

# Ponašanje i konstruiranje čeličnih okvira s ekscentričnim dijagonalama

Mladen Bulić, Mehmed Čaušević

## Ključne riječi

čelični okvir,  
ukrućivanje okvira  
ekscentrične dijagonale,  
duktilnost,  
seizmička spona,  
seizmička energija,  
Eurokod 8

## Key words

steel frame,  
frame stiffening with  
eccentric diagonals,  
ductility,  
seismic tie,  
seismic energy,  
Eurocode 8

## Mots clés

cadre d'acier,  
raidissement de cadre par  
diagonales excentriques,  
ductilité,  
connexion sismique,  
énergie sismique,  
Eurocode 8.

## Ключевые слова

стальная рама,  
усиление рамы,  
эксцентричная диагональ,  
дуктильность,  
сейсмическая скоба,  
сейсмическая энергия,  
Еврокод 8

## Schlüsselworte

Stahlrahmen,  
Rahmenversteifung,  
exzentrische Diagonalen,  
Duktilität,  
seismische Spange,  
seismische Energie,  
Eurokod 8

M. Bulić, M. Čaušević

Izvorni znanstveni rad

## Ponašanje i konstruiranje čeličnih okvira s ekscentričnim dijagonalama

Prikazana je konstrukcija hibridnog čeličnog okvira koja se temelji na ukrućivanju okvira s ekscentrično priključenim dijagonalama. Opisano je ponašanje najvažnijeg segmenta grede okvira nazvanog seizmička spona, preko koje se gubi seizmička energija. Prikazani su rezultati ispitivanja na okvirima u cijelosti te na seizmičkim sponama kao izdvojenim dijelovima. Na kraju je prikazana primjena ovoga koncepta i preporučena njegova uporaba u projektiranju na temelju Eurokoda 8-1.

M. Bulić, M. Čaušević

Original scientific paper

## Behaviour and design of steel frames with eccentric diagonals

The structure of the hybrid steel frame, based on frame stiffening with eccentrically linked diagonals, is presented. The behaviour of the most significant frame member segment, called seismic tie, through which the seismic energy is dissipated, is described. A detailed account is given of results obtained by testing frame as a whole and by testing seismic ties regarded as separate segments. In conclusion, the application of this concept is presented, and its use is recommended in the design work based on Eurocode 8-1.

M. Bulić, M. Čaušević

Ouvrage scientifique original

## Comportement et étude des cadres d'acier à diagonales excentriques

La construction d'un cadre d'acier hybride, basé sur le raidissement du cadre par les diagonales reliées de manière excentrique, est présentée. Le comportement du segment de cadre le plus important, appelé connexion sismique, par lequel l'énergie sismique est dissipée, est décrit. Les résultats obtenus par l'essai de l'ensemble du cadre, et par l'essai des connexions sismiques individuelles, sont présentés. En conclusion, l'application de ce concept est présentée, et son usage est recommandé dans les études basées sur l'Eurocode 8-1.

M. Булич, М. Чаушевич

Оригинальная научная работа

## Поведение и конструирование стальных рам с эксцентричными диагоналями

В работе показана конструкция гибридной стальной рамы, основанной на усилении рамы с эксцентрично присоединёнными диагоналями. Описано поведение важнейшего элемента балки, названного сейсмической скобой, через которую теряется сейсмическая энергия. Показаны, результаты испытаний на рамах в целостности, а также на сейсмических скобах как на отдельных частях. В конце показано применение этого концепта и рекомендовано его употребление при проектировании на основе Еврокода 8-1.

M. Bulić, M. Čaušević

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

## Verhalten und Konstruieren von Stahlrahmem mit exzentrischen Diagonalen

Dargestellt ist die Konstruktion eines hybriden Stahlrahmens die auf der Versteifung des Rahmens mit exzentrisch angeschlossenen Diagonalen beruht. Beschrieben ist das Verhalten des wichtigsten Segments des Rahmenbalkens, genannt seismische Spange, über die sich die seismische Energie verliert. Dargestellt sind die Ergebnisse der Prüfungen die an kompletten Rahmen und an den als Teil abgesonderten seismischen Spangen durchgeführt wurden. Am Ende ist die Anwendung dieses Konzeptes dargestellt und sein Gebrauch beim Entwurf auf Grund des Eurokod 8-1 anempfohlen.

Autori: Mr. sc. **Mladen Bulić**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Mehmed Čaušević**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka, V. C. Emina 5

1 Uvod

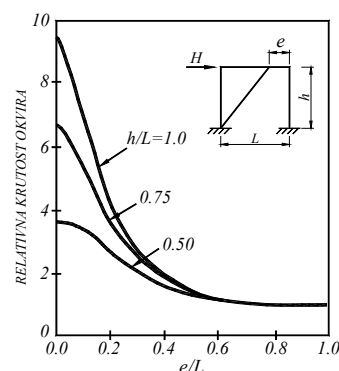
Konstrukcije koje se projektiraju za izvedbu u seizmičkim područjima moraju zadovoljiti dva osnovna zahtjeva. Prvo, konstrukcija mora biti provjerena na uobičajena opterećenja, kako bi se spriječila konstrukcijska i/ili nekonstrukcijska oštećenja. Drugo, konstrukcija se ne smije srušiti u jakom potresu. Duktilna konstrukcija s visokom elastičnom krutošću zadovoljava ove zahtjeve, ali takve sustave je teško ekonomično realizirati. Okviri bez dijagonala i okviri s centričnim dijagonalama uobičajeno su se primjenjivali pri projektiranju čeličnih konstrukcija izloženih seizmičkom djelovanju. Okviri bez dijagonala imaju odličnu duktilnost, ali nemaju dovoljnu krutost, osim ako su elementi okvira velikih poprečnih presjeka, a detalji priključaka dovoljno kruti, dok okviri s centričnim dijagonalama imaju visoku elastičnu krutost, ali posjeduju ograničenu duktilnost.

Nasuprot navedenim sustavima, čelični okvir s ekscentričnim dijagonalama (OED) konstrukcijski je okvirni sustav pri kojem se uzdužna sila u dijagonali prenosi u drugu dijagonalu ili stup preko posmika i/ili savijanja kratkog segmenta grede koji se naziva seizmičkom sponom te predstavlja hibridni sustav koji ima osobine obaju prethodnih spomenutih okvira [1].

Ideju primjene okvira s ekscentričnim dijagonalama kao pogodnog sustava za preuzimanje horizontalnih seizmičkih sila velikog intenziteta dali su Roeder i Popov [24], a zasniva se na ograničavanju neelastičnog ponašanja, tj. trošenja energije na unaprijed određenom broju mjesta u sustavu.

Seizmička spona djeluje kao osigurač kojim se troši velika količina energije unesene potresom. Spona također djeluje kao dio konstrukcije kojim se ograničavaju sile u dijagonalama, pa ne dolazi do njihova izvijanja, a ograničavaju se sile i u drugim dijelovima sustava, pri čemu spona ostaje najduktilniji element sustava. Znači, potrebno je postići da spona djeluje u sustavu i kao dio nosive konstrukcije i kao element preko kojeg se troši energija [13, 15].

Posljednjih su godina u SAD-u rađena skupa eksperimentalna istraživanja u Earthquake Engineering Research Center, Richmond, Berkeley [10, 11, 14], kojima je tretiran problem ponašanja okvira s ekscentričnim dijagonalama. Slijedom tih istraživanja u američka je pravila projektiranja uveden način sustava s ekscentričnim dijagonalama [26], što je preuzela i europska norma Eurokod 8-1 [27]. Ideja primjene takvih okvira prikazana je na slici 1. okvirom s proizvoljnim položajem dijagonale, pri čemu je dijagramom dana zavisnost relativne krutosti okvira od parametara  $e/L$  i  $h/L$ .

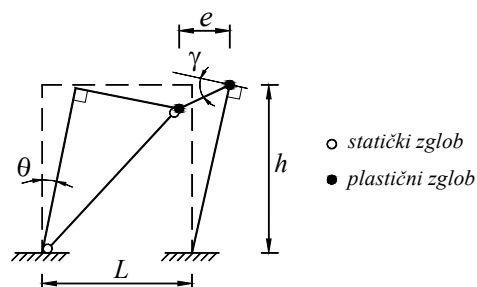


Slika 1. Zavisnost relativne krutosti okvira od parametara  $e/L$  i  $h/L$

Promjenom odnosa  $e/L$  od 0 do 1, što predstavlja ekscentričnost priključka dijagonale, tip okvira mijenja se od konvencionalnog okvira s centrično priključenom dijagonalom, kada je  $e/L = 0$ , pa preko okvira s ekscentrično priključenom dijagonalom do okvira bez dijagonale, kada je  $e/L = 1$ . Znači da za sve međuvrijednosti  $0 < e/L < 1$  okvir postaje okvir s ekscentrično priključenom dijagonalom. Relativna krutost okvira jest odnos između horizontalne krutosti okvira s ekscentričnim dijagonalama i okvira bez dijagonala [18, 19, 20].

Na slici 2. prikazan je mehanizam rušenja jednostavnog okvira. Iz geometrijskih se uvjeta vidi da je kut rotacije spone  $\gamma$  u relaciji s kutom rotacije konstrukcije  $\theta$ :

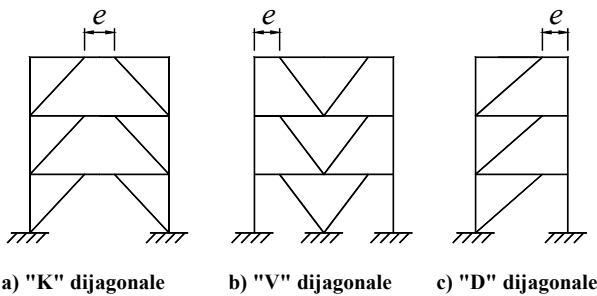
$$\gamma \cdot e = \theta \cdot (L - e) \tag{1}$$



Slika 2. Mehanizam rušenja jednostavnog okvira

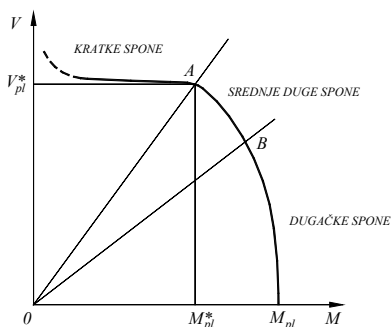
U slučaju da seizmička spona popušta u posmiku,  $\gamma$  predstavlja prosječnu posmičnu deformaciju, a ako seizmička spona popušta pri savijanju,  $\gamma$  predstavlja rotacije plastičnih zglobova (slika 2.). Odnos između plastične deformacije spone i deformacije konstrukcije raste kako se parametar  $e/L$  smanjuje.

Na slici 3. prikazani su najčešće primijenjeni tipovi okvira s ekscentričnim dijagonalama u praksi. Naročito je preporučljiva za upotrebu konfiguracija pri kojoj ne postoje direktne veze spone sa stupom. Uočava se da dulje spone imaju arhitektonskih prednosti jer se njima osiguravaju veći prostori za vrata i prozore [16, 17].



Slika 3. Najčešće primijenjeni tipovi OED u praksi

Većina seizmičke energije koja se troši kod OED zbiva se u seizmičkim sponama. Spone se projektiraju tako da ostanu u elastičnom području pri uobičajenom opterećenju, a da se deformiraju neelastično pri preopterećenju konstrukcije, te da se preko njih troši seizmička energija. Tipičan interakcijski dijagram momenta savijanja i poprečne sile prikazan je na slici 4., gdje je  $M_{pl}$  moment savijanja potpune plastičnosti,  $M_{pl}^*$  moment savijanja potpune plastičnosti umanjjen zbog poprečne sile te  $V_{pl}^*$  poprečna sila potpune plastičnosti umanjena zbog momenta savijanja. Na ovom je dijagramu označena karakteristična točka A koja dijeli područje u kojem prevladava popuštanje pri posmiku i područje u kojem se pojavljuje interakcija popuštanja pri savijanju i popuštanja pri posmiku. U području iza karakteristične točke B prevladava popuštanje pri savijanju. Svako područje na slici 4. odgovara određenoj duljini spone, koje se redom nazivaju: "kratke spone", "srednje duge spone" i "dugačke spone". Dakle, kritični faktor koji utječe na neelastično ponašanje spone jest njezina duljina. Mehanizam popuštanja, sposobnost trošenja energije i krajnji mehanizmi sloma usko su vezani s duljinom spone [11].



Slika 4. Interakcijski dijagram momenta savijanja i poprečne sile

Nije dobro ako je spona toliko dugačka da se dostignu vrijednosti  $M_{pl}$  (plastični zglobovi od savijanja na krajevima spone) prije nego što počne popuštanje materijala posmikom. Zbog toga su Kasai i Popov [12] iznijeli danas općeprihvaćen prijedlog da se duljina spone za "I" poprečni presjek odredi prema sljedećem izrazu:

$$e \leq 1,6 \frac{M_{pl}}{V_{pl}} \quad (2)$$

Kada je

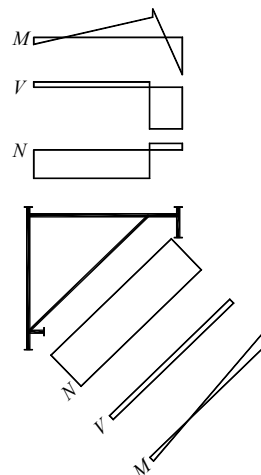
$$1,6 \frac{M_{pl}}{V_{pl}} < e < 2,5 \frac{M_{pl}}{V_{pl}} \quad (3)$$

spone su izložene ne samo popuštanju materijala posmikom, nego i savijanjem na svojim krajevima, što je predstavljeno područjem između točaka A i B na slici 4. I na kraju, kada je:

$$e \geq 2,5 \frac{M_{pl}}{V_{pl}} \quad (4)$$

dominira tečenje materijala savijanjem.

Spone duljine kojih zadovoljavaju uvjet (2) kratke su spone, uvjet (3) srednje duge spone te ako zadovoljavaju uvjet (4) dugačke spone.



Slika 5. Rezne sile u elementima dobro projektiranog sustava [4]

Na slici 5. kvalitativno je ilustrirana raspodjela reznih sila u elementima dobro projektiranog sustava, odakle se uočava velika vrijednost posmične sile po cijeloj dužini spone, koja je još podvrgnuta i momentima velikog intenziteta, ali samo na njezinim krajevima, kao i malim vrijednostima uzdužnih sila. Za kratke spone posmična sila dostiže vrijednost  $V_{pl}$  (kada dolazi do popuštanja materijala posmikom) prije nego što krajnji momenti dostignu vrijednost  $M_{pl}$ , što znači da će spona doživjeti popuštanje materijala posmikom i u njoj će se formirati posmični zglob.

Stup, greda bez spone i dijagonala moraju biti "jači" od spone, tako da se neelastične deformacije zbivaju u sponi kao najduktilnijem elementu sustava. Proces projektiranja okvira s ekscentričnim dijagonalama provode se na sljedeći način: Najprije se odrede najveće vrijednosti

posmičnih sila i momenata savijanja koji se mogu ostvariti u sponi zbog seizmičkog opterećenja. Zatim se na osnovi dobivenih reznih sila spona definiraju uzdužne sile i momenti savijanja u gredi i dijagonali na osnovi kojih se one dimenzioniraju. Potrebno je napomenuti da ako je kut između grede i dijagonale manji od 35° može doći do problema stabilnosti grede [3, 7, 21].

## 2 Analiza plastične sposobnosti okvira s ekscentričnim dijagonalama (OED)

Razmatrajući mehanizam *i*-tog kata na slici 6. može se dobiti sljedeći izraz za unutarnji (*Internal*) virtualni rad  $W_I$  [9, 11]:

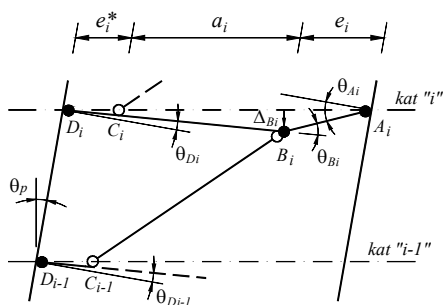
$$W_I = W_{I1} + W_{I2} + W_{I3} \quad (5)$$

gdje je:

$W_{I1}$  - unutarnji rad zbog deformacije poradi savijanja i zbog plastične posmične deformacije spona duljine  $e_i$

$W_{I2}$  - unutarnji rad zbog plastične deformacije koncentrirane na stupu uz sponu duljine

$W_{I3}$  - unutarnji rad zbog plastične deformacije stupova pri temeljima.



Slika 6. Mehanizam "i"-tog kata kod okvira s ekscentričnim dijagonalama

Svaka od ovih vrijednosti se može izraziti kao:

$$W_{I1} = \sum_{i=1}^n [M_{Ai} \theta_{Ai}^{(b)} + M_{Bi} \theta_{Bi}^{(b)} + V_{ABi} e_i (\theta_{Ai}^{(s)} + \theta_{Bi}^{(s)}) / 2] \quad (6)$$

$$W_{I2} = \sum_{i=1}^n [M_{Di} \theta_{Di}] \quad (7)$$

$$W_{I3} = \sum_{i=1}^n [M_{CL1} + M_{CL2}] \theta_p \quad (8)$$

gdje su  $M_{Ai}$ ,  $M_{Bi}$  i  $M_{Di}$  momenti savijanja u točkama  $A_i$ ,  $B_i$  i  $D_i$  na *i*-tom katu okvira prikazanog na slici 6., a  $M_{CL1}$  i  $M_{CL2}$  su desni i lijevi moment savijanja na temeljima stupova.  $\theta_{Ai}$ ,  $\theta_{Bi}$  i  $\theta_{Di}$  su virtualni kutovi rotacije u točkama  $A_i$ ,  $B_i$  i  $D_i$ , dok je  $\theta_p$  virtualni kut rotacije stupa (*pear*). Treba napomenuti da je:

$$\theta_{Ai} = \theta_{Ai}^{(b)} + \theta_{Ai}^{(s)} \quad (9)$$

gdje  $\theta_{Ai}^{(b)}$  označuje rotaciju zbog savijanja (*bending*) u točki  $A_i$ , a  $\theta_{Ai}^{(s)}$  označuje rotaciju zbog posmika (*shear*). Isto vrijedi i za  $\theta_{Bi}$ .

Unutarnji virtualni rad  $W_{I1}$  spona odredit će se tako da se primijeni idealna plastična teorija prema kojoj su u graničnom stanju momenti savijanja na krajevima spona jednaki. U tom je slučaju:

$$M_{Ai} = M_{Bi} = \frac{V_{ABi} \cdot e_i}{2} \quad (10)$$

gdje je  $V_{ABi}$  posmična sila u seizmičkoj sponi na *i*-tom nivou. Zatim se dobije:

$$W_{I1} = \sum_{i=1}^n [V_{ABi} e_i (\theta_{Ai} + \theta_{Bi}) / 2] \quad (11)$$

Kutovi rotacije  $\theta_{Ai}$  i  $\theta_{Bi}$  mogu se zamijeniti s njihovim približnim vrijednostima  $\theta_{Ai} \approx (L/e_i) \theta_p$ ,  $\theta_{Bi} \approx (L/e_i) \theta_p$ , gdje je  $L$  raspon okvira, te se dobiva:

$$W_{I1} = \sum_{i=1}^n [V_{ABi}] L \theta_p \quad (12)$$

Ova jednadžba je vrlo jednostavna za primjenu budući da je  $W_{I1}$  zbroj posmičnih sila u svim sponama okvira pomnožen s  $L \theta_p$ . Približne vrijednosti za  $\theta_{Ai}$  i  $\theta_{Bi}$  su precijenjene svega nekoliko postotaka u odnosu na vrijednosti koje se proračunavaju preciznije za prvi nivo okvira i daju prilično točne procjene za preostali dio okvira.

Unutarnji virtualni rad  $W_{I2}$  spona duljine  $e_i^*$  odredit će se iz momenta savijanja  $M_{Di}$  u jednadžbi (7). Dokazano je da je vrijednost  $\theta_{Di}$  općenito puno manja u usporedbi s  $\theta_{Ai}$  i  $\theta_{Bi}$  [11], tako da se može napisati:

$$M_{Di} \theta_{Di} \ll M_{Ai} \theta_{Ai} + M_{Bi} \theta_{Bi} \quad (13)$$

To dovodi do zaključka da je:

$$W_{I2} \ll W_{I1} \quad (14)$$

Stoga je unutarnji rad koji čine momenti plastičnih zglobova u točkama  $D_i$  zanemarivo malen u usporedbi s onim koji čine plastični zglobovi spona duljine  $e_i$ .

Da bi se odredio unutarnji virtualni rad  $W_{I3}$  pri temelju stupova moraju biti poznate vrijednosti momenata savijanja  $M_{CL1}$  i  $M_{CL2}$ . Vrijednosti  $\theta_{A1}$  i  $\theta_{B1}$  su približno jednake  $(L/e_1)\theta_p$ . Iz toga proizlazi:

$$(M_{CL1} + M_{CL2})\theta_p < M_{A1}\theta_{A1} + M_{B1}\theta_{B1} \quad (15)$$

Analiza okvira s ekscentričnim dijagonalama [11] pokazala je da  $W_{I3}$  ima vrijednost barem  $2e_1/L$  pomnoženo s unutarnjim radom spona prvog kata. Budući da kod višekatnog okvira postoji veći broj spona,  $W_{I3}$  bi bio puno manji od učinjenog rada svih spona, tj.

$$W_{I3} \ll W_{I1} \quad (16)$$

Ukupni unutarnji rad se može izraziti kao:

$$W_I \approx W_{I1} \approx \sum_{i=1}^n [V_{ABi}] L \theta_p \quad (17)$$

To pokazuje da se većina energije kod okvira s ekscentričnim dijagonalama troši plastičnom deformacijom seizmičkih spona.

Virtualni se rad  $W_E$  zbog vanjskih sila može izraziti kao:

$$W_E = W_{E1} + W_{E2} \quad (18)$$

gdje je  $W_{E1}$  rad učinjen horizontalnim opterećenjem, a  $W_{E2}$  rad učinjen vertikalnim opterećenjem.

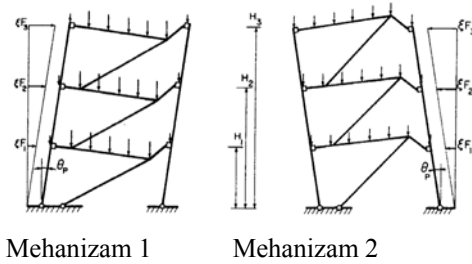
Vanjski rad od horizontalnog opterećenja  $W_{E1}$  jest:

$$W_{E1} = \xi \sum_{i=1}^n [F_i H_i] \theta_p \quad (19)$$

gdje su  $F_i$  generalizirane horizontalne sile, a  $H_i$  udaljenosti hvatišta sile od podnožja. Parametar  $\xi$  je faktor opterećenja s kojim treba pomnožiti generalizirane horizontalne sile  $F_i$  kako bi se dobila horizontalna otpornost okvira. Na slici 7. prikazana je raspodjela horizontalnih sila na okvir predočavajući dva moguća mehanizma.

Za određivanje vanjskog rada od vertikalnog opterećenja  $W_{E2}$  najprije će se razmotriti mehanizam 1 gdje horizontalno opterećenje djeluje s lijeva na desno i vertikalno će opterećenje proizvesti pozitivan vanjski rad.

Vertikalno je opterećenje modelirano kao više koncentriranih sila i pretpostavljeno je da nikakvo vertikalno opterećenje ne djeluje na sponu tako da poprečna sila po cijeloj duljini spona ostaje konstantna. Rad u svim toč-



Slika 7. Raspodjela horizontalnih sila na okvir

kama tih koncentriranih sila pri svakom katu može se jednostavno izraziti kao ukupno opterećenje koje djeluje na gredu pomnoženo s pomakom težišta opterećenja. Za  $i$ -ti nivo takav se rad može izraziti kao  $w_i L \Delta_{Bi} / 2$ , gdje je  $w_i$  vrijednost ekvivalentnoga jednolikog opterećenja, a  $\Delta_{Bi}$  je vertikalni pomak točke  $B_i$ . U skladu s tim dobiva se:

$$W_{E2} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n w_i L \Delta_{Bi} \quad (20)$$

$\Delta_{Bi}$  se može izraziti kao približna vrijednost

$$\Delta_{Bi} \approx (L - e_i - d_{Ri}) \theta_p \quad (21)$$

Uvrštavanjem (20) u (19) dobiva se izraz

$$W_{E2} \approx \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n w_i (L - e_i - d_{Ri}) L \theta_p \quad (22)$$

Potom će se razmotriti mehanizam 2 kada horizontalno opterećenje djeluje s desna na lijevo. Kada ne djeluje vertikalno opterećenje onda je ovaj mehanizam analogan onom prethodnom. Da bi se dogodio takav mehanizam pretpostavit će se da su vrijednosti  $e_i^*$  dovoljno male u usporedbi s vrijednostima  $e_i$ , a vrijednosti vertikalnog opterećenja su dovoljno male da ne uzrokuju plastične zglobove. Na osnovi toga,  $W_{E2}$  može se proračunati na isti način kao gore, ali treba imati na umu da je sada rad od vertikalnog opterećenja negativan, tj.

$$W_{E2} \approx -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n w_i (L - e_i - d_{Ri}) L \theta_p \quad (23)$$

i vanjski i unutarnji rad izraženi su virtualnim kutom rotacije  $\theta_p$ . Budući da vrijedi

$$W_E = W_I, \quad (24)$$

može se odrediti faktor opterećenja  $\xi$ . Iz jednadžbi (17) i (18) dobiva se

$$W_{E1} + W_{E2} = W_{I1} \quad (25)$$

Uvrštavanjem prethodno dobivenih izraza za mehanizam 1 dobiva se

$$\begin{aligned} \xi \sum_{i=1}^n [F_i H_i] \theta_p + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [w_i (L - e_i - d_{Ri})] L \theta_p = \\ = \sum_{i=1}^n [V_{ABi}] L \theta_p \end{aligned} \quad (26)$$

Iz toga proizlazi da je

$$\xi = \frac{L \cdot \sum_{i=1}^n \left[ V_{ABi} - \frac{1}{2} w_i (L - e_i - d_{Ri}) \right]}{\sum_{i=1}^n [F_i H_i]} \quad (27)$$

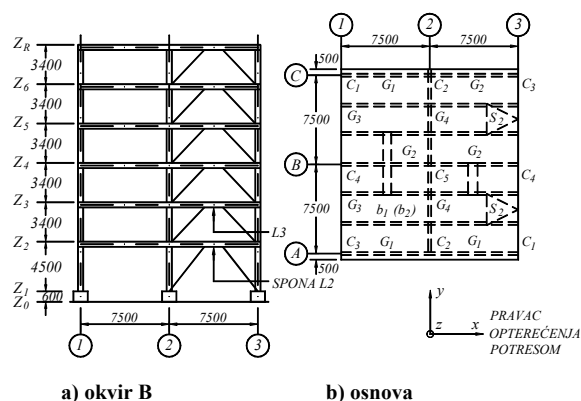
Analogno, za mehanizam 2 proizlazi da je

$$\xi = \frac{L \cdot \sum_{i=1}^n \left[ V_{ABi} + \frac{1}{2} w_i (L - e_i - d_{Ri}) \right]}{\sum_{i=1}^n [F_i H_i]} \quad (28)$$

Kada je  $\xi$  određen može se izračunati otpornost okvira na horizontalno opterećenje znajući da su horizontalne sile izražene kao  $\xi F_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ). Parametar  $\xi$  može se povezati s parametrom  $\alpha_u$  iz dijela 5 ovog rada koji je definiran u posljednjoj verziji Eurokoda 8. Za razliku od parametra  $\alpha_u$ , parametar  $\xi$  uzima u obzir utjecaj vertikalnog opterećenja kod nesimetričnih okvira. Kao što se vidi iz izraza (27) i (28), ovisno o smjeru horizontalnog opterećenja, vertikalno opterećenje uzrokuje smanjenje ili povećanje parametra  $\xi$  odnosno horizontalne otpornosti okvira.

### 3 Eksperimentalno ispitivanje modela šesterokatne građevine

Vrlo skupa pseudodinamička ispitivanja rađena su na jednoj šesterokatnoj građevini u prirodnoj veličini u Tsukubi i na modelu u Berkeleyju [22, 23, 25], u zajedničkom japansko-američkom projektu. Građevina je prikazana na slici 8., a sastoji se od jednog okvira s ekscentričnim dijagonalama (okvir B) i dva okvira bez dijagonala u pravcu opterećenja potresom (okviri A i C) [3]. Okomito na pravac opterećenja potresom su postavljena dva okvira s centričnim dijagonalama (okviri 1 i 3) te okvir bez dijagonala (okvir 2). Ovdje će se pokazati neke od dobivenih rezultata na modelu te građevine.



Slika 8. Konstrukcija u prirodnoj veličini u Tsukubi

Modelu građevine na slici 8. je za ispitivanja unesena ukupna energija  $E_I$  (Input energy). Ova je energija uravnotežena u konstrukciji modela kinetičkom energijom  $E_K$  (Kinetic energy), koja je proporcionalna kvadratu apsolutne brzine, zatim energijom deformacija  $E_S$  (Strain energy), koja se apsorbira u konstrukciji njezinom elastičnom deformacijom, zatim energijom nazvanom energija prigušenja  $E_\mu$  (Viscous damped energy), koja se troši u konstrukciji prisustvom viskoznog prigušenja, a proporcionalna je relativnoj brzini, i najznačajnijim faktorom trošenja energije u konstrukciji koji je rezultat neelastične deformacije konstrukcije (pa je zbog toga implicitno povezana s oštećenjem konstrukcije), zbog čega se troši tzv. neelastična energija deformacije  $E_H$  (Inelastic strain energy).

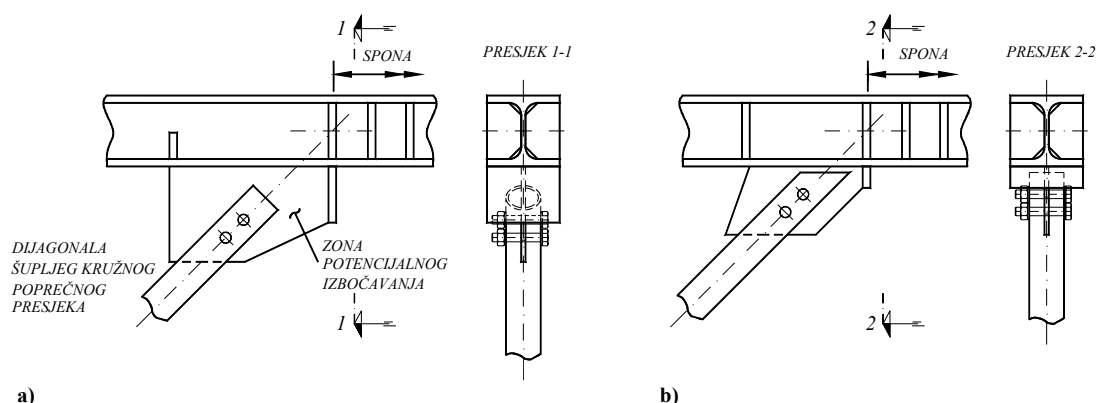
Znači da se bilanca energije modela može predstaviti relacijom:

$$E_I = E_K + E_S + E_\mu + E_H \quad (29)$$

Za nivo opterećenja modela kada konstrukcija ostaje u stanju uporabljivosti primijenjen je potres Taft-08, kod kojeg je vršno ubrzanje veličine 0,08 g. Tada je ustanovljeno da je trošenje unijete energije u konstrukciju modela izvršeno sa  $E_\mu$ . Za nivo opterećenja modela kada konstrukcija doživljava oštećenja (damageability level test) primijenjen je potres Taft-27, kod kojeg je vršno ubrzanje 0,27 g. U ovom je slučaju trošenje unijete energije u konstrukciju modela izvršeno preko  $E_H$  i  $E_\mu$ .

Primijećeno je da je trošenje energije, kao rezultat neelastične deformacije konstrukcije, bilo koncentrirano u donje dvije posmične spona L2 i L3 (slika 8.). Treba naglasiti da kapacitetom trošenja energije modela dominira upravo kapacitet trošenja energije putem posmičnih spona. U ovom slučaju, primjenom potresa Taft-57, posmičnim je sponama utrošeno više od 90% unijete energije, pri čemu je više od 70% unijete energije utrošeno samo u posmičnoj sponi L2.

Neelastično ponašanje posmične spona može biti podijeljeno u dvije faze: prva predstavlja stanje spona u raz-



Slika 9. Veza dijagonale sa sponom preko čvornog lima: a) detalj s mogućim izbočivanjem čvornog lima, b) poboljšani detalj

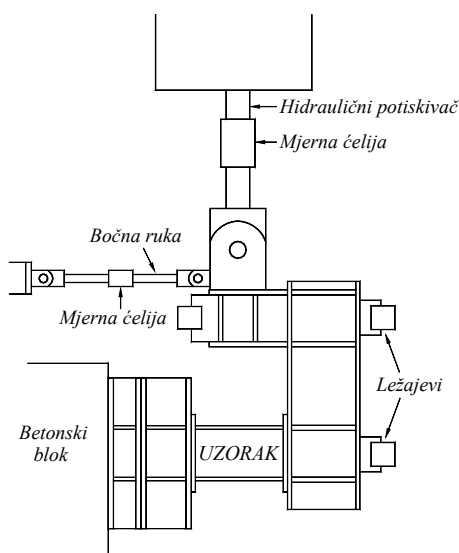
doblju prije izbočivanja njezina hrpta, dok druga predstavlja stanje spona nakon izbočivanja njezina hrpta. Trošenje energije u sponi L2 bilo je najveće za trajanja prve navedene faze, dok nakon izbočivanja hrpta spona dolazi do opadanja trošenja energije. Međutim, nakon izbočivanja hrpta spona L2 dolazi do povećanja energije koja se troši u pomičnoj sponi L3.

Veza dijagonale sa sponom kod ovog modela ostvarena je čvornim limom (slika 9.a). Takav detalj veze nije se pokazao dobrim pri eksperimentalnom ispitivanju. Otkazivanje veze manifestirano je jakim izbočivanjem čvornog lima u dijelu između dijagonale i spona. To je izbočivanje pospješeno djelovanjem negativnog momenta savijanja grede, koji je proizveo tlačno naprezanje velikog intenziteta duž dijela čvornog lima između dijagonale i spona. Poboljšana veza prikazana je na slici 9.b. To je poboljšanje ostvareno tako što je kraj dijagonale odsječen paralelno s gredom i lociran što bliže gredi. Osim toga ojačan je i dio ruba čvornog lima prema sponi. Ponovno napravljeno eksperimentalno ispitivanje s takvim detaljem veze dalo je jako dobre rezultate.

#### 4 Eksperimentalna ispitivanja seizmičkih spona kao izdvojenih dijelova konstrukcije

Umjesto da se rade eksperimenti na kompletnom sustavu okvira s ekscentričnim dijagonalama, kod kojeg je, kao što je pokazano, spona najvažniji element, najekonomičnije je izdvojiti samo sponu kao najkritičniji element i na njoj raditi eksperimente [10]. Izdvajanje seizmičke spona iz ostatka konstrukcije iziskuje uspostavu rubnih uvjeta koji će što je moguće više odgovarati očekivanom stanju u konstrukciji. Na slici 10. shematski je prikazana naprava za ispitivanje. Sila se preko hidrauličnog potiskivača unosi kao ciklična, pri čemu se generiraju histerezne petlje. Opterećenje se prenosi od naprave do uzorka preko elementa L oblika koji klizi na tri ležaja. Uzorak je spojen na napravu preko čelnih ploča. Svi spojevi su izvedeni tako da mogu prihvatiti sile nešto veće nego što su sile potpune plastifikacije poprečnog

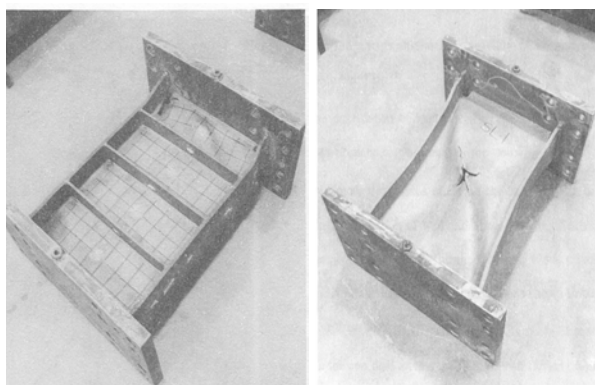
presjeka elementa. Krhki slom spoja može ugroziti duktilno ponašanje cjelokupnog okvira.



Slika 10. Tlocrtna shema naprave kojom se u sponi simuliraju rezne sile

Za ispitivanje odabrani su američki valjani "I" profili kvalitete čelika S235 (ASTM A36) u prirodnoj veličini. Ispitane su dvije kategorije seizmičkih spona: kratke i dugačke spona [1].

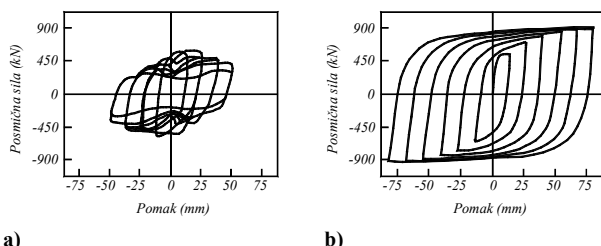
Uzorci kratkih spona odabrani su tako da se odredi do koje se mjere mogu poboljšati osobine spona s ukrucivanjem hrpta, kako bi se što više spriječilo izbočivanje hrpta. Na slici 11. su snimke slomljenih uzoraka bez ukruta hrpta i s tri para ukruta hrpta postavljenih na jednakim razmacima. Ovi uzorci jasno pokazuju da ukrucene spona imaju veću sposobnost trošenja energije. Kod ukrucene će se spona trošenje energije prije dogoditi neelastičnom posmičnom deformacijom, nego neelastičnim izbočivanjem hrpta. Kada je izbočivanje spriječeno, neelastične se posmične deformacije jednoliko raspodjeljuju po sponi, dok pri izbočivanju postoji težnja koncentriranju deformacija.



a) uzorak bez ukruta hrpta      b) uzorak s tri para ukruta hrpta

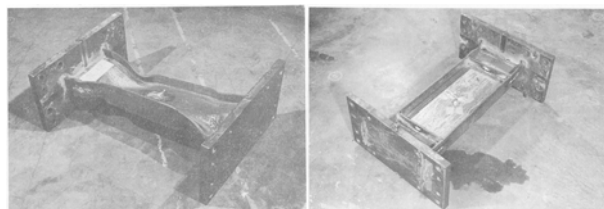
Slika 11. Snimke slomljenih uzoraka kratkih spona

Na slici 12.a prikazana je histerezna petlja ponašanja uzorka bez ukruta hrpta, dok je na slici 12.b prikazana histerezna petlja ponašanja uzorka s tri para ukruta hrpta postavljenih na jednakim razmacima. Uočava se da je dobivena histerezna petlja tipa „strain hardening“, što znači da povećanjem posmične sile spone dolazi do povećanja njezine krutosti. Ovakav tip „strain hardening“ histerezne petlje omogućava popuštanje materijala spone odvija po cijeloj duljini spone. Sa slike 12. uočava se drastična razlika u ponašanju spone iste duljine bez ukrutenja i s ukrutenjem njezina hrpta.



a)      b)  
Slika 12. Histerezne petlje ponašanja uzorka 1 i 4: a) uzorak bez ukruta hrpta b) uzorak s tri para ukruta hrpta

Uzorci dugačkih spona odabrani su tako da se naglasi trošenjeenergije savijanjem. Kako bi se postigle spona u kojima savijanje ima veći učinak, upotrijebljeni su poprečni presjeci manjih visina.



a) uzorak bez ukruta hrpta      b) uzorak s ukrutama hrpta

Slika 13. Snimke slomljenih uzoraka dugačkih spona

Pokazalo se da dulje spona imaju lošije ponašanje nakon izbočivanja nego što su to pokazale kraće spona. Razlog lošijeg ponašanja jest u nesposobnosti pojasnice da se

odupru izbočivanju. Izbočivanje pojasnice uzrokovalo je značajno bočno izvijanje uzorka u cjelini, iako je na oba kraja bila spriječena rotacija (slika 13.a).

Način ukrućivanja primijenjen kod uzorka na slici 13.b, gdje su ukrute hrpta postavljene na udaljenosti od svakog kraja spone za jednu širinu pojasnice, efikasno je onemogućio bočno izvijanje spone.

### 5 Primjena koncepta projektiranja čeličnih okvira s ekscentričnim dijagonalama u europskoj normi Eurokod 8-1

Da bi konstrukcija posjedovala kapacitet nošenja sila potresa te da bi se osiguralo njezino nelinearno ponašanje, poznato je da se ona projektira na djelovanje sila koje su manje od onih kada je odziv konstrukcije elastičan (linearan) [2, 5, 8]. Da bi se izbjegla nelinearna analiza konstrukcije, kapacitet trošenja energije u konstrukciji uzima se u obzir linearnim proračunom koji je zasnovan na reduciranom elastičnom spektru odziva ubrzanja podloge.

Takav reducirani elastični spektar nazvan je proračunskim spektrom, a redukcija je izvršena uvođenjem posebnog faktora ponašanja  $q$ . Faktor ponašanja  $q$  predstavlja sposobnost konstrukcije da apsorbira i troši energiju unijetu u konstrukciju potresom. To trošenje energije ostvaruje se nelinearnim ponašanjem konstrukcije, odnosno njezinim oštećenjem, na koje se računa pri radu s proračunskim silama.

Potresno otporne čelične građevine projektiraju se prema jednom od sljedećih konceptata [27]:

- koncept a) ponašanje konstrukcije sa slabim trošenjem energije
- koncept b) ponašanje konstrukcije s velikim trošenjem energije

U konceptu a) posljedice djelovanja mogu se proračunati na temelju elastičnoga proračuna [6] bez razmatranja značenja nelinearnog ponašanja materijala. Pri uporabi proračunskoga spektra [2, 5], osnovna vrijednost faktora ponašanja  $q$  kreće se od 1,5 – 2 (u tablici 1. podcrtana je preporučena vrijednost). U slučaju da nije ispunjen zahtjev pravilnosti po visini faktor ponašanja  $q$  treba korigirati, ali ne smije se uzeti manji od 1,5. Ako je osnovna vrijednost  $q$  uzeta veća od 1,5, potresno otporni elementi konstrukcije trebaju biti u razredima poprečnog presjeka 1, 2 ili 3.

U konceptu b) uzima se u proračun sposobnost dijelova konstrukcije (a to su područja u kojima dolazi do trošenja seizmičke energije) da se ponašaju nelinearno. Pri uporabi proračunskoga spektra, osnovna vrijednost fak-



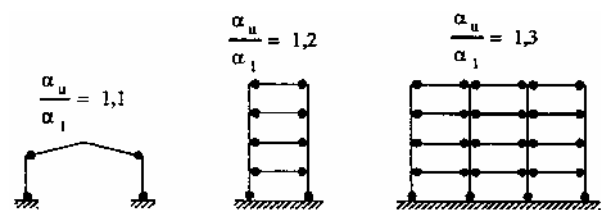
tora ponašanja  $q$  uzima se veća od vrijednosti uzete u konceptu a). Vrijednost  $q$  ovisi o razredu duktilnosti i tipu konstrukcije. Konstrukcije proračunane po konceptu b) trebaju pripadati razredima duktilnosti konstrukcije DCM (srednja) ili DCH (visoka). Ti razredi odgovaraju povećanoj sposobnosti konstrukcije da utroši energiju u plastičnim mehanizmima.

Tablica 1. Razredi duktilnosti i područje osnovnih vrijednosti faktora ponašanja  $q$

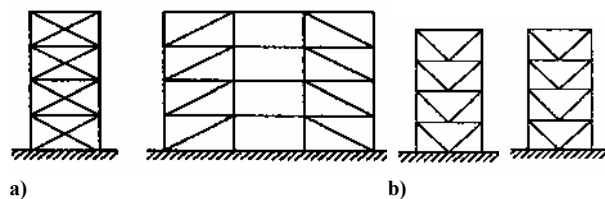
Koncept projektiranja	Razred duktilnosti (DC) konstrukcije	Područje osnovnih vrijednosti faktora ponašanja $q$
koncept a)	DCL (niska)	$\leq 1,5 - 2$
koncept b)	DCM (srednja)	$\leq 4$ također je uvjetovano vrijednosti ma iz tablice 2.
	DCH (visoka)	uvjetovano je samo vrijednostima iz tablice 2.

Tablica 2. Referentne vrijednosti faktora ponašanja  $q$  za sustave regularne po visini

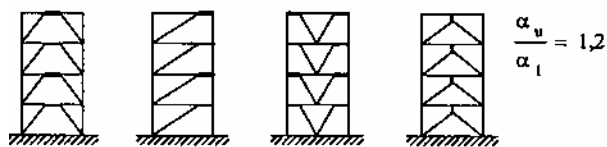
Tip konstrukcije	Klasa duktilnosti	
	DCM	DCH
okviri bez dijagonala	4	$5\alpha_u/\alpha_1$
okviri s centričnim dijagonalama	4	4
		2,5
okviri s ekscentričnim dijagonalama	4	$5\alpha_u/\alpha_1$



Slika 14. Okviri bez dijagonala (područja trošenja seizmičke energije su u gredama i spojevima stupova s temeljima)



Slika 15. Okviri s centričnim dijagonalama: a) trošenje seizmičke energije samo u vlačnim dijagonalama; b) trošenje seizmičke energije u vlačnim i tlačnim dijagonalama



Slika 16. Okviri s ekscentričnim dijagonalama (trošenje seizmičke energije u sponama opterećenim na savijanje ili posmik)

Za pravilne konstrukcijske sustave, faktor ponašanja  $q$  uzima se s osnovnim vrijednostima danim u tablici 2. Ako je građevina nepravilna po visini, vrijednosti  $q$  iz tablice 2. trebaju se smanjiti za 20%. Za građevine koje su pravilne u tlocrtu, ako nisu izvedeni izrazi za vrijednosti kvocijenta  $\alpha_u / \alpha_1$ , na slikama 14. do 16. su približne vrijednosti ovih kvocijenata. Najveća vrijednost  $\alpha_u / \alpha_1$  može biti 1,6.

$\alpha_1$  - je parametar s kojim treba pomnožiti horizontalne proračunske seizmičke sile (pri čemu sve ostale proračunske sile ostaju nepromijenjene) da bi dobile takve vrijednosti za koje bi najnepovoljnije opterećen poprečni presjek konstrukcije dostignuo svoje potpuno plastificiranje

$\alpha_u$  - je parametar s kojim treba pomnožiti horizontalne proračunske seizmičke sile da bi one dobile takve vrijednosti za koje bi određeni broj poprečnih presjeka dostignuo svoje potpuno plastificiranje, pri čemu predmetna konstrukcija postaje kinematički labilan mehanizam.

Kod elemenata u kojima se troši seizmička energija pri tlaku ili savijanju mora biti osigurana dovoljna lokalna duktilnost ograničavanjem kvocijenta širine i debljine poprečnog presjeka  $b/t$  (lokalna vitkost) prema razredima poprečnog presjeka. Ovisno o razredu duktilnosti i faktoru ponašanja  $q$  upotrijebljenim u proračunu, u tablici 3. navedeni su zahtjevi s obzirom na razrede poprečnog presjeka čeličnih elemenata u kojima se troši seizmička energija.

Tablica 3. Zahtjevi za razred poprečnog presjeka

Razred duktilnost i	Faktor ponašanja $q$	Razreda poprečnog presjeka
DCM (srednja)	$1,5 < q \leq 2$	razred 1, 2 ili 3
	$2 < q \leq 4$	razred 1 ili 2
DCH (visoka)	$q > 4$	razred 1

Seizmičke sponne se razvrstavaju u tri kategorije prema tipu razvoja plastičnog mehanizma:

- kratke sponne, kod kojih se energija troši plastificiranjem posmikom

- dugačke spone, kod kojih se energija troši plastificiranjem savijanjem
- srednje duge spone, kod kojih plastični mehanizam nastaje savijanjem i posmikom.

Razredba se provodi prema duljini spona  $e$ . Za "I" presjeke kategorije su:

$$\text{- kratke spone } e < e_s = 1,6 M_{p,spone} / V_{p,spone} \quad (30)$$

- dugačke spone

$$e > e_L = 2,5 M_{p,spone} / V_{p,spone} \quad (31)$$

$$\text{- srednje duge spone } e_s < e < e_L \quad (32)$$

gdje je:

$M_{p,spone}$  moment potpune plastičnosti u sponi

$V_{p,spone}$  poprečna sila potpune plastičnosti u sponi.

## 6 Konstrukcijske preporuke

Okviri s ekscentričnim dijagonalama razvrstani su u dvije osnovne kategorije. Prva kategorija kada seizmičke spone popuštaju pri posmiku, tj. kratke spone, te druga kategorija kada seizmičke spone popuštaju pri savijanju, odnosno dugačke spone.

Kratke je spone potrebno ukrutiti s najmanje dva para ukruta hrpta na jednakim razmacima. Ukručivanje poboljšava sposobnost trošenja energije u seizmičkoj sponi tako da odgađa neelastično izbočivanje hrpta, te usporava opadanje sposobnosti nošenja opterećenja kod seizmičke spone kontrolirajući amplitudu pomaka izvan ravnine hrpta. Trošenje energije kod ukrucene spona prije će se dogoditi neelastičnom posmičnom deformacijom, nego neelastičnim izbočivanjem hrpta.

Dugačke je spone potrebno ukrutiti s parom ukruta hrpta na udaljenosti od svakog kraja spona za širinu pojasnice. Ponašanje dugačkih spona u praksi se općenito pokazalo loše u odnosu prema kratkim sponama jer dulje spona imaju manju krutost i posjeduju manji kapacitet za trošenje energije. Razlog lošijem ponašanju jest u nesposobnosti pojasnice da se odupru izbočivanju. Stoga se preporučuje upotreba kratkih spona u praksi, kod kojih se popuštanje materijala ostvaruje posmičnim silama.

Kritični faktor koji utječe na neelastično ponašanje spona jest njezina duljina, a toj duljini su u korelaciji kapacitet trošenja energije i mehanizam rušenja sustava.

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

## 7 Zaključak

Čelični je okvir s ekscentričnim dijagonalama složeni sustav u kojem je kombinirana krutost konvencionalnog okvira s centričnim dijagonalama s duktilnošću i kapacitetom trošenja energije konvencionalnog okvira bez dijagonala. Kratki segment grede preko kojeg se uzdužna sila u dijagonali prenosi u drugu dijagonalu ili stup naziva se seizmičkom sponom. U seizmičkoj se sponi pojavljuje cjelokupno neelastično djelovanje kao najduktilnijem elementu sustava.

Eksperimentalno ispitani modeli pokazali su veliku elastičnu krutost te da posjeduju veoma dobre karakteristike trošenja energije u neelastičnom području. Nakon sloma prve seizmičke spona nije došlo do rušenja konstrukcije, što pokazuje da određeni broj seizmičkih spona mora popustiti prije nego konstrukcija bude u opasnosti od totalnog rušenja. Pokazano je da se seizmička spona treba locirati samo na jednoj strani dijagonale, budući da spona locirana na drugoj strani dijagonale nema značajan učinak pri gubljenju seizmičke energije.

Neelastični su pomaci katova zbog opterećenja potresom jednakomjerno raspodijeljeni na sve katove. Jednolična raspodjela pomaka katova znači da se niti jedan element ne deformira pretjerano, ali s druge strane to znači da je oštećenje također jednolično raspodijeljeno na sve katove konstrukcije. Nakon ekstremnog potresa, oštećenje može biti prilično veliko, ali je ono lakše popraviti nego oštećenja kod drugih tipova okvira.

Provjerom je pokazano da težina čelika koja je potrebna kod okvira s ekscentričnim dijagonalama može biti do 30% manja od one koja je potrebna kod okvira bez dijagonala.

### Napomena

Istraživanja opisana u ovome radu obavljena su u okviru znanstvenog projekta "Građevinske konstrukcije u seizmičkim područjima Hrvatske" koji financira Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske (0114006)

## LITERATURA

- [1] Bulić, M.: *Ponašanje i konstruiranje čeličnih okvira s ekscentričnim dijagonalama u uvjetima seizmičkog opterećenja*, Magistarski rad, Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2005.
- [2] Čaušević, M.: *Potresno inženjerstvo*, Školska knjiga, Zagreb, 2001.
- [3] Čaušević, M.: *Ponašanje i konstruiranje čeličnih okvira s ekscentričnim dijagonalama u uvjetima seizmičkog opterećenja*, Zbornik 5. kongresa za potresno inženjerstvo, pp. 131-142, Bled, Slovenija, 1990.
- [4] Čaušević, M.: *Interaction of Eurocode 8 and Eurocode 3 in eccentrically braced steel frame design*, European Earthquake Engineering, Journal of the European Association for Earthquake Engineering, Patron Editore Publisher, Bologna, Italy, No.2, pp. 3-7, 1998.
- [5] Čaušević, M.: *State-of-the-art on aerodynamics of steel long-span bridges at the end of the second millennium*, INFORMATOLOGIA, 34, 2001, 3-4, Zagreb, pp. 252-258.
- [6] Dujmović, D.; Androić, B.; Džeba, I.: *Modeliranje konstrukcija prema Eurocode 3*, IA Projektiranje, Zagreb, 2004.
- [7] Engelhardt, M. D.; Popov, E. P.: *On Design of Eccentrically Braced Frames*, EARTHQUAKE SPECTRA, Vol.5, No.3, pp. 495-511, 1989.
- [8] Fajfar, P.: *A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design*, EARTHQUAKE SPECTRA, Vol. 14, No. 3, pp 573-592, 2000.
- [9] Gulay, G.; Boduroglu, H.: *An Algorithm for the Optimum Design of Braced and Unbraced Steel Frames Under Earthquake Loading*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.18, No.1., pp.121-128, January, 1989.
- [10] Hjelmstad, K. D.; Popov, E. P.: *Seismic Behavior of Active Beam Links in Eccentrically Braced Frames*, Report No. UCB/EERC-83/24, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 1983.
- [11] Kasai, K.; Popov, E. P.: *A Study of Seismically Resistant Eccentrically Braced Frames*, Report No. UCB/EERC-86/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1986.
- [12] Kasai, K.; Popov, E. P.: *General Behavior of WF Steel Shear Link Beams*, Journal of the Structural Division, Vol.112, No.2., pp.362-382, ASCE, February, 1986.
- [13] Kasai, K.; Popov, E. P.: *Cyclic Web Buckling Control for Shear Link Beams*, Journal of the Structural Division, Vol.112, No.3., pp.505-523, ASCE, March, 1986.
- [14] Malley, J. O.; Popov, E. P.: *Design Considerations for Shear Links in Eccentrically Braced Frames*, Report No. UCB/EERC-83/84, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1983.
- [15] Malley, J. O.; Popov, E. P.: *Shear Links in Eccentrically Braced Frames*, Journal of Structural Engineering, ASCE, September, 1984.
- [16] Mazzolani, F. M.: *Steel and Composite Structures in European Seismic Areas: Research, Codification, Design, and Applications*, EARTHQUAKE SPECTRA, Vol.19, No.2, pp. 415-452, 2003.
- [17] Mazzolani, F. M., et. al.: *Remarks on Behaviour of Concentrically and Eccentrically Braced Steel Frames*, Proceedings of the International Workshop organized by the European Convention for Constructional Steelwork in Timisoara, Romania, E&FN SPON, An Imprint of Chapman & Hall, London, pp. 310-323, 1994.
- [18] 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.
- [19] Mazzolani, F. M.; Piluso, V.: *Theory and Design of Seismic Resistant Steel Frames*, E&FN SPON, An Imprint of Chapman & Hall, London, 1996.
- [20] Mazzolani, F. M.; Gioncu, V.: *Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas*, Proceedings of the International workshop organised by ECCS, E&FN SPON, An Imprint of Chapman & Hall, London, 1994.
- [21] Popov, E. P.; Kasai, K.; Engelhardt, M. D.: *Advances in Design of Eccentrically Braced Frames*, Earthquake Spectra, Vol.3, No.1., 1987.
- [22] Powel, G. H.; Kanaan, A. E.: *DRAIN-2D, A General Purpose Computer Program for Dynamic Analysis of Inelastic Plane Structures*, EERC Report, University of California, Berkeley, 1973.
- [23] Roeder, C. W.; et. al.: *Seismic Testing of Full-scale Building*, Journal of the Structural Division, Vol.113, No.11, ASCE, 1987.
- [24] Roeder, C. W.; Popov, E. P.: *Eccentrically Braced Steel Frames for Earthquakes*, Journal of the Structural Division, Vol.104, No.3., pp.391-412, ASCE, March, 1978.
- [25] Whittaker, A. S.; Uang, C. M.; Bertero, V. V.: *Seismic Testing of Eccentrically Braced Dual Steel Systems*, Earthquake Spectra, Vol.5, No.2., pp.429-448, 1989.
- [26] *International Building Code* (United States), 2000.
- [27] *Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance*, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, European Committee for Standardization, prEN 1998-1, Brussels, December 2003.