

Pouzdanost kratkih seizmičkih spona čeličnih okvirnih konstrukcija

Mladen Bulić, Boris Androić, Mehmed Čaušević

Ključne riječi

čelični okvir,
seizmičke spona,
pouzdanost,
indeks pouzdanosti,
nelinearni proračun,
laboratorijska ispitivanja

Key words

steel frame,
seismic ties,
reliability,
reliability index,
nonlinear analysis,
laboratory testing

Mots clés

cadre en acier,
connexions sismiques,
fiabilité,
indice de fiabilité,
analyse non-linéaire,
essai en laboratoire

Ключевые слова

стальная рама,
сейсмические скобы,
надежность,
индекс надежности,
нелинейный расчет,
лабораторные
испытания

Schlüsselworte

Stahlrahmen,
seismische Verbinder,
Zuverlässigkeit,
Zuverlässigkeitsindex,
unlineare Berechnung,
Laboruntersuchungen

M. Bulić, B. Androić, M. Čaušević

Izvorni znanstveni rad

Pouzdanost kratkih seizmičkih spona čeličnih okvirnih konstrukcija

U radu su prikazani rezultati istraživanja razina pouzdanosti kratkih seizmičkih spona s različitim brojem ukruta hrpta. Proveden je proračun metodom konačnih elemenata i laboratorijska ispitivanja na četiri serije sa po četiri nazivno jednaka uzorka. Probabilističkom analizom dobiveni su indeksi pouzdanosti te uspoređeni s normiranim za odgovarajući razred pouzdanosti. Pokazalo se da pretežni utjecaj na indeks pouzdanosti imaju debljina hrpta i djelovanje poprečne sile.

M. Bulić, B. Androić, M. Čaušević

Original scientific paper

Reliability of short seismic ties of steel frame structures

Results obtained by studying the level of reliability of short seismic ties, with different numbers of web braces, are presented. The analysis was made using the finite element method and laboratory testing, and involved four series of samples, each with four nominally similar samples. Reliability indices, obtained by probabilistic analysis, were compared with standard values for the corresponding category of reliability. It was established that the reliability index is mostly influenced by web thickness and transverse force action.

M. Bulić, B. Androić, M. Čaušević

Ouvrage scientifique original

Fiabilité des connexions sismiques courtes des structures-cadres en acier

Les résultats obtenus au cours de l'étude du niveau de fiabilité des connexions sismiques courtes, avec les numéros différents des raidisseurs d'âme, sont présentés. L'analyse est basée sur la méthode des éléments finis et sur les essais en laboratoire faits sur quatre séries d'échantillons, chacune à quatre échantillons théoriquement similaires. Les indices de fiabilité, obtenus par analyse probabiliste, sont comparés avec les valeurs standard pour la catégorie de fiabilité correspondante. Il a été déterminé que l'indice de fiabilité est surtout influencé par l'épaisseur d'âme et par l'action de la force transversale.

М. Булич, Б. Андроиц, М. Чаушевич

Оригинальная научная работа

Надежность коротких сейсмических скоб стальных рамных конструкций

В работе приведены результаты исследования уровня надежности коротких сейсмических скоб с различным числом элементов жесткости хребта. Проведен расчет методом конечных элементов и лабораторные испытания на четырех сериях с четырьмя номинально одинаковыми образцами. Путем probabilistic анализа получены индексы надежности, и проведено их сравнение с нормированными по соответствующему классу надежности. Подтверждено, что преобладающее влияние на индекс надежности оказывают толщина хребта и действие поперечной силы.

M. Bulić, B. Androić, M. Čaušević

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Zuverlässigkeit kurzer seismischer Verbinder von Stahlrahmenkonstruktionen

Im Artikel zeigt man die Ergebnisse der Untersuchung des Zuverlässigkeitsstands kurzer seismischer Verbinder mit verschiedener Anzahl von Stegsteifen. Durchgeführt wurden Berechnung mit der Methode der endlichen Elemente und Laboruntersuchungen von vier Serien mit je vier gleichen Prüfkörpern. Durch probabilistische Analyse erhielt man die Indizes der Zuverlässigkeit und verglich sie mit den Normierten für die entsprechende Zuverlässigkeitsklasse. Es zeigte sich dass die Stegdicke und die Wirkung der Querkraft den überwiegenden Einfluss auf den Zuverlässigkeitindex haben.

Autori: Dr. sc. **Mladen Bulić**, dipl. ing. građ. Sveučilište u Rijeci Građevinski fakultet; prof. dr. sc. **Boris Androić**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb; prof. dr. sc. **Mehmed Čaušević**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Rijeci Građevinski fakultet, Rijeka

1 Uvod

Predmet ovog istraživanja bio je probabilističkim analizama procijeniti razine pouzdanosti kratkih seizmičkih spona izloženih posmiku. Analiza je ograničena na kratke seizmičke spona budući da se kod njih razgradnja seizmičke energije odvija formiranjem plastičnih zglobova zbog posmika, tako da imaju veću sposobnost razgradnje energije nego dugačke i srednje duge spona [1]. Opterećenje je odabrano tako da ne predstavlja rezultat nekoga stvarnog seizmičkoga djelovanja, već je dovedeno na nivo koji je potreban da bi se procijenio indeks pouzdanosti seizmičkih spona.

Plastična posmična otpornost određena je prema Eurokodu 8-1 [2] koja za I poprečne presjeke ima sljedeću vrijednost:

$$V_{p,link} = (d - t_f) \cdot t_w \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} \text{ za } N_{Ed} / N_{pl,Rd} \leq 0,15 \quad (1)$$

te reduciranu vrijednost

$$V_{p,link,r} = V_{p,link} \left[1 - (N_{Ed} / N_{pl,Rd})^2 \right]^{0,5} \text{ za } N_{Ed} / N_{pl,Rd} > 0,15 \quad (2)$$

gdje je:

- $V_{p,link}$ - poprečna sila potpune plastičnosti u sponi
- N_{Ed} - uzdužna proračunska sila
- $N_{pl,Rd}$ - plastična uzdužna proračunska otpornost
- f_y - nazivna granica popuštanja čelika
- d - visina poprečnog presjeka
- b - širina poprečnog presjeka
- t_w - debljina hrpta i
- t_f - debljina pojasnice.

Duljina seizmičke spona odabrana je tako da se ispuni uvjet iz Eurokoda 8-1 [2] za duljinu kratke spona

$$e < e_s = 1,6 M_{p,link} / V_{p,link} \quad (3)$$

gdje je:

$M_{p,link}$ - moment potpune plastičnosti u sponi,

te da se ispuni uvjet za proračunsku udaljenost $a_{rač}$ između poprečnih ukruta hrpta za uzorke seizmičkih spona sa dva i tri para ukruta hrpta

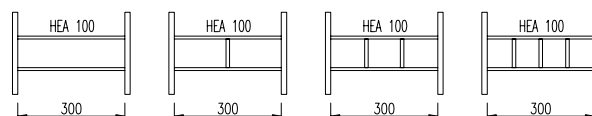
$$a_{rač} \leq 30t_w - d / 5 \quad (4)$$

Prema provedenim parametarskim analizama, te prema uvjetima u laboratoriju, donesena je odluka o izboru poprečnog presjeka uzoraka seizmičkih spona. Za sve uzorke usvojene su nazivne geometrijske karakteristike

poprečnog presjeka HEA100 ($d = 96$ mm, $b = 100$ mm, $t_w = 5$ mm i $t_f = 8$ mm). Također su usvojene nominalne karakteristike materijala za čelik S235 ($f_y = 235$ N/mm², $f_u = 360$ N/mm²) [3].

S obzirom na ove uvjete, usvojena je sljedeća duljina seizmičke spona $e_s = 1,1 M_{p,link} / V_{p,link} = 300$ mm..

Odabrana su četiri tipa kratkih spona jednakoga poprečnog presjeka i jednake duljine, a variran je broj ukruta hrpta, odnosno stvarni razmak između ukruta a_{stv} ; bez ukruta ($a_{stv0} = 300$ mm), s jednim parom ukruta ($a_{stv1} = 150$ mm), sa dva para ukruta ($a_{stv2} = 100$ mm), te s tri para ukruta ($a_{stv3} = 75$ mm) (slika 1.), gdje su spona bez ukruta i s jednim parom ukruta izvedene izvan pravila đanih u eurokodu, a spona sa dva i tri para ukruta u skladu s pravilima.



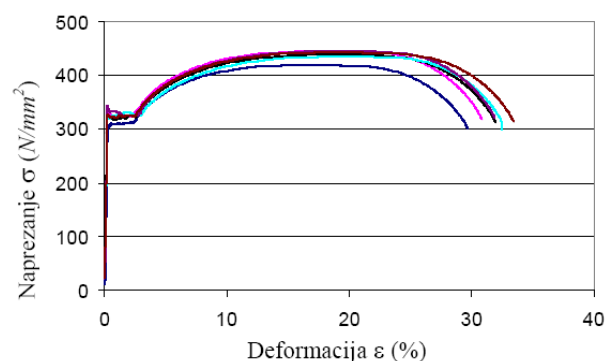
Slika 1. Odabrani uzorci kratkih seizmičkih spona

Na krajevima seizmičkih spona postavljene su čeone ploče debljine 15 mm. Ukrute hrpta su limovi debljine 10 mm [2], a postavljene su obostrano.

2 Numerička analiza

Numerička analiza primjenom metode konačnih elemenata provedena je programskim paketom ABAQUS [4]. Ova preliminarna analiza poslužila je prvenstveno kao osnova za pripremu laboratorijskih ispitivanja.

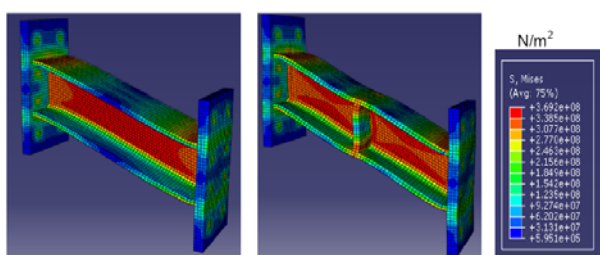
Modeliranje stvarnih mehaničkih karakteristika materijala učinjeno je na temelju rezultata provedenih vlačnih ispitivanja na šest ispitnih uzoraka izvađenih iz hrpta i šest ispitnih uzoraka izvađenih iz pojasnice. Srednja vrijednost granice popuštanja dobivena za hrpat iznosi $f_{yw} = 321,7$ N/mm², a za pojasnicu iznosi $f_{yw} = 323,9$ N/mm² (slika 2.) [5]. Na taj su način u numerički model uključene materijalne nelinearnosti.



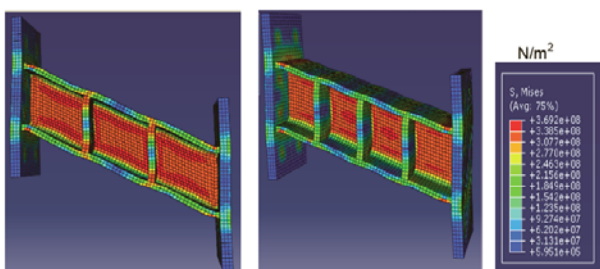
Slika 2. Dijagrami σ - ϵ ispitivanja vlačnih ispitnih uzoraka izvađenih iz hrpta

Rubni su uvjeti postavljeni tako da simuliraju spoj s vijcima na isti način kao kod laboratorijskih uzoraka. Ovdje su primijenjeni rubni uvjeti slični onima koje su primijenili Richards i Uang u svojoj studiji o kratkim seizmičkim sponama [6]. Ti rubni uvjeti omogućuju uzdužnu deformaciju seizmičke spona kada je spriječena rotacija na oba kraja.

Modeli su opterećivani vertikalnim pomakom na jednom kraju spona, pa je na taj način simulirana plastična deformacija spona zbog djelovanja poprečne sile. Na slikama je prikazana raspodjela von Misesovih naprezanja za sva četiri odabrana tipa (slike 3. i 4.). Najveća se naprezanja događaju u panelu hrpta gdje se uočava plastifikacija hrpta.

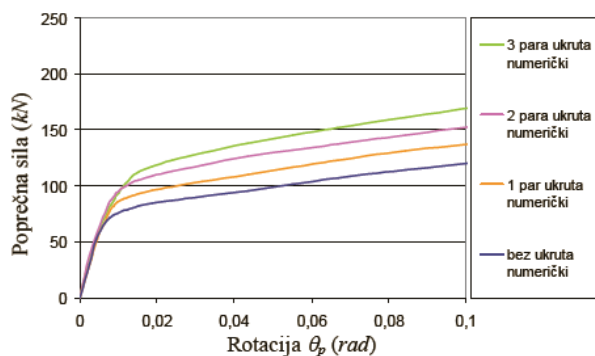


Slika 3. Raspodjela von Misesovih naprezanja – bez ukruta i sa jednim parom ukruta



Slika 4. Raspodjela von Misesovih naprezanja – sa dva i tri para ukruta

Dijagrami poprečna sila – rotacija u sponi prikazani su grafički za sva četiri tipa kratkih seizmičkih spona (slika 5.).



Slika 5. Numerički dobiven odnos poprečna sila – rotacija u sponi
Ponašanje seizmičkih spona s različitim brojem ukruta hrpta u elastičnom području gotovo je identično. U ne-

elastičnom području poprečna sila pri kojoj dolazi do plastične deformacije povećava se za veći broj ukruta hrpta.

3 Laboratorijska ispitivanja

3.1 Provedba laboratorijskih ispitivanja

Laboratorijska su ispitivanja provedena u laboratoriju Zavoda za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Ispitivanja su provedena u četiri serije (realizirane u dvije skupine) po četiri uzorka s različitim brojem ukruta hrpta [5].

Umjesto da se rade eksperimenti na kompletnom sustavu okvira s ekscentrično priključenim dijagonalama, pri kojem je spona najvažniji element, najekonomičnije je izdvojiti samo sponu kao najkritičniji element i na njoj raditi eksperimente. Tako je prva skupina eksperimenata realizirana na 8 uzoraka koji su spojeni vijcima na pomoćnu konstrukciju čime su simulirani stvarni rubni uvjeti (slika 6.). Kako bi se rezultati ispitivanja mogli usporediti sa stvarnim ponašanjem seizmičkih spona u okviru, druga skupina eksperimenata od 8 uzoraka realizirana je na jednostavnom modelu okvira s ekscentrično priključenom dijagonalom (slika 8.). Svi su uzorci (njih 16) nazivno isti po duljini, obliku poprečnog presjeka i mehaničkim karakteristikama, a variran je broj ukruta.

Prije samog ispitivanja provedeno je detaljno mjerenje svih dimenzija poprečnog presjeka spona i stvarni razmak između ukruta hrpta. Na taj su način dobivene geometrijske karakteristike uzoraka seizmičkih spona.

Prva skupina eksperimenata realizirana je tako da su seizmičke spona ispitivane u parovima. Pomaci seizmičkih spona mjereni su s pomoću induktivnih osjetila, a deformacija u panelu hrpta elektrootpornim tenzometrima. Kontrola unesene sile provedena je mjerenjem pomoću pretvarača sile koji je postavljen na centralnu ploču ispod preše (slika 6.).



Slika 6. Ispitivanje seizmičkih spona na pomoćnoj konstrukciji

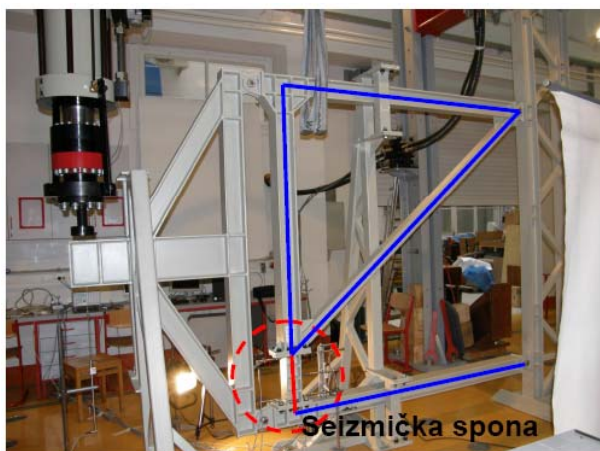
Opterećenje se nanosilo statički, kontrolom pomaka u jednom smjeru brzinom 0,05 mm/s, od nule do nivoa opterećenja koje uzrokuje plastičnu deformaciju seizmičke sponne. Uzorci su opterećivani do pomaka od oko 60 mm nakon toga je opterećivanje prekinuto i nastavljeno rasterećivanjem do 0 kN [5].

Na panelu hrpta seizmičke sponne pojava plastifikacije može se dobro uočiti na mjestima gdje je došlo do pucaanja i otpadanja (slika 7.).



Slika 7. Uzorak B2-2 nakon ispitivanja

Druga skupina eksperimenata realizirana je na modelu okvira širine 2 m i visine 2 m. S obzirom da su u vrijeme ispitivanja u laboratoriju postojali uvjeti samo vertikalnog unosa sile model okvira postavljen je u zarotirani položaj za 90°. Za stupove i gredu okvira odabran je poprečni presjek HEB120, za dijagonalu cijevni poprečni presjek 80 x 80 x 5 kvalitete čelika S355, te za sponu HEA100 kvalitete čelika S235. Stupovi okvira priključeni su na pomoćni rešetkasti nosač s jednim vijkom tako da je ostvaren čisti zglobovi priključak. Prijenos sile na model okvira izveden je preko pomoćne konstrukcije tako da je polovica sile nanosena na jednu stranu okvira, a polovica sile na drugu stranu okvira čime je simulirano stvarno stanje u okvirnoj konstrukciji (slika 8.).



Slika 8. Model okvira – priprema za ispitivanje

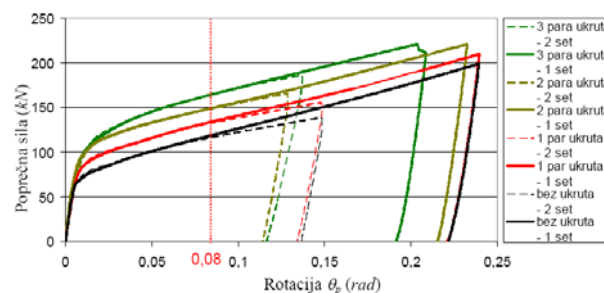
Opterećenje se, također, nanosilo statički, kontrolom pomaka, brzinom 0,05 mm/s. Uzorci su opterećivani do pomaka od oko 35 mm, što odgovara kutu rotacije seizmičke sponne od 0,12 rad (slika 9.). Pri tom kutu rotacije seizmičke sponne postale su vidljive elastične deformacije ostalih elemenata okvira, te je tada prekinuto opterećivanje i nastavljeno s rasterećivanjem do 0 kN [5].



Slika 9. Uzorak s tri para ukruta tijekom ispitivanja

3.2 Eksperimentalni rezultati

Krajnji rezultati prikazani su u obliku dijagrama poprečna sile – rotacija u sponi, čime je karakterizirano ponašanje odabranih tipova kratkih seizmičkih spona. Na temelju zabilježenih eksperimentalnih rezultata dobiveni su dijagrami za uzorke seizmičkih spona bez ukruta hrpta, s jednim, dva i tri para ukruta hrpta u prvoj i drugoj skupini eksperimenata (slika 10.). Uočava se da je ponašanje uzoraka seizmičkih spona s različitim brojem ukruta hrpta u elastičnom području gotovo identično, dok se u neelastičnom području, dodavanjem ukruta hrpta, poprečna sile povećava.

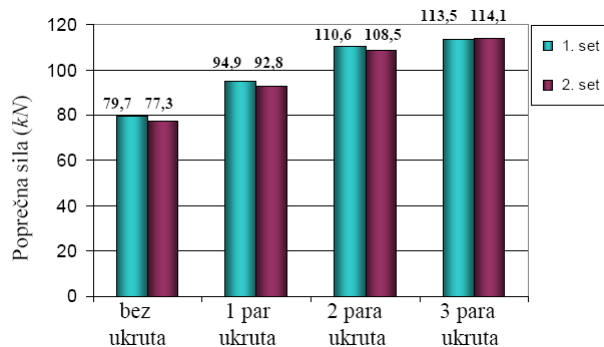


Slika 10. Dijagram poprečna sile-rotacija u sponi za prvu i drugu skupinu eksperimenata

Usporedbom ponašanja uzoraka seizmičkih spona u prvoj i drugoj skupini eksperimenata može se zaključiti da je ponašanje gotovo identično do kuta rotacije $\theta_p = 0,08$ rad (slika 10.). Razlika ponašanja uzoraka pri kutu rota-

cije seizmičke spona većem od 0,08 rad može se objasniti time što je u drugoj skupini eksperimenata došlo do elastičnog deformiranja ostalih elemenata okvira, što je uzrokovalo smanjenje poprečne sile u seizmičkoj sponi.

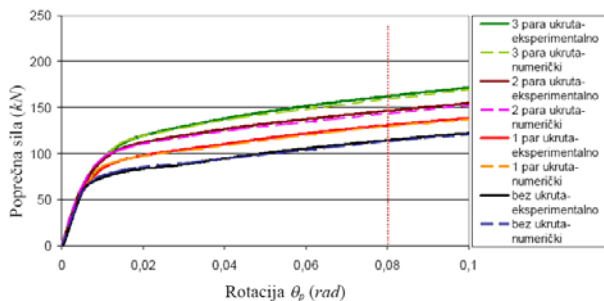
Vrijednost poprečne sile potpune plastičnosti prema računskom modelu otpornosti, ako se primijeni srednja vrijednost granice popuštanja dobivena eksperimentom $f_y = 321,7 \text{ N/mm}^2$, dobije se prema jedn. (1) $V_{p,link} = 81,7 \text{ kN}$. Ova se vrijednost približno podudara s vrijednostima poprečnih sila pri kojima dolazi do plastične deformacije u uzorcima seizmičkih spona bez ukruta hrpta dobivenih eksperimentom (slika 11.). Dodavanjem ukruta ta sila se povećava, pa tako je kod uzorka spona s jednim parom ukruta poprečna sila veća za oko 15 %, kod uzorka spona sa dva para ukruta za oko 34 % i kod uzorka s tri para ukruta približno 40 %.



Slika 11. Vrijednosti poprečnih sila u početku plastične deformacije spona

Ovo je povećanje potrebno uzeti u obzir pri projektiranju seizmičkih spona kako bi se u seizmičkoj sponi ostvarila razgradnja seizmičke energije plastičnim deformacijama.

Usporedbom rezultata dobivenih laboratorijskim ispitivanjima i rezultata dobivenih nelinearnom numeričkom analizom može se zaključiti da je postignuta vrlo dobra podudarnost između eksperimentalno i numerički dobivenih rezultata za sva četiri tipa seizmičkih spona.



Slika 12. Usporedba eksperimentalno i numerički dobivenih rezultata

Dobiveni eksperimentalni rezultati laboratorijskih ispitivanja kao i prikupljeni statistički podaci ostalih relevantnih baznih varijabli koji utječu na pouzdanost seizmičkih spona osnova su za statističku obradu kao pripremu za analizu pouzdanosti seizmičkih spona.

4 Probabilistička analiza

4.1 Općenito

Prije početka istraživanja postavljena je hipoteza da su različiti tipovi seizmičkih spona neujednačeni što se tiče vjerojatnosti otkazivanja odnosno odgovarajućih indeksa pouzdanosti.

Na pouzdanost seizmičkih spona kod čeličnih okvira s ekscentrično priključenim dijagonalama utječu različiti parametri koji su stohastičke prirode. Svojstva materijala i geometrijske veličine poprečnog presjeka seizmičke spona na strani otpornosti, te učinak djelovanja su slučajne veličine, tako da njihova stohastička priroda ima izravan učinak na pouzdanost.

Da bi se dobio stupanj pouzdanosti konstrukcije, potrebno je uzeti u obzir stohastičku prirodu svojstava konstrukcije te djelovanja na konstrukciju [8], [9], [10]. Svi parametri nepouzdanosti u probabilističkoj analizi uzeti su u obzir pomoću baznih varijabli. One karakteriziraju ponašanje i pouzdanost konstrukcije, a definirane su svojom srednjom vrijednošću, standardnom devijacijom te funkcijom gustoće vjerojatnosti [11]. Varijabilnost baznih varijabli uzeta je u obzir na strani otpornosti i na strani djelovanja.

4.2 Formiranje jednadžbi graničnog stanja

Formirane su jednadžbe graničnog stanja za odabrane tipove kratkih seizmičkih spona. Radi jednostavnosti, pretpostavlja se da su sve bazne varijable koje se pojavljuju u jednadžbama graničnih stanja međusobno nezavisne.

Za svaki uzorak formira se jednadžba graničnog stanja [5],[13]:

$$g_i(\bar{X}) = R - E = 0 \quad (5)$$

gdje je:

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

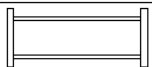
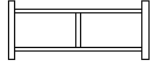
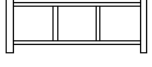

R - funkcija otpornosti s baznim varijablama i konstantama na strani otpornosti

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

Za odabrane uzorke kratkih seizmičkih spona način otkazivanja je posmikom u panelu hrpta tako da se jednadžba graničnog stanja može napisati na sljedeći način:

$$g_i(\bar{X}) = V_{p,link,i} - V_E = 0 \quad (6)$$

Tako su definirane sljedeće jednadžbe graničnog stanja (slika 13.):

$g_0(\bar{X}) = V_{p,link,0} - V_E = 0$	
$g_1(\bar{X}) = V_{p,link,1} - V_E = 0$	
$g_2(\bar{X}) = V_{p,link,2} - V_E = 0$	
$g_3(\bar{X}) = V_{p,link,3} - V_E = 0$	

Slika 13. Jednadžbe graničnog stanja za četiri tipa seizmičkih spona

Kada se u jednadžbu (6) uvrsti izraz za posmičnu otpornost prema jedn. (1) pomnožen s baznom varijablom korekcije modela γ_i jednadžba graničnog stanja za otkazivanje posmikom u panelu hrpta može se napisati kako slijedi:

$$g_i(\bar{X}) = \gamma_i \cdot (d - t_f) \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} - V_E = 0 \quad (7)$$

gdje je f_{yw} granica popuštanja hrpta I profila, a i označuje broj parova ukrućenja hrpta. Stvarni razmak između ukruta hrpta a_{stvi} može se napisati u obliku:

$$a_{stvi} = e / (i + 1) = 300 / (i + 1) \text{ mm}$$

Prema jedn. (4) dobije se proračunski razmak $a_{ra\check{c}}$ izražen pomoću stvarnog razmaka a_{stvi} :

$$a_{ra\check{c}} = 30t_w - d / 5 = 130,8 \text{ mm} = 0,436(i + 1)a_{stvi},$$

te se visina poprečnog presjeka d može izraziti na sljedeći način:

$$d = 150t_w - 5a_{ra\check{c}} = 150t_w - 5 \cdot 0,436(i + 1)a_{stvi} = 150t_w - 2,18(i + 1)a_{stvi}$$

Konačni oblik jednadžbe graničnog stanja dobije se kada se dobiveni izraz za visinu poprečnog presjeka d uvrsti u jedn. (7):

$$g_i(\bar{X}) = \gamma_i \cdot ((150t_w - 2,18 \cdot (i + 1) \cdot a_{stvi}) - t_f) \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} - V_E = 0 \quad (8)$$

Jednadžbe graničnog stanja za kratke spone bez ukruta s jednim parom, sa dva para te s tri para ukruta hrpta imaju konačni oblik:

$$g_0(\bar{X}) = \gamma_0 \cdot ((150t_w - 2,18a_{stvi0}) - t_f) \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} - V_E = 0 \quad (9)$$

$$g_1(\bar{X}) = \gamma_1 \cdot ((150t_w - 4,36a_{stvi1}) - t_f) \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} - V_E = 0 \quad (10)$$

$$g_2(\bar{X}) = \gamma_2 \cdot ((150t_w - 6,54a_{stvi2}) - t_f) \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} - V_E = 0 \quad (11)$$

$$g_3(\bar{X}) = \gamma_3 \cdot ((150t_w - 8,72a_{stvi3}) - t_f) \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} - V_E = 0 \quad (12)$$

Formuliranjem matematičkih izraza koji opisuju granična stanja ostvaren je prvi preduvjet za istraživanje formuliranog problema. Sljedeći je korak modeliranje baznih varijabli.

4.3 Bazne varijable

Bazne varijable definirane su kao jednodimenzijski stohastički model, a opisuju se odgovarajućim funkcijama razdiobe, tj. određene su tipom razdiobe, srednjom vrijednošću i standardnom devijacijom (tablica 1.).

Za formiranje stohastičkog modela na strani otpornosti iskorišteni su rezultati vlastitih laboratorijskih ispitivanja i mjerenja, a statistički su obrađeni programskim paketom STATISTIKA [14], čime je omogućena analiza formuliranog problema programskim paketom VAP [12]. Statistički parametri baznih varijabli na strani djelovanja određeni su na osnovi raspoloživih podataka iz literature [15].

Tablica 1. Bazne varijable

Otpornost	
γ_i	bazne varijable korekcije proračunskog modela otpornosti
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)

Odstupanja između otpornosti dobivene eksperimentalno i otpornosti dobivene primjenom modela otpornosti prema jedn.(1) uzete su u obzir pomoću baznih varijabli korekcije računskog modela otpornosti γ_i . Te su bazne varijable dobivene kao odnos vrijednosti dobivenih eksperimentom $V_{p,m,i}$ i odgovarajućih vrijednosti $V_{p,link}$ dobivenih primjenom modela otpornosti:

$$\gamma_i = \frac{V_{p,m,i}}{V_{p,link}} \quad (13)$$

gdje je $V_{p,m,i}$ poprečna sila u seizmičkoj sponi dobivena iz rezultata eksperimenata u trenutku kada započinje plastična deformacija spona, a $V_{p,link}$ je posmična otpornost prema jedn. (1).

Vrijednosti stvarnih mehaničkih karakteristika materijala dobivene su laboratorijskim vlačnim ispitivanjem ispitnih uzoraka [5] (slika 2.). Za sve uzorke seizmičkih spona provedeno je detaljno mjerenje geometrijskih vrijednosti; debljine hrpta t_w , debljine pojasnice t_f i stvarnih razmaka između ukruta hrpta $a_{sv,i}$. Za sve geometrijske bazne varijable i bazne varijable korekcije proračunskog modela otpornosti usvojena je normalna razdioba, dok je za granicu popuštanja hrpta f_{yw} usvojena lognormalna razdioba (tablica 2.).

Pri određivanju statističkih parametara bazne varijable djelovanja V_E analizirani su rezultati koji su publicirani u radovima [15], [16] te su u ovom radu usvojeni koeficijent varijacije $v = 0,25$ ($v = \sigma/\mu$) i Gumbelova razdioba. U odnosu na procjenu pouzdanosti seizmičkih spona za 98 %-fraktilu vrijednosti utjecaja djelovanja potresa, uzima se nazivna vrijednost dobivena iz postupka determinističkog proračuna ($V_E = V_{p,link}$). Na temelju karakteristične posmične otpornosti usvojenog poprečnog presjeka $V_{p,link}$ prema jedn. (1), te usvojenoga koeficijenta varijacije v i usvojene Gumbelove razdiobe, programskim paketom STATISTICA [14] određene su vrijednosti za srednju vrijednost μ i standardnu devijaciju σ bazne varijable V_E (tablica 2.).

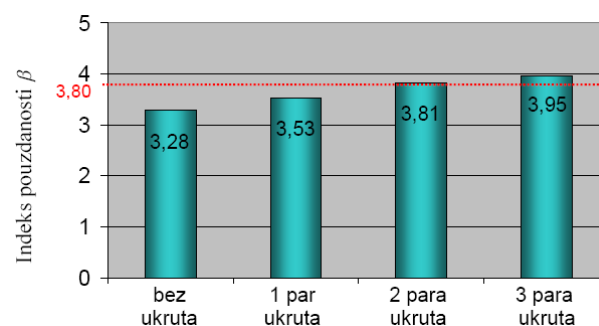
Tablica 2. Statistički parametri baznih varijabli

Bazna varijabla	Model razdiobe	Srednja vrijednost [μ]	Standardna devijacija [σ]
γ_0	normalna	1,21	0,0476
γ_1	normalna	1,35	0,0586
γ_2	normalna	1,49	0,0627
γ_3	normalna	1,74	0,0640
f_{yw}	lognormalna	321,7 N/mm ²	9,44 N/mm ²
t_w	normalna	5,29 mm	0,1436 mm
t_f	normalna	7,79 mm	0,1553 mm
a_{sv0}	normalna	300,18 mm	2,3085 mm
a_{sv1}	normalna	149,65 mm	1,7792 mm
a_{sv2}	normalna	99,57 mm	1,2272 mm
a_{sv3}	normalna	75,43 mm	0,7128 mm
V_E	Gumbelova	49,6 kN	12,4 kN

4.4 Rezultati probabilističke analize

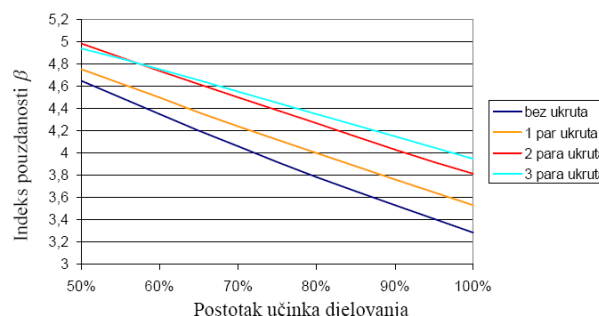
Proračunani su indeksi pouzdanosti za četiri odabrana tipa kratkih seizmičkih spona i uspoređeni su s normiranim indeksima pouzdanosti za odgovarajući razred pouzdanosti konstrukcije i granično stanje nosivosti.

U analizi je variran postotak učinka djelovanja, tj. djelovanja poprečne sile na seizmičke spona od 50 % do 100 % [5]. Proračunane vrijednosti indeksa pouzdanosti β prema FORM za analizirane uzorke seizmičkih spona za učinak djelovanja 100 % kreću se od $\beta = 3,28$ za uzorak seizmičke spona bez ukruta do $\beta = 3,95$ za uzorak seizmičke spona s tri para ukruta [17] (slika 14.). Za uzorak sa dva para ukruta i uzorak s tri para ukruta dobiven je indeks pouzdanosti veći od 3,8 što je normirana vrijednost za razred pouzdanosti RC2 i životni vijek konstrukcije od 50 godina prema Eurokodu 0 [18].



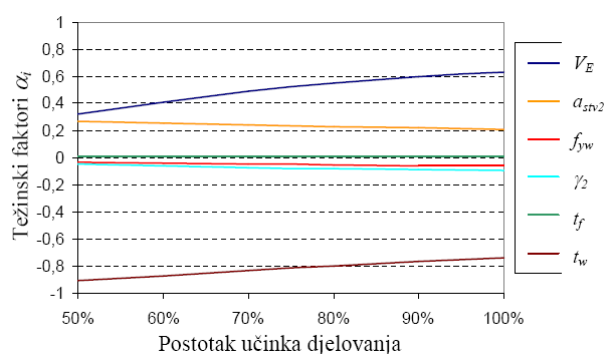
Slika 14. Indeks pouzdanosti β za učinak djelovanja 100 %

Vrijednosti indeksa pouzdanosti β za odabrane tipove seizmičkih spona prikazane su grafički u ovisnosti o postotku učinka djelovanja (slika 15.). Može se uočiti da su za učinak djelovanja manji od 57 % vrijednosti indeksa pouzdanosti za spona s tri para ukruta manje od vrijednosti indeksa pouzdanosti za spona sa dva para ukruta, iz čega se može zaključiti da za niže učinke djelovanja seizmičke spona sa dva para ukruta hrpta imaju najvišu razinu pouzdanosti.



Slika 15. Vrijednosti indeksa pouzdanosti β ovisno o postotku učinka djelovanja

Značaj pojedinih baznih varijabli iskazan je težinskim faktorima koji pokazuju s kojom težinom odgovarajuće bazne varijable sudjeluju u vrijednosti vjerojatnosti otkazivanja.



Slika 16. Vrijednosti težinskih faktora α_i za sponu sa dva para ukruta

Težinski faktori baznih varijabli za tip seizmičke spona sa dva para ukruta hrpta prikazani su grafički u ovisnosti o postotku učinka djelovanja (slika 16.). Uočava se da se težinski faktori baznih varijabli V_E , f_{yw} i γ_b smanjuju kako se smanjuje postotak učinka djelovanja, dok se težinski faktori baznih varijabli a_{stv} i t_w povećavaju. Prema rezultatima proizlazi da za 50 % učinka djelovanja pretežit utjecaj na indeks pouzdanosti β ima bazna varijabla debljine hrpta t_w .

Analize težinskih faktora pokazale su na koje bazne varijable treba posebno obratiti pažnju pri osmišljavanju i provođenju daljnjih laboratorijskih ispitivanja te pri projektiranju seizmičkih spona.

5 Zaključak

Probabilističkom analizom dobiveni su indeksi pouzdanosti za kratke seizmičke spona bez ukruta hrpta, s jednim parom, sa dva para i s tri para ukruta hrpta postavljenih na pravilnim razmacima. Dobivene vrijednosti indeksa pouzdanosti za spona sa dva i tri para ukruta hrpta, postavljenih na propisanim razmacima, veće su

od normirane vrijednosti $\beta = 3,80$, tj. imaju dovoljnu razinu pouzdanosti koja je propisana za razred pouzdanosti konstrukcije RC2 i životni vijek konstrukcije od 50 godina. Za manji postotak učinka djelovanja dobivene su, razumljivo, veće vrijednosti indeksa pouzdanosti. Za seizmičke spona sa dva i tri para ukruta hrpta pri učinku djelovanja 70 % dobivene su vrijednosti indeksa pouzdanosti veće od 4,3, što je normirana vrijednost za razred pouzdanosti konstrukcije RC3 i životni vijek konstrukcije od 50 godina.

Dobiveni indeksi pouzdanosti pokazali su da su neke vrijednosti ispod normiranih u europskoj normi, ovisno o odabranom razredu pouzdanosti konstrukcije s obzirom na posljedice otkazivanja, te se takvi tipovi seizmičkih spona ne mogu primijeniti za taj razred pouzdanosti. Prema dobivenim se vrijednostima težinskih faktora baznih varijabli može zaključiti da pretežit utjecaj na indeks pouzdanosti imaju debljina hrpta t_w na strani otpornosti i poprečna sila V_E na strani djelovanja.

Dobiveni indeksi pouzdanosti uspoređeni su s normiranim indeksima pouzdanosti prema Eurokodu 0 za tri razreda posljedica otkazivanja koje odgovaraju razredima pouzdanosti konstrukcije. Ovako definirani zahtjevi u Eurokodu 0 za veličinom indeksa pouzdanosti nisu dostatni jer je potrebna njihova veća diferencijacija, koja bi osim različitih posljedica otkazivanja trebala obuhvatiti i razine nadzora i pregleda tijekom građenja, tip graničnog stanja, predviđa li se krhki ili žilavi slom te je li otkazivanje izraženo nekom najavom. Postoji prijedlog [12] koji obuhvaća veličine indeksa pouzdanosti za 5 razreda posljedica otkazivanja i za 4 načina otkazivanja konstrukcije - od otkazivanja kao problema uporabljivosti pa do naglog otkazivanja bez najave. Na temelju rečenog očekuje se da će sljedeća inačica Eurokoda 0 obuhvatiti veću diferencijaciju pouzdanosti.

Istraživanja prikazana u ovom radu provedena su u sklopu znanstvenog projekta "Razvoj konstrukcija povećane pouzdanosti s obzirom na potres" (114-0821466-1470) koji financira Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske. Izradu laboratorijskih uzoraka financirala je tvrtka Trimio d.d., Trebnje, Slovenija.

LITERATURA

- [1] Mazzolani, F. M., Piluso, V. *ECCS Manual on Design of Steel Structures in Seismic Zones*, European Convention for Constructional Steelworks, TC 13 Seismic Design, Naples, 1994.
- [2] 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.
- [3] Eurocode 3 - *Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, European Committee for Standardization, CEN, Brussels, EN 1993-1-1:2005.
- [4] ABAQUS, *Manual*, SIMULIA, Rising Sun Mills, 2007.
- [5] Bulić, M., *Pouzdanost seizmičkih spona kod čeličnih okvira s ekscentričnim dijagonalama*, disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2009.
- [6] Richards, P., Uang, C. M. *Development of Testing Protocol for Short Links in Eccentrically Braced Frames*, Report No. SSRP-2003/08, University of California, San Diego, 2003.
- [7] 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.

- [8] Androić, B., Dujmović, D., Džeba, I., *Metalne konstrukcije 4*, IA Projektiranje, Zagreb, 2003.
- [9] Androić, B., Dujmović, D., Džeba, I., *Inženjerstvo pouzdanosti I*, Zagreb, 2006.
- [10] Skejić, D., Dujmović, D., Androić, B. *Reliability of the bending resistance of welded beam-to-column joints*. Journal of Constructional Steel Research 2008;64: 388-399.
- [11] Milčić, V., Peroš, B., *Uvod u teoriju sigurnosti nosivih konstrukcija*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 2003.
- [12] Schneider, J. *Introduction to Safety and Reliability of Structures*, Structural Engineering Documents, No. 5, IABSE, 1997.
- [13] Androić, B., Bulić, M., Čaušević, M., *Pouzdanost seizmičkih spona kod čeličnih okvira s ekscentričnim dijagonalama*, GRAĐEVINAR 59 (2007), 8, 675-683.
- [14] STATISTICA *Manual*, London, 1992.
- [15] Herak, M., Markusić, S., Ivančić, I. *Attenuation of peak horizontal and vertical acceleration in the Dinarides area*. Studia geoph. et geod. 2001;45:383-394.
- [16] Ambraseys, N.N., Simpson, K.A., Bommer J.J., *Prediction of horizontal response spectra in Europe*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1996;25: 371-400.
- [17] Čausević, M., Bulić, M., Androić, B. *Reliability of Seismic links in Eccentrically Braced Steel Frames*, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008:05-05-0025.
- [18] Eurocode 0: *Basis of structural design*, European Committee for Standardization, CEN, Brussels, EN 1990:2002.