

Seizmičko ponašanje inovativnih priključaka čeličnih okvirnih konstrukcija

Ozren Sudić¹, prof. dr. sc. **Davor Skejić²**

¹Projektiranje Sudić d.o.o., ozren.sudic@projektiranje-sudic.com

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, davor.skejic@grad.unizg.hr

Sažetak

Proteklih par desetljeća, u području čeličnih konstrukcija velika se pažnja posvećuje razvoju inovativnih konstrukcijskih priključaka nosač-stup kojima se poboljšava ponašanje konstrukcija kod djelovanja potresa. Inovativnost priključaka s prigušivačima nije sadržana samo u kontroli mjesta razgradnje energije, nego i u mogućnosti njihove jednostavne zamjene. Rad daje koncept ponašanja inovativnih priključaka sa seizmičkim prigušivačima te rezimira stanje područja s naglaskom na razvoj tržišno prihvatljivog koncepta takvih priključaka.

Ključne riječi: čelik, potres, priključak nosač-stup, inovativni tarni spoj, seizmičko prigušenje

Seismic behaviour of innovative joints of steel frame structures

Abstract

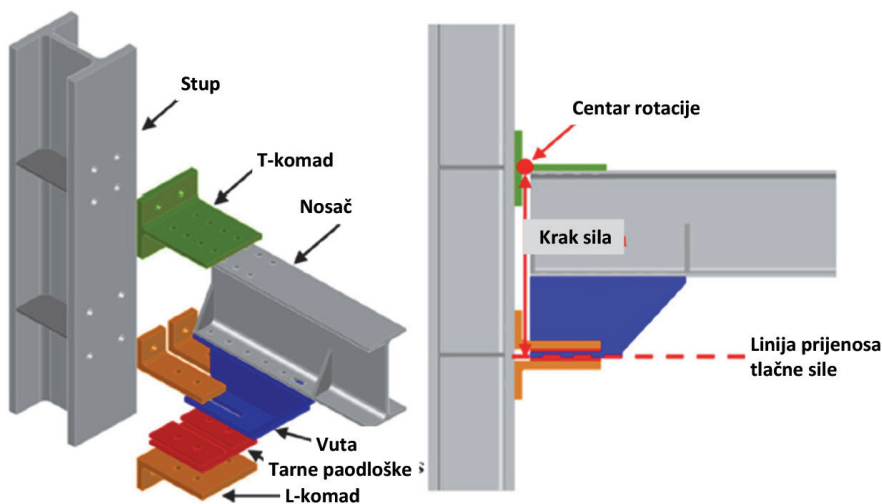
In recent decades, great attention has been paid in the field of steel structures to the development of innovative structural beam-to-column joints that improve the behaviour of structures under seismic action. The innovation of joints with dampers lies not only in the control of the location of energy dissipation, but also in the possibility to easily replace them. The paper provides a concept for the behaviour of innovative joints with seismic dampers and summarises the state of the art, focusing on the development of a marketable concept for such joints.

Key words: steel, earthquake, beam-to-column joints, innovative friction connection, seismic dampers

1 Uvod

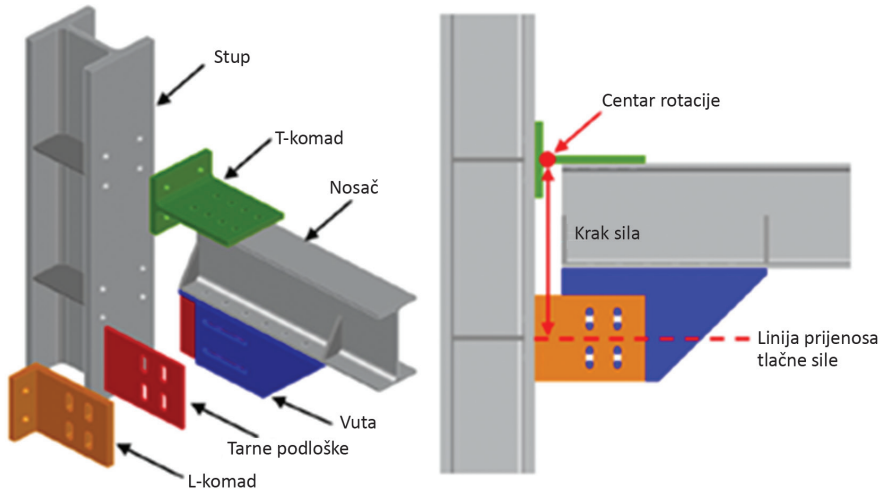
Tradicionalno su momentni priključci nosač-stup razmatrani kao potpuno kruti s punom otpornosti. U stvarnosti su to samo granični slučajevi ponašanja, te navedene pretpostavke mogu biti netočne i neekonomične, a naročito za slučaj djelovanja potresnih sila [1]. Sve navedeno bio je razlog razvoja inovativnih priključaka za čelične okvirne konstrukcije u seizmički aktivnim područjima koje zauzima sve veći prostor u znanstvenim istraživanjima posljednjih desetljeća [2]. Najčešće se radi o vijčanim priključcima nosač-stup, s osnovnom zadaćom za povećanjem potresne otpornosti konstrukcije. Vijčani momentni priključci (pune otpornosti) raznih tipova imaju prvenstvenu zadaću razgradnje seizmičke energije. Nakon provedbe razgradnje seizmičke energije, obzirom da se radi o vijčanim spojevima, iste je moguće zamijeniti novima. Mogućnošću zamjene priključaka (u cijelosti ili pojedinih njihovih komponenti) izbjegava se potreba za uklanjanjem konstrukcije nakon potresnog djelovanja, ako su iste dovele do trajnih oštećenja koja ne dozvoljavaju daljnju uporabu građevine. Obzirom na zahtjeve visoke preciznosti koji se postavljaju pred ovakve priključke, iste je potrebno proizvoditi u specijaliziranim proizvodnim pogonima adekvatne tehnološke razine. Također, postoje i zahtjevi za višim kvalitetama materijala koji se koriste za izvedbu ovakvih priključaka koji u principu funkcioniraju kao seizmički prigušivači.

Najčešće se kod razvoja priključaka nosač-stup radi o dva tipa priključaka. U prvom tipu vijci koji imaju funkciju disipacije energije postavljeni su u ravnini paralelno sa pojasnicom nosača, slika 1. [2], a u drugom tipu vijci su postavljeni u ravninama paralelno sa hrptom nosača, slika 2. [2].

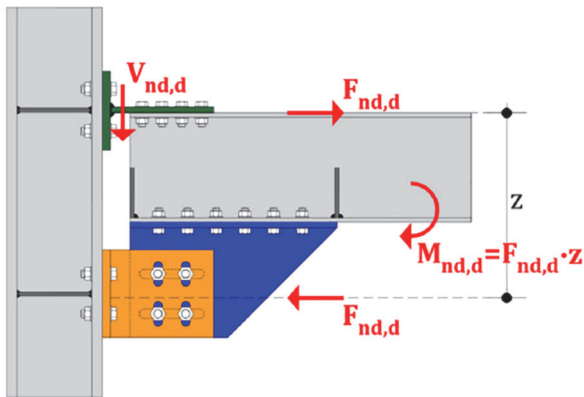


Slika 1. Tip priključka sa vijcima postavljenim paralelno sa pojasnicom nosača [2]

Kako bi se osigurala nosivost i duktilnost cijelog priključka potrebno je osigurati da svaka pojedina komponenta priključka zadovoljava tražene kriterije [2]. U principu, proces projektiranja priključaka može se podijeliti u dvije osnovne faze. Prva faza je projektiranje "prigušivača", kao najslabije komponente, uz definiranje kapaciteta preuzimanja sile od strane istog. Prvenstveno se radi o dimenzioniranju vijaka u sklopu "prigušivača". U drugoj fazi se na temelju tako definirane veličine djelovanja projektira ostatak priključka, tj. komponente koje nemaju ulogu "prigušivača", slika 3. (prikaz principa prijenosa unutarnjih sila) [2]. Nakon usporedbi sa rezultatima laboratorijskih ispitivanja, metode dimenzioniranja i pretpostavke predložene u sklopu istraživanja [2] pokazale su se ispravne.



Slika 2. Tip priključka sa vijcima postavljenim paralelno sa hrptom nosača [2]



Slika 3. Princip prijenosa unutarnjih sila za komponente koje nemaju ulogu "prigušivača" [2]

2 Stanje područja istraživanja

Glavnina istraživanja čeličnih priključaka nosač-stup fokusirana je na njihovo ponašanje pod statičkim opterećenjem [3-7]. Međutim, europske norme za projektiranje čeličnih konstrukcija u seizmički aktivnim područjima [8-9] nalažu znatno zahtjevnije uvjete za ponašanje konstrukcija, odnosno samih priključaka.

Istraživanja i razvoj seizmički otpornih priključaka nosač-stup najčešće se provodi u području okvirnih konstrukcija. Istraživanja se fokusiraju najvećim dijelom na vijčane tipove spojeva, sa dodatnim elementima koji imaju zadaću "prigušivanja" trenjem ("friction damper"). Obzirom na projektne zahtjeve, te zahtjeve ugradnje spojeva u građevine, bilo nove ili one u rekonstrukciji, nužno je zadovoljiti kriterije precizne proizvodnje elemenata ovakvih priključaka. Samim time proizvodnja elemenata priključaka provodi se u visokospecijaliziranim pogonima. U nizu istraživanja [2, 10-16] provedenih tokom zadnjih godina, na numeričkoj i laboratorijskoj razini, došlo se do značajnih spoznaja o ponašanju ovakvih tipova priključaka, odnosno spojeva. Ponašanje priključaka prilikom djelovanja potresnih sila u najvećem dijelu je ovisno o vijcima i "prigušivačima", te je utjecaj istih na ponašanje priključka predmet cijelog niza laboratorijskih istraživanja.

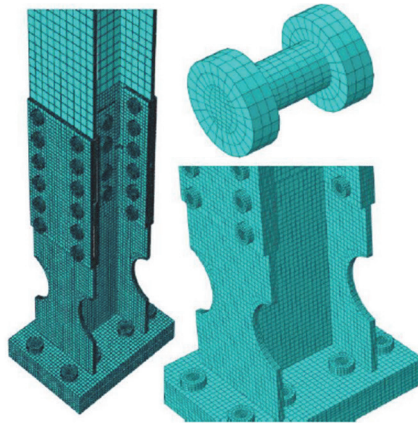
Kod vijčanih elemenata radi se o promatranju utjecaja veličine sile prednapreznja koja se unosi u vijak, na ponašanje priključka. Na primjer, cilj dijela istraživanja je definiranje jasne korelacije između sile prednapreznja vijka i koeficijenta trenja [12]. Također se promatra utjecaj broja i načina postavljanja vijaka, te podložnih pločica za vijke. Kod elemenata priključaka koji imaju funkciju "prigušivača" istraživanja se fokusiraju i na promatranje utjecaja izvedbe istih od različitih materijala na ponašanje priključaka [15]. Tako se pokazalo da mekši (neferitni) materijali mogu osigurati veću početnu vrijednost koeficijenta trenja u odnosu na tvrde materijale (karbidi). S druge strane tvrdi materijali mogu osigurati manje propadanje uslijed cikličkih opterećenja i male razlike u odgovoru na njih. Također, za razgradnju energije u ovisnosti od ukupno ostvarenih pomaka tokom potresa pokazalo se da su mekši materijali bolji za manje ukupne pomake, a tvrdi za veće vrijednosti ukupnih pomaka. Utvrđivanje granice tih dviju područja pomaka predmet je daljnjih istraživanja.

Trenutno je u procesu istraživanja i razvoja više tipova priključaka nosač-stup, a neki od sustava su i patentirani. Npr. sustav momentnog priključka s popustljivom vezom (engl. *Yield-Link Moment Connection*) [17], slika 4., je već i u komercijalnoj upotrebi u SAD.



Slika 4. Priključak nosač-stup s popustljivom vezom [17]

U daljnjem istraživanju i razvoju optimalnog inovativnog detalja priključka kriterij tržišne prihvatljivosti je također vrlo važan. Osim razvoja sustava priključaka nosač-stup kod novih konstrukcija, predmet interesa je i ugradnja inovativnih stopa stupa u konstrukcije koje su bile izložene djelovanju seizmičke sile, ali su mjesta razgradnje energije oštećena, slika 5., te ih je potrebno sanirati [18]. Priključcima bi se, ako je to moguće, izvela sanacija postojeće konstrukcije uklanjanjem deformiranog dijela elementa konstrukcije, te umetanjem novog. Veza novog i postojećeg elementa se izvodi vijčanim spojem, čime se izbjegava zavarivanje pri montaži. Time se izbjegava potreba za rušenjem cijele konstrukcije, a vijčani spoj dodatno poboljšava ponašanje priključka (zona pretvorbe energije) u eventualnim budućim potresima.



Slika 5. Prikaz oštećenog mjesta u djelomično zavarenoj izvedbi, te prijedlog načina sanacije [18]

U svrhu održive gradnje, ali i očuvanja kulturne baštine, rekonstrukcija postojećih zgrada postaje sve aktualnija tema. Različite međunarodne preporuke za rekonstrukciju ističu da upotreba tradicionalnih građevinskih metoda i materijala više nije prikladna, a često nije niti moguća. Kao alternativa tradicionalnim metodama preporučuju se metode rekonstrukcije čeličnim konstrukcijskim elementima koje, između ostalog, omogućavaju reverzibilnost postupka rekonstrukcije [19].

I normativni dio regulative također je svojevrstnom pretkvalifikacijom ovakvih priključaka i/ili njihovih komponenti [10, 11, 20, 21] dao na važnosti ovom području, ali je ograničen raspoloživim tipografijama i konfiguracijama priključaka [13].

3 Ciklička ispitivanja inovativnih priključaka nosač-stup

3.1 Eksperimentalni programi

Vrednovanja teorijskih rezultata procjene svojstava inovativnih priključaka nosač-stup, provode se složenim cikličkim laboratorijskim ispitivanjima. Pri tome se ispitivanja provode za razne tipografije i konfiguracije priključaka, tj. priključci se razlikuju po tipu, položaju u konstrukciji (npr. jednostrani priključak nosača i vanjskog stupa, dvostrani priključak nosača i unutarnjeg stupa), tipu profila, tipu materijala "prigušivača" itd. [2, 12, 14, 15]. Pregled važnijih cikličkih ispitivanja inovativnih priključaka prikazan je u tablici 1.

Tablica 1. Pregled važnijih cikličkih ispitivanja inovativnih priključaka nosač-stup

Autori / Referenca	Opseg ispitivanja	Predmet ispitivanja
Francavilla, A. et. al. [2]	16 tipova uzoraka (124 ispitivanja): - 8 uzoraka priključka nosača i vanjskog stupa - 8 uzoraka priključka nosača i unutarnjeg stupa - 2 konfiguracije priključaka (priključak s vijcima postavljenim paralelno sa pojasnicom nosača i priključak sa vijcima postavljenim paralelno s hrptom nosača)	praćenje pomaka praćenje sile u vijku
Ferrante Cavallaro, G. et al. [12]	51 ispitivanje	- 3 različita tipa materijala "prigušivača" - varijacija pritezanja vijka (40 % - 100 %) - 3 načina slaganja pločica za vijke
Latour, M. et. al. [14]	4 ispitivanja	2 različita tipa "prigušivača" nosači različitih krutosti
Ferrante Cavallaro, G. et al. [15]	16 ispitivanja	8 različitih materijala "prigušivača"

3.2 Zaključci iz provedenih laboratorijskih ispitivanja

U većini ispitivanja pokazalo se da je cikličko ponašanje priključka u skladu s pretpostavkama proračuna [2, 12], a rezultati ispitivanja u kojima je promatrano više parametara, npr. utjecaj sile prednaprezanja, utjecaj konfiguracije podložnih pločica, utjecaj raznih koeficijenata trenja, daju kvalitetne smjernice za buduća istraživanja. U tablici 2. dan je pregled najvažnijih rezultata/spoznaja iz provedenih ispitivanja.

Tablica 2. Zaključci iz provedenih ispitivanja

Autori / Referenca	Rezultati ispitivanja
Francavilla, A. et. al.[2]	Ispitivanje je potvrdilo ispravnost predložene procedure dimenzioniranja spojeva. Razlika u ponašanju obje konfiguracije priključaka sa stajališta ukupnog ponašanja priključka je vrlo mala. Kod priključka sa vijcima postavljenim paralelno sa hrptom nosača stabilnije cikličko ponašanje. Svi spojevi sposobni se prilagoditi rotaciji do 50 mrad praktički bez oštećenja. Najveća prednost ovoga je mogućnost lagane prilagodbe rotacijske sposobnosti produženjem rupa na "prigušivaču".
Ferrante Cavallaro, G.et al.[12]	Za tvrde materijale optimalno pritezanje vijaka na iznos 60% maksimalne sile prednaprezanja. Razne konfiguracije podložnih pločica utječu na postojanost sile prednaprezanja u vijku. Razne konfiguracije podložnih pločica ne poboljšavaju cikličko ponašanje "prigušivača". Jače pritezanje vijaka, iako su oštećenja manja, ne poboljšavaju ukupno cikličko ponašanje "prigušivača".
Latour, M. et. al. [14]	Oba tipa "prigušivača" osiguravaju zadovoljavajuća svojstva priključka, sa stabilnim i predvidivim odgovorom. Konfiguracija s vertikalnim položajem "prigušivača" daje malo bolji odgovor. Numerički modeli odgovarajuće predviđaju rezultate ispitivanja. Varijacija kapaciteta savijanja obje konfiguracije je direktno proporcionalna sa silom prednaprezanja vijka.
Ferrante Cavallaro, G.et al.[15]	Mekši materijali mogu osigurati veću početnu vrijednost koeficijenta trenja u odnosu na tvrde materijale. Tvrđi materijali osiguravaju manje oštećenje prilikom cikličkih opterećenja i vrlo male razlike u odgovoru na pobudu. Mekši materijali se bolje ponašaju za sumarne pomake manje od 1700 mm tokom cikličkog opterećenja, a tvrđi za veće vrijednosti sumarnih pomaka. Iako mekši materijali mogu osigurati veću početnu vrijednost koeficijenta trenja, pokazuju veće varijacije u odgovoru.

4 Zaključak

U radu je dan osnovni pregled problematike projektiranja, te rezultata laboratorijskih istraživanja, uz pregled spoznaja dobivenih istraživanjima inovativnih priključaka za seizmički otporne čelične okvirne konstrukcije. Evidentno je da postoji još čitav niz područja u kojima je moguće istražiti ponašanja seizmički otpornih inovativnih priključaka čeličnih okvirnih konstrukcija te samim time i poboljšati njihova tehnička rješenja. Laboratorijska ispitivanja trebala bi ići u smjeru odre-

divanja optimalne kombinacije komponenti priključka, uz poseban naglasak na materijale koji se koriste za izradu seizmičkih prigušivača.

Osim rješenja samih priključaka na nivou modeliranja i laboratorijskih ispitivanja, nužno je razmotriti i što jednostavniji način njihove zamjene nakon što su obavili svoju zadaću, odnosno nakon što su razgradili seizmičku energiju i sačuvali konstrukciju. Jedan od ciljeva je svakako i razvoj mogućnosti implementacije inovativnih priključaka ne samo u novim građevinama, već i onima koje se rekonstruiraju, bilo da je razlog sanacija šteta nakon potresa ili preventivno povećanje potresne otpornosti građevine. Konačni cilj daljnjeg istraživanja je razvoj optimalnog inovativnog, te tržišno prihvatljivog, detalja priključka.

Literatura

- [1] Dujmović, D.; Androić, B.; Skejić, D.: Modeliranje priključaka čeličnih okvirnih konstrukcija, *Građevinar*, 55 (2003), 339-348.
- [2] Francavilla, A., Latoru, M., Piluso, V. Rizzano, G.: Design criteria for beam-to-column connections equipped with friction devices, *Journal of Constructional Steel Research* 172 (2020) 106240.
- [3] Skejić, D.; Dujmović, D.; Androić, B.: Reliability of the bending resistance of welded beam-to-column joints, *Journal of Constructional Steel Research* Vol.64, No.4, (2008), pp. 388-399.
- [4] Skejić, D.; Dujmović, D.; Androić, B.: Behaviour of welded beam-to-column joints subjected to the static load, *Structural Engineering and Mechanics* Vol. 29, No. 1 (2008), pp. 17-35.
- [5] Skejić, D.; Dujmović, D.; Beg, D.: Behaviour of stiffened flange cleat joints, *Journal of Constructional Steel Research* Vol.103, No.12, (2014), pp. 61-76.
- [6] Javora, A.; Skejić, D.: Resistance assessment of beam-to-column joint with different blind bolt systems, *Tehnički vjesnik : znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku* (1330-3651) 24 (2017), 4, 1103-1112.
- [7] Ptiček, M.; Skejić, D.; Veljković, M.; Rizzano, G.: Structural steel joints with bolts in threaded holes, *Tehnički vjesnik : znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku* (1330-3651) 24 (2022), 4; 1382-1393.
- [8] CEN (2005): EN 1998-1 Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings; CEN, European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2005.
- [9] CEN (2005): EN 1998-3: Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance—Part 3: Assessment and retrofitting of Buildings; CEN, European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2005.

- [10] Moghaddam, H.; Afzalnia, F.; Hajirasouliha, I.; Optimal distribution of friction dampers to improve the seismic performance of steel moment resisting frames, *Structures* 37 (2022) 624-644
- [11] Paronesso, M.; Lignos, D.G.; Experimental study of sliding friction damper with composite materials for earthquake resistant structures, *Engineering Structures* 248 (2021) 113063
- [12] Ferrante Cavallaro, G., Francavilla, A.B., Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., Cyclic response of low yielding connections using different friction materials, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 114 (2018) 404-423.
- [13] Ferrante Cavallaro, G., Francavilla, A.B., Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., Standardised friction damper bolt assemblies time-related relaxation and installed tension variability, *J. Constr. Steel Res.* 41 (2018) 66-81.
- [14] Latour, M., D'Aniello, M., Zimbru, M., Rizzano, G., Piluso, V., Landolfo, R., Removable friction dampers for low-damage steel beam-to-column joints, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 115 (2018) 66-81.
- [15] Ferrante Cavallaro, G., Francavilla, A.B., Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., Experimental behaviour of innovative thermal spray coating materials for FREEDAM joints, *Composit. B Eng.* 115 (2017) 289-299.
- [16] Oliveira, S., Costa, R., Santos, A.F., Da Silva, L.S., Harada, Y., Piluso, V., A decoupled T-stub component model for the cyclic modelling of steel joint, *Journal of Constructional Steel Research* 209 (2023) 108044.
- [17] Ozkiliç, Y.O., A new replaceable fuse for moment resisting frames: Replaceable bolted reduced beam section connections, *Steel and Composite Structures*, Vol. 35, No. 3 (2020) 353-370
- [18] Yield-Link Moment Connection, www.strongtie.com (Pristupljeno: 05.05.2024.)
- [19] Skejić, D., Lukačević, I., Ćurković, I., Čudina, I. (2020). Application of steel in refurbishment of earthquake-prone buildings, *GRAĐEVINAR*, 72 (10), 955-966
- [20] AISC, ANSI/AISC 341-16: Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, USA, 2016.
- [21] AISC, ANSI/AISC 358-16: Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, USA, 2016.