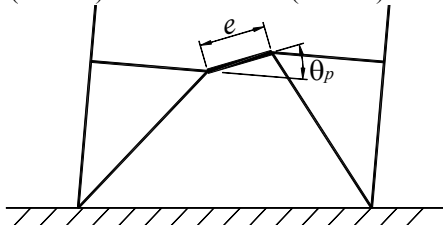
Za I i H poprečne presjeka jesu [8]:

¹ U hrvatskim normama niza HRN ENV 1998 koje su na snazi engleska riječ seismic link prevedena je sa potresna spojka. Pododbor PO8 Tehničkog odbora 548 Eurokodovi pri Hrvatskom zavodu za norme za ovaj je naziv u rujnu 2007. prihvatio riječ potresna veza. U ovom je radu, do konačne odluke tehničkih odbora TO 548 i TO 512 HZN ostavljen naziv koji rabe autori tj. seizmička spona.

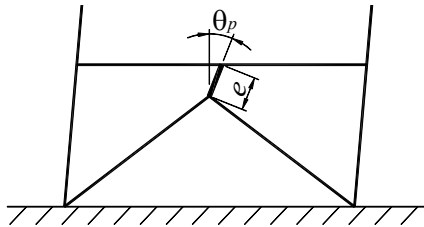
$$V_{p,link} = (d - t_f) \cdot t_w \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}$$

$$M_{p,link} = b \cdot t_f \cdot (d - t_f) \cdot f_y \quad (2)$$

Lokalni plastični mehanizam u seizmičkoj sponi ovisi o tipologiji konstrukcije. Tipologija konstrukcije može biti takva da su momenti savijanja na krajevima spone jednaki (slika 3.) ili da su različiti (slika 4.).



Slika 3. Jednaki momenti savijanja na krajevima spone



Slika 4. Različiti momenti savijanja na krajevima spone

Plastični mehanizmi u seizmičkim sponama ovise o njihovim duljinama, e [10]. Kratke spone popuštaju ponajprije pri posmiku; energija koja se utroši u plastičnom mehanizmu jest $W_V = V_{p,link} \cdot \theta_p \cdot e$.

Dugačke spone popuštaju ponajprije pri savijanju. Utrošena energija u plastičnom mehanizmu kod dugačkih spona koje su podvrgnute djelovanju jednakih momenata savijanja na krajevima (slika 3.) jest

$$W_M = 2M_{p,link} \cdot \theta_p$$

Granica između dugačkih i kratkih spona odgovara situaciji u kojoj se popuštanje može pojaviti pri posmiku ili pri savijanju:

$$\begin{aligned} W_M = W_V &\Rightarrow 2M_{p,link} \theta_p = V_{p,link} \cdot \theta_p \cdot e \Rightarrow \\ &\Rightarrow e = 2M_{p,link} / V_{p,link} \end{aligned} \quad (3)$$

Međutim, za vrijednosti e u graničnom području jednadžbe (3), značajne vrijednosti momenta savijanja i poprečnih sila nastaju istodobno te se njihova interakcija treba uzeti u obzir.

Dakle, seizmičke se spone razvrstavaju u tri kategorije prema tipu razvoja plastičnog mehanizma:

- kratke spone, kod kojih se energija troši formiranjem plastičnih zglobova zbog posmika
- dugačke spone, kod kojih se energija troši formiranjem plastičnih zglobova zbog savijanja

- srednje duge spone, kod kojih plastični mehanizam nastaje savijanjem i posmikom.

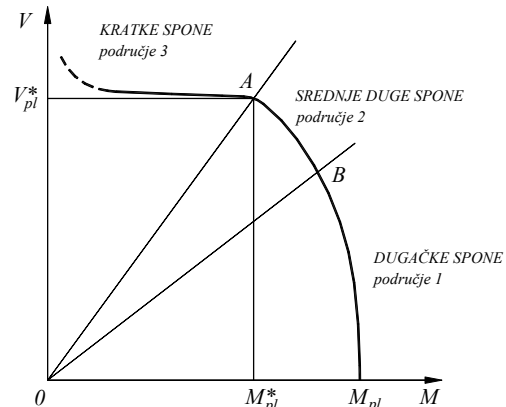
Razredba se provodi prema duljini spone e . Za I i H presjeke [8], [15]:

$$\bullet \text{ kratke spone } e < e_s = 1,6 M_{p,link} / V_{p,link} \quad (4)$$

$$\bullet \text{ dugačke spone } e > e_L = 3,0 M_{p,link} / V_{p,link} \quad (5)$$

$$\bullet \text{ srednje duge spone } e_s < e < e_L \quad (6)$$

Na interakcijskom dijagramu momenta savijanja i poprečne sile (slika 5.) označena je karakteristična točka A koja dijeli područje u kojem prevladava popuštanje pri posmiku i područje u kojem se javlja interakcija popuštanja pri savijanju i posmiku [10], [15]. U trećem području iza karakteristične točke B prevladava popuštanje pri savijanju. Ta područja odgovaraju određenim duljinama spone.



Slika 5. Interakcijski dijagram momenta savijanja i poprečne sile

Dulje spone imaju arhitektonskih prednosti jer se njima osiguravaju veći prostori za vrata i prozore. Međutim, ponašanje dugačkih spona u praksi se općenito pokazalo loše u odnosu na kratke spone, jer dulje spone imaju manju krutost i posjeduju manji kapacitet za trošenje energije, pa se u praksi preporučuje upotreba kratkih spona, kod kojih se popuštanje materijala ostvaruje posmičnim silama. Posmične su deformacije u suštini ravninske deformacije hrpta poprečnog presjeka spone, bez značajne sklonosti bočno torzijskom izvijanju.

Kod dugačkih se spona plastični zglobovi formiraju zbog savijanja što dovodi do izbočivanja pojasnica te krivljenje poprečnog presjeka s mogućnošću bočno torzijskog izvijanja. U tom slučaju treba postaviti jaka bočna pridržanja gornje i donje pojasnice.

Ukručivanje hrpta seizmičke spone poboljšava sposobnost trošenja energije u sponi tako da odgađa neelastično izbočivanje hrpta i usporava opadanje sposobnosti nošenja opterećenja kod seizmičke spone kontrolirajući amplitudu pomaka izvan ravnine hrpta. Trošenje energije kod ukružene će se spone prije dogoditi neelastičnom

posmičnom deformacijom, nego neelastičnim izbočivanjem hrpta [11].

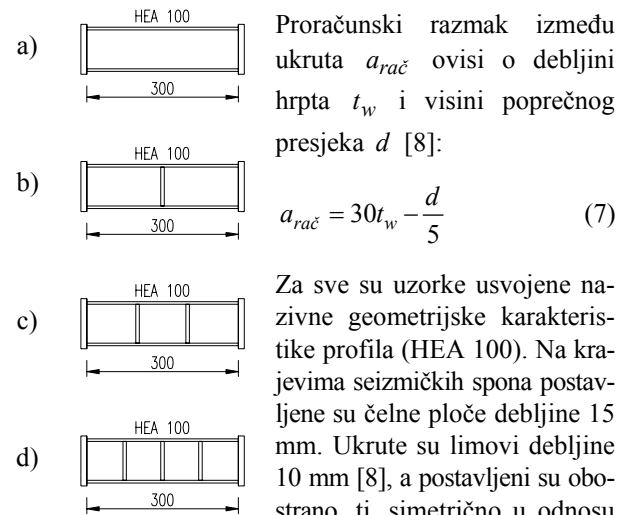
Presječna grede i dijagonale, tj. dio grede neposredno uz sponu mora biti bočno i torzijski stabilan. Stabilnost tog dijela grede postiže se postavljanjem sekundarnog nosača u presječni grede i dijagonale okomito na ravninu okvira. Seizmička spona mora biti slobodna bez bilo kakvih pridržanja. Ta pridržanja mogu spriječiti pojavu neelastičnih deformacija u sponi što može dovesti do oštećenja ostalih elemenata sustava.

3 Nelinearna numerička analiza

3.1 Odabir modela

Projektiranje okvira s ekscentričnim dijagonalama treba se osnivati na upotrebi kratkih spona kod kojih će se puštanje materijala ostvariti velikim vrijednostima posmičnih sila [10]. S obzirom na to ovaj će se rad ograničiti na analizu kratkih spona. Odabrana su četiri modela kratkih spona jednakoga poprečnog presjeka (HEA100) i jednake duljine ($e = 300$ mm), a variran je broj ukruta, odnosno stvarni razmak između ukruta $a_{stv\ i}$ (slika 6.):

- model spona bez ukruta ($a_{stv0} = 300$ mm)
- model spona s jednim parom ukruta ($a_{stv1} = 150$ mm)
- model spona s dva para ukruta ($a_{stv2} = 100$ mm)
- model spona s tri para ukruta ($a_{stv3} = 75$ mm)

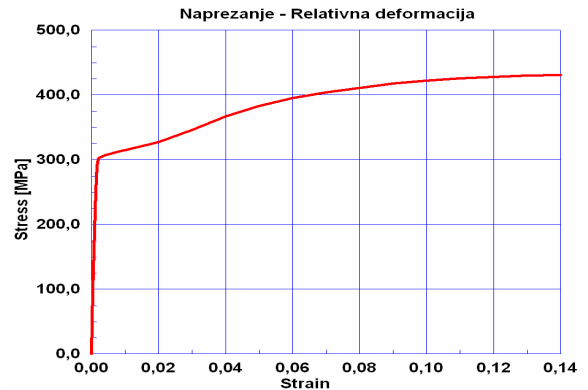


Slika 6. Četiri modela seizmičkih spona

uvjete u okviru (slika 1). S jedne je strane spona spriječeno svih šest stupnjeva slobode, dok je s druge strane spriječeno pet stupnjeva slobode, a dopušteno je pomicanje po vertikalnoj osi.

3.2 Mehaničke karakteristike elemenata numeričkog modela

U numeričke modele uključena je stvarna materijalna nelinearnost. Modeliranje stvarnih mehaničkih karakteristika elemenata učinjeno je na temelju eksperimentalnih rezultata provedenih vlačnih ispitivanja za razred čelika S235 (slika 7.) preuzetih iz literature [20], [21].

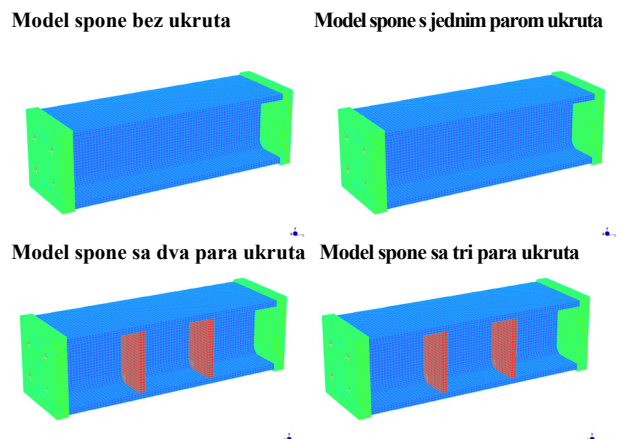


Slika 7. Dijagram $\sigma-\epsilon$

3.3 Geometrija modela konačnih elemenata

Nelinearna numerička analiza provedena je programskim paketom STRAUS [23]. Sva su četiri modela modelirana trodimenzijskim 8-nodal brick Solid konačnim elementima (slika 8.). Na spoju čelne ploče s profilom, te na spoju ukruta na profilu, bilo je potrebno pronaći takvu mrežu konačnih elemenata koja će odgovarati mreži konačnih elemenata profila. Model bez ukruta sadrži ukupno 32833 čvora, odnosno 24072 elementa, model s jednim parom ukruta sadrži 34873 čvorova, odnosno 25496 elementa, model sa dva para ukruta sadrži 36913 čvorova, odnosno 26920 elementa, te model sa tri para ukruta sadrži 38953 čvora, odnosno 28344 elementa.

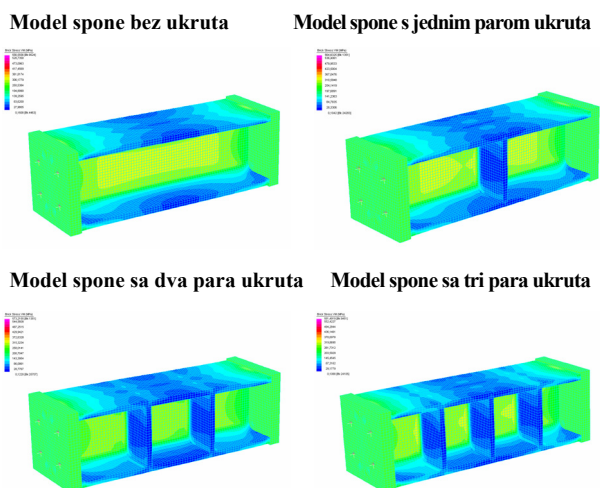
Opterećenje je unošeno u obliku vertikalnog pomaka na jednom kraju spona; pomaci su nanošeni u koracima veličine 1 mm.



Slika 8. Mreža konačnih elemenata modela spona

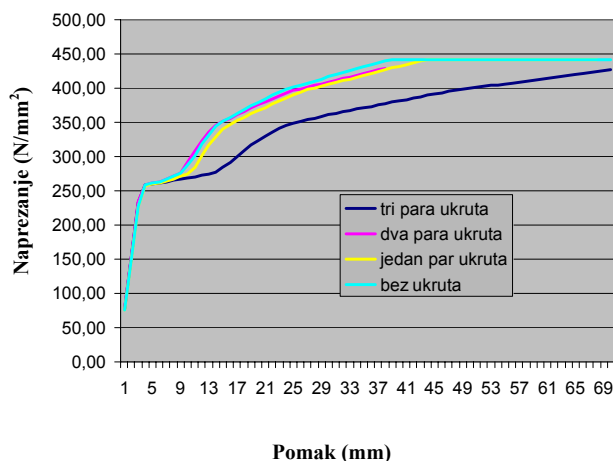
3.4 Rezultati

Napravljena je usporedba numeričkih rezultata za četiri modela ukrućenja seizmičkih spona. Prikazana je raspodjela Von Misesovih napreznja u 10. koraku opterećenja (pomak od 10 mm na desnom kraju spone) kada dolazi do plastifikacije hrpta zbog djelovanja poprečne sile (slika 9.).



Slika 7. Plastifikacija hrpta kod četiri modela seizmičkih spona

Promjena napreznja u hrptu pri nanošenju pomaka u koracima veličine 1 mm na desnom kraju spone prikazana je grafički (slika 10.).



Slika 8. Napreznje u hrptu pri nanošenju inkrementalnih pomaka na desnom kraju spone

Može se uočiti da se modeli bez ukruta, s jednim parom ukruta i s dva para ukruta ponašaju gotovo istovjetno.

Kod modela sa tri para ukruta uočava se veće područje popuštanja materijala što znači da se plastifikacija hrpta u tom području dešava bez izbočavanja plohe hrpta.

4 Probabilistička analiza

4.1 Općenito

Da bi se dobio stupanj pouzdanosti konstrukcije, potrebno je uzeti u obzir stohastičku prirodu svojstava konstrukcije te djelovanja na konstrukciju [1], [2]. Naime, stvarne vrijednosti mehaničkih karakteristika materijala i geometrijske karakteristike elemenata odstupaju od idealnih vrijednosti. Također, djelovanja na konstrukciju u stvarnosti se razlikuju od pretpostavljenih pri proračunu konstrukcije.

Svi parametri nepouzdanosti u probabilističkoj analizi uzimaju se u obzir stohastičkim varijablama, koje se nazivaju baznim varijablama. One karakteriziraju ponašanje i pouzdanost konstrukcije, a definirane su svojom srednjom vrijednošću, standardnom devijacijom te funkcijom gustoće vjerojatnosti [16].

Dokaz pouzdanosti za različite modele seizmičkih spona provodi se formiranjem jednadžbi graničnog stanja, formiranjem stohastičkog modela (opisivanje statističke prirode baznih varijabli) te izračunavanjem pripadnih indeksa pouzdanosti β .

Okviri s ekscentričnim dijagonalama mogu se svrstati u razred pouzdanosti konstrukcije RC2. Ciljana veličina indeksa pouzdanosti β u tom je slučaju 3,8 za povratni period od 50 godina [7], [19]. Za svaki od četiri odabrana modela formira se jednadžba graničnog stanja:

$$g(\bar{X}) = R - E = 0 \quad (8)$$

gdje je:

$g(\bar{X})$ - funkcija graničnog stanja koja povezuje sve bazne varijable i konstante

R - funkcija otpornosti s baznim varijablama i konstantama na strani otpornosti

E - funkcija učinka djelovanja s baznim varijablama i konstantama na strani djelovanja

4.2 Bazne varijable

U probabilističkom su konceptu pouzdanosti svojstva materijala, geometrijske veličine i učinci djelovanja prikazani kao slučajne varijable (tablica 1.).

Bazne su varijable definirane kao jednodimenzijski stohastički model, a opisuju se odgovarajućim funkcijama razdiobe, tj. određene su tipom razdiobe, srednjom vrijednošću μ i standardnom devijacijom σ (tablica 2.).

Tablica 1. Bazne varijable

Otpornost	
γ_i	faktori korekcije modela
f_{yw}	granica popuštanja hrpta spona
t_w	debljina hrpta spona
t_f	debljina pojasnice spona
a_{stvi}	stvarni razmaci ukruta hrpta spona
Djelovanje	
V_E	učinak djelovanja (poprečna sila) od potresa

Faktori korekcije proračunskog modela otpornosti γ_i dani su kao odnos poprečne sile u modelu seizmičke spona pri popuštanju materijala dobivene numeričkom analizom $V_{p,m,i}$ i teorijske otpornosti $V_{p,link}$ prema jednadžbi (2).

$$\gamma_i = \frac{V_{p,m,i}}{V_{p,link}} \quad (9)$$

Tablica 2. Statistički parametri baznih varijabla

Bazna varijabla	Model razdiobe	Srednja vrijednost [μ]	Standardna devijacija [σ]
γ_0	normalan	1,19	0,1377
γ_1	normalan	1,29	0,1493
γ_2	normalan	1,42	0,1643
γ_3	normalan	1,61	0,1863
f_{yw}	lognormalan	280 N/mm ²	19,04 N/mm ²
t_w	normalan	5,15 mm	0,112 mm
t_f	normalan	8,13 mm	0,223 mm
a_{stv0}	normalan	300 mm	3,0 mm
a_{stv1}	normalan	150 mm	1,5 mm
a_{stv2}	normalan	100 mm	1,0 mm
a_{stv3}	normalan	75 mm	0,75 mm
V_E	Gumbel	36223 N	9056 N

Odnos standardne devijacije σ i srednje vrijednosti μ , odnosno koeficijent varijacije ν je preuzet iz literature [25] i za sve modele iznosi 0,1157.

Vruće valjani profili se uvoze iz cijele Europe, međutim najpotpuniji dostupni rezultati vezani su uz istraživanja provedena u Italiji. S obzirom na to ovdje su usvojeni

statistički parametri za granicu popuštanja f_y , koji vrijede za Italiju [24].

Statistički parametri za geometrijske karakteristike kao bazne varijable, debljinu hrpta t_w i debljinu pojasnice t_f su preuzeti iz literature [20]. Preporučuje se normalna razdioba kao stohastički model za sve geometrijske nesavršenosti.

Srednja vrijednost za stvarne razmake između ukruta a_{stvi} uzeta je kao nazivna vrijednost. Koeficijent varijacije usvojen je 0,01 budući da vrijede stroga pravila vezana uz dopuštena odstupanja pri radioničkoj izradi čelične konstrukcije [7].

U radu nije tretiran statički sustav okvira s ekscentričnom dijagonalom neke stvarne konstrukcije, već je analiziran samo dio jednog takvog okvira na kojem se nalazi spona. Srednja vrijednost ($\mu = 36223$ N) i standardna devijacija ($\sigma = 9056$ N) bazne varijable V_E dobiveni su programskim paketom STATISTICA [22] na temelju karakteristične posmične otpornosti usvojenoga poprečnoga presjeka ($V_E = V_{p,link} = 59769$ N) prema jednadžbi (2). Odnos između standardne devijacije i srednje vrijednosti određen je koeficijentom varijacije ν , ($\nu = \sigma/\mu$). Analizom rezultata koji su dobiveni za standardnu devijaciju ubrzanja za potrese na području Dinarida [9], te analizom rezultata citiranih autora u istome radu (Ambra-seys i dr.), u ovome je radu usvojen koeficijent varijacije $\nu = 0,25$.

4.3 Formiranje jednadžbi graničnog stanja

a) Model spona bez ukruta

Poprečni presjek: HEA100

$$e = 300 \text{ mm}$$

$$a_{stv0} = e$$

$$a_{ra\check{c}} = 130,8 \text{ mm}$$

$$a_{ra\check{c}} = 0,436 a_{stv0}$$

$$g_0(\bar{X}) = V_{p,link,0} - V_E = 0$$

$$g_0(\bar{X}) = \gamma_0 \cdot (d - t_f) \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} - V_E = 0$$

Iz jednadžbe (7) je:

$$d = 150t_w - 5a_{ra\check{c}}$$

$$d = 150t_w - 2,18a_{stv0}$$

$$g_0(\bar{X}) = \gamma_0 \cdot ((150t_w - 2,18a_{stv0}) - t_f) \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} - V_E = 0 \quad (10)$$

b) Model spona s jednim parom ukruta

Poprečni presjek: HEA100

$$e = 300 \text{ mm}$$

$$a_{stv1} = 0,5 e$$

$$a_{rač} = 130,8 \text{ mm}$$

$$a_{rač} = 0,872 a_{stv1}$$

$$g_1(\bar{X}) = V_{p,link,1} - V_E = 0$$

$$g_1(\bar{X}) = \gamma_1 \cdot (d - t_f) \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} - V_E = 0$$

Iz jednadžbe (7) je:

$$d = 150t_w - 5a_{rač}$$

$$d = 150t_w - 4,36a_{stv1}$$

$$g_1(\bar{X}) = \gamma_1 \cdot ((150t_w - 4,36a_{stv1}) - t_f) \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} - V_E = 0 \quad (11)$$

c) Model spone s dva para ukruta

Poprečni presjek: HEA100

$$e = 300 \text{ mm}$$

$$a_{stv2} = 0,333 e$$

$$a_{rač} = 130,8 \text{ mm}$$

$$a_{rač} = 1,308 a_{stv2}$$

$$g_2(\bar{X}) = V_{p,link,2} - V_E = 0$$

$$g_2(\bar{X}) = \gamma_2 \cdot (d - t_f) \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} - V_E = 0$$

Iz jednadžbe (7) je:

$$d = 150t_w - 5a_{rač}$$

$$d = 150t_w - 6,54a_{stv2}$$

$$g_2(\bar{X}) = \gamma_2 \cdot ((150t_w - 6,54a_{stv2}) - t_f) \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} - V_E = 0 \quad (12)$$

d) Model spone s tri para ukruta

Poprečni presjek: HEA100

$$e = 300 \text{ mm}$$

$$a_{stv3} = 0,25 e$$

$$a_{rač} = 130,8 \text{ mm}$$

$$a_{rač} = 1,744 a_{stv3}$$

$$g_3(\bar{X}) = V_{p,link,3} - V_E = 0$$

$$g_3(\bar{X}) = \gamma_3 \cdot (d - t_f) \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} - V_E = 0$$

Iz jednadžbe (7) je:

$$d = 150t_w - 5a_{rač}$$

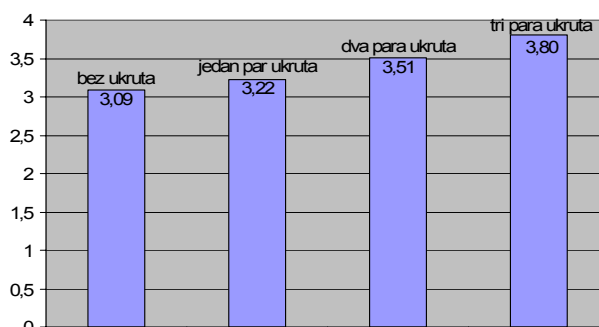
$$d = 150t_w - 8,72a_{stv3}$$

$$g_3(\bar{X}) = \gamma_3 \cdot ((150t_w - 8,72a_{stv3}) - t_f) \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} - V_E = 0 \quad (13)$$

4.4 Rezultati

Proračun indeksa pouzdanosti β , kao operativne vrijednosti veličine vjerojatnosti otkazivanja, proveden je računskim programskim paketom VAP [19] koji omogućava proračun indeksa pouzdanosti prema metodi pouzdanosti prvog reda – FORM (*First Order Reliability Method*). Dobiveni indeksi pouzdanosti za pojedine modele seizmičkih spona prikazani su grafički.

Dobivene vrijednosti indeksa pouzdanosti β prema FORM za promatrane modele seizmičkih spona kreću se od $\beta = 3,09$ za model spone bez ukruta do $\beta = 3,80$ za model spone sa tri para ukruta (slika 11.).

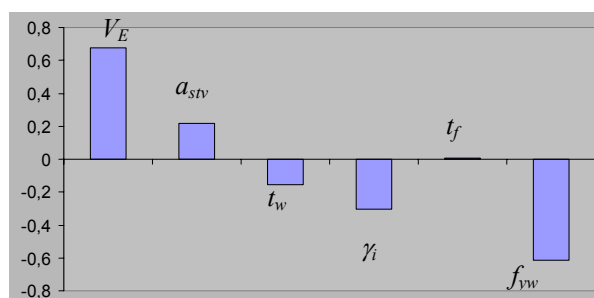


Slika 9. Indeksi pouzdanosti za pojedine modele seizmičkih spona prema FORM

Također je provedena analiza u kojoj su dobiveni faktori osjetljivosti α_i (*sensitivity*) baznih varijabli. Budući da faktori osjetljivosti pokazuju "težinu" bazne varijable s obzirom na njezin utjecaj na veličinu indeksa pouzdanosti, prema rezultatima analize proizlazi da pretežit utjecaj na indeks pouzdanosti β imaju sljedeće bazne varijable (slika 12.):

t_w – debljina hrpta (na strani otpornosti)

V_E – učinak djelovanja (poprečna sila) od potresa



Slika 10. Faktori osjetljivosti α_i pojedinih baznih varijabli

5 Zaključak

Za provođenje numeričkih simulacija metodom konačnih elemenata odabran je programski paket Straus. Primijenjeni Solid 3D (8-nodal brick) elementi, iako mnogo kompliciraniji za modeliranje od ravninskih elemenata, daju točnije rezultate i preporučuju se za znanstvene numeričke simulacije čeličnih sustava. U numerički je model unesena materijalna nelinearnost. Modeli su opterećivani dodavanjem pomaka u koracima od 1 mm na jednom kraju spona te je na taj način simulirana plastifikacija hrpta zbog djelovanja poprečne sile.

Numeričkom je analizom pokazano da se model bez ukruta, model s jednim parom ukruta i model s dva para ukruta ponašaju gotovo istovjetno u području popuštanja materijala. Kod modela sa tri para ukruta javlja se područje popuštanja materijala koje je gotovo dvostruko dulje nego kod ostalih modela što znači da se plastifikacija hrpta u tom području događa bez izbočivanja plohe

hrpta. U takvoj seizmičkoj sponi može se utrošiti veća količina seizmičke energije.

Nakon numeričke analize proveden je proračun indeksa pouzdanosti β za četiri modela seizmičkih spona, te faktora osjetljivosti pojedinih baznih varijabli. Za model sa tri para ukruta dobiven je indeks pouzdanosti $\beta = 3,8$ što je i ciljana veličina za razred pouzdanosti konstrukcije RC2 i povratni period od 50 godina [7], [19]. Za ostale je modele dobivena manja vrijednost indeksa pouzdanosti.

Prema dobivenim faktorima osjetljivosti baznih varijabli može se zaključiti da pretežit utjecaj imaju debljina hrpta t_w i učinak djelovanja potresa (poprečna sila) V_E . Ovaj rezultat pokazuje važnost dimenzijske kontrole debljine hrpta kod budućega eksperimentalnog ispitivanja. Također, rezultat dokazuje važnost točne procjene varijabilnosti opterećenja potresom budući da precjenjivanje ove varijabilnosti rezultira relativno velikim gubitkom pouzdanosti.

Napomena

Istraživanja prikazana u ovome radu provedena su u sklopu znanstvenog projekta "Razvoj konstrukcija povećane pouzdanosti s obzirom na potres" (114-0821466-1470) u okviru znanstvenog programa "Ujednačavanje pouzdanosti konstrukcija različitih materijala i tipova" koji financira Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske.

LITERATURA

- [1] Androić, B., Dujmović, D., Džeba, I., *Metalne konstrukcije 4*, IA Projektiranje, Zagreb, 2003.
- [2] Androić, B., Dujmović, D., Džeba, I., *Inženjerstvo pouzdanosti 1*, IA Projektiranje, Zagreb, 2006.
- [3] Bulić, M., Čaušević, M., *Ponašanje i konstruiranje čeličnih okvira s ekscentričnim dijagonalama*, GRAĐEVINAR 57 (2005), 9, 687-697.
- [4] Čaušević, M., *Potresno inženjerstvo*, Školska knjiga, Zagreb, 2001.
- [5] Čaušević, M., *Interaction of Eurocode 8 and Eurocode 3 in eccentrically braced steel frame design*, European Earthquake Engineering, Journal of the European Association for Earthquake Engineering, Patron Editore Publisher, Bologna, Italy, No.2, pp. 3-7, 1998.
- [6] Čaušević, M., *Ponašanje i konstruiranje čeličnih okvira s ekscentričnim dijagonalama u uvjetima seizmičkog opterećenja*, Zbornik 5. kongresa za potresno inženjerstvo, pp. 131-142, Bled, Slovenija, 1990.
- [7] Eurocode 0, *Basis of structural design*, CEN European Committee for Standardization, Brussels, EN 1990: 2002.
- [8] 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.
- [9] Herak, M., Markušić, S., Ivančić, I., *Attenuation of peak horizontal and vertical acceleration in the Dinarides area*, Studia geoph. et geod. 45 (2001), 383-394.
- [10] Hjelmstad, K.D., Popov, E. P., *Seismic Behavior of Active Beam Links in Eccentrically Braced Frames*, Report No. UCB/EERC-83/24, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 1983.
- [11] Kasai, K., Popov, E. P., *General Behavior of WF Steel Shear Link Beams*, Journal of the Structural Division, Vol.112, No.2., pp.362-382, ASCE, February, 1986.
- [12] Malley, J. O., Popov, E. P., *Design Considerations for Shear Links in Eccentrically Braced Frames*, Report No. UCB/EERC-83/84, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1983.
- [13] Malley, J. O., Popov, E. P., *Shear Links in Eccentrically Braced Frames*, Journal of Structural Engineering, ASCE, September, 1984.
- [14] 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.
- [15] Mazzolani, F. M., Gioncu, V., (editors), *Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas*, Proceedings of the International workshop organised by ECCS, E&FN SPON, An Imprint of Chapman & Hall, London, 1994.
- [16] Milčić, V., Peroš, B., *Uvod u teoriju sigurnosti nosivih konstrukcija*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 2003.

- [17] Popov, E. P., Kasai, K., Engelhardt, M. D., *Advances in Design of Eccentrically Braced Frames*, Earthquake Spectra, Vol.3, No.1., 1987.
- [18] Roeder, C. W., Popov, E. P., *Eccentrically Braced Steel Frames for Earthquakes*, Journal of the Structural Division, Vol.104, No.3., pp.391-412, ASCE, March, 1978.
- [19] Schneider, J., *Introduction to Safety and Reliability of Structures*, Structural Engineering Documents, No. 5, IABSE, 1997.
- [20] Skejić, D., *Pouzdanost djelomično nepopustljivih zavarenih priključaka nosač-stup*, Magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2005.
- [21] Skejić, D., Dujmović, D., Haiman, M., *Nelinearni proračun zavarenog priključka nosač-stup*, GRAĐEVINAR 58 (2006), 12, 979-987.
- [22] STATISTICA Manual, London, 1992.
- [23] STRAUS (Strand) Manual, G+D Computing, Sydney, 2002.
- [24] Tkalčević, V., Pouzdanost sačastih nosača iz aspekta bočnog izvijanja, Disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2006.
- [25] Tkalčević, V., Džeba, I., Androić, B., Pouzdanost sačastih nosača na bočno-torzijsko izvijanje, GRAĐEVINAR 59 (2007), 4, 311-318.