

Nelinearni proračun zavarenog priključka nosač - stup

Davor Skejić, Darko Dujmović, Miljenko Haiman

Ključne riječi

zavareni priključak nosač-stup, nelinearni proračun, materijalna nelinearnost, metoda konačnih elemenata, laboratorijska ispitivanja

Key words

welded girder-pier connection, nonlinear analysis, material nonlinearity, finite-element method, laboratory testing

Mots clés

connexion soudée poutre-pilier, analyse non-linéaire, non-linéarité matérielle, méthode des éléments finis, essai de laboratoire

Ключевые слова

сваренное соединение балка-столб, нелинейный расчёт, материальная нелинейность, метод конечных элементов, абортаторные испытания

Schlüsselworte

geschweisster Anschluss Träger-Stütze, unlineare Berechnung, materielle Unlinearität, Verfahren der endlichen Elemente, Laboruntersuchungen

D. Skejić, D. Dujmović, M. Haiman

Izvorni znanstveni rad

Nelinearni proračun zavarenog priključka nosač-stup

U ovom se radu opisuje nelinearna numerička simulacija ponašanja laboratorijskih uzoraka zavarenih priključaka nosač-stup provedena metodom konačnih elementa. Uspoređeni su rezultati te simulacije s onim što je dobiveno laboratorijskim ispitivanjima. Istaknuta je vrlo dobra usklađenost dobivenih rezultata sve do područja izrazite nelinearnosti. Preporučena je potreba detaljnog laboratorijskog ispitivanja mehaničke karakteristike vara, što bi trebalo uvrstiti u numerički model.

D. Skejić, D. Dujmović, M. Haiman

Original scientific paper

Nonlinear analysis of the welded girder-pier connection

The nonlinear numerical simulation has been conducted by the finite-element method to determine behaviour of laboratory samples of welded girder-pier connections. The results obtained by this simulation have been compared with laboratory testing results. A very good correspondence of results has been established until the zone of high nonlinearity. A more detailed laboratory testing of mechanical properties of the weld is recommended, and the results of this additional testing should be included in the numerical model.

D. Skejić, D. Dujmović, M. Haiman

Ouvrage scientifique original

Analyse non-linéaire de la connexion soudée poutre-pilier

Une simulation non-linéaire du comportement des échantillons de laboratoire des connexions soudées poutre-pilier a été faite en utilisant la méthode des éléments finis. Les résultats obtenus par cette simulation sont comparés avec les résultats des essais en laboratoire. Une bonne correspondance des résultats a été établie jusqu'à la zone de non-linéarité élevée. Les essais de laboratoire plus détaillés des caractéristiques mécaniques de la soudure sont recommandés, et les résultats de ces essais devraient être inclus dans le modèle numérique.

Д. Скеич, Д. Дуймович, М. Хайман

Оригинальная научная работа

Нелинейный расчёт сварочного соединения балка-столб

В этой работе описывается нелинейная числовая симуляция поведения лабораторных образцов сваренных соединений балка-столб, проведенная методом конечных элементов. Сравнены результаты той симуляции с тем, что получено лабораторными испытаниями. Подчеркнута очень хорошая согласованность полученных результатов всё до области выразительной нелинейности. Рекомендуются необходимость детального лабораторного исследования механической характеристики сварного шва, что бы было необходимо внести в числовую модель.

D. Skejić, D. Dujmović, M. Haiman

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Unlineare Berechnung des geschweissten Anschlusses Träger-Stütze

In diesem Artikel beschreibt man die unlineare numerische Simulation des Verhaltens der Laborproben von geschweissten Anschlüssen Träger-Stütze, durchgeführt nach dem Verfahren der endlichen Elemente. Verglichen wurden die Ergebnisse dieser Simulation mit denen durch Laboruntersuchungen erhaltenen. Hervorgehoben ist die sehr gute Übereinstimmung der erhaltenen Ergebnisse bis zum Gebiet der prägnanten Unlinearität. Man betont die Notwendigkeit einer detaillierten Laboruntersuchung der mechanischen Eigenschaften der Schweissnaht, was in das numerische Modell eingereicht werden sollte.

Autori: Mr. sc. **Davor Skejić**, dipl. ing. građ.: prof. dr. sc. **Darko Dujmović**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26; doc. dr. sc. **Miljenko Haiman**, dipl. ing. građ., Arhitektonski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, Zagreb

1 Uvod

Dosadašnji analitički i eksperimentalni rezultati vezani uz ponašanje priključaka čeličnih konstrukcija pokazuju da klasična teorija nosača ne daje točnu procjenu prijenosa opterećenja zbog specifičnih rubnih uvjeta područja priključka, odnosno spoja. U proteklih dvadesetak godina provedena su mnogobrojna laboratorijska ispitivanja i danas već zastarjela baza SERICON [1] upotpunjena je suvremenim ispitivanjima diljem Europe [2], [3], [4]. Ispitivanja koja su provedena u laboratoriju Zavoda za tehničku mehaniku na Građevinskom fakultetu u Zagrebu [5], obuhvaćala su ispitivanje zavarenih jednostranih čeličnih priključaka nosač-stup izrađenih od I profila i opterećenih statičkim opterećenjem i značajan su doprinos pri ispitivanju ponašanja priključaka čeličnih konstrukcija.

Međutim, činjenica jest da su laboratorijska ispitivanja skupa. Različitost konstrukcijskih oblika koji se rabe i različitost kombinacija parametara koji utječu na ponašanje čeličnih konstrukcijskih priključaka uistinu je velika, tako da je gotovo nemoguće provesti zahtijevani broj konačnih skupina laboratorijskih ispitivanja koji bi pomogli u potpunom razumijevanju njihova ponašanja. Kako brz razvoj informatičke tehnologije čini suvremena računala sve dostupnijima, numerička simulacija postaje jeftina alternativa fizičkim ispitivanjima. Stoga je ključna ideja pokušati numerički simulirati ponašanje priključaka i tako se orijentirati prema „numeričkim ispitivanjima“.

Osnovni alat koji je dostupan za numeričke simulacije jest metoda konačnih elemenata (MKE). Ova metoda analize dopušta precizno modeliranje složene geometrije. Materijalna nelinearnost, kao što je plastičnost kod

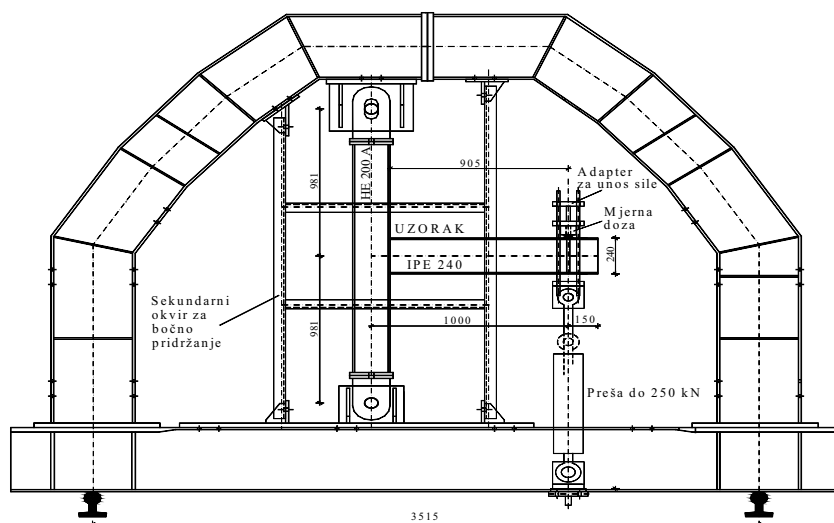
čelika, može se odgovarajuće uzeti u obzir. Složeni rasporedi opterećenja, kao i rubni uvjeti mogu se također precizno uzeti u obzir. Moguća su i približna rješenja za kompleksne probleme, kao što su kontakti, pukotine i trenje. U ovome radu provedena je nelinearna numerička simulacija ponašanja laboratorijskih uzoraka zavarenih priključaka nosač-stup metodom konačnih elemenata računalnim programom COSMOS/M [6].

Cilj provedenih istraživanja bio je kreirati numerički model koji potvrđuje provedena laboratorijska ispitivanja ponašanja zavarenih djelomično nepopustljivih priključaka nosač-stup. Ovaj rad upućuje na činjenicu da teorija nosača unutar područja priključka ne vrijedi i da je za analizu priključaka čeličnih konstrukcija nužna detaljna analiza metodom konačnih elemenata. Također se ističe zaključak da Eurokod 3, odnosno metoda kompenzata, daje prihvatljive analitičke izraze za karakterizaciju priključaka koji se mogu rabiti pri analizi okvirnih čeličnih konstrukcija.

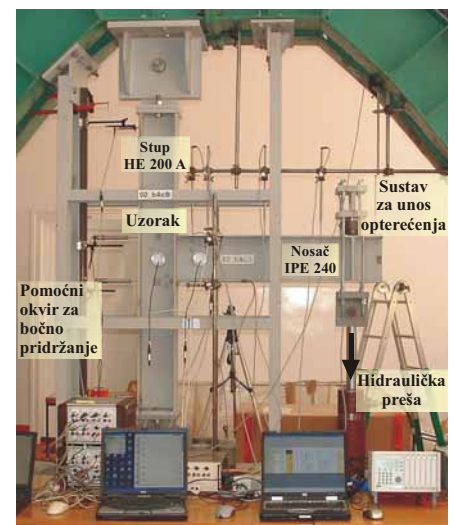
2 Laboratorijska ispitivanja

2.1 Opis laboratorijskih ispitivanja

Provedena su ispitivanja ponašanja zavarenih jednostranih čeličnih priključaka nosač-stup izrađenih od I profila izloženih statičkom opterećenju. Svih šest uzoraka su geometrijski i mehanički nominalno isti, nosači su izrađeni od profila IPE 240, a stupovi od HE 200 A. Svi su elementi uzoraka od čelika S 235 JR G2 prema europskim normama EN 10025 [7] i EN 10204 [8]. Bitno je napomenuti da su pojedini profili dobavljeni od različitih proizvođača, te su njihove kombinacije rezultirale sa šest različitih, iako nominalno istih, uzoraka priključaka (tablica 1.).



Slika 1. Razmještaj uzorka i dodatne opreme u okviru za ispitivanja



Tablica 1. Oznake uzoraka zavarenih priključaka ovisno o kombinacijama elemenata

Uzorci zavarenih priključaka		Stup		
		A	B	C
Nosač	A	01_bAcA	02_bAcB	03_bAcC
	B	04_bBcA	05_bBcB	06_bBcC
Oznake: <i>b</i> – nosač (beam), <i>c</i> – stup (column), <i>A, B, C</i> – proizvođač profila				

Iz uvjeta laboratorija, geometrije okvira za ispitivanje, kapaciteta preše za unos sile i najpogodnijeg načina ispitivanja proizašao je konačni odabir uzorka. Jednostrani (vanjski) zavareni uzorak priključka izrađen je s kontinuiranim stupom ukupne visine 1521 mm, dok je nosač ukupne duljine 1055 mm zavaren za pojasnicu stupa. Razmještaj uzorka i dodatne opreme u okviru za ispitivanje prikazan je na slici 1. Gornja pojasnica nosača je vlačno naprezana, a donja tlačno. Stup je pri dnu zglobno oslonjen. Na vrhu stupa je zglobni vertikalno pomični ležaj.

Uzorci su opterećivani statičkom silom na gornjoj pojasnici nosača hidrauličkom prešom kapaciteta 250 kN (vlak) s najvećim pomakom od 400 mm. Ispitivanja su provedena uz kontrolu brzine unosa opterećenja (konstantna brzina od 0,06 kN/s sve do otkazivanja uzoraka) prema programu unosa opterećenja detaljno opisanom u [5].

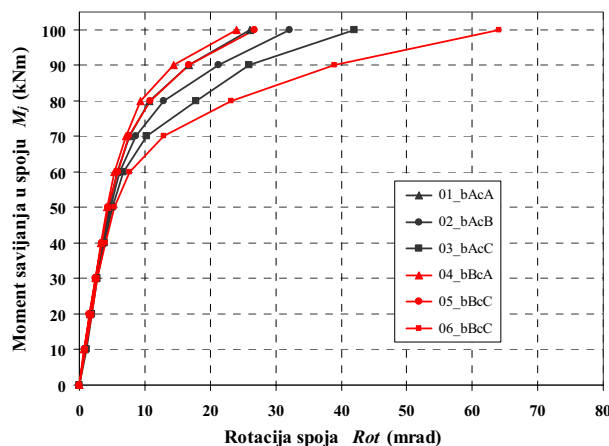
Kako bi se zabilježilo realno ponašanje priključka potrebno je bilo izmjeriti vrijednosti opterećenja, rotacije nosača, rotacije stupa, deformacije tlačnog područja priključka, deformacije vlačnog područja priključka, posmične deformacije područja panela hrpta stupa i pripadne rotacije. Pomaci su mjereni sa 16 LVDT's (*Linear Variable Displacement Transducers*). Rotacije osi stupa i nosača izravno su zabilježene sa 2 klinometra. Za procjenu detaljnijeg stanja deformacija postavljani su tenzometri: 2 K-rozete u središtu posmika hrpta stupa i tlačno područje hrpta stupa, 2 linearna tenzometra na vlačnu pojasnicu nosača.

2.2 Eksperimentalni rezultati

Ovdje se navode samo krajnji rezultati laboratorijskih ispitivanja za svih šest uzoraka zavarenih priključaka nosač-stup. Krajnji su rezultati prikazani u obliku dijagrama $M_f - \phi$ (odnos momenta savijanja u spoju prema rotaciji spoja), čime je karakterizirano ponašanje takvih zavarenih priključaka nosač-stup.

Različite krivulje $M_f - \phi$ dobivene su za svih šest nominalno istih uzoraka zavarenog djelomično nepopustljivog priključka nosač-stup (slika 2.). Razlike su ponajprije uzro-

kovane činjenicom da su uzorci priključaka sastavljeni od elemenata, nosača i stupova, nabavljenih od različitih europskih proizvođača čeličnih I profila, a mogu se obrazložiti razlikama mehaničkih i manjim dijelom geometrijskih karakteristika nominalno istih uzoraka.

Slika 2. Eksperimentalni odnosi $M_f - \phi$ (s elastičnom rotacijom nosača)

Rezultati se mogu svrstati u tri skupine i to ovisno o mjestu proizvodnje stupova. Prvu skupinu čine uzorci 01_bAcA i 04_bBcA, drugu 02_bAcB i 05_bBcB, a treću 03_bAcC i 06_bBcC. To se opravdava činjenicom da dominantna peta komponenta, pojasnica i hrpat nosača u tlaku, a prema tome i nosač kao element, gotovo nemaju utjecaja na ponašanje razmatranog tipa priključka [5].

3 Nelinearna numerička analiza

3.1 Podloga za numeričku analizu

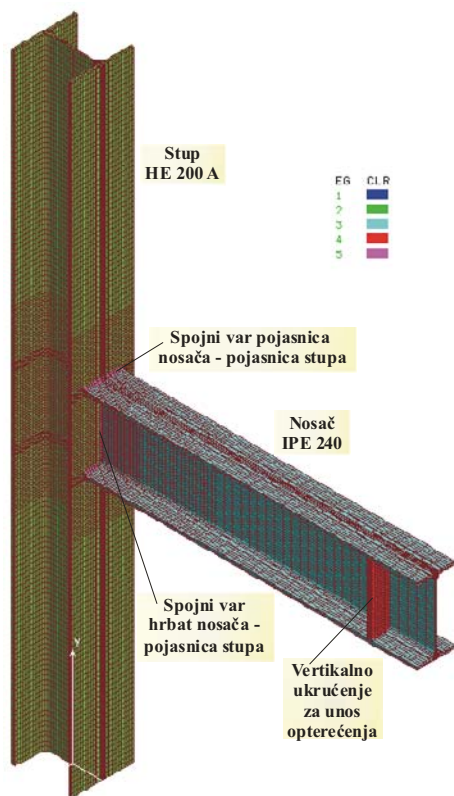
Preliminarna analiza MKE pokazala se odlučujućom pri planiranju laboratorijskih ispitivanja. Analiza je provedena s COSMOS/M, nelinearnim modulom NSTAR [9]. Kalibriranje modela učinjeno je prema eksperimentalnim rezultatima koji su objavljeni u literaturi [1], [3] i [10], za slične uzorke priključaka, ali i prema preliminarnim analizama u sklopu semiprobabilističkog pristupa detaljno opisanoga u [5].

Vrlo važno bilo je ispravno modeliranje stvarnih mehaničkih karakteristika elemenata na temelju rezultata provedenih vlačnih ispitivanja epruveta izvađenim iz nosača i iz stupova. Na taj su način u numerički model bile uključene materijalne nelinearnosti. Geometrijske imperfekcije u ovoj analizi nisu uzete u obzir.

U nastavku se opisuje modeliranje geometrije modela (formiranje mreže konačnih elemenata), modeliranje mehaničke nelinearnosti, modeliranje opterećenja, a zatim se daje kratak osvrt na rezultate ove vrlo precizne i korisne analize.

3.2 Geometrija modela konačnih elementa

Budući da statistički dobivene srednje vrijednosti izmjerenih geometrijskih karakteristika profila nosača (IPE 240) i stupova (HE 200 A) nisu bitno odstupale od nominalnih vrijednosti za sve uzorke usvojene su nominalne geometrijske karakteristike pojedinih profila.



Slika 3. Numerički model zavarenog priključka nosač-stup (IPE 240 – HE 200 A)

Iako je modeliranje priključaka s ravninskim SHELL elementima jednostavnije i puno brže za kreiranje numeričkog modela i samog proračuna, zadovoljavajući rezultati ne dobivaju se zbog složenog ponašanja samog

područja priključka, a naročito spoja. Stoga su svi elementi stupa, nosača i varova trodimenzijski 8-nodal brick SOLID elementi [6]. Model konačnih elementa sadrži ukupno 62.669 čvorova, odnosno 42.132 elementa, a mreža je izrazito gusta u području priključka (slika 3.).

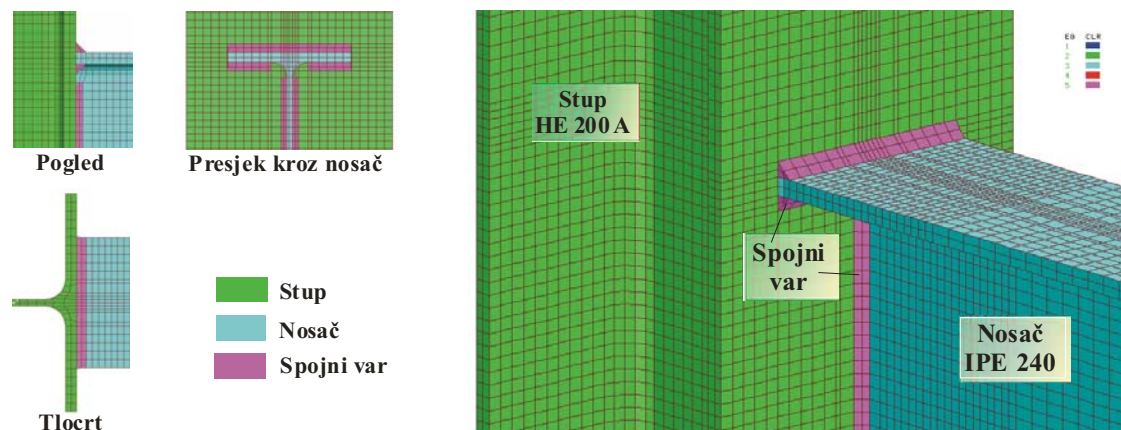
Budući da se radi o dva različita profila koji se spajaju, problem je bio pronaći odgovarajuću mrežu konačnih elemenata, kako bi se ostvarilo jednostavno spajanje konačnih elemenata na vanjskoj strani pojasnice stupa i konačnih elemenata na poprečnom presjeku nosača.

Na slici 4. prikazana je mreža konačnih elemenata stupa, nosača i zavora u zoni spoja. Radi bolje vizualizacije prikazan je prostorni pogled na spojni zavar između gornje pojasnice nosača, odnosno hrpta nosača i vanjske strane pojasnice stupa. Zavori su također modelirani kao SOLID elementi, a osobita se pozornost pri modeliranju posvećivala međusobnom poklapanju čvorova stupa, nosača i zavora. Debljina zavora na pojasnici nosača je 6 mm, dok je vertikalni var na hrptu nosača debljine 4 mm.

3.3 Mehaničke karakteristike elemenata numeričkog modela

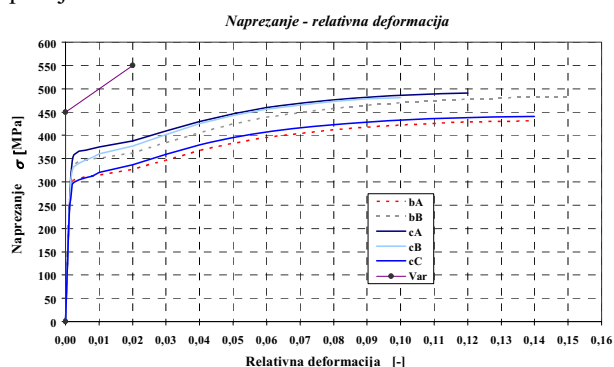
Na temelju provedenih ispitivanja epruveta dobivene su mehaničke karakteristike upotrijebljenog čelika i na taj su način u numeričke modele uvrštene stvarne mehaničke nelinearnosti. Na slici 5. prikazani su uprosječeni dijagrami σ - ε za elemente priključaka ovisno o mjestu proizvodnje nosača, odnosno stupova, i usvojeni σ - ε dijagram za elemente zavora.

Uprosjeceni dijagrami σ - ε dobiveni su kao srednje vrijednosti od rezultata vlačnih ispitivanja materijala na epruvetama koje su grupirane prema tipu i mjestu proizvodnje elemenata. Iz profila nosača, bA i bB, izvađene su po tri epruvete, dok su iz profila stupova cA, cB i cC izvađene po četiri epruvete [5]. Srednje vrijednosti ovis-



Slika 4. Mreža konačnih elemenata u području spoja nosača s vanjskom pojasnicom stupa

nosti relativnih deformacija i napreznja dane su u tablici 2., ovisno o mjestu proizvodnje profila (elementa) priključaka.

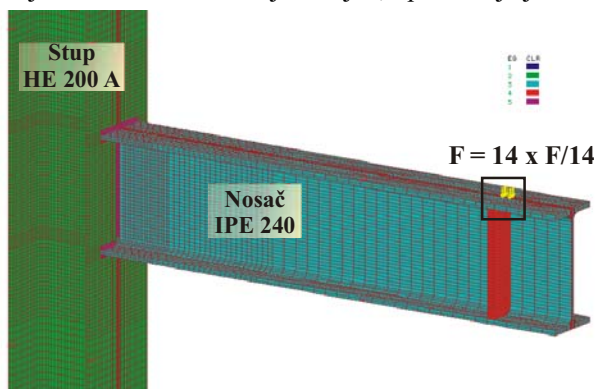


Slika 5. Dijagrami σ - ε čelika (S235) nosača IPE 240 (bA i bB) i stupova HE 200 A (cA, cB i cC)

Ovdje treba napomenuti da su mehaničke karakteristike spojnih zavara usvojene iz literature gdje se zavari modeliraju kao krhki elementi. Pretpostavljen je bilinearni odnos σ - ε s točkom koja odgovara granici popuštanja (0,00001, 450) i točkom koja odgovara čvrstoći zavara (0,02, 550). S tim pretpostavkama željela se osigurati teorijska nepopustljivost zavara i činjenica da je čvrstoća vara uz pretpostavku kvalitetne izvedbe, kakav je ovdje slučaj, veća od osnovnog materijala.

3.4 Modeliranje opterećenja

Unos opterećenja u laboratorijskim ispitivanjima bio je ostvaren polukuglom promjera 25 mm. Kako bi se što bolje simulirali laboratorijski uvjeti, opterećenje je real-

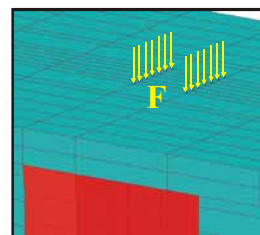
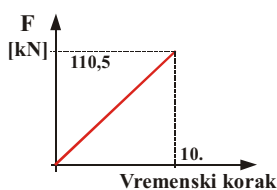


Slika 6. Unos opterećenja F u obliku 14 koncentriranih sila

no modelirano u obliku 14 koncentriranih vertikalnih sila $F/14$ i uneseno u model na gornjoj strani gornje pojasnice nosača, na udaljenosti 1000 mm od osi stupa (905 mm od spoja). Na slici 6. prikazani su mjesto i način unosa opterećenja. Vrijednost opterećenja je linearno rasla, u deset jednakih vremenskih koraka, do ukupne vrijednosti 7,8926 kN svake od 14 sila, odnosno ukupne vrijednosti od 110,5 kN koja odgovara vrijednosti momenta savijanja u spoju od 100 kNm ($M_j = 0,905F$).

Tablica 2. Srednje vrijednosti σ - ε odnosa ovisno o proizvođaču čeličnih profila

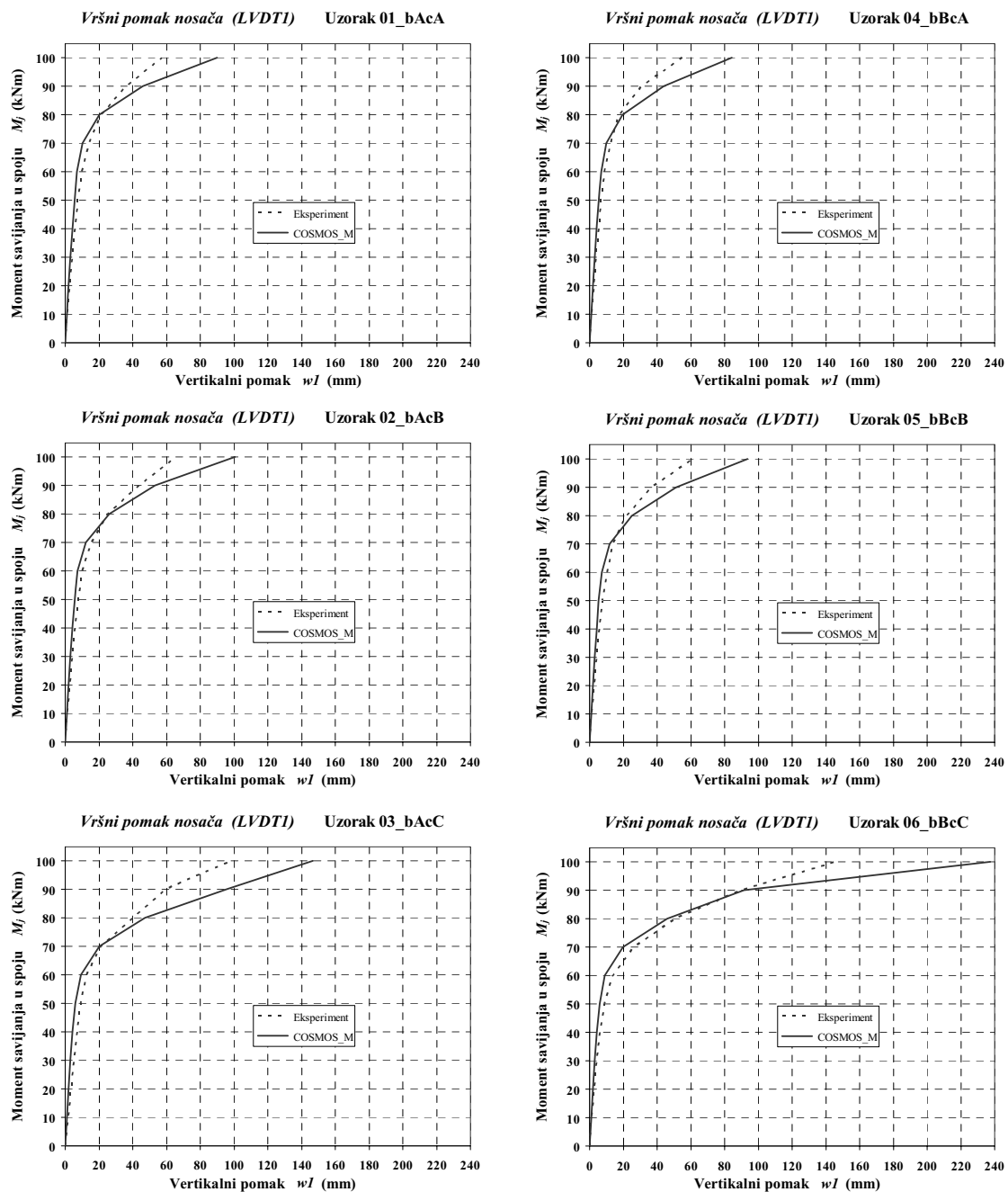
Relativna deformacija [-]	Napreznja [MPa]				
	bA	bB	cA	cB	cC
0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,0004	98,40	101,80	102,30	104,54	102,06
0,0009	199,71	201,02	205,46	206,01	203,66
0,0012	251,69	246,61	257,58	255,72	249,41
0,0016	289,68	295,24	314,73	305,66	263,89
0,0020	299,79	323,47	344,61	325,29	295,21
0,0022	301,83	331,91	352,12	328,88	297,15
0,0024	303,25	336,40	357,45	331,85	298,53
0,004	306,29	344,59	365,42	340,48	304,96
0,006	309,72	347,39	368,12	347,10	309,40
0,008	312,33	349,31	371,63	351,91	312,71
0,01	314,65	350,57	374,38	359,69	320,53
0,02	326,82	361,52	388,09	376,72	336,40
0,03	345,57	384,09	409,59	401,10	358,78
0,04	366,85	404,76	428,97	425,20	379,47
0,05	382,64	423,53	446,17	442,58	395,28
0,06	394,58	437,80	459,15	455,70	406,77
0,07	403,83	448,52	468,85	465,43	415,62
0,08	411,26	457,59	476,10	472,83	422,59
0,09	417,18	464,29	481,78	478,29	427,99
0,10	421,80	469,77	486,01	481,05	432,29
0,11	425,37	474,41	488,86		435,68
0,12	427,82	477,76	490,44		437,90
0,13	429,35	479,89			439,44
0,14	430,24	481,49			440,53
0,15		482,13			



4 Analiza rezultata

Navode se samo numerički rezultati koji u usporedbi s rezultatima laboratorijskih ispitivanja karakteriziraju globalno ponašanje priključka, popustljivost spoja i otkazivanje priključka.

Usporedba eksperimentalnih i numeričkih rezultata odnosom momenta savijanja u spoju i vršnog pomaka nosača prikazana je na slici 7. za svaki od šest ispitanih

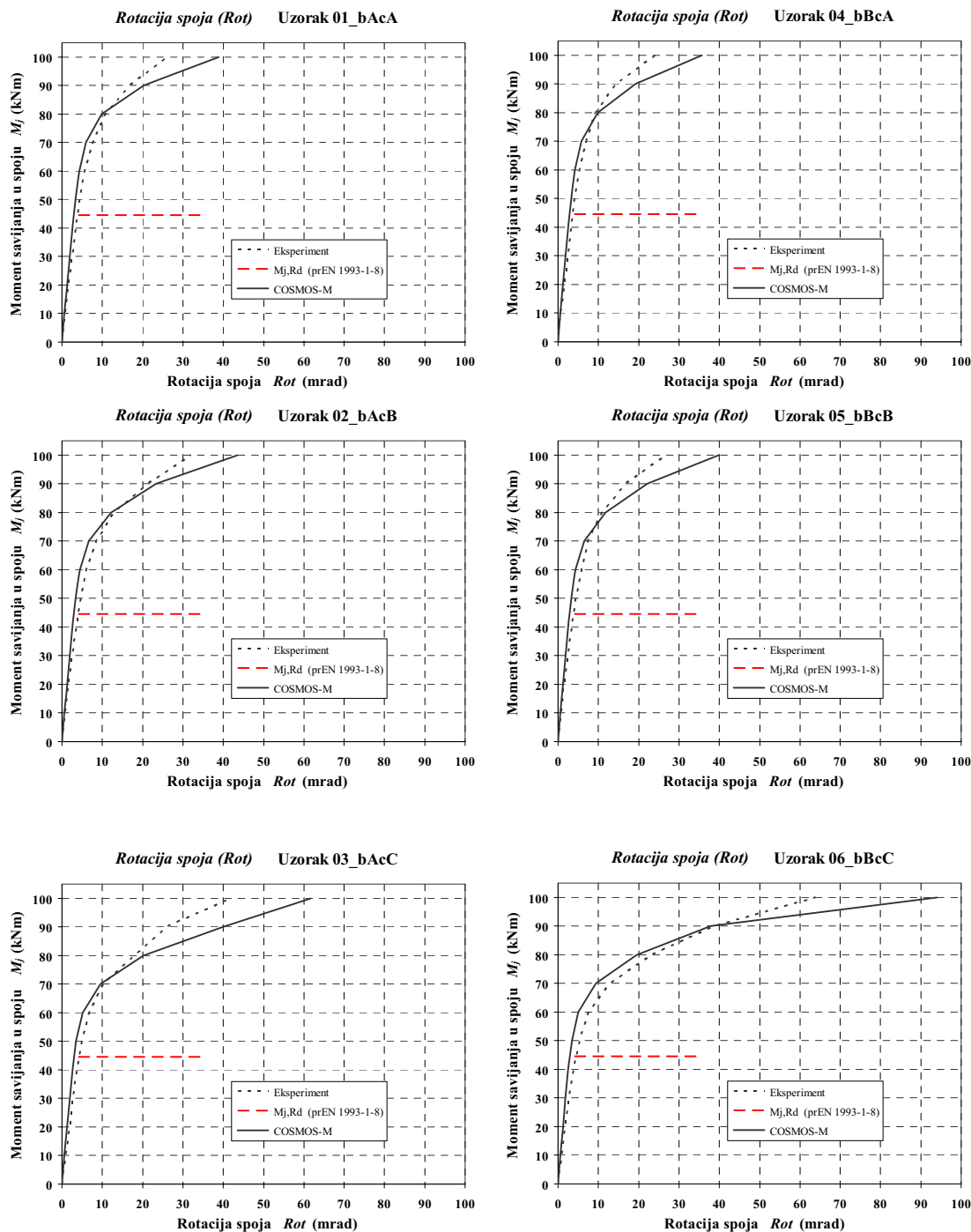


Slika 7. Usporedba eksperimentalnih i numeričkih vrijednosti vertikalnog pomaka 25 mm od kraja nosača

priključaka posebno. Vršni je pomak nosača vertikalni pomak točke na gornjoj pojasnici nosača koja je od kraja nosača udaljena 25 mm, a odgovara pomaku koji je zabilježen preko LVDT-a 1. Rezultati numeričke analize u području elastičnog ponašanja priključka pokazuju nešto povoljnije globalno ponašanje priključka jer u odnosu na eksperimentalne rezultate za isti moment savijanja daju nešto manje vršne pomake nosača. U području izrazite nelinearnosti COSMOS-M daje znatno veće pomake u odnosu na laboratorijske rezultate. Uzrok tome je nerealna aproksimacija stvarnih karakteristika

materijala, koja je posljedica malog broja vlačnih ispitivanja, i jednostavna aproksimacija mehaničkih karakteristika zavara.

Na slici 8. prikazan je odnos momenta savijanja spoja, M_j , i rotacije spoja, Rot . Rotacija spoja je definirana kao promjena kuta između deformiranih osnih linija nosača i stupa [11]. Uočava se usklađenost numeričkih i eksperimentalnih rezultata sve do vrijednosti momenta savijanja od oko 80 kNm. Iznad te granice COSMOS-M daje znatno veće rotacije spoja. Također je bitno uočiti veli-



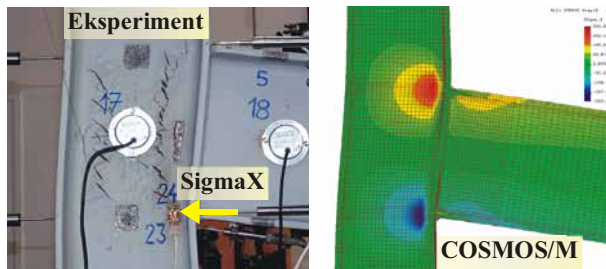
Slika 8. Usporedba eksperimentalnih i numeričkih vrijednosti rotacije spoja odnosa $M_j-\phi$

ku razliku između proračunske otpornosti priključka na savijanje, $M_{j,Rd}$, koja prema prEN 1993-1-8 [12] iznosi 44,5 kNm, i srednje vrijednosti eksperimentalne otpornosti od 83,0 kNm [5].

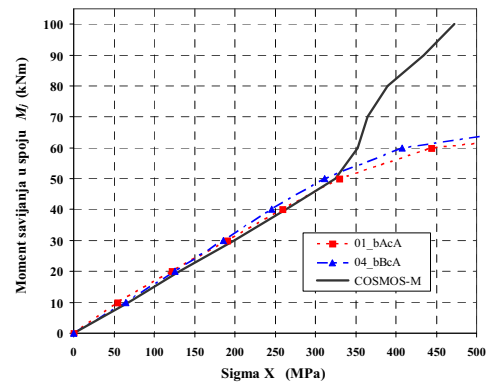
Znatne razlike u postkritičnom, nelinearnom području ponašanja priključka uzrokovane su početkom plastifikacije pojasnog zavara u numeričkom modelu. Iz eksperimentalnih rezultata može se vidjeti da do značajne

plastifikacije zavara nije došlo, što naslućuje još kruće ponašanje zavara. Kako bi se mehaničke karakteristike spojnog zavara, osobito onog između pojasnice nosača i pojasnice stupa, mogle pravilno modelirati, potrebno je provesti detaljna laboratorijska ispitivanja.

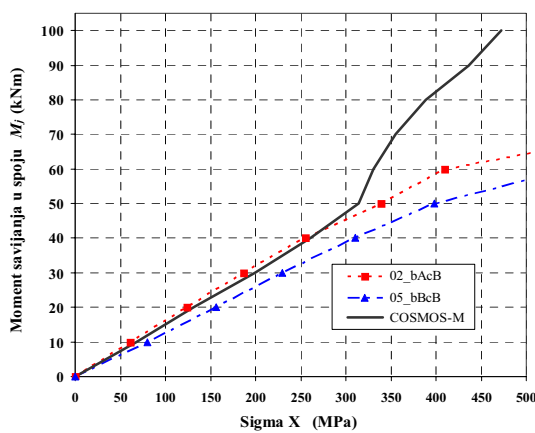
Ta ispitivanja treba usmjeriti na razne tipove, odnosno pripremu i izvedbu te važne krhke komponente zavarenih priključaka nosač-stup.



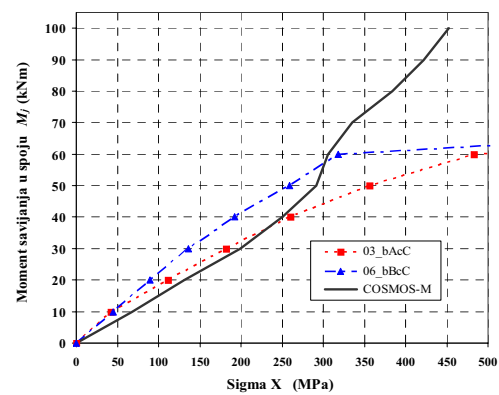
Hrbat stupa u transverzalom tlaku (Sigma X) Stup cA



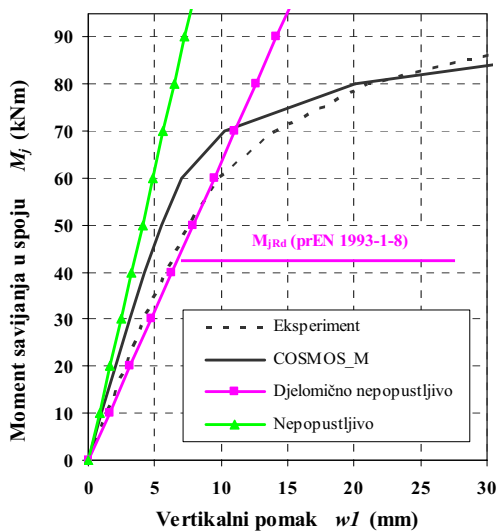
Hrbat stupa u transverzalom tlaku (Sigma X) Stup cB



Hrbat stupa u transverzalom tlaku (Sigma X) Stup cC



Slika 9. Usporedba eksperimentalnih i numeričkih vrijednosti normalnoga tlačnog naprezanja u hrptu stupa



Slika 10. Vršni pomaci nosača za nepopustljivi i djelomično nepopustljivi priključak sa $S_{j,ini}$ (uzorak 01_bAcA)

Kod svih ispitanih uzoraka otkazao je hrbat stupa u transverzalom tlaku. To potvrđuje točnost numeričke analize gdje se jasno vidi da plastifikacija tlačnog područja stupa počinje za srednju vrijednost momenta savijanja od oko 50,0 kNm. Na slici 9. prikazano je normal-

no naprezanje u smjeru osi X u točki na hrptu stupa u visini tlačne pojasnice nosača. Numerički se rezultati izuzetno dobro poklapaju i s rezultatima semiprobabilističke analize prema prEN 1993-1-8 koja je detaljno opisana u [5]. Naime, otpornost priključka na savijanje, $M_{j,Rd} = 44,5$ kNm jako je bliska zabilježenoj vrijednosti momenta savijanja za koji počinje plastifikacija, što potvrđuje točnost jednostavnih analitičkih izraza koje preporučuje metoda komponentata i koja je kao metoda usvojena u sada valjanom eurokodu.

Na kraju, na slici 10. dana je usporedba vršnih pomaka nosača (LVDT-1) koji su dobiveni analizama u računalnom programu Robot, [13] za laboratorijski uzorak 01_bAcA. Vidi se da tradicionalno nepopustljivo modeliran uzorak priključka daje osjetno manje pomake od numeričkih, a naročito od eksperimentalnih vrijednosti.

S druge strane kada se primijeni suvremeni pristup i priključak modelira sa proračunskom početnom krutosti $S_{j,ini} = 16298,25$ kNm/rad dobiju se vrijednosti pomaka koje se poklapaju s eksperimentalnim. Dakle, ako se primjenjuje tradicionalni pristup i ovaj tip priključka smatra nepopustljivim, dobiju se rezultati koji su na strani

manje pouzdanosti (manji progibi nosača). Primjena suvremenog pristupa prema prEN 1993-1-8 povlači za sobom pouzdanu procjenu progiba nosača sve do proračunske otpornosti priključka na savijanje, a i realniju raspodjelu momenata savijanja, što u konačnici rezultira manjim stupom.

5 Zaključak

Iz provedenih analiza može se zaključiti da nelinearna numerička analiza ispitanog priključka vrlo dobro odgovara eksperimentalnim rezultatima sve do područja izrazite plastifikacije priključka. Te razlike upućuju na nužnost detaljnijih laboratorijskih ispitivanja mehaničkih karakteristika raznih tipova spojnih varova. Velika razlika između računskih i numeričkih vrijednosti vode k zaključku da je potrebno usavršiti predloženi model usvojen u metodi komponenata.

Numeričke simulacije na ovom kalibriranom modelu konačnih elemenata u programskom paketu COSMOS-M, odnosno modulu NSTAR, omogućuju provođenje virtualnih laboratorijskih ispitivanja s neograničenom varijacijom geometrijskih i mehaničkih karakteristika. Na taj način moguće je, bez većih materijalnih troškova, usavršiti mehanički model koji je prihvaćen u Eurokodu 3.

Nadalje, postavlja se pitanje daje li jednostavni analitički izrazi prema metodi komponenata za procjenu osnovnih karakteristika priključka rezultate s prihvatljivim stupnjem pouzdanosti. Dakle, treba li se približiti što realnijem predviđanju ponašanja priključaka i po cijenu kompliciranja metode komponenata. Odgovor je potvrđan iz razloga što se suvremenim pristupom djelomično nepopustljivih priključaka mogu postići znatne ekonomske uštede pri analizi okvirmih čeličnih konstrukcija. S druge strane, za analize takve usavršene i eventualno nešto kompliciranije metode komponenata primjenjivat će se specijalizirani programski paketi i tako izbjeći dugotrajni i mukotrpn manualni postupci. Također će se na taj način iskoristiti postkritična svojstva čeličnih priključaka.

Varijabilnost ponašanja nominalno istih priključaka koja je dobivena numeričkim analizama i potvrđena eksperimentalnim rezultatima očiti je pokazatelj da usavršavanje modela metode komponenata treba provesti probabilističkim metodama. Za nastavak istraživanja ove kompleksne tematike preporučuje se kombinacija teorije pouzdanosti i metode konačnih elemenata, odnosno korištenje stohastičkom metodom konačnih elemenata (SFEM: *Stochastic Finite Element Method*).

LITERATURA

- [1] Weinand, K.: *SERICON – Databank on Joints in Building Frames*, Proceedings of the 1st COST C1 Workshop, Strasbourg, 28-30, October 1992.
- [2] Girão Coelho, A. M.; Bijlaard, F. S. K.; da Silva, L. S.: *Experimental assessment of the ductility of extended end plate connections*. Engineering Structures 26 (2004), 1185-1206.
- [3] da Silva, L. S.; Lima, L.; Vellasco, S.; Andrade, S.: *Experimental behaviour of end-plate beam-to-column joints under bending and axial force*, Database reporting and discussion of results. Report on ECCS-TC10, Meeting in Ljubljana, April 2002.
- [4] Faella, C.; Piluso, V.; Rizzano, G.: *Structural Steel Semirigid Connections, Theory, Design and Software*, CRC Press LLC, 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431, 2000.
- [5] Skejić, D.: *Pouzdanost djelomično nepopustljivih zavarenih priključaka nosač-stup*, magistarski rad, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2005.
- [6] COSMOSM (2005), Manual GeoStar V2.95.
- [7] European Committee for Standardization (CEN): *EN 10204:1995E, Metallic products*, Brussels, 1995.
- [8] European Committee for Standardization (CEN): *prEN 10025:2000E, Hot rolled products of structural steels*, Brussels, 2000
- [9] COSMOSM (2005), Manual NStar V2.95.
- [10] Cruz, P. J.S.; da Silva, L. S.; Rodrigues, D. S.; Simões, R. A. D.: *Database for the semi-rigid behaviour of beam-to-column connections in seismic regions*, Journal of Constructional Steel Research 46 (1998) 1-3, 233-234
- [11] Jaspert, J.P.: *Contributions to recent advances in the field of steel joints, Column bases and further configurations for beam-to-column joints and beam splices*, Aggregation thesis, University of Liège, Liège, 1997
- [12] European Committee for Standardization (CEN): *prEN 1993-1-8:2003, Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.8: Design of joints*, Final draft, Brussels, 2003.
- [13] Robot Millennium Program - Version 17.5: User's Manual, RoboBAT, June 2004.