

Primljen / Received: 10.8.2015.

Ispravljen / Corrected: 19.7.2016.

Prihvaćen / Accepted: 29.7.2016.

Dostupno online / Available online: 10.3.2017.

Analiza poduprtih čeličnih okvira s nepopustljivim i djelomično nepopustljivim priključcima

Autori:



Doc.dr.sc. **Hossein Khosravi**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Hakim Sabzevari
Građevinski fakultet
Sabzevari, Iran
H.khosravi@hsu.ac.ir



Mr.sc. **Yashar Hejazi**, dipl.ing.građ.
Islamsko sveučilište Azad
Odjel za građevinarstvo
Neyshabur, Iran
Yasharhejazi@gmail.com



Mr.sc. **Sayed Shoaib Mousavi**, dipl.ing.građ.
Islamsko sveučilište Azad
Neyshabur, Iran
Odjel za građevinarstvo
Shoaib.mousavi@gmail.com

Stručni rad

Hossein Khosravi, Yashar Hejazi, Sayed Shoaib Mousavi

Analiza poduprtih čeličnih okvira s nepopustljivim i djelomično nepopustljivim priključcima

U radu je analizirana primjena veznog sustava za kontrolu bočnog pomaka okvira naročito djelomično nepopustljivih priključaka. Rezultati pokazuju da se primjenom nepopustljivih priključaka umjesto djelomično nepopustljivih priključaka u poduprtim okvirima pri raznim metodama stabilizacije postižu raznovrsni utjecaji na parametre krutosti i duktilnosti konstrukcija. Osim toga, u nekim se slučajevima može utjecati i na progresivnu nestabilnost građevina.

Ključne riječi:

poduprti okvir, nepopustljivi i djelomično nepopustljivi priključci, nelinearna statička metoda postupnog guranja

Professional paper

Hossein Khosravi, Yashar Hejazi, Sayed Shoaib Mousavi

Analysis of supported steel frames with rigid and semi-rigid connections

The use of a bracing system for controlling lateral displacement of frames, especially in case of semi-rigid connections, is analysed in the paper. The results indicate that various effects on the stiffness and ductility parameters of structures can be achieved with different bracing methods by the use of rigid connections instead of semi-rigid connections in supported frames. Moreover, the progressive instability of structures can in some cases be influenced.

Key words:

supported frame, rigid and semi-rigid connections, non-linear static pushover analysis

Fachbericht

Hossein Khosravi, Yashar Hejazi, Sayed Shoaib Mousavi

Analyse gehaltener Stahlrahmen mit biegesteifen und teilweise nachgiebigen Anschlüssen

In dieser Arbeit wird die Anwendung von Halterungssystemen zur Kontrolle lateraler Verschiebungen analysiert, insbesondere bei Rahmen mit teilweise nachgiebigen Anschlüssen. Die Resultate zeigen, dass durch den Einsatz biegesteifer Anschlüsse anstelle von teilweise nachgiebigen Anschlüssen für gehaltene Rahmen bei verschiedenen Stabilisierungsmethoden unterschiedliche Einflüsse auf die Steifigkeits- und Duktilitätsparameter erzielt werden. Außerdem kann in manchen Fällen die progressive Instabilität der Konstruktion beeinflusst werden.

Schlüsselwörter:

gehaltene Rahmen, biegesteife und teilweise nachgiebige Anschlüsse, nichtlineare statische Pushover Methode

1. Uvod

U konvencionalnim metodama analize i projektiranja čeličnih okvira podrazumijeva se da je ponašanje nepopustljivih priključaka između greda i stupova u potpunosti obuhvaćeno. Ako se usvoji ta pretpostavka, projektiranje i analiza čeličnih okvira postaju jednostavniji. Međutim, laboratorijski rezultati pokazuju da kod hipotetskih nepopustljivih priključaka ipak postoji i određeni stupanj fleksibilnosti, te da s druge strane kod hipotetskih zglobnih priključaka postoji i određeni stupanj krutosti. Zbog toga je nužno istraživanje djelomično nepopustljivih priključaka, što bi mogla biti osnova za provođenje preciznih analiza i za ekonomično projektiranje čeličnih okvira. Studije koje su o ponašanju čeličnih okvirnih konstrukcija nakon potresa iz 1994. i 1995. godine izradili Kabes i Nutrio pokazuju da se u zoni priključka između grede i stupa javlja čitava serija oštećenja [1]. Prema tim analizama, dobro projektirani djelomično nepopustljivi priključci sudjeluju u nelinearnom ponašanju konstrukcija i dovode do poboljšanja seizmičkog ponašanja čeličnih okvira kod niskih i srednje visokih građevina [2]. U studiji o okvirima [3], autori pokazuju da djelomično nepopustljivi priključci smanjuju sveukupne troškove materijala i građenja za otprilike 20 posto. Treba napomenuti da ovaj rad koji uključuje istraživanje velikih pomaka i usporedbu tih pomaka s pomacima na nepopustljivim konstrukcijama, preporuke metoda za kontrolu pomaka i ocjenu tih metoda te, konačno, analizu ponašanja nepopustljivih i djelomično nepopustljivih konstrukcija, može u znatnoj mjeri pridonijeti značajnijoj primjeni djelomično nepopustljivih priključaka u građevinama [4].

Iako su centrični vezovi krući od ekscentričnih vezova, kod njih je stupanj rasapa energije i duktilnosti veći nego kod centričnih vezova [5]. Jedna od metoda koje se koriste za ocjenu seizmičkog ponašanja konstrukcija je i nelinearna statička analiza s postupnim guranjem. U toj se metodi rezultati iskazuju na osnovi ponašanja elemenata, a komponente ponašanja konstrukcije dijele se na tri razine:

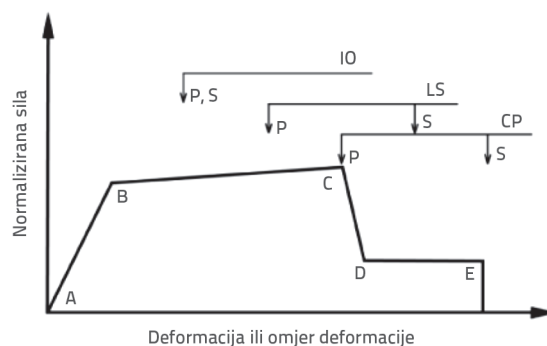
Prema normativnom dokumentu FEMA 356 [6], razina ponašanja građevine definira se na bazi konstrukcijskog i nekonstrukcijskog ponašanja njenih komponenata. Ta razina se određuje u odnosu na stupanj pojave pukotina ili oštećenja konstrukcijskih i nekonstrukcijskih komponenata. Konstrukcijske komponente su elementi poput stupova, greda, vezova, posmičnih zidova, dijafragmi, temelji i ostalih sličnih komponenata. Kriteriji za određivanje razine ponašanja konstrukcijskih komponenata dijele se uzimajući u obzir vrstu konstrukcijskog sustava, vrstu elementa (primarni ili sekundarni), te privremeni i trajni bočni pomak.

Izraz privremeni bočni pomak označava maksimalni relativni bočni pomak kata. Pretpostavlja se da se taj parametar aktivira tijekom potresa osnovne sigurnosti. Izraz trajni bočni pomak označava maksimalni relativni bočni pomak kata koji se zadržava u konstrukciji nakon potresa osnovne sigurnosti i to bilo zbog pojave pukotina ili plastičnog ponašanja. Ponašanje

konstrukcijskih komponenata dijeli se na tri razine, a svaka od njih označava se posebnim brojem i slovom S. Razina trenutne useljivosti jest razina ponašanja kod koje se predviđa da nakon potresa otpornost i krutost konstrukcijskih komponenata nije bitno narušena. Osim toga, u komponentama ne dolazi do trajnih deformacija niti do pojave pukotina. Dakle, trenutna useljivost konstrukcije je realno moguća. Na ovoj razini ponašanja, maksimalni privremeni bočni pomak iznosi 0,7 %. Ta razina ponašanja obilježava se oznakom S-1. Razina zaštite života označava razinu ponašanja na kojoj se predviđa da će potres oštetiti konstrukciju, ali da to oštećenje neće dovesti do ljudskih žrtava. Drugim riječima, na svim katovima komponente konstrukcije zadržavaju određenu krutost i stupanj otpornosti. Aktiviran je sustav gravitacijskog opterećenja i u konstrukciji nastaju trajne deformacije.

Na ovoj razini ponašanja, vrijednost maksimalnog privremenog bočnog pomaka iznosi 2,5 % dok vrijednost maksimalnog trajnog bočnog pomaka iznosi 1 %. Ta razina ponašanja obilježava se oznakom S-3. Razina sprečavanja rušenja jest razina ponašanja na kojoj se očekuje da će konstrukcija nakon potresa pretrpjeti velika oštećenja, ali se građevina neće srušiti te će broj ljudskih žrtava biti minimalan. Dakle preostala krutost i otpornost konstrukcijskih komponenata u ovom je slučaju zanemariva. Osim toga, kako se tu javlja velik broj trajnih deformacija, dolazi i do odvajanja nepoduprtih zidova i izbočina. Što se tiče nastalih uvjeta, građevina je u stanju sprečavanja rušenja. Na ovoj razini ponašanja, vrijednosti maksimalnog trenutnog bočnog pomaka i maksimalnog trajnog bočnog pomaka ograničene su na 5 %. Ova razina ponašanja obilježava se oznakom S-5. Razina ponašanja trenutne useljivosti obilježava se oznakom IO, dok se razina zaštite života i razina sprečavanja rušenja označavaju oznakama LS tj. CP [6].

Razine ponašanja primarnih i sekundarnih elemenata prikazane su na dijagramu odnosa sile i pomaka (slika 1.). Razine ponašanja primarnih i sekundarnih elemenata označavaju se slovima (P), tj. (S) [6].



Slika 1. Razine ponašanja primarnih i sekundarnih elemenata [5]

Okvirne su konstrukcije analizirane pomoću programa PERFORM 3D [7]. Taj je program posebno namijenjen za projektiranje konstrukcija otpornih na djelovanje potresa. Program na tržište stavlja tvrtka CSI [7]. Složene konstrukcije mogu se

analizirati nelinearno na bazi raznih graničnih stanja otpornosti i deformacija pomoću programa PERFORM. Taj program se odlikuje vrlo velikim mogućnostima u smislu projektiranja baziranog na ponašanju. Isto tako, njime se mogu izračunati odnosi kapaciteta/zahtjeva za sve komponente i sva granična stanja. Osim toga, ovim se programom može automatski ocijeniti ponašanje u skladu s normativnim dokumentom FEMA 356 [6].

2. Karakteristike modela

U ovom se radu analiziraju četiri uzorka. Prvi primjer je poduprti čelični okvir s ekscentričnim vezom u obliku obrnutog slova V. Drugi se primjer sastoji od poduprtog čeličnog okvira s centričnim vezom u obliku obrnutog slova V. Treći se primjer sastoji od poduprtog čeličnog okvira s križnim vezom, a četvrti se primjer sastoji od poduprtog čeličnog okvira s dvokatnim križnim vezom. Svaki primjer uključuje dva modela, a u prvom od njih priključak između grede i stupa je nepopustljiv (eng. *rigid model connection* - RMC). U drugom je modelu priključak između grede i stupa djelomično nepopustljiv (eng. *semi-rigid model connection* - SRMC). Ponašanje djelomično nepopustljivih priključaka u dostupnim nepopustljivim priključcima, te projektiranje djelomično nepopustljivih priključaka u prvom stadiju postupka projektiranja, upućuje na potrebu provedbe dodatnih istraživanja u ovom području. Tijekom modeliranja konstrukcije korištene su razne vrste profila. Grede, stupovi i vezovi usvojeni su kao profili IPE (grede), IPB (HE-B) (stupovi) i UNP (vezovi), što je u skladu s odgovarajućim njemačkim normama DIN. Pretpostavljena je kvaliteta čelika S235. Materijali su izrađeni od konstrukcijskog čelika čija granica popuštanja iznosi 2400 kg/cm², a čvrstoća im iznosi 3700 kg/cm². U modeliranju djelomično nepopustljivih priključaka korišteno je otporno sidro i plastično sidro za pola grede (0,5 M_{pl-beam}). Vrijednosti K₀ i M_{CE} izračunavaju se pomoću jednadžbe (1), tj. (2).

$$K_0 = \frac{M_{CE}}{0,003} \quad (1)$$

$$M_{CE} = ZF_{ve} \quad (2)$$

gdje je:

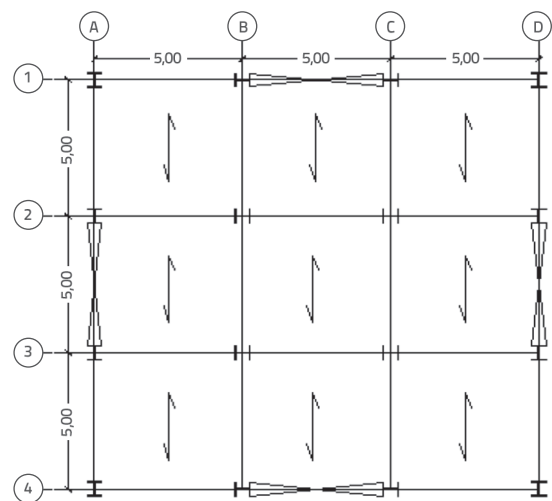
K₀ - rotacijska krutost opruge

M_{CE} - očekivana otpornost na savijanje

Z - plastični moment otpora

F_{ve} - očekivano granica popuštanja koje iznosi 1,1F_y

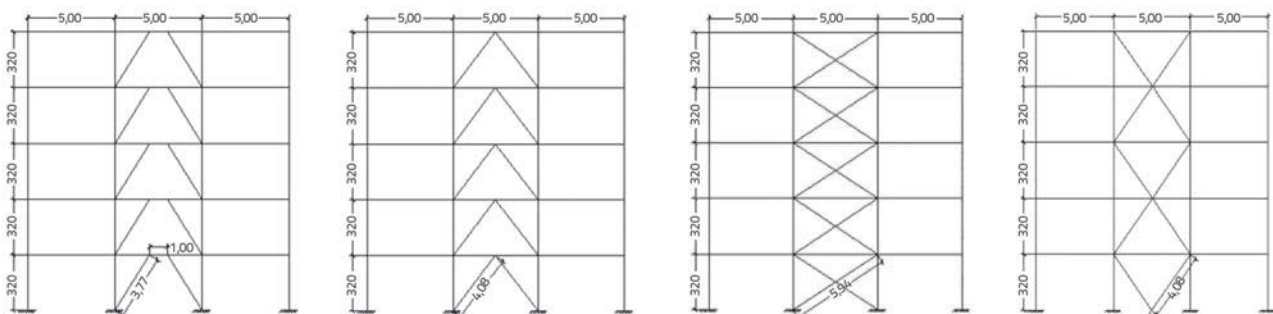
Dijagram moment-rotacija prema dokumentu FEMA 356 [6] koristi se za modeliranje odnosa momenta-rotacije za djelomično nepopustljivi priključak. U vezi s time pretpostavlja se da rotacijsko popuštanje θ_v iznosi 0.003. Parametri modeliranja i kriterij prihvatanja za djelomično nepopustljive priključke određeni su prema dokumentu FEMA 356 [6]. Tlocrt svih analiziranih građevina prikazan je na slici 2.



Slika 2. Tlocrt analiziranih konstrukcija

U nelinearnoj se analizi koristi okvir koji se nalazi na prvjoj i četvrtoj osi. Geometrija tog okvira prikazana je na slici 3.

Ti su okviri projektirani u skladu s propisima AISC-ASD. Rezultati analize su prikazani u tablici 1.



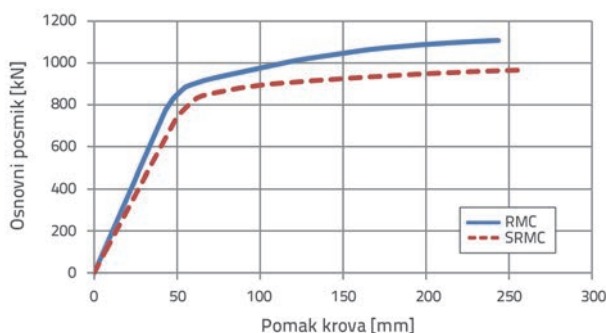
Slika 3. Prikaz okvira za razne modele: a) poduprti okvir s ekscentričnim vezom u obliku obrnutog slova V; b) poduprti okvir s koncentričnim vezom u obliku obrnutog slova V; c) poduprti okvir s križnim vezom; d) poduprti okvir s dvokatnim križnim vezom

Tablica 1. Projektirani presjeci okvira

	Katovi	Stupovi 1-B i 1-C	Stupovi 1-A i 1-D	Vezovi	Grede 1-AB i 1-CD	Grede 1-BC
Poduprti okviri s ekscentričnim vezovima u obliku obrnutog slova V	1	HE320B	HE240B	2UNP180	IPE300	IPE400
	2	HE260B	HE240B	2UNP180	IPE300	IPE400
	3	HE260B	HE240B	2UNP160	IPE300	IPE360
	4	HE240B	HE220B	2UNP160	IPE270	IPE270
	5	HE240B	HE220B	2UNP120	IPE240	IPE240
Poduprti okviri s centričnim vezom u obliku obrnutog slova V	1	HE300B	HE200B	2UNP160	IPE300	IPE550
	2	HE240B	HE200B	2UNP160	IPE300	IPE550
	3	HE220B	HE180B	2UNP160	IPE270	IPE500
	4	HE220B	HE180B	2UNP140	IPE270	IPE450
	5	HE220B	HE180B	2UNP120	IPE270	IPE400
Poduprti okviri s križnim vezom	1	HE360B	HE180B	2UNP140	IPE300	IPE300
	2	HE280B	HE180B	2UNP140	IPE300	IPE300
	3	HE220B	HE180B	2UNP120	IPE300	IPE300
	4	HE180B	HE180B	2UNP120	IPE300	IPE300
	5	HE180B	HE180B	2UNP100	IPE270	IPE270
Poduprti okviri s dvokatnim križnim vezom	1	HE360B	HE200B	2UNP180	IPE300	IPE300
	2	HE240B	HE200B	2UNP180	IPE300	IPE300
	3	HE220B	HE180B	2UNP160	IPE300	IPE300
	4	HE180B	HE180B	2UNP140	IPE300	IPE300
	5	HE180B	HE180B	2UNP100	IPE270	IPE270

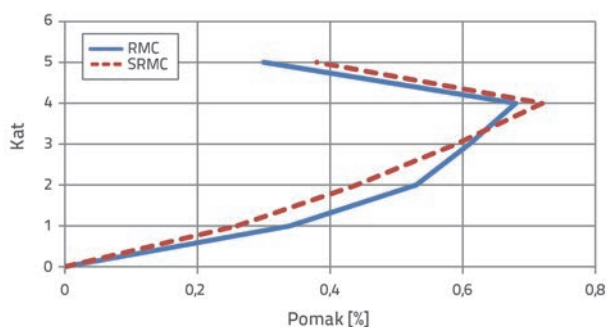
2.1. Primjer 1: Modeliranje poduprtog okvira s ekscentričnim vezom u obliku obrnutog slova V

Nakon postupka postupnog guranja na poduprtom okviru s ekscentričnim vezom u obliku obrnutog slova V, provedena je analiza dijagrama postupnog guranja, pomaka konstrukcije unutar ciljnog pomaka, te ponašanja elemenata. Usporednom analizom dijagrama postupnog guranja prikazanog na slici 4., ustanovljeno je da se smanjuje gradijent dijagrama u linearnom i nelinearnom području nakon što se nepopustljivi priključci zamijene djelomično nepopustljivim priključcima, što upućuje na smanjenje krutosti u okviru s linearnim i nelinearnim područjem.



Slika 4. Usporedba krivulja postupnog guranja u okviru s ekscentričnim vezom u obliku obrnutog slova V

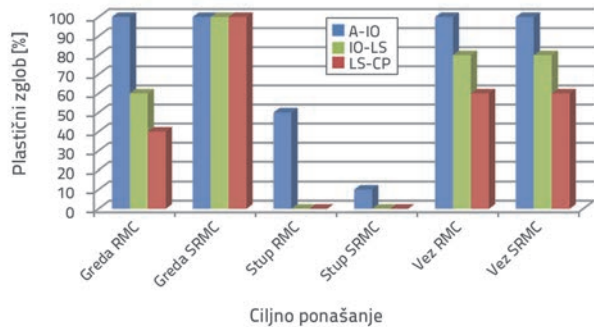
Vrijednost krutosti u linearnom području smanjena je sa 18069,8 kN/m na 14868,2 kN/m za djelomično nepopustljivi okvir, a postotak smanjenja iznosi 21,53 %. U nelinearnom području, stopa smanjenja krutosti je veća. Isto tako, bočna otpornost na popuštanje smanjena je sa 777 kN/m na 722 kN/m, što predstavlja smanjenje od 7,6 %. Krajnje granično stanje nosivosti smanjeno je sa 1107 kN na 966 kN, što predstavlja smanjenje od 14,6 %. Nije zabilježena bitna promjena duktilnosti okvira tijekom analize pomaka uslijed popuštanja. U oba modela radi se o mehanizmu s istim pomacima. Uspoređivanjem dijagrama međukatnog pomaka (slika 5.) može se zaključiti da se međukatni pomak povećao na nižim i višim katovima u odnosu na ciljni pomak, i to zato što su umjesto nepopustljivih priključaka korišteni djelomično nepopustljivi.



Slika 5. Usporedba međukatnih pomaka za okvir s ekscentričnim vezom u obliku obrnutog slova V

Okvir s nepopustljivim priključcima i maksimalnim bočnim pomakom od 0,68 % nalazi se unutar razine trenutne useljivosti, a okvir s djelomično nepopustljivim priključcima i maksimalnim bočnim pomakom od 0,72 % izlazi iz te razine.

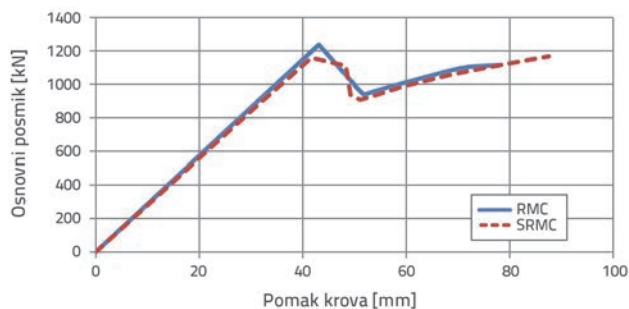
Usporedba razina ponašanja prikazana na slici 6. potvrđuje činjenicu da veći broj greda ulazi u raspone IO-LS i LS-CP nakon što se nepopustljivi priključci zamijene djelomično nepopustljivim.



Slika 6. Usporedba razina ponašanja elemenata u poduprtim okvirima s ekscentričnim vezom u obliku obrnutog slova V

2.2. Primjer 2: Poduprti okvir s centričnim vezom u obliku obrnutog slova V

Nakon postupka postupnog guranja na poduprtom okviru s centričnim vezom u obliku obrnutog slova V, provedena je analiza dijagrama postupnog guranja, pomaka konstrukcije unutar ciljnog pomaka, te ponašanja elemenata. Usporednom analizom dijagrama postupnog guranja prikazanog na slici 7. ustanovljeno je da duktilnost raste i da se otpornost pri popuštanju smanjuje nakon što se nepopustljivi priključci zamijene djelomično nepopustljivim priključcima. Nije uočena bitna promjena vrijednosti krutosti. Koeficijent duktilnosti okvira s nepopustljivim priključcima iznosio je 1,77 dok je isti koeficijent za okvire s djelomično nepopustljivim priključcima iznosio 2,1. Stopa povećanja iznosila je 18,6 %. Bočna otpornost na popuštanja nepopustljivih i djelomično nepopustljivih okvira iznosila je 1237 KN tj. 1158 KN. Stopa smanjenja iznosila je 6,8 %.

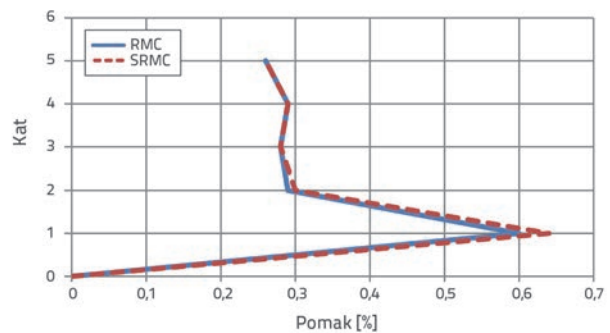


Slika 7. Usporedba krivulja postupnog guranja za okvir s centričnim vezom u obliku obrnutog slova V

Uspoređivanjem dijagrama međukatnog pomaka (slika 8.) može se zaključiti da se međukatni pomak povećao na donjem katu te

da je stabilan na gornjem katu u odnosu na ciljni pomak, i to zato što su umjesto nepopustljivih priključaka korišteni djelomično nepopustljivi.

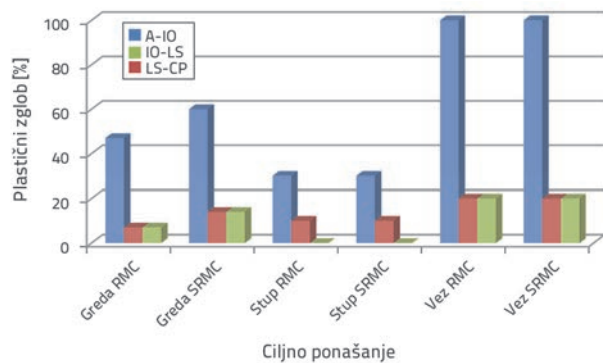
Okvir s nepopustljivim i djelomično nepopustljivim priključcima s bočnim pomacima od 0,64 % tj. 0,6 % na prvom katu nalazi se unutar razine trenutne useljivosti.



Slika 8. Usporedba međukatnih pomaka za okvir s centričnim vezom u obliku obrnutog slova V

Usporednom analizom dijagrama s razinama ponašanja (slika 9.) može se uočiti da korištenje djelomično nepopustljivih priključaka dovodi do uvođenja većeg broja greda u područja A-IO, IO-LS i LS-CP.

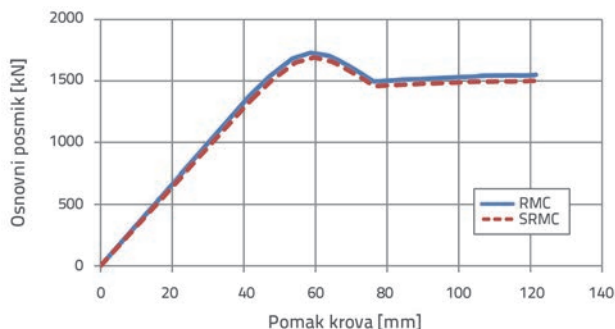
Ponašanje stupova se ne mijenja i u oba modela stup ne ulazi u područje LS-CP. Na prvom i drugom katu, uvjet koji vrijedi za stupove smještene blizu vezova je kritičan. Osim toga, ponašanje vezova ostaje stabilno bez obzira na primjenu djelomično nepopustljivih priključaka, a u oba uzorka se javlja isti postotak zglobova unutar područja LS-CP, IO-LS i A-IO.



Slika 9. Usporedba razina ponašanja za okvir s centričnim vezom u obliku obrnutog slova V

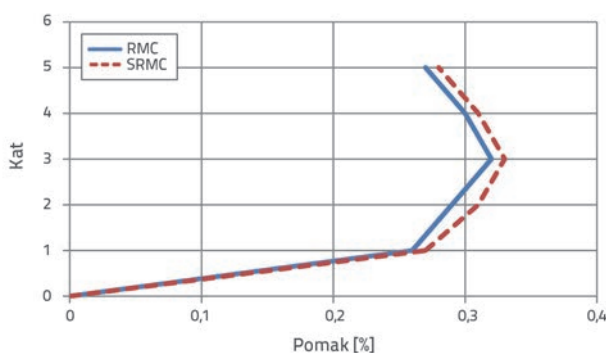
2.3. Primjer 3: Modeliranje poduprtog okvira s križnim vezom

Usporednom analizom dijagrama postupnog guranja (slika 10.) može se zaključiti da zbog korištenja križnih vezova i njihove velike krutosti zamjena nepopustljivih priključaka djelomično nepopustljivim rezultira manjim smanjenjem parametara otpornosti i krutosti, pri čemu duktilnost ostaje stabilna.

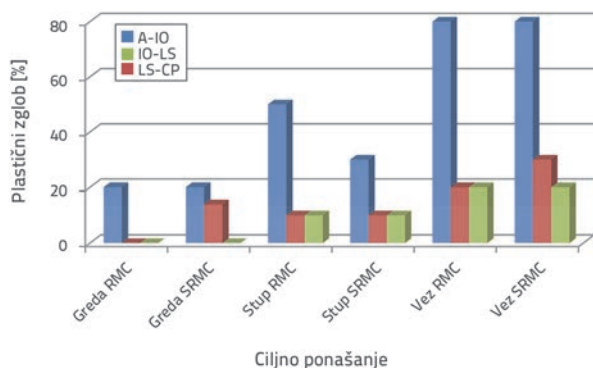


Slika 10. Usporedba krivulja postupnog guranja za okvir s križnim vezom

Iz usporedbe međukatnih pomaka prikazane na slici 11. može se vidjeti da se međukatni pomak kata koji odgovara ciljnom pomaku povećava ako se umjesto nepopustljivih koriste djelomično nepopustljivi priključci. Stopa maksimalnog pomaka okvira s nepopustljivim i djelomično nepopustljivim priključcima iznosi 0,32 % tj. 0,33 %, a okviri s tim pomacima nalaze se u području trenutne useljivosti.



Slika 11. Usporedba međukatnih pomaka u okviru s križnim vezom



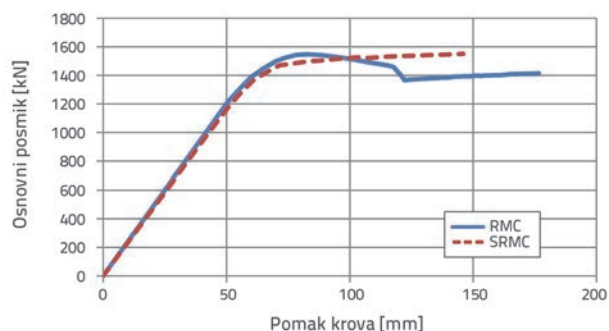
Slika 12. Usporedba razina ponašanja za okvir s križnim vezom

Na temelju usporedbe razina ponašanja prikazanih na slici 12. može se zaključiti da primjena djelomično nepopustljivih priključaka dovodi do uvođenja većeg broja greda u područje IO-LS, pri čemu niti jedna greda ne ulazi u područje LS-CP. Smanjuje se broj stupova koji se nalaze u području A-IO, ali zato broj stupova koji se nalaze u područjima IO-LS i LS-CP

ostaje nepromijenjen. Veći broj vezova ulazi u područje IO-LS i to zbog primjene djelomično nepopustljivih priključaka. Ne mijenja se broj elemenata vezova koji ulaze u područje LS-CP.

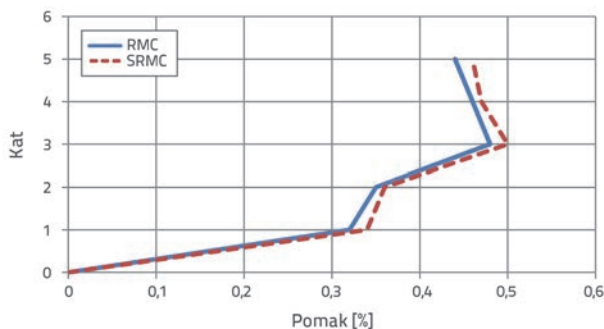
2.4. Primjer 4: Modeliranje poduprtog okvira s dvokatnim križnim vezom

Analizira se pomak konstrukcije unutar ciljnog pomaka, isto kao i razine ponašanja elementa, nakon provedbe analize postupnog guranja za poduprti okvir s dvokatnim križnim vezom. Uspoređivanjem dijagrama postupnog guranja (slika 13.), može se zaključiti da se vrijednosti otpornosti, krutosti i duktilnosti mijenjaju zbog zamjene nepopustljivih priključaka djelomično nepopustljivim priključcima, te da okvir s djelomično nepopustljivim priključcima ranije postaje nestabilan. Iz dijagrama postupnog guranja može se izvesti da vrijednost duktilnosti okvira s nepopustljivim i djelomično nepopustljivim priključcima iznosi 2,88 tj. 2,34, što odgovara smanjenju duktilnosti od približno 1,23 %.



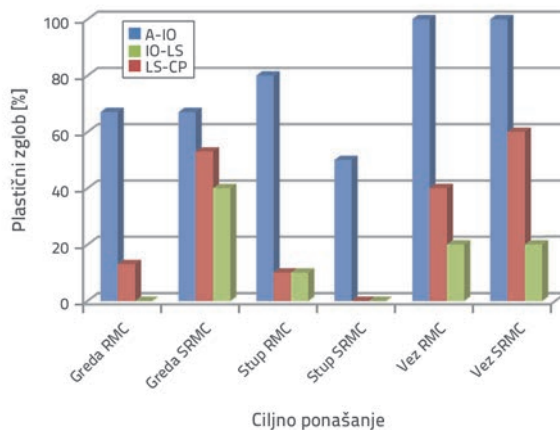
Slika 13. Usporedba krivulja postupnog guranja za okvir s dvokatnim križnim vezom

Na temelju usporedbe međukatnih vrijednosti prikazanih na slici 14. može se zaključiti da se međukatni pomak koji odgovara ciljnom pomaku povećava zbog primjene djelomično nepopustljivih priključaka umjesto nepopustljivih priključaka. Tako se okviri s nepopustljivim priključcima i djelomično nepopustljivim priključcima, s međukatnim pomakom od 0,48 % tj. 0,5 % nalaze u području trenutne useljivosti.



Slika 14. Usporedba međukatnih pomaka za okvir s dvokatnim križnim vezom

Na temelju usporedbe razina ponašanja koje su prikazane na slici 15. može se zaključiti da se, nakon što se nepopustljivi priključci zamijene djelomično nepopustljivim, broj greda koje ulaze u područje A-IO ne mijenja, te da se veći broj greda nalazi u područjima IO-LS i LS-CP. U djelomično nepopustljivom se okviru manji broj stupova nalazi u području A-IO, dok u područjima IO-LS i LS-CP uopće nema stupova. Veći se broj veznih elemenata nalazi u području IO-LS kada se koriste djelomično nepopustljivi priključci, dok se uopće ne mijenja broj veznih elemenata koji se nalaze u područjima A-IO i LS-CP.



Slika 15. Usporedba razina ponašanja za okvir s dvokatnim križnim vezom

2.5. Analiza rezultata modeliranja

Analiza primjera 1

U slučaju poduprtog okvira s ekscentričnim vezom u obliku obrnutog slova V, na moment okvira bitno utječe bočna sila i to zato što su vezovi ekscentrični. Zbog toga zamjena nepopustljivih priključaka djelomično nepopustljivim bitno utječe na ponašanje građevina. Općenito uzevši, čini se da je ponašanje ekscentrično ukrućenih okvira (EBF) zapravo poželjno jer produženje dijagrama i očvršćivanje u nelinearnom području dovodi do boljeg ponašanja okvira koji ima nepopustljive priključke.

Kako se uslijed zamjene nepopustljivih priključaka djelomično nepopustljivim povećava i rotacija priključka, može se očekivati da će doći do konstrukcijskog pomaka, s tim da se bočni pomak poduprtog okvira smanjuje djelovanjem vezova. Smatra se da je to prednost dotičnih okvira, naročito kada se sastoje od djelomično nepopustljivih priključaka.

U ovom se primjeru dopušta određeni bočni pomak, ne samo zbog niske krutosti ekscentričnog veza u obliku obrnutog slova V nego i zbog rane pojave plastičnosti vezne grede.

Spomenuta zamjena dovodi do boljeg ponašanja stupa pa se tako oko 10 % tih stupova nalazi u području A-IO. Ponašanje vezne grede ostaje stabilno u područjima A-IO, IO-LS i LS-CP zbog primjene djelomično nepopustljivih priključaka; 80 % i 60 % tih greda nalaze se u područjima IO-LS tj. LS-CP.

Moment savijanja djelomično nepopustljivih priključaka veći je od odgovarajućeg momenta nepopustljivih priključaka u slučaju gravitacijskog opterećenja. Ako se nepopustljivi priključci zamijene djelomično nepopustljivim, bočno opterećenje greda se smanjuje a povećava se djelovanje gravitacijskog opterećenja. Zbog toga se greda svakako treba pojačati. Općenito uzevši, bočne sile u maloj mjeri djeluju na grede zbog zamjene nepopustljivih priključaka djelomično nepopustljivim, pri čemu se povećava dio sila koje djeluju na vezove. Što se tiče načela jaki stup slaba greda, te zbog činjenice da su grede osnovni elementi konstrukcije, poželjno je u gradnji okvirnih građevina koristiti djelomično nepopustljive priključke umjesto nepopustljivih. Prema dobivenim rezultatima, u ekscentričnom se sustavu može očekivati da će zbog amortizacije energije doći do nelinearnog ponašanja i plastifikacije veznih greda. Ponašanje vezova slično je kod oba modela, a niti jedna od komponenata ne ulazi u ekstremna područja.

Analiza primjera 2

Općenito uzevši, ponašanje okvira s centričnim vezom u obliku obrnutog slova V nije baš duktilno. Duktilnost okvira donekle se povećava i nestabilnost okvira se odgađa. Sve to proizlazi iz primjene djelomično nepopustljivih priključaka, što omogućuje znatno veću rotaciju priključka.

U ovom modelu, veliki dio otpornosti okvira proizlazi iz djelovanja vezova, a primjena djelomično nepopustljivih priključaka bitno ne utječe na bočnu otpornost i bočnu krutost. U ta dva modela, do naglog povećanja otpornosti nakon granice popuštanja uglavnom dolazi zbog izvijanja tlačnih vezova na prvom i drugom katu.

Kako su nepopustljivi priključci zamijenjeni djelomično nepopustljivim, krutost okvira se smanjuje. U ovom sustavu krutost vezova veća je od krutosti veznog okvira pa se ponašanje konstrukcije kontrolira pomoću tog modela. Nakon dosezanja granice popuštanja i naglog pada otpornosti, bilježi se očvršćivanje u nelinearnom području.

Zbog visoke bočne krutosti vezova, u ovom modelu primjena djelomično nepopustljivih priključaka ne utječe bitno na pomake. Centrični obrnuti vez dovodi do povećanja krutosti poduprtog okvira, a također utječe i na pomake zbog činjenice da je poprečni presjek ovog veza veći u usporedbi s ostalim centričnim vezovima.

Zbog gravitacijskog opterećenja, u djelomično nepopustljivim priključcima dolazi do većeg povećanja momenta savijanja grede negoli u nepopustljivim priključcima. Primjena djelomično nepopustljivih priključaka također smanjuje utjecaj bočnih opterećenja na gredu te povećava utjecaj gravitacijskog opterećenja. Predviđa se da će veličina grede porasti, jer grede na koje su spojeni vezovi moraju nakon izvijanja tlačnih vezova podnositi veliku neujednačenu silu koju generira potres.

Kod tih se greda plastični zglob od savijanja može formirati u bilo kojoj točki duž grede, osim u dvije krajnje točke. Nakon što se nepopustljivi priključci zamijene djelomično nepopustljivim,

uvjet za grede postaje kritičniji. Povećava se utjecaj bočnih sila na vez, a istovremeno se smanjuje krutost okvira. Međutim, zbog nekih kriterija kod projektiranja vezova, čak i primjena djelomično nepopustljivih priključaka bitno ne utječe na ponašanje vezova. Okvir će i dalje biti krt i postat će nestabilan prije formiranja spomenutih zglobova.

Analiza primjera 3

Kod modeliranja poduprtog okvira s križnim vezom, bilježi se visoka krutost križnog veza. Zbog toga se ponašanje okvira bitno ne mijenja bez obzira na primjenu djelomično nepopustljivih priključaka. Što se tiče pada otpornosti zbog doseganja granice popuštanja, ponašanje ovog okvira slično je kao u uzorku br. 2, koji ima centrični vez u obliku obrnutog slova V. Osnovni razlog zbog kojeg dolazi do pada otpornosti jest izvijanje tlačnih vezova na prvom i drugom katu. Čak i nakon što se nepopustljivi priključci zamijene djelomično nepopustljivim, pad otpornosti se svejedno ne može isključiti, pa tako do ranijeg pada otpornosti, u usporedbi s gravitacijskim opterećenjem, može doći zbog velikih utjecaja na vezove. Kod centričnih vezova u obliku obrnutog slova V, osni se zglob formira u vezovima, a isto se događa kod oba modela. Formiranjem plastičnih zglobova i njihovog razvoja, isti se mehanizam može primjenjivati i na jedan i na drugi model. Može se zaključiti da kod poduprtog okvira s križnim vezom primjena djelomično nepopustljivih priključaka neće bitno utjecati na parametre otpornosti, krutosti i duktilnosti. Ponašanje poduprtog okvira s križnim vezom bolje je od ponašanja poduprtog okvira s centričnim vezom u obliku obrnutog slova V (Primjer 2). Stoga bi se moglo zaključiti da je preporučljiva primjena djelomično nepopustljivih priključaka u okviru s križnim vezom.

Zbog visoke bočne krutosti vezova, u ovom modelu primjena djelomično nepopustljivih priključaka neće bitno utjecati na pomake. Nakon zamjene nepopustljivih priključaka djelomično nepopustljivim, smanjuje se krutost okvira a povećava se relativni katni pomak. Vezovi gornjih katova podložniji su promjeni pomaka zato što se smanjenje otpornosti i krutosti okvira realizira primjenom djelomično nepopustljivih priključaka. U slučaju djelomično nepopustljivih priključaka, moment savijanja grede uvjetovan gravitacijskim opterećenjem veći je u odnosu na moment koji se bilježi kod nepopustljivih priključaka. Kada se koriste djelomično nepopustljivi priključci, smanjuje se utjecaj bočnih sila na grede, a istovremeno se povećava utjecaj gravitacijskog opterećenja. Stoga bi se trebala povećati otpornost grede, a bilo bi poželjno i ispitati stanje i status priključaka. Mijenjanjem priključaka, poboljšava se ponašanje stupova zbog manjeg utjecaja bočnog opterećenja na stupove.

Utjecaj bočnih sila na vezove povećava se zbog djelomično nepopustljivih priključaka i smanjenja krutosti okvira.

Međutim, zbog nekih kriterija za projektiranje vezova, ponašanje vezova ne mijenja se bitno kod primjene djelomično nepopustljivih priključaka.

Analiza primjera 4

U okviru s centričnim vezom u obliku obrnutog slova V, neujednačena se sila generira u gornjoj gredi zbog izvijanja tlačnog elementa, što dovodi do povećanja veličine grede i do lošeg ponašanja okvira. Da bi se smanjila vrijednost te sile, može se kombinirati sedam i osam načina ukrućivanja. Ta je metoda djelotvorna jer dovodi do povećanja otpornosti i duktilnosti u odnosu na vrijednosti koje su zabilježene za Primjer 2. U poduprtom okviru s dvokatnim križnim vezovima, bočna otpornost u točki popuštanja smanjuje se za samo 2 % bez obzira na primjenu djelomično nepopustljivih priključaka. U ovom primjeru, odgovarajuće ponašanje vezova dovodi do zanemarive varijacije otpornosti nakon zamjene priključaka. Malo smanjenje krutosti okvira zabilježeno je u linearnom području kada je korišten djelomično nepopustljivi priključak. Međutim, krutost okvira smanjuje se u nelinearnom području. Ipak, povećanje krutosti može se uočiti kod okvira s djelomično nepopustljivim priključcima. Okvir s djelomično nepopustljivim priključcima prelazi u mehanizam prije okvira s nepopustljivim priključcima. Stoga je njegova duktilnost smanjena.

Zbog prikladnog rasporeda i odgovarajuće bočne krutosti vezova, nisu zabilježeni bitni pomaci nakon konverzije nepopustljivih priključaka u djelomično nepopustljive. Zbog korištenja djelomično nepopustljivih priključaka, smanjena je krutost okvira, dok je istovremeno povećan bočni pomak. Vezovi su skloniji pomaku na gornjim katovima i to zbog smanjenja otpornosti i krutosti g okvira, što proizlazi iz korištenja djelomično nepopustljivih priključaka.

Zato se treba povećati veličina greda, a trebaju se povećati i mjere ojačanja da bi se tako povećala čvrstoća grede.

U slučaju djelomično nepopustljivih priključaka, dolazi do povećanja momenta savijanja grede u odnosu na moment nepopustljivih priključaka, a tome je razlog utjecaj gravitacijskog opterećenja. Primjenom djelomično nepopustljivih priključaka smanjuje se utjecaj bočnog opterećenja, a istovremeno se povećava utjecaj gravitacijskog opterećenja. Bolje ponašanje greda na osmom vezu, tj. sedmom vezu zabilježeno je u slučaju dvokatnog križnog veza. Drugi vez donekle je neutralizirao neujednačenu silu, što je dovelo do prikladnog ponašanja u slučajevima nepopustljivih i djelomično nepopustljivih priključaka. Zamjenom priključaka poboljšane su karakteristike greda zbog niskog utjecaja bočnog opterećenja.

Utjecaj bočne sile na vez povećan je zbog korištenja djelomično nepopustljivih priključaka te zbog smanjenja krutosti okvira. Međutim, zbog nekih kriterija koji se primjenjuju kod projektiranja vezova, ponašanje vezova nije se bitno promijenilo nakon primjene djelomično nepopustljivih priključaka.

3. Zaključak

Primjena djelomično nepopustljivih priključaka preporučuje se kao mjera za poboljšanje nedostatne duktilnosti nepopustljivih priključaka. Visoka vrijednost bočnog pomaka okvira s djelomično nepopustljivim priključcima trebala bi se smatrati

nedostatkom koji se može riješiti dodavanjem veznog sustava. U radu je analizirano ponašanje djelomično nepopustljivih okvira s vezovima, a dobiveni rezultati sažeto su prikazani kako slijedi:

- U poduprtom okviru s ekscentričnim vezom u obliku obrnutog slova V, zamjena nepopustljivih priključaka djelomično nepopustljivim priključcima uzrokovala je značajan pad otpornosti i bočne krutosti. Nije zabilježena bitna promjena duktilnosti okvira. Povećao se bočni pomak pa je trebalo povećati otpornost grede. Stoga se može zaključiti da je za primjenu djelomično nepopustljivih priključaka u poduprtom okviru potrebna visoka otpornost i krutost. Općenito uzevši, u usporedbi s uzorkom 3, ovaj okvir mnogo je osjetljiviji na primjenu djelomično nepopustljivih priključaka.
 - U poduprtom okviru s centričnim vezom u obliku obrnutog slova V, zamjena nepopustljivih priključaka djelomično nepopustljivim dovela je do povećanja duktilnosti i do odgode nestabilnosti okvira. Došlo je i do povećanja bočnog pomaka.
- Otpornost komponenata grede (spojenih s vezovima) dostatna je, osim u iznimnim slučajevima. Može se ustvrditi da je ponašanje sustava poboljšano.
- U poduprtom okviru s križnim vezom, zamjena nepopustljivih priključaka djelomično nepopustljivim priključcima nije dovela do bitne promjene u krutosti, otpornosti i duktilnosti. Vrijednost bočnog pomaka donekle je povećana, a kod manjeg broja greda i vezova uočena je potreba za povećanjem otpornosti. Općenito uzevši, u usporedbi s primjerom 3, ovaj je okvir manje osjetljiv na primjenu djelomično nepopustljivih priključaka.
 - U poduprtom okviru s dvokatnim križnim vezom, okvir ranije postaje nestabilan a duktilnost se smanjuje nakon zamjene nepopustljivih priključaka djelomično nepopustljivim priključcima. Uočava se manje povećanje bočnog pomaka. U ovom slučaju potrebno je povećati otpornost kod većeg broja greda i manjeg broja vezova.

LITERATURA

- [1] Bhatti, M.A., Hingtgen, J.D.: Effect of connection stiffness and plasticity on the service load behaviour of unbraced steel frames, *Engineering Journal*, 32 (1995) 1, pp. 21-33.
- [2] Nader, M.N., Astaneh-Asl, A.: Shaking table test of rigid, semi-rigid and flexible steel frames, *Journal of Structural Engineering*, 122 (1996) 6, pp. 589-596.
- [3] Aribert, J.M., Grecea, D.: Experimental behaviour of partial-resistant beam- to- column joints and their influence on the q- factor of steel frames, *The 11th European conference of earthquake engineering*, Paris, France, 1998.
- [4] Chui, P.O.T., Chan, S.L.: Vibration and deflection characteristics of semi-rigid. jointed frames, *Engineering Structural*, 19 (1997) 12, pp. 1001-1010.
- [5] Roeder, C.W., Popov, E.P.: Eccentrically Braced Steel Frames for Earthquakes, *Journal of Structural Div ASCE*, 104 (1978) 3, pp. 391-412.
- [6] FEMA 356 2000: Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of building, *Federal Emergency Management Agency (FEMA)*, Washington DC.
- [7] CSI corporation of DC (CSI CORP DC): Nonlinear analysis and performance assessment for 3-D structures. *PERFORM 3D*.