

Primljen / Received: 20.6.2014.

Ispravljen / Corrected: 2.10.2014.

Prihvaćen / Accepted: 15.10.2014.

Dostupno online / Available online: 10.11.2014.

Procjena ponašanja "Pre-Northridge" priključaka na ekstremna opterećenja

Autori:



Dr.sc. **Iman Faridmehr**
Tehničko sveučilište u Maleziji
Građevinski fakultet
UTM građevinski istraživački centar
s.k.k-co@live.com



Izv.prof.dr.sc. **Mohd Hanim Osman**
Tehničko sveučilište u Maleziji
Građevinski fakultet
Odjel za konstrukcije i materijale
mhanim@utm.my



Izv.prof.dr.sc. **Mamood Md. Tahir**
Tehničko sveučilište u Maleziji
Građevinski fakultet
UTM građevinski istraživački centar
mahmoodtahir@utm.my



Mr.sc. **Ali Farokhi Nejad**
Tehničko sveučilište u Maleziji
Strojarski fakultet
ali17761@yahoo.com



Mr.sc. **Reza Hodjati**
Tehničko sveučilište u Maleziji
Građevinski fakultet
Odjel za konstrukcije i materijale
rezahodjati670@gmail.com

Prethodno priopćenje

Iman Faridmehr, Mohd Hanim Osman, Mamood Md. Tahir, Ali Farokhi Nejad, Reza Hodjati

Procjena ponašanja "Pre-Northridge" priključaka na ekstremna opterećenja

Katastrofalne posljedice djelomičnog urušavanja apartmana Ronan Point 1968. i potresa u Northridgeu 1994. razotkrile su osjetljivost čeličnih okvira izloženih ekstremnim opterećenjima. Izvješća ovih dvaju katastrofalnih događaja pokazala su značajnu ulogu priključka nosač-stup gdje su se pretežno događala oštećenja. Numeričko i eksperimentalno istraživanje provedeno je u skladu sa 2010 AISC seizmičkim odredbama i UFC 4-023-03 smjernicama. Nisko ciklično ponašanje i rotacijski kapacitet proizlaze iz analize gdje je lom u blizini sućeonog zavara bio način otkazivanja uzoraka.

Ključne riječi:

"Pre-Northridge" priključci, međukatni kut zaokreta, ponašanje pri seizmičkom i progresivnom kolapsu

Preliminary note

Iman Faridmehr, Mohd Hanim Osman, Mamood Md. Tahir, Ali Farokhi Nejad, Reza Hodjati

Evaluation of extreme load performance of pre-Northridge connections

Disastrous consequences of a partial collapse of the Ronan Point apartment in 1968, along with the 1994 Northridge earthquake, exposed the vulnerability of steel moment frames subjected to extreme loading. The reports of these two catastrophic events revealed the significant role of the beam-to-column connection where the damage was mainly formed. A numerical and experimental investigation was conducted in accordance with 2010 AISC Seismic Provisions and UFC 4-023-03 Guideline. An inadequate cyclic behaviour and rotational capacity resulted from the analysis where the fracture in the vicinity of groove welding was due to a poorly designed connection.

Key words:

pre-Northridge welded-bolted connection, interstorey drift angle, seismic and progressive collapse performance

Vorherige Mitteilung

Iman Faridmehr, Mohd Hanim Osman, Mamood Md. Tahir, Ali Farokhi Nejad, Reza Hodjati

Bewertung des Verhaltens von "Pre-Northridge" Verbindungen unter extremen Belastungen

Die katastrophalen Folgen des teilweisen Einsturzes der Wohnung Ronan Point 1968 und des Northridge-Erdbebens 1994 enthüllten die Verletzlichkeit von Stahlrahmenkonstruktionen unter extremen Belastungen. Berichte über diese katastrophalen Ereignisse weisen auf eine bedeutende Rolle der Verbindungen von Trägern und Säulen hin, die den größten Schaden vorzeigten. Numerische und experimentelle Untersuchungen sind nach der AISC seismischen Verordnung 2010 und den UFC 4-023-03 Richtlinien. Die Analysen weisen auf ein schlechtes zyklisches Verhalten und niedrige Rotationskapazität hin, wobei das Versagen in der Nähe der Schweißnaht sich als häufigster Versagensmodus herausstellte.

Schlüsselwörter:

"Pre-Northridge" Verbindungen, seismisches und progressives Einsturzverhalten

1. Uvod

Prije potresa u Northridgeu u Kaliforniji 1994., nije se pridavala velika važnost pouzdanosti konstrukcija i građevinskim propisima za spojeve u čeličnim okvirima, no posljedice potresa su uzrokovale ozbiljnu štetu na priključcima nosač-stup gdje se dogodila rotacija veća od maksimalno dopuštene. Ovaj neočekivani lom krte konstrukcije bio je u suprotnosti s projektiranom konstrukcijom, došlo je do disipacije energije stvaranjem duktilnih plastičnih zglobova u čeličnim nosačima. Tada su stručnjaci usmjerili svoju pozornost na ispitivanja takvih spojeva. Ispitivanje seizmičkog djelovanja na čelične okvire su proveli SAC Joint Venture, financiran od strane Savezne agencije za krizni menadžment, FEMA [1] u Sjedinjenim Državama, koji je objavio niz izvještaja poput FEMA 350 [2] i FEMA 351 [3], a odnose se na projektiranje spojeva čeličnih nosača otpornih na seizmičke aktivnosti. MD Engelhardt i AS Husain [4] proveli su ispitivanje cikličnim opterećivanjem na osam zavarenih čeličnih spojeva. Cilj je bio istražiti potrebu za dodatnim zavarima na priključcima nosač-stup. Rezultati su pokazali da su se plastične rotacije u gredi dogodile zbog pukotina u spoju koji je bio slab, a veze su popustile te su se grede slomile u/ili neposredno prije zavarenog dijela. 2005. godine Chen i Cheng-Chih i sur. [5] proveli su eksperimentalno i numeričko ispitivanje u kojem su ispitivali ponašanje pri cikličnom opterećenju "Pre-Northridge" priključaka.

Eksperimentalni rezultati pokazali su krte lom ruba nosača koji je iniciran pri dnu zavarenog dijela. Osim toga, numerička analiza je pokazala da koncentracija naprezanja može dovesti do loma grede. Kao posljedica toga, provedeno je opširno ispitivanje seizmičkog ponašanja konstrukcija od zavarenih čeličnih okvira [6-8]. Cilj ovog istraživanja bio je ustanoviti utjecaj pukotine u spoju na ponašanje čeličnih konstrukcija pri potresu. Prijevremeni lomovi zabilježeni su u svim ispitivanjima, a vrste prijeloma su slične onima s područja na kojem se dogodio potres. Danas se protokoli ispitivanja, navedeni u Dodatku S u AISC potresnim propisima [9], primjenjuju za poduzimanje kvalitetnih mjera za spojeve koji mogu preuzeti moment savijanja u specijalnim ili običnim čeličnim okvirima. Cilj takvih protokola za ispitivanje je omogućiti priključku podnošenje velikih neelastičnih deformacija pomoću kontroliranog duktilnog popuštanja u određenim načinima ponašanja.

Katastrofalne posljedice djelomičnog urušavanja tornja Ronan Point 1968. također su zabrinule znanstvenike u vezi s otpornosti konstrukcije na progresivni kolaps, baš kao i teroristički napad 11. rujna 2001. zbog kojeg se srušio World Trade Center. Do danas su izdane brojne knjige koje se bave tematikom progresivnog razaranja pri potresnom djelovanju. Khandelwal, K. i El-Tawil, S. [10] predstavili su 2007. numeričku simulaciju da bi prikazali ključne varijable koje utječu na formiranje lančanih aktivnosti u čeličnim okvirima otpornima na moment savijanja. U drugom numeričkom ispitivanju, Jinkoo Kim i Dawoon An [11] su proučavali utjecaj lančanih aktivnosti na razvoj progresivnog sloma čeličnih okvira. Rezultati su

pokazali da je maksimalni progib, uzrokovan naglim uklanjanjem stupa bio smanjen kada su lančane aktivnosti uzete u proračun. Također, Karns i suradnici [12] su 2009. testirali čelični okvir na eksploziju. Studija je obuhvaćala numeričke i eksperimentalne ocjene ponašanja priključka nosač-stup na eksploziju.

U drugoj studiji koju su proveli Chung-Che Chou i suradnici [13], tri priključka su sanirana zavarivanjem bočnih strana između stupa i grede, čime je potvrđena izvedba sanacije. Karakteristike priključka navedene su u nekoliko numeričkih i eksperimentalnih ispitivanja [12, 14-17]. Najveće iznenađenje u istraživanjima bila je činjenica da su polukrute veze osjetljivije na progresivni kolaps nego krute veze. Štoviše, dokazano je da se moment savijanja u gredi značajno smanjuje kad nastupe lančane reakcije. Zbog toga danas inženjeri pri projektiranju uzimaju u obzir progresivni kolaps. U Eurokodu EN 1991/01/07 [18] nalaze se norme koje se odnose na projektiranje zgrada na poznata i izvanredna djelovanja. Zasad u ovom propisu ne postoje norme koje se odnose na zaštitu stabilnosti građevine uslijed ratnih razaranja, terorističkih aktivnosti, eksplozija, djelovanja potresa ili požara. Ipak, projektanti u Ujedinjenom Kraljevstvu uzimaju u obzir norme za projektiranje u slučaju nerazmjernog progresivnog kolapsa kod visokih građevina (s pet i više katova) već 26 godina. Također su dani opći propisi o otporu konstrukcije na progresivni kolaps u BS 6399 [19], dok su posebne odredbe za čelične, betonske i zidane konstrukcije navedene u BS 5950 [20], BS 8110 [21] i BS 5628 [22]. Općenito se u praksi u Europi koriste tri alternativne mjere, nekada i zajedno, u svrhu postizanja robusne konstrukcije i smanjenja rizika od nerazmjernog progresivnog kolapsa. Spomenute mjere su sljedeće:

- smanjenje mogućnosti pojave slučajnog opterećenja
- izbjegavanje širenja mogućeg inicijalnog oštećenja zajedno s povećanjem statičke neodređenosti uključujući indirektnu metodu i metodu alternativnog puta prijenosa opterećenja
- projektiranje konstrukcije tako da podnosi slučajna opterećenja, takozvana metoda otpornosti na specifična opterećenja.

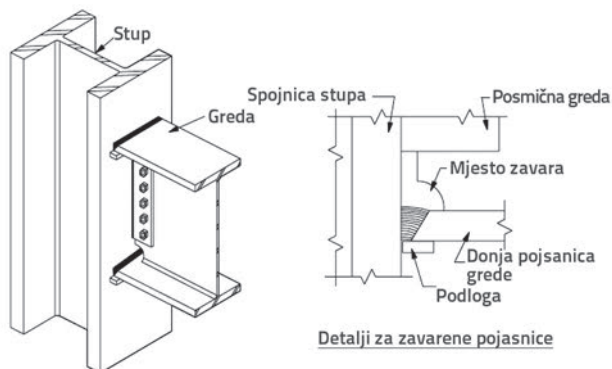
U SAD-u, propisi Odjela obrane (eng. *Department of Defence - DoD*) [23] i propisi Općih upravnih poslova (eng. *General Services Administration - GSA*) [24], sadrže detaljnu metodologiju za smanjenje mogućnosti pojave progresivnog kolapsa građevina. Osnovna analiza koja se upotrebljava preko ovih smjernica je metoda alternativnog puta (AP metoda). Ovakav pristup dopušta da se lokalno oštećenje dogodi kad je konstrukcija izložena ekstremnom opterećenju, ali se nastoje osigurati i alternativni putevi opterećenja kako bi se početna šteta mogla kontrolirati, a progresivni kolaps izbjeći. Pretpostavka je da se spoznajama o seizmičkom djelovanju može poboljšati otpornost čeličnih konstrukcija na kolaps. Međutim, seizmičko djelovanje uzrokuje drugačiji tip sile u konstrukciji u odnosu na progresivni kolaps. Drugim riječima, utjecaj lančanih aktivnosti nastalih tijekom progresivnog kolapsa na "Pre-Northridge" priključke još nije dovoljno istražen. Važno je napomenuti da se sposobnost priključka da podnosi vertikalna opterećenja putem niza mehanizama naziva lančana aktivnost. Glavni cilj ovog

istraživanja bilo je ispitivanje osjetljivosti priključka nosač-stup u slučaju ekstremnih opterećenja. Dakle, numeričke simulacije i eksperimentalni testovi su provedeni kako bi se proučile ključne varijable za projektiranje, posebno plastični zglobovi na mjestu priključka, koji utječu na otpornost zajedno s načinom otkazivanja u slučaju cikličnog opterećenja i progresivnog kolapsa koji je simuliran pomoću "push-down" analize. Zbog toga, međukatni kut zaokreta koji je u skladu s Propisima o potresima iz 2010. [9], kao i ograničenja rotacije plastičnog zgloba, određena u DoD [23] jesu osnovni kriteriji za određivanje seizmičko progresivno djelovanje. Modeli su smanjeni na šestinu svoje stvarne veličine, a napravljeni su u Laboratoriju za materijale i konstrukcije na Tehničkom sveučilištu u Maleziji (UTM), a numerički dio je proveden metodom konačnih elemenata u računalnom programu ABAQUS [25].

2. Ponašanje "Pre-Northridge" priključaka tijekom ekstremnih opterećenja

Nakon potresa u Northridgeu, izvješća o oštećenjima pokazala su da su se u priključku pukotine donjeg ruba grede dogodile zbog nedovoljno elastičnih deformacija grede (slika 1.). S ekonomskog stajališta, potres u Northridgeu 1994. izazvao je jako veliku materijalnu štetu te izazvao gubitke milijuna dolara u građevinskom sektoru. Opsežna istraživanja diljem svijeta provedena su kako bi se smanjila takva neočekivana šteta. Postoje dva strateška pristupa za poboljšanje detalja spojeva:

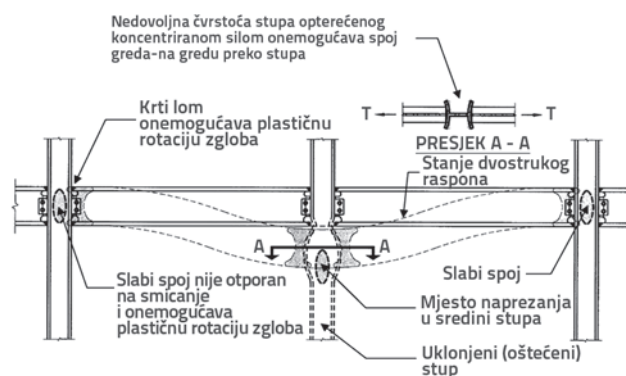
- Strategija ojačanja: elementi kao što su pokrovne ploče, stropne ploče i vertikalne grede koriste se za nadogradnju ili povećanje nosivosti na priključnom području s obzirom na osnovne elemente (grede ili stupove). Ta strategija omogućava "guranje" plastičnog zgloba dalje od osjetljivog mjesta na području spoja.
- Strategija oslabljenja: najistaknutiji primjer ove strategije je reducirani presjek grede (eng. *Reduced Beam Section - RBS*) poznat pod nazivom RBS spoj ili priključak, gdje je element grede (npr. pojasnica) namjerno oslabljen u savijanju (smanjenjem širine pojasnice) kako bi se stvorio "osigurač" za mehanizam koji doprinosi rastezanju bez oštećenja u spoju.



Slika 1. Tipični "Pre-Northridge" (zavarena pojasnica – vijčano spojen hrbat) priključak pune otpornosti

U graditeljskoj struci odavno postoji pretpostavka da su konstrukcije koje su projektirane na seizmičko opterećenje otpornije na progresivni kolaps. Drugim riječima, postoji pretpostavka da će projektiranje s obzirom na seizmičko djelovanje dovesti do boljeg otpora konstrukcije na progresivni kolaps. Naime, zbog nedostatka smjernica za progresivni kolaps, istraživači i ispitivači se trude pronaći način projektiranja za slučajeve seizmičke aktivnosti, ali ne postoji sustavno istraživanje koje pokazuje kako projektiranje na seizmiku utječe na ponašanje konstrukcije u trenutku progresivnog kolapsa. Ovo je važan problem koji se mora naglasiti zato što seizmičke sile zahtijevaju različite zahtjeve na konstrukciju u usporedbi s progresivnim kolapsom.

Na primjer, kod okvira, seizmičke sile uzrokuju veliki moment u spoju grede i stupa, a slom je povezan s djelovanjem velikih vlačnih sila, što može negativno djelovati na veze projektirane na seizmičke aktivnosti. U slučaju sloma stupa, lančana reakcija greda je ovisna o svojstvima spoja, prikazanima na slici 2. Za sada ne postoji niti jedna studija koja bi pokazala da "Pre-Northridge" priključci posjeduju odgovarajuću otpornost koja bi dopustila razvoj plastičnih zglobova na krajevima grede zajedno s velikim vlačnim silama. Stoga ponašanje ovakvih konstrukcija pri opterećenjima predstavlja problem koji je nužno ispitati prije nego što se ovakvi sustavi koriste u slučajevima progresivnog kolapsa.



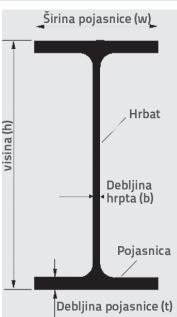
Slika 2. Nemogućnost zaštite od progresivnog kolapsa nakon otkazivanja stupa, GSA [19]

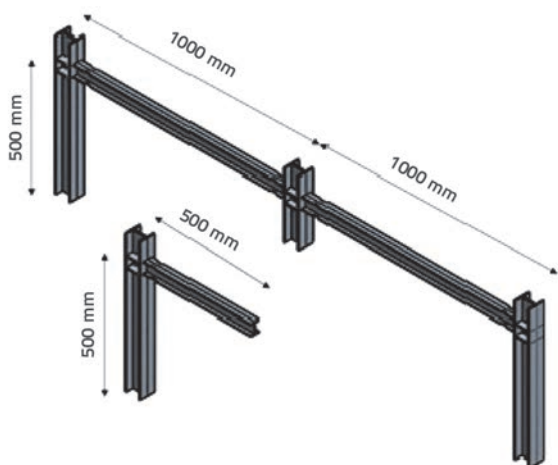
3. Istraživačka metodologija i postavke modeliranja

3.1. Istražene studije slučajeva

Studije ovoga istraživanja obuhvaćaju šest puta umanjene priključke nosač-stup, gdje su elementi izvedeni od I - profila, i koji su izloženi cikličnim i "push-down" ispitivanjima. Okviri su projektirani u skladu sa zahtjevima "Odredbi za čelične konstrukcije" (ANSI/AISC 360-10) [9]. Detalji spomenutih predloženih priključaka za procjenu seizmičkog i progresivnog kolapsa su prikazani na slici 3. i u tablici 1.

Tablica 1. Greda, stup i dijelovi spoja

Element	Veličina [mm]	Presjek	Moment inercije [mm ⁴]
Presjek grede Visina Debljina hrpta Širina pojasnice Debljina pojasnice	50 2 40 2		104000
Presjek stupa Visina Debljina hrpta Širina pojasnice Debljina pojasnice	70 4 70 4		690000



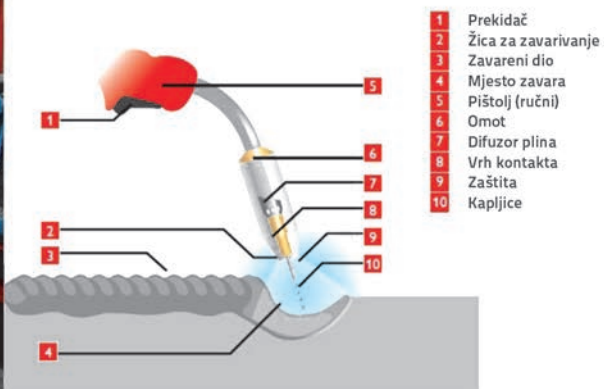
Slika 3. Studije slučajeva za procjenu seizmičkog i progresivnog kolapsa

3.2. Izrada i postavke za modeliranje

Ispitni uzorci su se izrađivali zajedničkom suradnjom sveučilišnog laboratorijskog osoblja i komercijalnih proizvođača. Metoda plinskog zavarivanja metala (GMAW) primjenjuje se u ovom istraživanju, a poznatija je kao MIG (eng. *metal inert gas*),

elektrolučni postupak zavarivanja koji koristi stalno dovođenje žice kao elektrode za zavarivanje (slika 4.). U trenutku kada započinje postupak zavarivanja, električni luk između zavarenog dijela i vrha žice se zatvara. Topljenje žice odvija se na progresivni način pri istoj brzini na kojoj se puni i na taj način je spoj zavaren. Da bi se zaštitio zavareni dio i električni luk od kontaminacije iz okoline, mlaznica sa žicom ugrađena je u cijev za zavarivanje i na taj način prenosi inertni (nereaktivni) plin. Brzina, slobodna distribucija, kontinuitet i pouzdanost automatskog zavarivanja, osim kontrole i svestranosti ručnog zavarivanja, navedene su kao prednosti ove vrste zavarivanja. Ova tehnika se koristi u zadnje vrijeme vrlo često. Da bi se provelo uspješno MIG zavarivanje kao poluautomatski proces, korišten je ručni pištolj.

Napon, brzina, debljina, luk i dužina žice navedeni su kao zajednički parametri zavarivanja, a metoda prijenosa metala je određena naponom luka i žice. Kad je zavarivanje gotovo, koristi se vapno da bi se ispitala popustljivost u spoju grede i stupa. Seizmički i progresivni kolaps procijenjen je ispitivanjem uzoraka umanjениh na šestinu stvarne veličine, uzimajući u obzir različite propise za opterećenja i bočne sigurnosne sklopove (slika 5.). Nedostaje još slučaj stupa (metoda alternativnog puta), a on je dio ispitivanja metodom progresivnog kolapsa gdje kratkotrajan katastrofalan događaj uništava unutarnji stup konstrukcije. U



Slika 4. Proces zavarivanja i dijelovi opreme

metodi alternativnog puta, vertikalno opterećenje se postupno povećava korištenjem hidrauličnog uređaja na vrhu stupa kao što je prikazano na slici 6.

Obje strane greda bočno su pridržane na udaljenosti 150 i 800 mm od središnje osi stupa. Hidraulični pseudodinamički pogon od 250 kN, s maksimalnim hodom klipa od 500 mm do vrha grede izabran je za provedbu i procjenu cikličnog ispitivanja uzoraka (slika 6.). Bočna pridržanja greda postavljena su na sredini raspona nosača od osi stupa. Središnji raspon nosača na sredini stupa je mjesto na kojem su pričvršćene obje strane nosača. Tenzometri su postavljeni na pretpostavljenim mjestima zglobova na čeličnim nosačima, najčešće na krajevima, kako bi se izmjerile unutrašnje sile. Da bi se dobila što kvalitetnija mjerenja vertikalnih progiba na mjestu uklonjenog stupa i vrha nosača, korišteni su linearni varijabilni diferencijalni transformatori (LVDT). Osim toga, u ovom istraživanju postavljene su sljedeće pretpostavke:

- Promatraju se uzorci koji su ograničeni u ravni (radi se samo o dvodimenzionalnim ispitivanjima). Utjecaj izvan ravnine grede na zglob je zanemaren.
- Primjenjen je konzervativni pristup, temeljen na zanemarivanju djelovanja stropne ploče.
- Za početne uvjete postavljena su nulta naprezanja koja su rezultat gravitacijskih opterećenja i direktnih opterećenja pri brzini nula.

Da bi se uspješno pretvorio smanjeni model u onaj u punoj veličini, potrebno je koristiti faktore mjerila: faktor mjerila za elastičnost materijala S_E , faktor mjerila za naprezanja S_σ , faktor mjerila za duljinu S_l , faktor mjerila za deformacije S_ϵ , i faktor mjerila za masu (SM), koji se obično koristi u dinamičkim simulacijama. Budući da su prototip i model u ovoj studiji izrađeni od istog čelika, onda je $S_E = 1$, [26]. Da

bi se izračunali navedeni faktori modela, koriste se sljedeće formule:

$$S_l = \frac{\text{duljina prototipa}}{\text{duljina modela}} = \frac{6}{1} = 6 \quad (1)$$

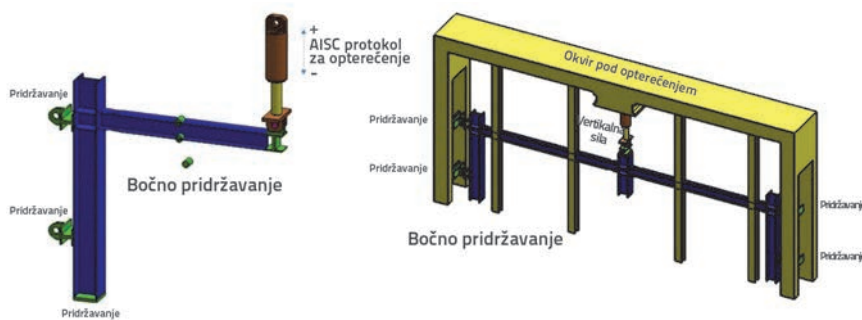
$$S_\epsilon = \frac{S_M}{S_l} = 1 \quad (2)$$

$$S_\sigma = S_E \cdot S_\epsilon = S_E \quad (3)$$

Jednadžbe (1) i (3) služe da bi se dobili svi ostali faktori modela. Vrijednosti faktora modela prikazane su u tablici 2.

Tablica 2. Faktori modela za pretvorbu modela u stvarnu veličinu

Veličine	Simbol	Vrijednost faktora modela
Svojstva materijala		
Modul elastičnosti	S_E	1
Deformacija	S_ϵ	1
Naprezanje	S_σ	1
Poissonov koeficijent	ν	1
Geometrija		
Linearni pomak	S_l	6
Površina	S_l^2	36
Moment inercije	S_l^4	1296
Moduli elastičnosti i plastičnosti	S_l^3	216
Opterećenja		
Koncentrirana opterećenja	$S_E S_l^2$	36
Moment torzije	$S_E S_l^3$	216
Poprečna sila	$S_E S_l^2$	36



Slika 5. Uzorci modela koji se ispituju na seizmički i progresivni kolaps



Slika 6. Dinamički pogon i hidraulični uređaj koji služi za procjenu pri seizmičkom i progresivnom kolapsu

3.3. Postupak modeliranja konačnim elementima

U radu je korišten računalni program ABAQUS/STANDARD [20] kako bi se izradili odgovarajući modeli s velikim deformacijama i naprezanjima. Primijenjen je puni C3D8R element s osam čvorova, koji ima šest stupnjeva slobode, a to su tri komponente sile i tri momenta, kako bi se dobili precizniji rezultati za spomenuti model. Nadalje, korištena je točna krivulja naprezanje-deformacija kako bi se pravilno modeliralo ponašanje materijala [27]. Izrazi (4) do (7) koriste se da bi se utvrdili pomaci i deformacije:

$$e = \frac{\Delta l}{l} \quad (4)$$

$$S = \frac{P}{A_0} \quad (5)$$

$$\sigma = S(1+e) \quad (6)$$

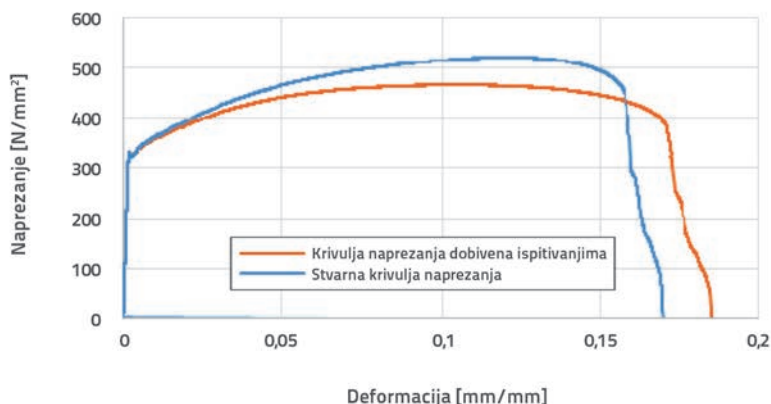
$$\varepsilon = \ln(1+e) \quad (7)$$

gdje su σ i ε vrijednosti stvarnih naprezanja i deformacija određene jednadžbama (6) i (7), dok su e i S izmjerene deformacije i naprezanja dobiveni iz jednoosnog testa na rastezanje prema jednadžbama (4) i (5). Krivulje stvarnih naprezanja i deformacije te naprezanja i deformacija dobivenih ispitivanjima prikazane su na slici 7.

Prema ispitivanju na rastezanje (vlak), granica rastezanja je 320 MPa, vlačna čvrstoća je 510 MPa, a produženje je 18 %. Čelična ploča korištena u ovom istraživanju ima svojstva materijala slična kao kvaliteta 50 prema američkom standardu ASTM A572-07, što je jednako europskoj normi S420M / EN 10025-4. U svim slučajevima proračuna metodom konačnih elemenata, temelj stupa je imao spriječene sve stupnjeve slobode tijekom nanošenja opterećenja te kontrole vertikalnih pomaka. Za ispitivanje je izabrano kvazistatičko opterećenje s brzinom opterećenja od 2 mm/s. Da bi model imao gušću mrežu elemenata, korišten je se heksaedarski element u svim modelima.

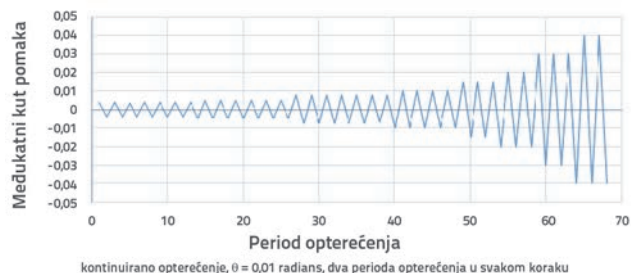
3.4. Postupak opterećivanja

Potresne odredbe [9] 2010 AISC uzete su u obzir pri odabiru opterećenja koje se koristi u ovom istraživanju. Djelovanje opterećenja i broj cikličnih aktivnosti određeni su AISC protokolom, što se vidi na slici 8. Svakom stupnju opterećenja odgovara određeni međukatni kut zaokreta. Ispitivanje se provodi primjenom koraka opterećenja uz bilježenje podataka u redovitim intervalima. Sva zapažanja su zabilježena tijekom ispitivanja modela na opterećenja.



Slika 7. Krivulje stvarnih naprezanja i deformacija te naprezanja i deformacija dobivenih ispitivanjima (lijevo), univerzalni uređaj za ispitivanje (desno)

Nakon što je uzorak bio oslabljen na 40 % početne čvrstoće, opterećenje je zaustavljeno. S druge strane, vertikalna "push-down" analiza izvedena je na način da se postupno povećavao vertikalni pomak na mjestu uklonjenog stupa kako bi se proučio kut zaokreta u spoju i otpor konstrukcije na takve deformacije.



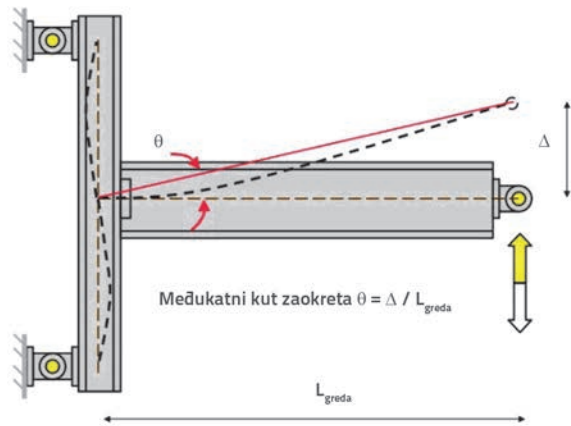
Slika 8. Postupak opterećivanja koji je korišten za seizmičko ispitivanje

3.5. Kriteriji prihvatljivosti temeljeni na AISC 341-10 i UFC 4-023-03 propisima

Na temelju AISC potresnih odredbi [9], SMF - specijalni okvir, treba biti oblikovan kako bi osigurao značajnu neelastičnu otpornost kroz popustljivost pri savijanju greda i ograničenu popustljivost stupova. Nadalje, stupovi će biti projektirani tako da budu općenito jači nego potpuno popustljive ili ojačane grede ili nosači. S ovakvim spojevima ispunit će se svi zahtjevi na seizmičke aktivnosti:

- ako su međukatni kutovi zaokreta najmanje 0,04 radijana, moraju biti postavljeni podupirači (slika 9.),
- otpornost spoja na savijanje izračunan na stupu mora iznositi najmanje $0,80 \cdot M_p$ momenta grede pri međukatnom kutu zaokreta od 0,04 radijana. M_p predstavlja moment plastičnosti.





Slika 9. Prikaz međukatnog kuta pomaka i rotacijske nosivosti spoja

Odgovarajući rotacijski kapacitet spoja je jako bitan pri sprječavanju progresivnog kolapsa (slika 9.). Momentne veze koje su preoblikovane u same rotacijske kapacitete mogu preuzeti savijanje, ali nemaju dovoljnu otpornost na aksijalno naprezanje i moment savijanja, što je jedan od bitnih zahtjeva za sprječavanje progresivnog kolapsa. Dok vlačna čvrstoća može značajno povećati nosivost sustava na sam moment savijanja, veza grede i stupa mora biti u mogućnosti prenijeti velike rubne vlačne sile iz kombinacije momenta savijanja i aksijalnog naprezanja. Tablica 5-2 UFC 4-023-03 [23] prikazuje projektiranu čvrstoću i rotacijske kapacitete priključaka nosač-stup korištene u ispitivanju na progresivni kolaps. Tablica 3. prikazuje odabrane kriterije za ispitivanje progresivnog kolapsa priključka nosač-stup.

Tablica 3. Kriteriji prihvatljivosti za potpuno pridržane veze

Vrsta veze	Plastični rotacijski zaokret (θ) [rad]	
	Prvi element	Drugi element
Zavarena neojačana pojasnica (eng. <i>Welded unreinforced flange - WUF</i>)	0,0284-1,57 ⁻⁵ d	0,043-2,36 ⁻⁵ d

d = visina nosača, u mm

4. Rezultati i diskusija

4.1. Procjena progresivnog kolapsa

Ovo poglavlje sadrži rezultate dobivene proračunom primjenom metode konačnih elemenata konačnih elemenata i eksperimentalnim ispitivanjem. Glavna varijabla u procjeni ponašanja pri progresivnom kolapsu je plastični kut zaokreta (θ), definiran kao vertikalni progib stupa (u) na sredini raspona nosača (L) (slika 9.). Nesavršenosti na mjestu zavora između pojasnice nosača i stupa na vlačnoj strani nosača zajedno s daljnjim širenjem pukotina na hrptu nosača bili su najveći problem kod eksperimentalnih procjena. Model je imao otpornost na vertikalno opterećenje od 6 kN prije početka loma. Tenzometri postavljeni na pojasnici nosača nisu zabilježili deformacije veće od 1800 $\mu\epsilon$, što upućuje na ograničena svojstva spoja na razvijanje lančanih reakcija. Spoj je bio otporan na plastičnu rotaciju od 0,015 radijana prije progresivnog kolapsa te model nije zadovoljio zahtjeve DoD propisa [23]. Uzorak u deformiranom stanju s ekvivalentnom raspodjelom plastičnih zglobova nakon krajnjeg stanja progresivnog kolapsa prikazan je na slici 10. Dijagrami vertikalnih opterećenja naspram kutova zaokreta plastičnih zglobova nastalih pri progresivnom kolapsu,

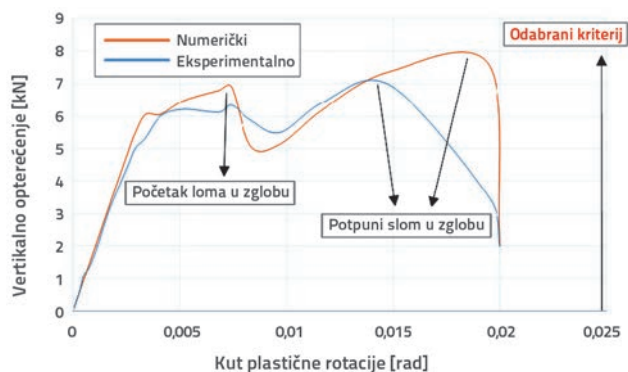


Slika 10. Oštećenje priključka nakon završetka ispitivanja progresivnog kolapsa i raspodjele ekvivalentnih plastičnih deformacija

Tablica 4. Rezultati ispitivanja za progresivni kolaps zgloba

Vertikalna sila na početku loma [kN]		Maksimalna vertikalna sila na kraju ispitivanja [kN]		Rotacija zgloba na početku loma [rad]		Rotacija zgloba na kraju ispitivanja [rad]		Vrsta pogreške	
Proračun	Ispitivanje	Proračun	Ispitivanje	Proračun	Ispitivanje	Proračun	Ispitivanje	Proračun	Ispitivanje
6,9	6,2	7,8	7,1	0,005	0,004	0,018	0,014	Otkazivanje spoja	Otkazivanje spoja

dobiveni numeričkim i eksperimentalnim ispitivanjem, prikazani su na slici 11.



Slika 11. Vertikalna opterećenja i kut rotacije plastičnog zgloba u ispitivanjima na progresivni kolaps

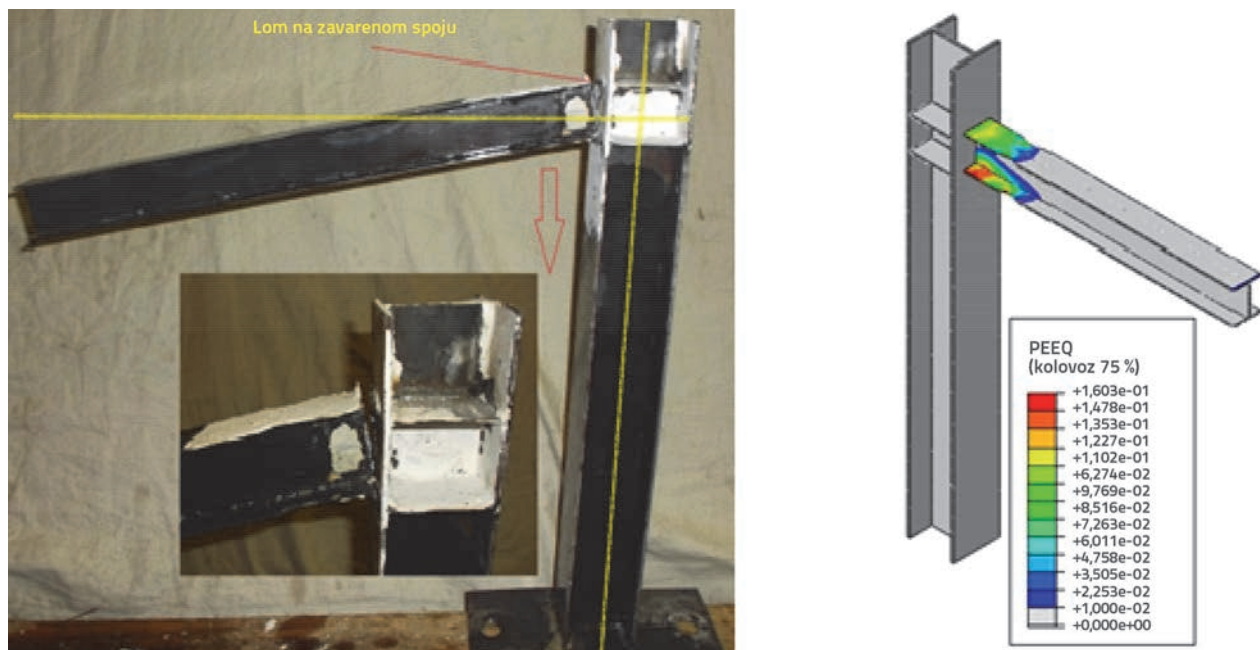
Prema slici 11., eksperimentalni i numerički rezultati podudaraju se u pogledu mjesta popuštanja očvršćenja zgloba i načina otkazivanja. Postoji očita razlika u maksimalnoj rotaciji

plastičnog zgloba dobivenoj u metodi konačnih elemenata i eksperimentalnim ispitivanjima. Ovo pokazuje da je različito ponašanje zavara prema numeričkoj analizi i eksperimentalnom ispitivanju te se događa različito ponašanje konstrukcije. Može se zaključiti da ponašanje priključka nosač-stup znatno ovisi o mjestima zavarivanja.

Razlike između numeričkih i eksperimentalnih rezultata u ispitivanjima ponašanja pri progresivnom kolapsu prikazane su u tablici 4.

4.2. Procjena seizmičkog ponašanja

U ovom poglavlju obrađeno je ponašanje priključka pri seizmičkom opterećenju. Međukatni kut pomaka je osnovni parametar u ispitivanju ponašanja pri seizmičkom utjecaju, a prikazan je na slici 9. U ispitivanim modelima zabilježene su loše karakteristike pod utjecajem cikličnog opterećenja. Iako se formiranje plastičnih zglobova očekivalo na nosaču, lom se dogodio u zavarenom spoju. U prvoj fazi, u zavarenom spoju je došlo do krtog loma već pri međukatnom kutu pomaka od 0,01 radijan. Povećavanjem opterećenja, pukotina na zavarenom



Slika 12. Oštećenje uzorka na kraju cikličnog ispitivanja (lijevo), raspodjela ekvivalentnih plastičnih deformacija (desno)

Tablica 5. Rezultati seizmičkog utjecaja na zglob

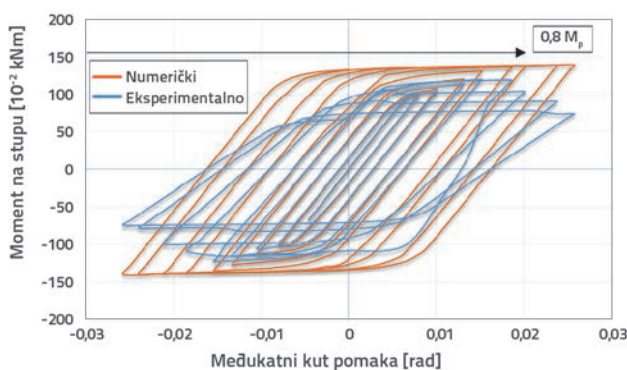
M / M_p Prvi lom		M / M_p Maksimum		Međukatni kut zaokreta u prvom lomu [rad]		Međukatni kut zaokreta na kraju ispitivanja [rad]		Način otkazivanja	
Analiza	Ispitivanje	Analiza	Ispitivanje	Analiza	Ispitivanje	Analiza	Ispitivanje	Analiza	Ispitivanje
0,71	0,65	0,74	0,68	0,015	0,01	0,027	0,023	Otkazivanje spoja	Otkazivanje spoja

M_p - moment plastičnosti

dijelu se počela širiti. Tijekom ciklusa od 0,018 rad, povećanje do 1 mm zabilježeno je u duljini pukotine, što je dovelo do velikog smanjenja čvrstoće. Tenzometri postavljeni na pojasnici grede zabilježili su deformacije manje od 1800 $\mu\epsilon$, pokazujući ograničen kapacitet spoja da se razvije potpuni plastični zglob. Oštećenja modela nakon završetka cikličnih ispitivanja i raspodjela ekvivalentnih plastičnih deformacija mogu se vidjeti na slici 12.

Izračunani momenti na stupu i međukatni kutovi pomaka smatraju se globalnim cikličnim odgovorom uzoraka prikazanih na slici 13. Rezultati numeričkih testova i eksperimentalnih ispitivanja pokazali su vrlo dobro podudaranje cjelokupnog ponašanja pri cikličnom opterećivanju modela. Možemo primijetiti da je model koji je napravljen da bi pokazao ponašanje materijala elastoplastični model, a simulacija se provodila do faze sloma. Prema tome, gubitak krutosti ne može se prikazati numerički u odnosu na eksperimentalno ispitivanje, gdje je gubitak krutosti bio vezan za lokaliziranje oštećenja na zavarenom području. Osim toga, numerički rezultati su također potvrdili formiranje plastičnih zglobova u blizini mjesta zavarivanja, što upućuje na povećanu osjetljivost tog mjesta na moguće prijelome.

Usporedba rezultata eksperimentalnih ispitivanja i numeričke analize seizmičkog utjecaja na zglob prikazana je u tablici 5.



Slika 13. Momenti na stupu i međukatni kutovi zaokreta

5. Zaključak

U ovom istraživanju ispitivano je ponašanje "Pre-Northridge" priključaka pri seizmičkom i progresivnom kolapsu. Osnovni

kriteriji prihvatljivosti za seizmički i progresivni kolaps uključuju međukatni kut zaokreta i savojnu čvrstoću temeljenu na seizmičkim propisima 2010 AISC [9] zajedno s plastičnim kutom zaokreta iz smjernica UFC 4-023-03 [23]. Na osnovi numeričkih i eksperimentalnih rezultata ovog istraživanja, doneseni su sljedeći zaključci:

- Numerički i eksperimentalni rezultati pokazali su da je otkazivanje zavarenog priključka nosač-stup uzrokovano pukotinom u priključku koja je otkrivena pomoću "push down" analize, te priključak može podnijeti samo kut plastične rotacije od 0,015 radijana prije nego nastupi ozbiljniji lom. Štoviše, rezultati pokazuju ograničena svojstva priključka u razvijanju potpuno neelastičnog kapaciteta priključka nosača. Prema istim rezultatima, zaključeno je da takav priključak ne može podnijeti progresivni kolaps po smjericama iz UFC 4-023-03.
- Prema rezultatima o cikličnim svojstvima, priključak je pokazao slaba svojstva te ne ispunjava zahtjeve seizmičkih propisa 2010 AISC, jer može podnijeti samo međukatni kut zaokreta od 0,02 radijana. Štoviše, povećana osjetljivost zavarenog priključka na moguće lomove posljedica je koncentracije plastičnih naprezanja u blizini zavarenog priključka, koja nisu predviđena pri projektiranju.
- Prema podacima o ponašanju pri progresivnom kolapsu, način otkazivanja i stvaranje lančanih reakcija je kontrolirano vlačnom čvrstoćom priključka nosač-stup nakon velikih rotacija. Ovo pokazuje da se za vlačnu čvrstoću priključka nosač-stup, umjesto obične otpornosti, mora usvojiti ona kada je priključak izložen velikim rotacijama. Ako se velike rotacije ne uzmu u obzir pri projektiranju, zglobovi s malim kutovima zaokreta neće moći ostvariti predviđenu otpornost.
- Priključak nosač-stup bio je izložen velikim momentima tijekom cikličnih ispitivanja i velikim vlačnim silama tijekom "push down" analize. Ispitivanje seizmičkog utjecaja omogućit će projektiranje boljih priključaka, otpornijih na progresivni kolaps.
- Sanacija "Pre-Northridge" priključaka je prijeko potrebna za postojeće zgrade. Jedno od dobrih rješenja u ovom slučaju je zavarivanje vute ispod grede i para ukrutnih ploča ispod gornje pojasnice grede. Pretpostavlja se da bi ovo tehničko rješenje moglo učinkovito smanjiti plastične deformacije u sučeonom spoju na gornjoj pojasnici grede.

Zahvala

Autori zahvaljuju cijenjenom tehničkom osoblju Laboratorija za konstrukcije i materijale, Tehnološkog sveučilišta u Maleziji

(UTM) na suradnji i podršci u ovom istraživanju te na novčanim donacijama za provođenje ovog eksperimentalnog rada.

LITERATURA

- [1] Agency, F.E.M., *Federal Emergency Management Agency*, U.D.o.H. Security, Editor. 2002: United States of America.
- [2] Agency, F.E.M., *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings "FEMA 350"*, U.D.o.H. Security, Editor. 2000: United States of America.
- [3] Agency, F.E.M., *Recommended Seismic Evaluation and Upgrade Criteria for Existing Welded Steel Moment-Frame Buildings "FEMA 351"*, U.D.o.H. Security, Editor. 2000: United States of America.
- [4] Engelhardt, M., Husain, A.: *Cyclic-loading performance of welded flange-bolted web connections*. Journal of Structural Engineering, 1993. 119 (12): pp. 3537-3550.
- [5] Chen, C.-C., et al. : *Cyclic behaviour of unreinforced and rib-reinforced moment connections*. Journal of Constructional Steel Research, 2005. 61 (1): pp. 1-21.
- [6] Wang, C.-H., Wen, Y.-K.: *Evaluation of pre-Northridge low-rise steel buildings. I: Modeling*. Journal of Structural Engineering, 2000. 126 (10): pp. 1160-1168.
- [7] Whittaker, A., Gilani, A., Bertero, V.: *Evaluation of pre-Northridge steel moment-resisting frame joints*. The Structural Design of Tall Buildings, 1998. 7 (4): pp. 263-283.
- [8] Lee, K., Foutch, D.A.: *Seismic performance evaluation of pre-Northridge steel frame buildings with brittle connections*. Journal of Structural Engineering, 2002. 128 (4): pp. 546-555.
- [9] Specifications, A.C.o., *Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-10)*. 2010, American Institute of Steel Construction, Inc.
- [10] Khandelwal, K., El-Tawil, S.: *Collapse behavior of steel special moment resisting frame connections*. Journal of Structural Engineering, 2007. 133 (5): pp. 646-655.
- [11] Kim, J., An, D.: *Evaluation of progressive collapse potential of steel moment frames considering catenary action*. The structural design of tall and special buildings, 2009. 18 (4): pp. 455-465.
- [12] Karns, J.E., et al.: *Behaviour of varied steel frame connection types subjected to air blast, debris impact, and/or post-blast progressive collapse load conditions*. Austin, TX, United States, 2009: pp. 1868-1877.
- [13] Chou, C.C., et al.: *Seismic rehabilitation performance of steel side plate moment connections*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010. 39 (1): pp. 23-44.
- [14] Liu, J.: *Preventing progressive collapse through strengthening beam-to-column connection, Part 1: Theoretical analysis*. Journal of Constructional Steel Research, 2010. 66 (2): pp. 229-237.
- [15] Lee, C.-H., et al.: *Simplified nonlinear progressive collapse analysis of welded steel moment frames*. Journal of Constructional Steel Research, 2009. 65 (5): pp. 1130-1137.
- [16] Liu, Y., Xu, L., Grierson, D.E.: *Influence of Semi Rigid Connections and Local Joint Damage on Progressive Collapse of Steel Frameworks*. Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2010. 25 (3): pp. 184-204.
- [17] Kim, T., Kim, J.: *Collapse analysis of steel moment frames with various seismic connections*. Journal of Constructional Steel Research, 2009. 65 (6): pp. 1316-1322.
- [18] EN 1991-1-7. Eurocode 1 - EN 1991-1-7: Actions on structures - Part 1-7: General actions - Accidental actions, 2006.
- [19] BS 6399. BS 6399: Loading for buildings: Part 1: Code of practice for dead and imposed loads. British Standards Institute, 1996.
- [20] BS 5950. BS 5950: Structural use of steelwork in building: Part 1: Code of practice for design - Rolled and welded sections. British Standards Institute, 2000.
- [21] BS 8110. BS 8110: Structural use of concrete: Part 1: Code of practice for design and construction. British Standards Institute, 2000.
- [22] BS 5628. BS 5628: Code of practice for use of masonry: Part 1: Structural use of unreinforced masonry. British Standards Institute, 1978.
- [23] Department of Defense, *Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, UFC 4-023-03*. 2010.
- [24] The U.S. General Services Administration, *Progressive Collapse Design Guidelines Applied to Concrete Moment-Resisting Frame Buildings*. 2003: Washington (DC).
- [25] ABAQUS/Standard user's manual. Vol. 1. 2001: Hibbitt, Karlsson & Sorensen.
- [26] Tsitos, A.: *Experimental and Numerical Investigation of the Progressive Collapse of Steel Frames*. Doctor of Philosophy Dissertation, The University at Buffalo, the State University of New York. 2009
- [27] Faridmehr, I., et al.: *Correlation between Engineering Stress-Strain and True Stress-Strain Curve*. American Journal of Civil Engineering and Architecture, 2014. 2 (1): pp. 53-59.