

Primljen / Received: 21.4.2023.

Ispravljen / Corrected: 14.8.2023.

Prihvaćen / Accepted: 20.10.2023.

Dostupno online / Available online: 10.1.2024.

Kritički osvrt na vezove sa spriječenim izvijanjem dijagonala

Autori:



Prachi Mishra, dipl.ing.građ.

Visvesvaraya Nacionalni institut za tehnologiju
Nagpur, Indija

dt19amc001@students.vnit.ac.in

Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Arvind Y. Vyavahare**, dipl.ing.građ.

Visvesvaraya Nacionalni institut za tehnologiju
Nagpur, Indija

ayv@apm.vnit.ac.in

Prethodno priopćenje

Prachi Mishra, Arvind Y. Vyavahare

Kritički osvrt na vezove sa spriječenim izvijanjem dijagonala

Vezovi sa spriječenim izvijanjem dijagonala postaju sve popularniji u konstrukcijama otpornima na potrese. Takvi vezovi olakšavaju stabilno histerežno ponašanje dijagonala s čeličnom jezgrom koja se ne izvija te je obložena čeličnom cijevi ispunjenom betonom ili mortom. Međutim, u posljednjih nekoliko godina istraživači su primijetili da nema potrebe za ispunom te da vezovi mogu biti izrađeni od čelika. U ovom je radu prikazan sažetak svojstava vezova sa spriječenim izvijanjem dijagonala na temelju numeričkih i eksperimentalnih rezultata istraživanja te se prema američkim normama i preporukama iz dostupnih istraživanja sažimaju osnove za projektiranje. U radu se također raspravlja o konceptu, kriterijima stabilnosti, početnoj i naknadnoj krutosti, sposobnosti rasipanja energije, uočenim načinima sloma te praktičnoj primjeni vezova sa spriječenim izvijanjem, nakon čega slijede zaključci i prijedlozi za budući razvoj tih vezova.

Ključne riječi:

konstrukcije, čelik, vezovi, izvijanje, sustav koji sprječava izvijanje, jezgra, rasipanje energije

Research Paper

Prachi Mishra, Arvind Y. Vyavahare

A critical review on buckling restrained braces

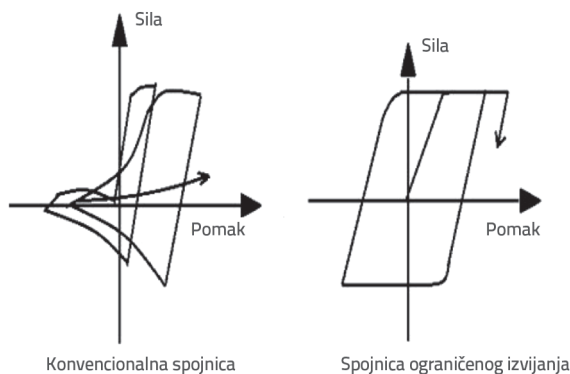
Currently, buckling restrained braces are gaining popularity in earthquake resistant designs. These braces facilitate stable hysteretic behaviour with a non-buckling steel core encased in a steel tube, which is filled with concrete or mortar. However, in the last few years, researchers have observed that there is no need for the filler material and these braces can be made of steel. This paper presents a summary of buckling restrained braces on the grounds of numerical and experimental research results and attempts to summarize the basic design provisions according to the American standards and recommendations from the available research. The paper also discusses the concept, stability criteria, initial and post stiffness, energy dissipation capacity, failure modes observed, and the practical applications of buckling restrained braces, followed by conclusions and future suggestions for the development of these braces.

Key words:

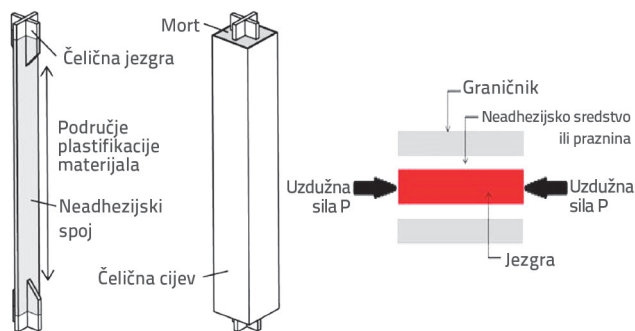
structures, steel, braces, buckling, restrainer, core, energy dissipation

1. Uvod

Okviri opremljeni vezovima sa sprječanim izvijanjem dijagonala (engl. *buckling restrained braces - BRB*) ovih se godina opsežno primjenjuju u konstrukcijama otpornima na vjetar i seizmičko djelovanje. Takvi okviri nude gotovo jednake osne (ili uzdužne) sile pri granici popuštanja u vlačnom i tlačnom naprezanju i stoga se plastificiraju bez značajnog izvijanja. Zahvaljujući tome, predstavljaju bolju alternativu konvencionalnim okvirima. Drugim riječima, okvir s vezovima s ograničenim izvijanjem dijagonala jest vrsta konvencionalnog ukrućenog okvira koji sprječava izvijanje dijagonale veza u tlaku. Na slici 1. prikazana je usporedba histereznog ponašanja BRB-a sa sustavom konvencionalnih vezova. Koncept BRB-a je jednostavan: sprječava se izvijanje dijagonale veza prije plastifikacije. Vez se izrađuje oblaganjem čelične jezgre unutar sustava koji sprječava izvijanje. Prostor između sustava koji sprječava izvijanje i čelične jezgre ispunjen je ispunom, a to može biti beton ili mort. Time se sprječava izvijanje unutarnje čelične jezgre. Jezgra je premazana neadhezivnim materijalom prije dodavanja ispune kako bi se izbjegla adhezija između čelične jezgre i ispune. Time se također sprječava prijenos onog opterećenja između jezgre i sustava koji priječi izvijanje. Ideja ograničavanja jezgre dovodi do ujednačenog i simetričnog histereznog ponašanja u BRB-ovima te se sprječava izvijanje dijagonale veza. Na slici 2. prikazan je koncept BRB-a [1].

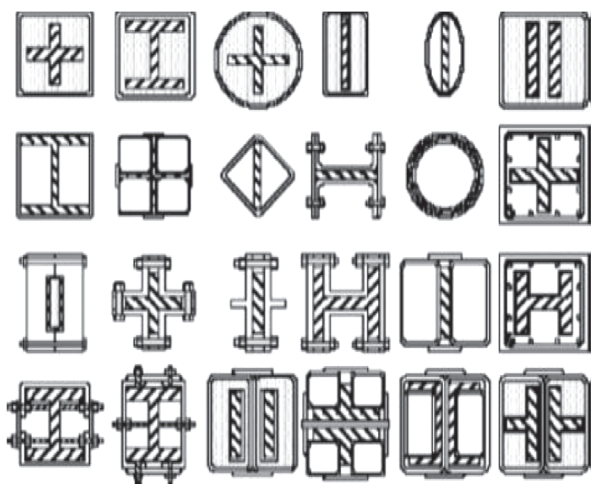


Slika 1. Histerežno ponašanje konvencionalnog veza u usporedbi s BRB-om, tj. sa sprječanim izvijanjem dijagonala



Slika 2. Koncept BRB-a

Seizmička stabilnost bilo koje konstrukcije može se postići različitim metodama, bilo induciranjem dinamičkih oscilatora i uređaja za rasipanje energije ili razvojem sustava seizmičke kontrole unutar konstrukcije. Sustavi seizmičke kontrole mogu biti aktivni, pasivni ili hibridni. Izolacija osnove konstrukcije predstavlja još jedan sličan sustav. Upotreba bilo kojeg sustava seizmičke kontrole je skupa i potrebna u područjima koja su vrlo sklona seizmičkim aktivnostima. Radi seizmičke sigurnosti, u izgradnji mostova prednost se daje kontrolnim uređajima kao što su metalni uređaji koji se plastificiraju, tarne naprave, uređaji s viskoznim fluidom i viskoelastični uređaji. Kako bi se osigurala seizmička sigurnost u područjima koja su srednje sklona na potrese, uređaji za rasipanje energije preferiraju se zbog niskih troškova i jednostavnosti ugradnje. Prije razvoja BRB okvira, okviri s ekscentričnim dijagonalama (engl. *eccentrically braced frames - EBF*) smatrani su boljom alternativom čeličnim okvirima zbog njihove veće elastične krutosti i bolje sposobnosti rasipanja energije. Proučen je i pristup projektiranja kapaciteta za određivanje veličine dijagonale veza u EBF-ovima [2]. Duktilne posmične veze u EBF-u predstavljaju učinkovite naprave za rasipanje seizmičke energije koje ostaju elastične pri linearnom opterećenju i otporne su na nelinearne plastične deformacije pri bilo kojem seizmičkom djelovanju. Seizmičke veze uključene su u konstrukcijske mjere različitih zemalja. Istraživači su proučavali postupak projektiranja posmičnih veza prema uvjetima opterećenja, specifikacijama ukrućenja hrpta i spojevima sa stupovima [3]. Međutim, učinkovitost veza kod nejednakih krajnjih momenata i uzdužnih sila potrebno je dodatno istražiti. Iako izbočivanje hrpta još uvijek predstavlja ograničenje posmičnih veza, poduzeti su pokušaji da se poboljša njihovo ponašanje izvijanja dodavanjem ukrućenja hrpta. U prošlosti su testirane kratke seizmičke veze s ukrućenim hrptovima koji su projektirani prema Eurokodu 8 te su pokazali primjerenu pouzdanost za klasu pouzdanosti RC2 s 50 godina povratnog perioda [4]. Zapravo, konstrukcijske mjere za projektiranje BRB okvira razvijene su iz mjera EBF-a.



Slika 3. Različiti presjeci BRB-a, [5]

Poprečni presjek koji se primjenjuje za središnji dio BRB-a općenito je pravokutnog oblika. Međutim, mogu se koristiti i različiti drugi oblici. Na slici 3. prikazani su različiti presjeci BRB-ova koje su istraživači usvojili u posljednjih nekoliko desetljeća [5]. Osnovno projektiranje BRB-a ga čini teškim i kompliciranim za rukovanje. Stvrdnjavanje ispune, koja može biti mort ili beton, u ovim je vezovima također vrlo težak proces. Kako bi se uklonile te poteškoće, uvedeni su potpuno čelični BRB-ovi. Ideja je bila ukloniti ispunu iz BRB-ova kako bi bili lakši i jednostavniji za lijevanje. Kod potpuno čeličnih BRB-ova, unutarnja jezgra je zatvorena u vanjsku cijev bez ispune između cijevi i jezgre. Upotreba neadhezivnog materijala također nije obvezna. Umjesto toga, predviđen je razmak između sustava koji sprječava izvijanje i elementa jezgre kako bi se omogućilo slobodno kretanje jezgre unutar kućišta sustava koji priječi izvijanje. Međutim, princip rada sličan je radu konvencionalnih BRB-ova. Potpuno čelične BRB-ove lakše je proizvesti, ekonomičniji su i omogućuju jednostavan pregled nakon potresa jer se mogu rastaviti. U ovom radu autori predstavljaju kritički sažetak BRB-ova na temelju njihovog koncepta, razvoja, kriterija stabilnosti, eksperimentalnih i numeričkih istraživanja, razmatranja projektiranja, načina sloma koje je potrebno proučavati i dosadašnjih primjena. Prikazano je detaljno istraživanje i zaključak o BRB-ovima. U današnjem svijetu u kojem je nemoguće predvidjeti štetu koja će nastati nakon potresa, vrijedno je proučiti takav ekonomičan i učinkovit uređaj za rasipanje energije. Na temelju dostupne literature autori pokušavaju navesti i neke prijedloge. Autori vjeruju da će ovaj rad biti koristan drugim istraživačima u istraživanju BRB-ova i da će premostiti jaz u istraživanju kako bi se mogla provesti daljnja ispitivanja u ovom području.

2. Razvoj BRB-a

2.1. Koncept BRB-a

BRB se sastoji od sljedećih komponenti:

- 1. Mehanizam spriječenog izvijanja (BRM):** Radi se o vanjskom dijelu i jedinici za podupiranje osne (uzdužne) sile. Prethodno upotrebljavani BRM bio je čelična jedinica koja je bila ispunjena mortom i iznimno kruta. Međutim, BRM sustav nove generacije lakši je u usporedbi s njim jer je izrađen od čelika.
- 2. Jezgra:** Radi se o glavnoj jedinici za sprječavanje izvijanja čija je funkcija spriječiti izvijanje veza. Izrađena je od čelika visoke čvrstoće i bilo kojeg oblika poprečnog presjeka. Općenito se preferira pravokutni oblik jezgre duž duljine plastifikacije (popuštanja), a križni duž dijela krajnje duljine. Prema željama projektanta, može biti i kružnog ili bilo kojeg drugog oblika.
- 3. Neadhezivni materijal:** Neadhezivni materijali primjenjuju se između ploče jezgre i elemenata za sprječavanje izvijanja kako bi se osigurao prostor za širenje ploče jezgre pod tlakom. Smanjuju silu prianjanja između ploče jezgre i elemenata za sprječavanje izvijanja. Istraživači su koristili različite

neadhezivne materijale. Kao poželjni neadhezivni materijali smatrali su se sloj epoksidne smole i silikonska smola. U tu svrhu upotrebljavane su i vinilne trake, ploče od stiropora visoke gustoće, kloroprenska guma, gumene ploče i silikonske ploče. Neadhezivne materijale potrebno je primjenjivati kao jedinice za razdvajanje. U suprotnom treba osigurati razmak između dvije jedinice. U potpuno čeličnim BRB-ovima neadhezivni materijali nisu nužni. Međutim, za BRB-ove visokih performansi s dugim segmentom plastifikacije i tankom pločom jezgre, neadhezivni materijali i dalje su potrebni za postizanje viših svojstava kod niskocikličkog umora. Glavna funkcija neadhezivnog materijala nije samo smanjenje sile prianjanja između ploče jezgre i elemenata za sprječavanje izvijanja, već i osiguravanje prostora za širenje ploče jezgre pod tlakom.

2.2. Povijest i razvoj

Ideja BRB-a nastala je u Japanu. Wakabayashi i sur. [6] prvi su eksperimentirali na tim vezovima uvođenjem pločastih BRB-ova. Kano i sur. [7] proveli su numeričko istraživanje o elastoplastičnom ponašanju BRB-ova. Kimura i sur. [8] predložili su koncept BRB-ova za izradu vezova koji se bavi problemom degradacije nosivosti i krutosti. Predloženi BRB također je pridonio ispunjavanju zahtjeva smanjenja duktilnosti i sposobnosti rasipanja energije običnog čeličnog veza u tuku. Mochizuki i sur. [9, 10] proveli su istraživanja kako bi se riješio problem ukupne stabilnosti čeličnog veza okruženog armiranim betonom. Prvi japanski istraživači BRB-a također su predložili da se čelična jezgra premaže neadhezivnim sredstvom kako bi se jezgra odvojila od okolnog betona. Osim istraživanja koja su provedena na ovim vezovima s dobrim rezultatima, BRB-ovi nisu bili uključeni u preporuke za projektiranje na japanskom Arhitektonskom institutu (engl. *Architectural Institute of Japan - AIJ*) prije 1996. godine. Fujimoto i sur. [11] proveli su istraživanje BRB-ova s čeličnom jezgrom obloženu čeličnim cijevima ispunjenima betonom ili mortom. Ti BRB-ovi prvi su put primijenjeni 1989. u dvije poslovne zgrade s čeličnim okvirom, a nakon toga su primijenjeni u 160 zgrada u Japanu [12]. Do 1990. godine stotine zgrada u Japanu, od kojih je većina bila viša od 15 katova, prihvatile su i primijenile BRB-ove. Nadalje, Wada i sur. [13] predložili su novi koncept projektiranja "otporan na oštećenja". U ovom su konceptu uveli BRB-ove kao elastoplastične prigušivače koji rasipaju energiju unutar elastičnog glavnog okvira. Prihvaćanje i primjena BRB-ova u Japanu povećala se uglavnom nakon potresa u Kobeu 1995. godine. Iako su istraživanja izvorno započela u Japanu, tehnologija je primijenjena i u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD) nakon dobrih rezultata ovih vezova u Japanu. Potres u Northridgeu 1994. godine značajno je promijenio seizmička istraživanja čelika u SAD-u. Prije tog potresa vjerovalo se da su posebni čelični okviri učinkovita rješenja za projektiranje čeličnih konstrukcija otpornih na potrese. Međutim, krti slom spojeva između nosača i stupova koji se dogodio u mnogim višekatnim čeličnim zgradama, prisililo je istraživače da preispitaju i rekonstruiraju

seizmičke konstrukcijske mjere za projektiranje konstrukcija otpornih na potrese. Prva praktična primjena BRB-ova u SAD-u bila je u izgradnji zgrade na UC (engl. *University of California* - UC) Davisu 1998. godine čije je ispitivanje provedeno 2000. godine na Sveučilištu Kalifornija (UC) Berkeley. U nekoliko godina izvedeno je nekoliko projekata koji primjenjuju BRB. Black i sur. [14] proveli su ispitivanje komponenti na vezovima i primijetili ponovljeno simetrično histerezo ponašanje. Seizmičko ponašanje tih vezova istraživali su Sabelli i sur. [15] Zatim je u SAD-u izgrađeno nekoliko zgrada s ugrađenim BRB-ovima, nakon uvrštavanja smjernica za projektiranje okvira BRB-a u seizmičke odredbe za čelične konstrukcije [16]. Pseudo-dinamičke numeričke analize vezova naveliko su istraživali Fahnestock i sur. [17]. AISC 341-10 (Seizmičke odredbe za čelične konstrukcije) navodi norme za projektiranje ovih vezova [18].

Provedena su brojna istraživanja seizmičke otpornosti konstrukcija. Jačanje postojećih zgrada i otpornost na izvijanje konstrukcijskih komponenti bila je tema od interesa među istraživačima. Provedena su numerička ispitivanja otpornosti na izvijanje stupova od nehrđajućeg čelika sa zglobnom vezom kutnih poprečnih presjeka koji su projektirani prema Eurokodu 3 [19, 20]. Istraživanja su provedena i na različitim oblicima ojačanja za primjenu kao potporne konstrukcije protiv seizmičkih djelovanja [21]. Značajna otpornost na seizmička djelovanja može se postići dodavanjem lakih drvenih etaža postojećoj konstrukciji [22]. Promjena krutosti konstrukcije posljedica je dodanih drvenih etaža. Sustavi potpornih nosača kod visokih zgrada također mogu biti dobra alternativa za seizmičku sigurnost [23]. Projektiranje temeljeno na performansama za pojačanje postojećih zgrada smjer je istraživanja za buduće istraživače. Studiju slučaja o pojačanju postojeće zgrade srednje visine proveli su Erdem i sur. [24]. Uključivala je usporedbu seizmičkih svojstava zgrade prema turskom zakonu i američkim normama putem nelinearne analize. Zatim su predložili metode projektiranja na temelju performansi zgrade.

Među azijskim zemljama, Kina je najaktivnija u primjeni i razvoju uređaja za rasipanje energije. Poput Japana, Kina je također zemlja sklona potresima i stoga je izrazila veliko zanimanje za BRB-ove. Većina istraživanja provedenih na tim vezovima u posljednja dva desetljeća potječe iz Kine. Razmatranje projektiranja uređaja za rasipanje energije uključeno je u kineske odredbe seizmičkog projektiranja zgrada tek početkom 2000-ih [25]. Xie [26] je ocijenio praktičnu primjenu BRB-ova u azijskim konstrukcijama. Nakon toga je provedeno istraživanje o BRB-ovima u ostalim azijskim zemljama osim Japana, a posebice u Kini. Kina je izdala tehničke specifikacije za čelične konstrukcije u visokim zgradama [27], a uključivale su kriterije za projektiranje BRB-ova. Tehničke specifikacije za primjenu BRB-ova [28] izdalo je Kinesko udruženje za normizaciju inženjerske gradnje za konstrukcijske mjere ovih vezova zajedno sa smjericama za projektiranje čvornih limova za spajanje vezova.

Nekoliko drugih zemalja diljem svijeta pokazalo je interes za BRB-ove provođenjem eksperimentalnih i numeričkih

istraživanja nad tim vezovima. Zemlje poput Kanade, Turske, Novog Zelanda, Irana, Tajvana, Južne Koreje, Europe i Indije također su dale svoj doprinos u istraživanju i razvoju BRB-ova predlažući različite izmjene na temelju svojih nalaza.

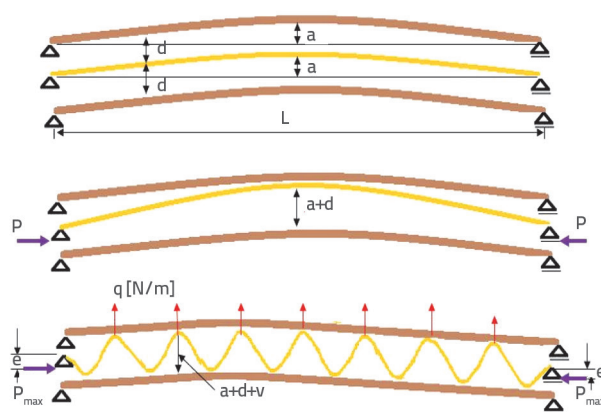
3. Analiza stabilnosti BRB-ova

Postoje tri glavna načina izvijanja pod kojima se identificiraju BRB-ovi:

- globalno izvijanje vezova pod osnim tlakom.
- lokalno izvijanje metalne jezgre.
- torzijsko izvijanje dijela produženog segmenta jezgre izvan vanjske cijevi.

3.1. Kriteriji sprječavanja globalnog izvijanja u BRB-ovima

Globalna stabilnost veza najvažniji je kriterij i mora se proučiti kako bi se odredilo ponašanje BRB-ova. Na slici 4. prikazan je mehanizam globalnog izvijanja u BRB-ovima.



Slika 4. Učinak BRB-a na globalno izvijanje

Zasad najpopularniji način za sprečavanje globalnog izvijanja u BRB-ovima koji su poduprti na oba kraja pružio je JSSC [29], izraz (1)

$$\frac{P_{max}(a+d+e)}{1 - \frac{P_{max}}{P_E^R}} \leq M_y^R \quad (1)$$

pri čemu je M_y^R moment savijanja jedinice za sprečavanje izvijanja, P_{max} je maksimalna osna tlačna sila koju doživljava dijagonala veza, P_E^R je Eulerova sila izvijanja inducirana u graničniku, a je početna deformacija veza u središtu, d je prostor između elementa jezgre i elementa koji sprječava izvijanje, a e je ekscentričnost osne tlačne sile koja je ista na oba kraja.

Lijeva strana izraza daje moment savijanja u središtu elementa jezgre uzimajući u obzir P-delta efekt, a desna strana izraza pokazuje granicu popuštanja elementa jezgre prilikom izvijanja.

Također pokazuje kako se pretpostavlja da je popuštanje u početnoj fazi u graničnom stanju. Nakon globalnog izvijanja, moment savijanja elementa jezgre u središtu izražava se kao u izrazu (2) [30]:

$$M_c = P_{\max}(a + d + e + v) \quad (2)$$

pri čemu je v bočna deformacija u sustavu koji sprječava izvijanje nakon globalnog izvijanja i prikazan je izrazom (3),

$$v = 5M_c L^2 / 48E_R I^2 \quad (3)$$

pri čemu je L duljina veza, E je modul elastičnosti, a I je moment površine 2. stupnja vanjske cijevi.

Supstituirajući vrijednost izraza (3) u izraz (2) dobivamo izraze (4) i (5)

$$M_c = P_{\max}(a + d + e + 5M_c L^2 / 48E_R I^2) \quad (4)$$

$$M_c \cong \frac{P_{\max}(a + d + e)}{1 - 1.03 \frac{P_{\max}}{P_E^R}} \quad (5)$$

pri čemu je Eulerova sila izvijanja elementa koji sprječava izvijanje prikazan izrazom (6)

$$P_E^R = \frac{\pi^2 E^R I^R}{L^2} \quad (6)$$

Stoga se može primijetiti da kada je $P_{\max} = P_v$ omjer sila izvijanja na elementu koji sprječava izvijanje, P_e , u odnosu na silu izvijanja koja uzrokuje popuštanje elementa jezgre, P_y ima značajnu ulogu u procjeni momenta savijanja. Potom je predložen izraz (7) koji uključuje P_e i P_y [31].

$$\frac{\varphi P_e}{1.3 P_y} \geq 1 \quad (7)$$

pri čemu je φ faktor smanjenja čvrstoće čija je vrijednost 0,85, a izraz (7) je izraz (8)

$$\frac{P_e}{P_y} \geq 1,5 \quad (8)$$

Fujimoto i sur. [11] u svojoj su analizi predložili da se kritično tlačno opterećenje za vez, u kojoj je čelični element jezgre obložen jedinicom koja sprječava izvijanje, može dobiti iz rješenja ravnoteže u izrazu (9),

$$E_b I_b \frac{d^2 v}{dx^2} + (v + v_0) N_{\max} = 0 \quad (9)$$

pri čemu je $E_b I_b$ krutost na savijanje elementa koji sprječava izvijanje, N_{\max} je sila koja uzrokuje popuštanje BRB-a, v je poprečni otklon, a v_0 je početni otklon jezgre. Pretpostavlja se da je početni otklon, v_0 sinusoidna krivulja, izraz (10),

$$v_0 = a \sin \pi x / L \quad (10)$$

Rješenje jednadžbe ravnoteže daje izraz (11)

$$v + v_0 = \frac{a}{1 - \frac{P_{\max}}{P_e}} \quad (11)$$

pri čemu se N zamjenjuje s P . Moment savijanja u središtu veza izražen je izrazom (12)

$$M_c = \frac{(a + d + S_r) P_{\max}}{1 + \frac{P_{\max}}{P_e}} \quad (12)$$

Čvrstoća i krutost koje zahtijeva jedinica za sprječavanje izvijanja mogu se dobiti uz pretpostavku da se izvijanje veza odvija kada je naprezanje u vanjskoj cijevi jednako graničnom naprezanju jezgre, tj. maksimalna osna sila u vezu doseže silu koja uzrokuje popuštanje koje doživljava čelična jezgra izraz (13).

$$\frac{P_e}{P_y} \geq 1 + \frac{\pi^2 E_b (a + e + S_r) D}{2 \sigma_y L_b^2} \quad (13)$$

pri čemu je D promjer elementa za ograničavanje, σ_y je njegova granica popuštanja, a L_b je njegova duljina. Utjecaj amplitude razmaka nije uključen u izraz (13) prilikom određivanja momenta. Stoga, njegovim uključivanjem, jednadžba momenta savijanja u središtu postaje

$$\frac{P_e}{P_y} \geq 1 + \frac{E_b (a + e + S_r) D}{2 \sigma_y L_b^2} = \beta \quad (14)$$

Izraz (14) sugerira da je ukupna stabilnost na izvijanja veza osigurana ako omjer sile izvijanja na elementu koji sprječava izvijanje P_e u odnosu na opterećenje sile izvijanja elementa jezgre P_y nije manji od β . β regulira kriterije globalne stabilnosti BRB-ova i ovisi o ponašanju materijala i geometrije veza.

3.2. Lokalno izvijanje metalne jezgre

Za lokalni način izvijanja, učinkovitost BRB-ova može se poboljšati u slučajevima kada ne dolazi do izvijanja unutarnje jezgre duž ograničene duljine. Wada i sur. [13] navode jednadžbu (15) za kritično opterećenje za lokalno izvijanje jezgre,

$$P_{cr} = 2\sqrt{\beta E I_t} \quad (15)$$

pri čemu je $E I_t$ krutost na savijanje za unutarnju čeličnu jezgru, a β je distribuirana konstanta opruge.

Visoki stupanj izvijanja unutarnje čelične jezgre može se izbjeći pri

$$P_{cr} \geq \sigma_y A_1 \quad (16)$$

što zahtijeva

$$\beta \geq \frac{\sigma_y^2 A_f^2}{4E_f I_f} \tag{17}$$

Pri čemu je A_f površina poprečnog presjeka unutarnje jezgre. Uočeno je da u višim oblicima izvijanja kritično opterećenje unutarnje čelične jezgre ne ovisi o krajnjim uvjetima jezgre.

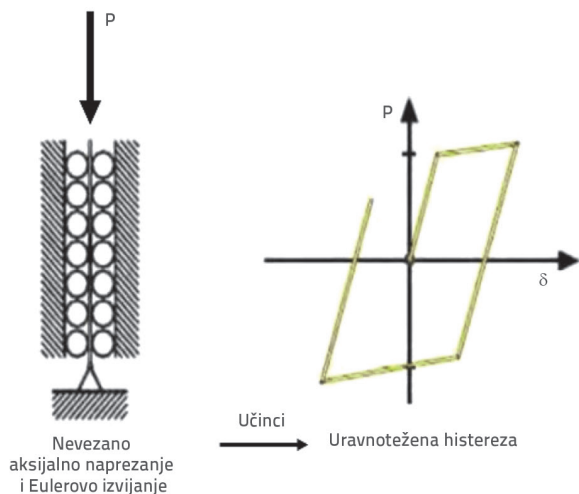
3.3. Torzijsko izvijanje u dijelu produženog segmenta jezgre izvan vanjske cijevi

Dio jezgre koji se proteže od cijevi koja sprječava izvijanje može biti podvrgnuto torzijskom izvijanju, što je treći i najkritičniji oblik izvijanja za BRB-ove. Provedena su mnoga istraživanja o torzijskom izvijanju neadhezivnih vezova, a neka su još uvijek u tijeku. Uočeno je da kritično opterećenje koje uzrokuje torzijsko izvijanje dijela produženog segmenta jezgre u BRB-ovima ne ovisi o duljini segmenta.

4. Sposobnost rasipanja energije BRB-ova

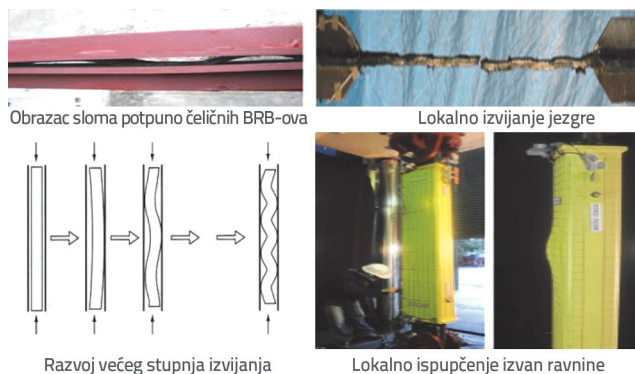
4.1. Histerezo ponašanje BRB-ova

Očekuje se da će se konvencionalni ukrućeni okvir oduprijeti deformacijama okvira zbog bočnih sila nastalih prilikom bilo kojeg seizmičkog djelovanja. Kad god se pojavi bilo kakva seizmička opasnost, vezovi inducirani u okviru podvrgavaju se ponovljenim ciklusima naprezanja. Budući da je konvencionalni čelik slab u tlaku, izvija se i pokazuje nesimetrično histerezo ponašanje. Stoga se sposobnost veza da rasipa energiju smanjuje. Štoviše, izvijanje konvencionalnog veza vrlo je nepredvidljivo. Ovaj način sloma ukrućenog okvira može se spriječiti primjenom BRB okvira. BRB-ovi se odupiru i tlačnim i vlačnim silama kada se prekorače njihove granice elastičnosti, rasipajući energiju, a u isto vrijeme stabilizirajući konstrukciju. Kada je podvrgnut ponavljajućem cikličnom opterećenju, BRB sustav okvira pokazuje simetričnu i stabilnu histerezo petlju i u vlaku i u tlaku, kao što je prikazano na slici 5.



Slika 5. Ponašanje BRB-a [32]

To je najvažnija karakteristika BRB-ova. BRB sustav smatra se superiornim prema tradicionalnom sustavu ukrućenog okvira zbog te karakteristike. Manja opterećenja i deformacije u vezovima redistribuiraju se zbog stabilne histerezne prirode. Sposobnost BRB-ova da rasipaju energiju smanjuje ukupna oštećenja konstrukcije. Ovi se vezovi ne izvijaju bočno, pa dolazi do manjih oštećenja susjednih nekonstrukcijskih elemenata [15].



Slika 6. Načini sloma u BRB-u [1, 33]

4.2. Kapacitet kumulativne deformacije BRB-a

Jedan od važnih kriterija koji regulira ponašanje BRB-ova pri rasipanju energije je njihov kapacitet kumulativne deformacije do loma jezgre. Lokalno izvijanje elementa jezgre rezultira neujednačenom raspodjelom deformacije po njegovoj duljini. Ova pojava smanjuje kapacitet kumulativne deformacije u vezu. Takeuchi i sur. [34] iz prethodnih su istraživanja predložili formulu za normaliziranu amplitudu deformacije $\Delta \epsilon_n$ za nisko ciklički umor BRB-ova,

$$\Delta \epsilon_n = 0,5 N_f^{-0.14} + 54 N_f^{-0.71} \tag{18}$$

pri čemu je N_f broj ciklusa loma.

Takeuchi i sur. [35] zatim su modificirali izraz (18) zamjenom rezultata kako bi dobili

$$N_f = \left(1 - \frac{3\Delta \epsilon_n}{70} \right) \left(\frac{\Delta \epsilon_n^{-1.41}}{3.63 \cdot 10^{-3}} \right) \tag{19}$$

pri čemu je $N_f > 20$.

Izraz (19) definira djelomičnu koncentraciju plastične deformacije u elementu jezgre na zonama vrlo niskog sloma. Upućuje na stanje naprezanja koje prelazi graničnu vrijednost s negativnim tangentnim modulom. Takeuchi i sur. [35] definirali su omjer za izračun lokalne plastične deformacije bez znatnog napora. Taj omjer dobiva se dijeljenjem lokalne deformacije na točki koncentracije plastičnog naprezanja s normaliziranom deformacijom. Omjer je isprva predložen za vezove s kružnim cijevima. Točka u kojoj je lokalna deformacija približno jednaka vrijednosti izračunanoj formulom umora smatra se točkom loma veza.

5. Istraživanja BRB-ova

Do danas je provedeno nekoliko istraživanja na BRB-ovima na različite načine, uključujući komponente BRB-ova, podsklop BRB-ova ili cijelu konstrukciju ugrađenu s BRB-ovima. Istraživanja provedena na BRB-ovima mogu se podijeliti u dva dijela: eksperimentalna i numerička.

5.1. Eksperimentalna istraživanja BRB-ova

Eksperimentalno istraživanje BRB-ova započelo je početkom devedesetih godina prošlog stoljeća, nakon čega su u sljedeća dva desetljeća uslijedila mnoga druga. Opći sažetak do sada provedenih eksperimentalnih istraživanja prikazan je u tablici 1.

Tablica 1. Sažetak eksperimentalnih istraživanja BRB-ova

Literatura	Parametri	n	b	t	L	Materijal jezgre	Istraženi parametar
Fujimoto i sur. 1990. [12]		5	190	19	3190	valjani čelik JIS G 3101 SS41	Dimenzije elementa koji sprječava izvijanje
Hasegawa i sur. 1999. [36]		2	130	22	1291	valjani čelik JIS G 3101 SS400	Globalni odziv opterećenja i pomaka
Iwata i sur. 2001. [14]		4	176	16	1296	valjani čelik SN400B	Neadhezivni materijal
Nakamura i sur. 2000. [37]		11	100	16–25	960–1180	LYP100(4), SN400B (3), LYP235(4)	Svojstva umora
Koetaka i sur. 2001. [38]		7	120–150	22	1080–1910	SM490A s graničnim naprezanjem 345 N/mm ² i SN490B s graničnim naprezanjem 364 N/mm ²	Sigurnosni faktor protiv izvijanja savijanjem, omjer površine presjeka na kraju i onog u središtu veza i omjer širine i debljine na kraju vezova.
Meritt i sur. 2003. [39]		8	64–161	19–25	4470–4704	Čelik A36, nazivne granice razvlačenja, F _y = 248,2 MPa	Rezultirajuća sila veza, osna (uzdužna) deformacija veza, histerezna energija, kumulativna neelastična aksijalna deformacija, faktor prilagodbe tlačne čvrstoće i faktor prilagodbe vlačne čvrstoće
Black i sur. 2004. [14]		5	145–204	19	3090–3410	JIS SM490A s graničnim naprezanjem 418,5 MPa i JIS SN400B s graničnim naprezanjem 285,4 MPa	Histerezno ponašanje
Iwata 2004. [40]		4	176	16	2√2 puta visina kata	SN400B (F _y = 262,6 MPa i 289,1 MPa)	Karakteristike histereze, karakteristike konačnog loma i kumulativna apsorbirana energija
Tsai i sur. 2004. [41]		10	100	20	900	A572 GR50	Neadhezivni materijal
Tremblay i sur. 2006. [42]		2	125	12,7	1001–2483	G40.21-350WT čelik s F _y = 370 MPa i F _u = 492 MPa	Odnos osnog opterećenja i deformacije jezgre veza
Ma i sur. 2008. [43]		3	84	18	929	Q235 čelik	Križni oblik jezgre
Ding i sur. 2009. [44]		10	70,8–100	7,5–7,64	1106–1789	Kineski Q235-B čelik s nazivnim graničnim naprezanjem f _y = 235 MPa i vlačno naprezanje f _u = 420 MPa	Neadhezivni materijal, razmak između ploče i veza, konfiguracija čelične šipke i rubne armature te efektivna širina ploče
Eryasar 2009. [45]		12	100	10	900	Europski čelik razreda S355 (EN 10025, 1994.) (F _y = 355 MPa i F _u = 510 MPa)	Globalni odziv opterećenja i pomaka, faktori prilagodbe, početna krutost, popuštanje i oblici izvijanja

n - broj uzoraka, b - širina jezgre [mm], t - debljina jezgre [mm], L - duljina plastifikacije jezgre [mm]

Tablica 1. Sažetak eksperimentalnih istraživanja BRB-ova - nastavak

Literatura	Parametri	n	b	t	L	Materijal jezgre	Istraženi parametar
Ju i sur. 2009. [46]		7	100×100×6×8		1900–2100	Čelik SS400 s granicom razvlačenja od 240 MPa	Debljina vanjske cijevi i neograničenog dijela jezgre
Chou i Chen 2010. [47]		4	150	22	2880	ASTM Gr. 50 čelik	Veličina elementa koji sprječava izvijanje i uklanjanje neadhezivnog materijala
Mirtaheri i sur. 2011. [48]		4	80	8	600–1300	čelik s graničnim naprežanjem 297,5 MPa	Duljina jezgre koja se plastificira, rasipanje energije i efektivna krutost
Fahenstock i sur. 2012. [49]		2	35.6 i 38.1	12,7	1364	Čelik A36 s graničnim naprežanjem 305 MPa i 365 MPa	Histerezni odgovor i kapaciteti kumulativne deformacije
Takeuchi i sur. 2012. [50]		6	94–130	16–22	1000	čelična ploča jezgre s graničnim naprežanjem 257–261 N/mm ²	Okomita sila ploče jezgre, lokalni val izvijanja ploče jezgre i krajnja čvrstoća stijenske elementa koji sprječava izvijanje
Hikino i sur. 2013. [51]		2	74	12	30 i 110	SN400B s graničnim naprežanjem 297 MPa	Stabilnost BRB-a izvan ravnine
Wang i sur. 2013. [52]		10	100	10	1360	Legura aluminija HS63S-T5 (granično naprežanje 206,3 MPa)	Produženi segment jezgre
Zsarnoczay A. 2013. [53]		10	40–55	15–20	1800–2000	Čelik razreda S235 JR	Kapacitet kumulativne neelastične deformacije, faktor prekomjerne čvrstoće materijala, faktor prilagodbe očvršćivanja plastičnom deformacijom, faktor prilagodbe čvrstoće u tlaku i ukupna prilagodba očvršćivanja u tlaku
Tabatabaei i sur. 2014. [54]		2	80	10	1100	ST 37-2 (DIN 17100) s nazivnom granicom razvlačenja od 235 MPa i graničnom čvrstoćom od 365 MPa	Histerezni odzivi
Zhao i sur. 2014. [55]		8	49,5–54	5–8	1400	Q235-B	Omjer širine i debljine jezgre (b/t) i razmak između jezgre i zaštitne cijevi
Chen i sur. 2016. [56]		7	80–100	10	880–900	Q235B čelik	Širina razmaka u ravnini i dimenzije jezgre
Sahoo i Ghowsi 2017. [57]		2	40	8	1000	Fe410 s određenim graničnim naprežanjem od 250 MPa	Histerezni odgovor, odziv rasipanja energije i duktilnost pomaka
Jia i sur. 2018. [58]		5	70	10	670	blagi čelik SS400 s graničnim naprežanjem od 275,6 GPa	Početna krutost, maksimalni indeksi duktilnosti, kumulativni indeksi duktilnosti i ekvivalentni omjeri viskoznog prigušenja

n - broj uzoraka, b - širina jezgre [mm], t - debljina jezgre [mm], L - duljina plastifikacije jezgre [mm]

Tablica 1. Sažetak eksperimentalnih istraživanja BRB-ova - nastavak

Literatura	Parametri	n	b	t	L	Materijal jezgre	Istraženi parametar
Qu i sur. 2018. [59]		7					Projektiranje spoja, materijal spoja, materijal za odvajanje i protokol opterećenja
Wang i sur. 2018. [60]		6	100–150	10	1800–2100	Q195(5) s graničnim naprežanjem 216 do 220 MPa i Q235B(1) s graničnim naprežanjem 270 MPa do 280 MPa	Krivulja histereze, "skeleton" kostura, vlačni i tlačni neujednačeni koeficijent, koeficijent rasipanja energije, ekvivalentni omjer viskoznog prigušenja, performanse plastične deformacije te bočni pomaci vanjske ploče koja sprječava izvijanje BRB-a niske plastifikacije u ravnini i izvan nje
Li i sur. 2019. [61]		6	20–24	6	230	Q235B s graničnim naprežanjem 251,3 MPa	Histerezni odgovor
Quang i sur. 2019. [62]		2	60	20	1700	Q235 čelik (nominalna granica razvlačenja od 235 MPa)	Krutost i nosivost uzoraka
Qu i sur. 2020. [63]		6	56	10	500	Čelik Q235B proizveden u Kini (235 MPa)	Brzina deformacije, prekomjerna čvrstoća na tlak i kumulativni kapacitet deformacije BRB-ova
Zhou i sur. 2021. [64]		3	Miura-ori uzorak duljine 90 mm i visine 69,28 mm	6	1472–1536	Q235 niskouglični čelik	Histerežno ponašanje

n - broj uzoraka, b - širina jezgre [mm], t - debljina jezgre [mm], L - duljina plastifikacije jezgre [mm]

5.2. Numerička istraživanja BRB-ova

U posljednjih nekoliko desetljeća proveden je niz istraživanja kako bi se utvrdila učinkovitost i ponašanje BRB-ova. Clark i sur. [65] u svojem su istraživanju pokazali da okviri opremljeni BRB-ovima mogu imati veće zaostale pomake zbog niske krutosti veza nakon dosezanja granice popuštanja. Slične rezultate naveli su i Sabelli i sur. [15]. Fahenstock i sur. [66] u svojoj numeričkoj simulaciji procijenili su maksimalnu vrijednost zahtjeva za duktilnošću koja je bila 26 u slučaju šest gibanja tla skaliranih da budu 1,5 puta veći od intenziteta projektirane razine. Izračunali su vrijednost kumulativnog zahtjeva za duktilnošću veza od 99 u slučaju projektiranog intenziteta potresa i 171 u slučaju maksimalnog očekivanog intenziteta potresa. Mislilo se da seizmičko projektiranje tih vezova ne može biti pod utjecajem niskocikličkog umora. Kiggins i Uang [67] te Ariyaratana i Fahenstock [68] proveli su istraživanja o dvojnim sustavima koji se sastoje od okvira s vezovima sa spriječenim izvijanjem i čeličnih okvira. Radili su na metodama smanjenja zaostalih pomaka. Primjenu tih vezova u visokim zgradama proučavali su Kim i sur. [69] Postigli su dobre rezultate u pogledu čvrstoće, krutosti i duktilnog odziva vezova.

Brojne analize konačnih elemenata provedene su na BRB-ovima različitih konfiguracija i svojstava materijala. Fahenstock

i sur. [17] objasnili su nelinearne dinamičke analize koje su provedene na okvirima BRB-a primjenom zapisa o gibanju tla skaliranih na dvije razine seizmičke opasnosti. Takeuchi i sur. [35] proveli su nelinearne analize kako bi objasnili lokalni mehanizam izvijanja vanjske cijevi. Zaključili su da se, kada postoji veći razmak između jezgre, primjenjuje vanjska cijev, a debljina cijevi je relativno manja te dolazi do značajnog povećanja brzine deformacije cijevi. Iz svojih su analiza također zaključili da duljina elementa jezgre ne utječe na performanse veza. Korzekwa i Tremblay [70] proveli su i nelinearne analize primjenom cikličnog opterećenja na potpuno čelične BRB-ove. Analizirali su prirodu kontaktnih sila koje su se razvile između elementa jezgre i vanjske cijevi. Zaključili su da se tim silama odupiru vijci u vlaku i cijev u savijanju. Ove sile rezultirale su razvojem uzdužnih sila trenja koje su dovele do tlačnih opterećenja koja djeluju osno u vanjskoj cijevi dok su ciklusi pomaka nametnuti na vez. Dusicka i Tinker [71] proučavali su iznimno lagane BRB-ove s jezgrom od aluminija i ovijenim polimernim pultrudiranim cijevima ojačanim staklenim vlaknima kao elementima koji sprječavaju izvijanje. Utvrđeno je da su ti BRB-ovi učinkoviti u odnosu na oblik stabilnosti globalnog izvijanja i težili su približno 27 % konvencionalnih BRB-ova s ispunom i približno 41 % potpuno čeličnih BRB-ova. Anniello i sur. [72] teoretski su procijenili performanse potpuno

čeličnih demontažnih BRB-ova pomoću analize konačnih elemenata. Cilj je bio nadograditi postojeće armiranobetonske zgrade koje su u prošlosti već bile eksperimentalno testirane. Hoveidae i Rafezy [73] proveli su analize konačnih elemenata u potpuno čeličnim BRB-ovima kako bi proučavali lokalno izvijanje čelične ploče jezgre. Karimi i sur. [74] proveli su analizu konačnih elemenata na troetažnom čeličnom okviru koji uključuje BRB-ove i procijenili seizmički odziv okvira pod udarnim opterećenjem i dinamičkom analizom. Rossi [75] je numerički istražio ove vezove u kontekstu pravila izotropnog očvršćivanja. Hosseinzadeh i Mohebi [76] istražili su modele konačnih elemenata potpuno čeličnih BRB-ova pod cikličkom analizom i usporedili performanse tih vezova s običnim vezovima. Ispitali su i odzive okvira s potpuno čeličnim BRB-ovima za nelinearne statičke i dinamičke analize. Almeida i sur. [77] predstavili su analizu slučaja naknadnom adaptacijom postojeće zgrade rimokatoličke škole pri čemu su primijenjeni potpuno čelični BRB-ovi. Procijenili su ponašanje zgrade nelinearnom metodom postupnoga guranja i zaključili da se BRB-ovi mogu koristiti i za pojačanje postojećih zgrada. Lin i sur. [78] numerički su ispitali sustav potpornih nosača s prigušenjem koji uključuje BRB-ove kao uređaje za rasipanje energije. Seizmička učinkovitost pojedinačnog BRB sustava veza procijenjena je pomoću nelinearne analize odziva te je utvrđeno da je zadovoljavajuća za manje potrese. Rahnard i sur. [79] predložili su metodu za precizno modeliranje i izradu jednostavnog modela BRB-a. Razmotrili su analizu slučaja na dva uzorka koji su eksperimentalno testirani za modeliranje BRB-ova pomoću modeliranja konačnih elemenata primjenom softvera ABAQUS. Avci-Karatas i sur. [80] razvili su modele konačnih elemenata prethodno testiranih uzoraka primjenom potpuno eksperimentalnih podataka [81]. Modelirali su dvije čelične jezgre s čeličnim elementom koji sprječava izvijanje i jednu jezgru od aluminijske legure s aluminijskim elementom koji sprječava izvijanje i identificirali ključne probleme koji reguliraju histerezo ponašanje BRB-ova. Alborzi i sur. [82] predložili su hibridni BRB koji se sastoji od elementa jezgre izrađenog pomoću više ploča s različitim ponašanjima napreznja i deformacija. Ponašanje tog inovativnog hibridnog BRB-a uspoređeno je s ponašanjem konvencionalnih BRB-ova na tri okvira zgrada različitih visina pomoću analize vremenskog zapisa i zaključeno je da predloženi hibridni BRB omogućava bolje rasipanje energije. Jamkhaneh i sur. [83] predložili su novu vrstu potpuno čeličnog BRB-a s valovitim rubovima jezgre i vanjskog omotača i ispitali ih pomoću modela konačnih elemenata. Primijećeno je da valoviti i rebrasti rubovi povećavaju otpornost na izvijanje vezova. Naghavi i sur. [84] numerički su ispitivali različite vrste centrično ukrućenih okvira i BRB okvira kroz nelinearnu metodu postupnoga guranja i analizu vremenskog zapisa pomoću softvera ABAQUS. Primijetili su da BRB-ovi prolaze kroz značajnu plastičnost bez formiranja plastičnih zglobova i na taj način rasipaju veću količinu energije. Utvrđeno je da elementi BRB-a odgađaju popuštanje u okviru.

5.3. Kriteriji za projektiranje BRB-ova

Okviri opremljeni potpuno čeličnim BRB-ovima uvelike se primjenjuju u različitim zemljama, uključujući SAD, zbog znatno boljih seizmičkih svojstava i učinkovitosti kao bočne konstrukcije otporne na opterećenje. Američki institut za čelične konstrukcije (AISC) nije analizirao ove okvire u izdanju Seizmičkih odredbi za čelične konstrukcije iz 2005. godine. Međutim, AISC je u suradnji s Udrugom građevinskih inženjera Kalifornije dao određene smjernice za izradu takvih okvira. Te su smjernice izrađene s namjerom uključivanja u izdanje navedenih odredbi iz 2005. godine [76]. Preporučene odredbe nakon toga su pregledane i uključene u FEMA 450. Prihvaćanje teorije BRB-a za primjenu u bilo kojem planu zahtijeva da vez ispunjava kriterije iz odjeljka 8.6.3.7.10 preporučenih odredbi NEHRP-a iz 2003. za seizmičke propise za nove zgrade i druge konstrukcije (FEMA 450) [85]. Smatra se da se u SAD-u projektiranje BRB-ova temelji na ekvivalentnoj metodi bočne sile. Važno je napomenuti da se smatra kako je krajnji uzdužni pomak dvostruko veći od uzdužnog pomaka veza u izdanju AISC seizmičkih odredbi za čelične konstrukcije iz 2005. godine te je 1,5 puta veći od uzdužnog pomaka veza objavljene u FEMA 450.

5.3.1. Elementi uključeni u seizmički proračun

Američke norme za projektiranje određuju koeficijent modifikacije odziva R za seizmičko projektiranje zgrada i okvira. Taj se koeficijent primjenjuje za minimiziranje elastičnih seizmičkih sila, čime se prikazuje nelinearni odziv konstrukcije. U europskim je normama faktor ponašanja q sličan faktor [86]. Međutim, BRB okviri nisu uključeni. Prema "preporučenim odredbama za vezove sa spriječenim izvijanjem" koje je objavio Pododbor za seizmologiju Udruge konstrukcijskih inženjera Sjeverne Kalifornije, koeficijent modifikacije odziva od 8 prikladan je za spojeve nosača i stupa koji nisu otporni na momente, a trebao bi biti 9 za spojeve nosača i stupa koji su otporni na momente. Međutim, te su vrijednosti smanjene na 7, odnosno 8, kada su predložene "Preporučenim odredbama NEHRP-a za seizmičke propise za nove zgrade i druge konstrukcije" [87]. Te su vrijednosti zatim usvojene normom ASCE/SEI 7 pod imenom "Najmanja predviđena opterećenja za zgrade i druge konstrukcije" [88]. Uspoređujući koeficijent modifikacije odziva prema američkim normama s faktorom ponašanja prema Eurokodu 8, može se zaključiti da će vrijednost q za čelični okvir visoke duktilnosti biti približno 6,5 do 8, što je znatno manje od vrijednosti R od 7 do 8 za okvire BRB-a prema američkim normama. Vrijednost q za centrično ukrućene okvire uzima se kao 4,8 u Eurokodu 8. Projektiranje BRB okvira često je regulirano metodama krajnjeg graničnog stanja. Štoviše, ti okviri imaju relativno veću krutost i stoga će vrijednost q biti veća. To znači da bi uporaba okvira opremljenih BRB-ovima bila ekonomična u europskim seizmičkim područjima u odnosu na druge vrste okvira. Štoviše, troškovi popravka u drugim vrstama okvira znatno su viši od troškova u slučaju okvira BRB-a jer

se BRB-ovi mogu lako zamijeniti nakon bilo kojeg seizmičkog događaja. Stoga se umjesto konvencionalnog neadhezivnog tipa BRB-ova preferira primjena potpuno čeličnih BRB-ova jer se lako proizvode, ugrađuju i zamjenjuju.

Mahamoudi i Zaree [89] također su pokušali procijeniti vrijednost R za okvire BRB-a. Izveli su statičku nelinearnu analizu na modelima zgrada s jednostrukim i dvostrukim rasponom, više katova i različitim konfiguracijama vezova. Dobili su visoke vrijednosti faktora R za okvire BRB-a. Također su primijetili da na vrijednost R uvelike utječe visina zgrade i broj vezova.

Moni i sur. [90] također su proveli istraživanje kako bi se utvrdila vrijednost R za okvire BRB-a niske do srednje visine prema Nacionalnom kanadskom zakonu o gradnji (NBCC) 2010. Utvrđeno je da maksimalna vrijednost R iznosi 6,17 za okvir BRB-a. Istraživači su također uočili da su okviri s većim visinama imali niže vrijednosti R .

Abou-Elfath i sur. [91] na temelju svog istraživanja predložili su novi faktor modifikacije odziva za okvire BRB-a koji će se uzeti u obzir u egipatskim normama. Ne postoji definirana vrijednost R za okvire BRB-a u egipatskim normama i stoga su okviri s BRB-ovima projektirani pomoću vrijednosti R koja iznosi 4,5, a koja se primjenjuje u konvencionalnom sustavu izvijanja. Zaključili su da je vrijednost R za okvire BRB-a znatno veća.

5.3.2. Veličina jezgre

Projektiranje veličine čelične jezgre poprilično je jednostavno ako je poznata potrebna uzdužna granica popuštanja koja se može lako izračunati. Prema odredbama AISC-a iz 2005. [32], za okvir BRB-a, otpornost nosača i stupova na savijanje ne uzima se u obzir pri određivanju potrebnih granica popuštanja BRB-ova. Dakle, ukrućeni okvir djeluje kao statički determinantna rešetkasta konstrukcija i može se lako analizirati u svrhu projektiranja. Površina poprečnog presjeka jezgre veza A_c može se izračunati kako je izraženo u jednadžbi (20).

$$A_c = \frac{P_y}{\phi F_y} \quad (20)$$

pri čemu je P_y potrebna granica popuštanja F_y je granica popuštanja čelične jezgre, a ϕ je faktor smanjenja čvrstoće koji je jednak 0,9 za BRB-ove.

Materijali navedeni u skladu sa smjernicama AISC-a za čeličnu jezgru uključuju JIS G 3136 SN400 B, ASTM A36 ili ASTM A572 razreda 42.

5.3.3. Projektiranje cijevi koje sprječavaju izvijanje

Odabir materijala i veličine cijevi koja sprječava izvijanje nije jednostavan kao kod jezgre. Cijev sprječava izvijanje unutarnje jezgre i stoga mora biti vrlo pažljivo projektirana. Projektiranje cijevi koja sprječava izvijanje prije svega ovisi o maksimalnoj uzdužnoj sili koju će prenijeti unutarnja čelična jezgra. Ta sila ovisi o sili trenja između jezgre i cijevi koja sprječava izvijanje,

faktoru prekomjerne čvrstoće materijala čelične jezgre, ograničenoj bočnoj deformaciji čelične jezgre i očvršćivanju materijala. Ta sila također može biti veća od punog plastičnog kapaciteta poprečnog presjeka cijevi koja sprječava izvijanje. Prema smjernicama AISC-a [32], maksimalna sila koju prenosi vez je kao što je navedeno u izrazu (21),

$$P_{max} = \beta \cdot \omega \cdot R_y \cdot P_y \quad (21)$$

pri čemu je β faktor prilagodbe čvrstoće u tlaku, koji je jednak omjeru maksimalne tlačne i maksimalne vlačne sile; ω je faktor prilagodbe očvršćivanja plastičnom deformacijom, koji je jednak omjeru maksimalne vlačne čvrstoće i projektirane granice popuštanja; R_y je faktor prekomjerne čvrstoće materijala, koji je jednak omjeru maksimalnog katnog posmika u stvarnom ponašanju i prve značajne granice popuštanja u konstrukciji.

Za cijev koja sprječava izvijanje, materijali navedeni u AISC smjernicama uključuju JIS G3466 STKR 400 ili ASTM A500, razred B. Međutim, za cijev koja sprječava izvijanje mogu se primjenjivati i drugi materijali ako su prikladni za ispitivanje. Neki istraživači predložili su druge materijale osim čelika koji se mogu primjenjivati kao materijal cijevi koja sprječava izvijanje. Rahai i sur. [92] primijenili su PVC cijevi i limove od FRP-a za vanjski pokrovni materijal te su eksperimentalno i numerički istraživali takve BRB-ove i zaključili da su ti materijali prikladna alternativa za čelik. Djelomične BRB-ove predložio je i Abraham [93]. Izrađeni su od čeličnih elemenata stabiliziranih polimerom ojačanih vlaknima kroz naknadnu primjenu.

5.3.4. Ostali elementi

Ostali elementi uključuju neadhezivan materijal (ako je primijenjen), vrstu spoja i dio za spajanje veza. Za potpuno čelične BRB-ove, glavna funkcija nanošenja nije premazivanje jezgre neadhezivnim materijalom, već ograničavanje vezivanja između jezgre i elementa koji sprječava izvijanje. Alternativno, može se osigurati mali razmak između cijevi koja sprječava izvijanje i jezgre. Za potpuno čelične BRB-ove, cijev koja sprječava izvijanje spojena je s jezgrom. To se može učiniti zavarivanjem ili pomoću vijaka. Za projektiranje vijaka, Wu [94] je dobio formulu za izračun maksimalnog vlačnog opterećenja N_s na vijcima u izrazu (22).

$$N_s = \frac{4S_s + 2\gamma\epsilon_c w_c P_{max}}{L_c} \quad (22)$$

pri čemu je S_s razmak između jezgre i elementa koji sprječava izvijanje na jačoj strani, γ plastični Poissonov omjer, ϵ_c očekivana maksimalna deformacija jezgre, w_c širina jezgre potpuno čeličnog BRB-a, L_c udaljenost od središta do središta između dva vijaka, a P_{max} maksimalno opterećenje koje nosi potpuno čelični BRB na završnoj razini.

Dio jezgre koji se proteže izvan zaštitne cijevi povezan je s okvirom čvornim limovima. Ovi produženi dijelovi nisu popustljivi i mogu se povezati s okvirom vijčanim spojevima. U današnje se

vrijeme daje prednost zglobnim spojevima, a ne standardnim i modificiranim vijčanim spojevima zbog nižih troškova ugradnje i zanemarivog momenta prevrtanja. Time se olakšava uporaba BRB-ova veće duljine jezgre, što rezultira manjom deformacijom. Dostupne smjernice ne uzimaju u obzir produženi dio jezgre izvan zaštitne cijevi. Taj dio može pretrpjeti torzijsko izvijanje ili može doživjeti slom prije popuštanja dijela jezgre i stoga zahtijeva više pažnje.

5.3.5. Druge mogućnosti

Osim različitih preporuka normi iz različitih zemalja, proučavani su i različiti pristupi projektiranju BRB-ova koji se ugrađuju u čelične okvire. Metoda temeljena na sili uvijek je bila prvi izbor u ranijim istraživanjima. Međutim, trenutačno metode temeljene na pomaku i energiji dobivaju pozornost prilikom projektiranja BRB okvira. Projektiranje temeljeno na performansama primjenom metode temeljene na energiji postaje popularan u performansama BRB okvira tijekom seizmičkih pojava. Štoviše, potpuno čelični BRB-ovi također dobivaju na popularnosti među projektantima za primjenu u BRB okvirima jer se lako proizvode, kao i zamjenjuju ili popravljaju nakon bilo kojeg seizmičkog djelovanja.

Housner [95] je bio prvi istraživač koji je osmislio koncept metode projektiranja temeljene na energiji. Kim i sur. [96] predložili su metodu seizmičkog projektiranja čeličnih okvira s BRB-ovima na temelju koncepta energetske bilance. Izračunali su histerezni zahtjev čeličnog okvira i u skladu s tim odredili veličinu BRB-ova. Ye i sur. [97] predstavili su okvir za seizmičko projektiranje čeličnih konstrukcija s ukrućenim okvirima. Avila i sur. [98] predložili su metodu za seizmičko projektiranje okvira temeljeno na energiji prema metodi potresnog inženjeringa temeljenog na performansama. Ma [99] je predložio metodu za seizmičko projektiranje čeličnih ekscentrično ukrućenih okvira temeljenu na energiji. Metoda se temeljila na spektrima histerezne energije i spektrima akumuliranog omjera duktilnosti. Smatra se da je konstrukcija BRB okvira donekle slična onoj ekscentrično ukrućenih okvira, te se stoga predložena metoda može primjenjivati za seizmičko projektiranje BRB okvira. Međutim, metoda je predložena prema kineskoj klasifikaciji tla.

5.4. Načini sloma koji se moraju uzeti u obzir u slučaju BRB-ova

Tijekom provođenja analize BRB-ova u numeričkim ili eksperimentalnim istraživanjima potrebno je uzeti u obzir sljedeće načine sloma.

5.4.1. Globalno izvijanje sklopa

Najvažniji kriterij stabilnosti BRB-ova je njegova provjera u odnosu na ukupno izvijanje veza. To je potrebno prethodno razmotriti. Većina istraživanja provedenih u prošlosti usredotočilo se samo na ovaj način sloma. Istraživači su predložili različite

ograničavajuće uvjete sile kako bi spriječili slom globalnog izvijanja. Prethodno je predloženo da do globalnog izvijanja ne dolazi kada je Eulerova sila izvijanja elementa koji sprječava izvijanje veća od graničnog naprezanja unutarnje jezgre čak i ako je element jezgre podvrgnut intenzivnoj tlačnoj sili. Nadalje, za potrebe projektiranja predložene su različite vrijednosti omjera Eulerove sile izvijanja elementa koji sprječava izvijanje i granice popuštanja jezgre. Hoveidae i Rafezy [100] predložili su da taj omjer bude 1,2.

5.4.2. Lokalno izvijanje unutarnje jezgre

Takeuchi i sur. [101] ispitali su lokalno izvijanje elementa jezgre i procijenili učinke debljine vanjske cijevi na izvijanje ovih vezova. Također su naveli da nema koristi od proučavanja ponašanja BRB-ova u elastičnom rasponu jer ti vezovi trpe velike neelastične deformacije zbog jakih gibanja tla. Hoveidae i Rafezy [73] utvrdili su da koeficijent trenja između jezgre i elementa koji sprječava izvijanje, razmak između njih i konfiguracija sučelja imaju značajne učinke na ponašanje lokalnog izvijanja unutarnje čelične jezgre. Predložili su da odgovarajuća veličina razmaka s neadhezivnim materijalom odgovarajuće debljine s manjim koeficijentom trenja može spriječiti lokalno izvijanje čelične jezgre osiguravanjem slobodnog bočnog širenja jezgre. Također su predložili da je primjena neadhezivnog materijala bolja opcija od opcije izravnog kontakta i opcije razmaka.

5.4.3. Sužavanje poprečnog presjeka unutarnje jezgre

Slom uzrokovan sužavanjem poprečnog presjeka jezgre općenito se javlja kada je broj ukrućenih okvira nizak, a BRB-ovi koji se primjenjuju su kratki. Kratki BRB-ovi obično su krući. Time nastaju velike sile koje utječu na BRB-ove koji su malobrojni. Kao rezultat toga, unutarnja jezgra BRB-a inhibira prekomjerna naprezanja pri visokim vlačnim silama. Ta naprezanja potom dosežu čvrstoću materijala i posljedično, deformacija dovodi do sužavanja poprečnog presjeka unutarnje jezgre. Iako je ponašanje jezgre nakon popuštanja stabilno i duktilno, promjena opterećenja iz sužavanja određuje strukturno ponašanje BRB-a. Stoga bi se zabrinutost zbog pojave takvih situacija trebala rješavati u fazi projektiranja.

5.4.4. Izvijanje unutarnje jezgre nakon sužavanja poprečnog presjeka

Kada dođe do sužavanja poprečnog presjeka unutarnje jezgre zbog promjene opterećenja, ona ostaje u početnoj fazi. To sužavanje stvara slabe točke u čeličnoj jezgri, a u jezgri dolazi do sloma u ravnomjernoj raspodjeli deformacija duž svoje duljine plastifikacije kada je promjena opterećenja u tlaku. Stoga, slabe točke koje se formiraju oštećuju jezgru razvojem neujednačenog izvijanja. Neujednačeno izvijanje jezgre proizvodi poprečnu silu na elementu za sprječavanje izvijanja u kojem se jezgra nalazi. Nakon toga dolazi do ispupčenja kućišta.

5.4.5. Izvijanje jezgre izvan ravnine

Dio unutarnje jezgre koji se proteže izvan elementa za sprječavanje izvijanja može se izviti tijekom promjene opterećenja zbog tlaka. Proizvođači bi stoga trebali učvrstiti ove krajnje dijelove protiv izvijanja oko slabije osi. To se može postići okomitim pločama za ukrućenje ili stabilizacijskim obujmicama. Predloženo je da kada je duljina ugrađenog dijela približno 1,5 do 2 puta veća od širine jezgre na dijelu plastifikacije, tada ne dolazi do gubitka krutosti na savijanje duž duljine jezgre [102]. Nadalje, preferira se paralelna orijentacija jer je nepovoljna za stanje izvijanja izvan ravnine. Slika 6. prikazuje tipične načine sloma u BRB-ovima.

5.5. Primjene BRB-ova

BRB-ovi imaju praktičnu primjenu u brojnim projektima širom svijeta, posebno u Japanu. Prijašnji BRB-ovi ugrađeni u zgrade bili su nevezani ispunama. Međutim, sada se daje prednost potpuno čeličnim BRB-ovima. Potpuno čelični BRB-ovi jednostavni su za ugradnju u okvire zbog svoje male težine i jednostavne izrade. Ugradnja BRB-ova u čelične mostove kao seizmičkih uređaja pokazala se najučinkovitijom metodom kontrole oštećenja. Očekuje se da će BRB-ovi u čeličnim mostovima učinkovito izdržati jake potrese tri puta bez zamjene [103]. Upotreba BRB-ova kao prigušivača u čeličnim sustavima

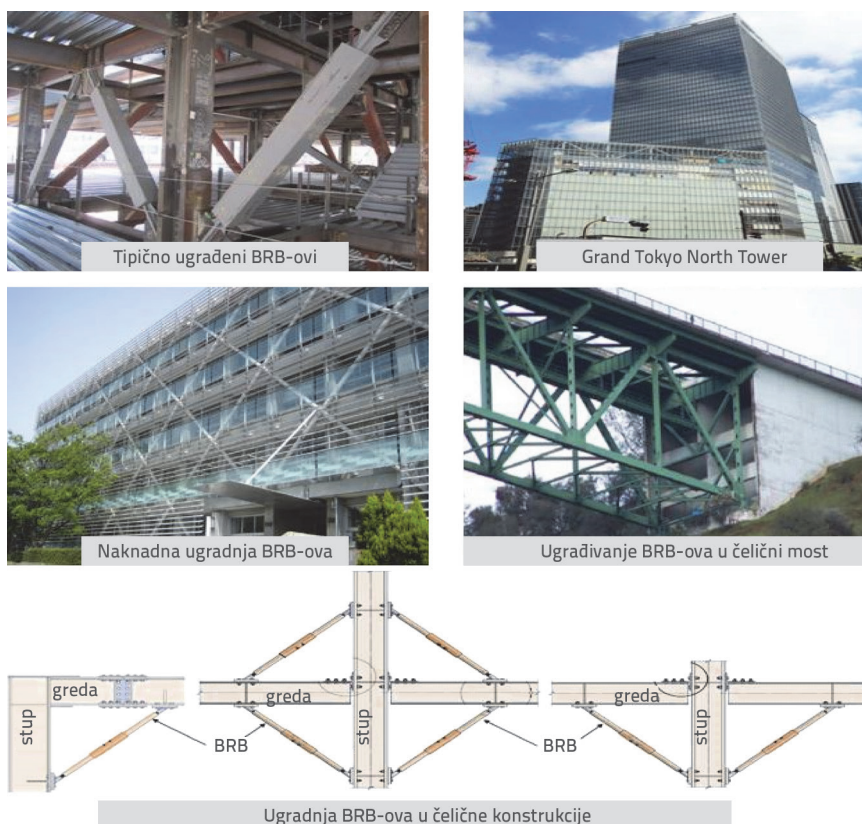
može postići zadovoljavajuće performanse. BRB-ovi se mogu primjenjivati za učvršćivanje pločastih nosača u konstrukcijama mostova kako je prikazano na slici 7. Mostovi velikog raspona mogu postati učinkovitiji naknadnom ugradnjom BRB-ova zahvaljujući njihovoj boljoj arhitektonskoj fleksibilnosti i jednostavnosti ugradnje [104]. BRB-ovi se primjenjuju u raznim drugim zemljama, uključujući SAD, Kinu, Tajvan, Tursku i Novi Zeland. Široka je upotreba u Americi i Japanu, a BRB sustav projektiranja uključen je i u novu generaciju Eurokodova. Prema Europskoj normi EN 15129 [105] o antiseizmičkim uređajima, BRB-ovi su kategorizirani kao uređaji ovisni o nelinearnom pomaku. Izravna primjena američkih kriterija za projektiranje ne može biti praktična tehnika jer postoje značajne razlike između europskog i američkog pristupa propisima o konstrukcijama. Zsarnóczy [106] je stoga predložio postupke projektiranja okvira BRB-a u skladu s Eurokodom, testiranjem uzoraka BRB-a koje je dostavio Star Seismic Europe Ltd.

BRB-ovi su odabrani u sklopu nekoliko projekata naknadne ugradnje kako bi služili za rasipanje energije i poboljšanje seizmičkog ponašanja postojećih zgrada na Tajvanu. Na Sveučilištu kineske kulture u Taipeiju, primjenom BRB-ova kao uređaja za rasipanje energije izgrađena je desetokatna gimnazija. U neduktilnim okvirima BRB-ovi se uglavnom ugrađuju u perimetar kao vanjski okvir. Takve vrste naknadnih ugradnji uglavnom je teško ostvariti. Za ove situacije predlaže se "integrirani fasadni inženjering" [107]. Ovaj koncept

kombinira rekonstrukciju konstrukcije, projektiranje fasade i okoliša te uključuje poboljšanja seizmičkih performansi pomoću uređaja za disipaciju seizmičke energije (poput BRB-ova). BRB-ovi se također primjenjuju u rešetkastim konstrukcijama i prostornim konstrukcijama. Toyotin stadion je primjer primjene BRB-ova na potpurnu konstrukciju prostorne konstrukcije. Štoviše, BRB-ovi su posljednjih godina primjenjivani u izgradnji niza mostova. Nedavno su se BRB-ovi primijenili u okviru za njihanje (eng. *rocking frame*) ili okviru nalik kralježnici (eng. *spine frame*) koji se obično identificira kao "sustav ojačanja" (eng. *strong-back system*).

6. Zaključak

U ovom su radu autori saželi koncept, razvoj, kriterije stabilnosti, eksperimentalna i numerička istraživanja, konstrukcijska razmatranja, načine sloma koje treba proučavati i primjene vezova sa sprječanim izvijanjem (BRB) tijekom proteklih desetljeća. Može se zaključiti da su BRB-ovi vrlo učinkoviti



Slika 7. Primjene BRB-ova [1, 103, 104]

seizmički uređaji koji su dokazali svoju korisnost. Štoviše, ekonomičniji su u usporedbi s drugim seizmičkim uređajima. Što se tiče proračuna za izgradnju ili nisko do srednje visokih konstrukcija zgrada, BRB-ovi su najbolja alternativa za primjenu u svrhu seizmičkih uređaja. Štoviše, potpuno čelični BRB-ovi preferiraju se u odnosu na konvencionalne BRB-ove zbog njihove niske cijene, manje težine i jednostavne ugradnje. Okviri opremljeni BRB-ovima imaju relativno veću krutost i veće rasipanje energije od okvira otpornih na savijanje i centrično ukrućenih okvira. Autori su pregledali istraživanja provedena na BRB-ovima te su predstavili kratak sažetak o tim vezovima ovisno o dostupnosti literature i prošlim istraživanjima. Može se zaključiti da su BRB-ovi novo i ekonomično rješenje za izgradnju zgrada otpornih na potrese te da predstavljaju učinkovite i pouzdane seizmičke uređaje.

Slom globalnog izvijanja veza prevladavajući je kriterij stabilnosti za koji su BRB-ovi projektirani. Međutim, potrebna su dodatna istraživanja u ovom području. Nadalje, stabilnost na spojnom dijelu i lokalno izvijanje također zahtijevaju dodatna eksperimentalna istraživanja. BRB-ovi imaju nisku krutost nakon popuštanja u odnosu na početnu krutost popuštanja, a to može rezultirati oštećenjem na jednoj razini te je potrebno pronaći rješenja za ovaj problem. Vrlo malo istraživača pokušalo je upotrijebiti materijale koji nisu čelik kao vanjski element koji sprječava izvijanje. Prema autorima, to bi mogla biti važna modifikacija veza jer bi to rezultiralo uštedom troškova i laganom konstrukcijom. Nadalje, šuplji čelični profili mogu se koristiti kao elementi koji sprječavaju izvijanje umjesto teških čeličnih profila. Takvi elementi su lakši s poželjnim momentom inercije, ali to zahtijeva dodatna praktična istraživanja. Još jedan

aspekt koji nije u potpunosti uzet u obzir jest utjecaj ovijenosti između elementa jezgre i okolne ispune. Taj aspekt treba eksperimentalno i numerički proučavati. Tendencija BRB okvira da imaju veće zaostale pomake može se smatrati ograničenjem. Međutim, to je također svojstvo jednog elastičnoplastičnog uređaja. Danas brojne zemlje provode istraživanja o BRB-ovima i praktično ih primjenjuju. Međutim, njihovi su napori usmjereni na razvoj sustava testiranja prema kojem tvrtke mogu proizvoditi patentirane sustave. Slijedom toga, ti se vezovi ne primjenjuju u zemljama u kojima je potražnja niska. Štoviše, prema spoznajama autora, ovi vezovi nisu uključene u norme za projektiranje većine zemalja, ali su u više navrata primijenjene u različitim zemljama sklonim potresima. Stoga je potrebno formulirati jednostavnije i bolje smjernice za njihovo projektiranje. Međutim, mnogi aspekti još uvijek nisu obrađeni i potrebno ih je dodatno proučiti. To može biti razlog zašto većina zemalja još uvijek nije uključila BRB-ove u svoje norme za seizmičko projektiranje. Razvojem tehnologije, u novijoj izgradnji i projektiranju zgrada, povećala se i potreba za tehnologijom rasipanja energije, a BRB-ovi su dokazali svoju učinkovitost kao uređaji za rasipanje energije. Budućnost BRB-ova u seizmičkoj izgradnji najavljuje mnoge mogućnosti. Stoga su potrebna dodatna eksperimentalna i numerička istraživanja kako bi projektanti mogli steći više povjerenja u njihovu primjenu.

Zahvala

Rad je nastao na Visvesvaraya Nacionalnom institutu za tehnologiju, Nagpur, Indija. Autori su zahvalni Institutu na potpori Prachi Mishra u istraživanju u sklopu doktorata.

LITERATURA

- [1] Takeuchi, T., Wada, A., Matsui, R., Silter, B., Lin, P.C., Sutcu, F., Sakata, H., Qu, Z.: Buckling-Restrained Braces and Applications, Japan Society of Seismic Isolation, 2017.
- [2] Engelhardt, M.D., Popov, E.P.: On design of eccentrically braced frames, *Earthquake Spectra*, 5 (1989) 3, pp. 495-511
- [3] Malley, J.O., Popov, E.P.: Shear Links in Eccentrically Braced Frames, *Journal of Structural Engineering*, 110 (1984) 9, pp. 2275-2295
- [4] Bulic, M., Causevic, M., Androic, B.: Reliability of short seismic links in shear, *Bulletin of Earthquake Engineering*, (2013) 11, pp. 1083-1098, 10.1007/s10518-012-9419-y.
- [5] Della, Corte, G., D'Aniello, M., Landolfo R., Mazzolani F.M.: Review of steel buckling restrained braces, *Steel Construction* 4; (2011) 2, 0.1002/stco.201110012.
- [6] Wakabayashi, M., Nakamura, T., Kashihara, A., Yokoyama, H., Morizono, T.: Experimental study on the elasto-plastic behavior of braces enclosed by precast concrete panels under horizontal cyclic loading (Part 1 and Part 2), *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting of Architectural Institute of Japan Kinki Branch-Structural- Section I*, (1973) 6, pp. 121-128
- [7] Kano, Y., Kuwabara, T., Seki, Y., Yoshino, T.: Experimental study on shear wall with braces (Part 1), *Proceedings of the Annual Research Meeting Architectural Institute of Japan, Kanto area, Japan*, 1971.
- [8] Kimura, K., Yoshioka, K., Takeda, T., Furuya, N., Takemoto, Y.: Tests on braces encased by mortar in-filled steel tubes, *Proceedings of the Annual Research Meeting Architectural Institute of Japan, Tokai area, Japan*, 1976.
- [9] Mochizuki, N., Murata, Y., Ando, N., Takahashi, S.: Experimental study on buckling of unbonded braces under axial compressive force (Part 1 and Part 2), *Proceedings of the Annual Research Meeting Architectural Institute of Japan, Tokai area, Japan*, 1979.
- [10] Mochizuki, N., Murata, Y., Ando, N., Takahashi, S.: Experimental study on buckling of unbonded braces under axial compressive force (Part 3), *Proceedings of the Annual Research Meeting Architectural Institute of Japan, Kinki area, Japan*, 1980.
- [11] Fujimoto, M., Wada, A., Saeki, E., Watanabe, A., Hitomi, Y.: A study on the unbonded brace encased in buckling-restraining concrete and steel tubes, *J. Struct. Constr. Eng.*, 1988, pp. 249-58

- [12] Fujimoto et al.: Development of unbonded brace, Quarterly column No. 115, 1990., pp. 91-96
- [13] Wada, A., Connor, J.J., Kawai, H., Iwata, M., Watanabe, A.: Damage tolerant structures, Proceedings of first U.S.-Japan workshop on the improvement of building structural design and construction practices, San Diego, California, 1992.
- [14] Black et al.: Component Testing, Seismic Evaluation and Characterization of Buckling-Restrained Braces, J. Struct. Eng., 2004.
- [15] Sabelli, R., Mahin, S., Chang, C.: Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling-restrained braces, Eng. Struct., 2003, pp. 655-666
- [16] AISC 341-05: Seismic provisions for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, USA, 2002.
- [17] Fahenstock, L.A., Sause, R., Ricles, J.M.: Seismic Response and Performance of Buckling-Restrained Braced Frames, J. Struct. Eng., 133 (2007) 9, pp. 1195-1204
- [18] American Institute of Steel Construction: Seismic provisions for structural steel buildings, Chicago, IL; 2010.
- [19] Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting, EN 1993-1-3, Brussels, Belgium, 2006.
- [20] Filipović, A., Dobrić, J., Marković, Z., Baddoo, N., Flajs, Ž.: Buckling resistance of stainless-steel angle columns, GRAĐEVINAR, 71 (2019) 7, pp. 547-558, <https://doi.org/10.14256/JCE.2563.2018>.
- [21] İzol, R., Gürel, M.A., Buyuktasgin, H.A.A.: Investigation of the effectiveness of nature-inspired buttress forms in supporting masonry structures, GRAĐEVINAR, 74 (2022) 7, pp. 573-586, <https://doi.org/10.14256/JCE.3415.2021>.
- [22] Jančar, J., Zafirov, T., Premrov, M., Dujič, B., Hristovski, V.: Seismic resistance of existing buildings with added light timber structure storeys, GRAĐEVINAR, 74 (2022) 5, pp. 403-417, <https://doi.org/10.14256/JCE.3328.2021>.
- [23] Husain, M., Hassan, H., Mohamed, H.A., Elgharbawy, E.S.: Seismic response of post-tension shear walls – Outrigger structure, GRAĐEVINAR, 74 (2022) 6, pp. 491-502, <https://doi.org/10.14256/JCE.3418.2021>.
- [24] Erdem, R.T., Karal, K.: Performance assessment and strengthening proposal of an existing building, GRAĐEVINAR, 74 (2022) 1, pp. 51-61, <https://doi.org/10.14256/JCE.3250.2021>
- [25] GB50011-2001: Code for seismic design of buildings, Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, Beijing, China, 2001.
- [26] Xie, Q.: State of the art of buckling-restrained braces in Asia, J. Constr. Steel Res., 2005, pp. 727-748
- [27] JGJ99-2015: Technical specification for steel structure of tall building, Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, Beijing, China, 2015.
- [28] T/CECS 817-2021: Technical specification for application of buckling restrained brace, China Association for Engineering Construction Standardization, Beijing, China, 2021.
- [29] JSSC: Seismic Responses and Seismic Design Methods of Frames with Hysteretic Dampers, Tokyo, Japan, 1988.
- [30] Kato, M., Usami, T., Kasai, A.: A numerical study on cyclic elasto-plastic behavior of buckling-restraining brace members, Struct. Eng. Earthq. Eng., 48 (2002), pp. 641-648
- [31] Chen, C.C., Chen, S.Y., Liaw, J.J.: Application of low yield strength steel on controlled plastification ductile concentrically braced frames, Can. J. Civil Eng., 28 (2001) 5, pp. 823-836
- [32] Lopez, W.A., Sabelli, R.: Seismic Design of Buckling-Restrained Braced Frames, Structural steel education council, 2004.
- [33] Della Corte, G., D'Aniello, M., Landolfo, R.: Field Testing of All-Steel Buckling-Restrained Braces Applied to a Damaged Reinforced Concrete Building, J. Struct. Eng., 141 (2015) 1, pp. D4014004
- [34] Takeuchi et al.: Estimation of cumulative deformation capacity of buckling restrained braces, Journal of Structural Engineering, 134 (2008) 5, pp. 822-831
- [35] Takeuchi et al.: Cumulative Cyclic Deformation Capacity of Tubular Braces with Local Buckling, Journal of Structural and Construction Engineering, 608 (2006), pp. 143-150
- [36] Hasegawa et al.: Experimental study on dynamic behavior of unbonded braces, AIJ. J. Technol. Des., 9 (1999), pp. 103-106
- [37] Nakamura et al.: Fatigue properties of practical - scale unbonded braces, Nippon steel technical report No. 82, (2000) 7.
- [38] Koetaka, Y., Narihara, H., Tsujita, O.: Experimental study on buckling restrained braces, Proceedings of the Sixth Pacific Structural Steel Conference, Beijing, China, 2001.
- [39] Meritt et al.: Subassemblage testing of star seismic buckling restrained braces, Report TR-2003/04, Structural Systems Research Projects, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, California.
- [40] Iwata, M.: Applications-design of buckling restrained braces in Japan, Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, 2004.
- [41] Tsai, K.C., Lai, J.W., Hwang, Y.C., Lin, S.L., Wang, C.H.: Research and application of double - core buckling restrained braces in Taiwan, Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, 2004.
- [42] Tremblay et al.: Seismic testing and performance of buckling-restrained bracing systems, Can. J. Civil Eng., (2006), pp. 183-198
- [43] Ma et al.: Full scale test of all-steel buckling restrained braces, Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- [44] Ding et al.: Tests of hysteretic behavior for unbonded steel plate brace encased in reinforced concrete panel, Journal of Constructional Steel Research, 65 (2009), pp. 1160-1170
- [45] Eryasar, M.: Experimental and numerical investigation of buckling restrained braces, Thesis, Graduate school of natural and applied sciences, Middle East Technical University, 2009.
- [46] Ju et al.: Component tests of buckling-restrained braces with unconstrained length, Engineering Structures, 31 (2009), pp. 507-516
- [47] Chou, C., Chen, S.: Subassemblage tests and finite element analyses of sandwiched buckling-restrained braces, Eng. Struct., 32 (2010), pp. 2108-2121
- [48] Mirtaheri et al.: Experimental optimization studies on steel core lengths in buckling restrained braces, Tehran J. Constr. Steel Res., 67 (2011), pp. 1244-1253
- [49] Fahenstock, L.A., Miller, D.J., Eatherton, M.R.: Development and experimental validation of a nickel-titanium shape memory alloy self-centering buckling-restrained brace, Engineering Structures, 40 (2012), pp. 288-298
- [50] Takeuchi et al.: Effect of local buckling core plate restraint in buckling restrained braces, Eng. Struct., 44 (2012), pp. 304-311
- [51] Hikino, T., Okazaki, T., Kajiwara, K., Nakashima, M.: Out-of-Plane Stability of Buckling-Restrained Braces Placed in Chevron Arrangement, J. Struct. Eng., 139 (2013) 11, pp. 1812-1822

- [52] Wang et al.: Low-cycle fatigue testing of extruded aluminium alloy buckling-restrained braces, *Engineering Structures*, 46 (2013), pp. 294–301, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.07.016>.
- [53] Zsarnoczay, A.: Experimental and Numerical Investigation of Buckling Restrained Braced Frames for Eurocode Conform Design Procedure Development, PhD dissertation, Department of structural engineering, Budapest University of technology and economics, 2013.
- [54] Tabatabaei, S.A.R., Mirghaderi, S.R., Hosseini, A.: Experimental and numerical developing of reduced length buckling-restrained braces, *J. Constr. Steel Res.*, 77 (2014), pp. 143–160
- [55] Zhao et al.: Local buckling behavior of steel angle core members in buckling-restrained braces: Cyclic tests, theoretical analysis, and design recommendations, *Engineering Structures*, 66 (2014), pp. 129–145
- [56] Chen et al.: Effect of the unbonding materials on the mechanic behavior of all-steel buckling-restrained braces, *Engineering Structures*, 111 (2016), pp. 478–493
- [57] Sahoo, D.R., Ghowsi, A.F.: Experimental Study of All-Steel Buckling-restrained Braces under Cyclic Loading, *Proceedings of The International conference on earthquake engineering and structural dynamics*, Reykjavik, Iceland, 2017.
- [58] Jia et al.: Experimental Study on High-Performance Buckling-Restrained Braces with Perforated Core Plates, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 19 (2019) 1, 10.1142/S0219455419400042.
- [59] Qu et al.: Testing of Buckling-Restrained Braces with Replaceable Steel Angle Fuses, *J. Struct. Eng.*, 144 (2018) 3.
- [60] Wang et al.: Experimental and numerical study of the seismic performance of an all-steel assembled Q195 low-yield buckling-restrained brace, *Engineering Structures*, 176 (2018), pp. 481–499
- [61] Li et al.: A New Buckling-Restrained Brace with a Variable Cross-Section Core, *Advances in Civil Engineering*, (2019), DOI:10.1155/2019/4620430.
- [62] Quang et al.: Experimental study on two-level yielding buckling-restrained braces, *Journal of Constructional Steel Research*, 159 (2019), pp. 260–269
- [63] Qu et al.: Effects of Strain Rate on the Hysteretic Behavior of Buckling Restrained Braces, *J. Struct. Eng.*, 146 (2020) 1.
- [64] Zhou, Y., Zhang, Q., Cai, J., Zhang, Y., Yang, R., Feng, J.: Experimental study of the hysteretic behavior of energy dissipation braces based on Miura origami, *Thin-Walled Structures*, 167 (2021).
- [65] Clark et al.: Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices, *Proceedings of 69th Annual Convention, SEAOC, Sacramento, USA, 1999.*
- [66] Fahnestock et al.: Ductility Demands on Buckling Restrained Braced Frames Under Earthquake Loading, *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2 (2003) 2, pp. 255–268
- [67] Kiggins, S., Uang, C.M.: Reducing residual drift of buckling-restrained braced frames as a dual system, *Engineering Structures*, 28 (2006), pp. 1525–1532
- [68] Ariyaratana, C., Fahnestock, L.A.: Evaluation of buckling-restrained braced frame seismic performance considering reserve strength, *Engineering Structures*, 33 (2011), pp. 77–89
- [69] Kim et al.: Seismic performance of tubular structures with buckling restrained braces, *The structural design of tall and special buildings*, 18 (2009), pp. 351–370
- [70] Korzekwa, A., Tremblay, R.: Numerical simulation of the cyclic inelastic behaviour of buckling restrained braces, *Proceedings of STESSA, Philadelphia, USA, 2009.*
- [71] Dusicka, P., Tinker, J.: Global Restraint in Ultra-Lightweight Buckling-Restrained Braces, *J. Compos. Constr.*, 17 (2013) 1, pp. 139–150
- [72] Aniello, M., Corte, G.D., Landolfo, R.: Finite Element Modelling and Analysis of "All-Steel" Dismountable Buckling Restrained Braces, *The Open Construction and Building Technology Journal*, 8 (2014), pp. 216–226
- [73] Hoveidae, N., Rafezy, B.: Local Buckling Behavior of Core Plate in All-Steel Buckling Restrained Braces, *International Journal of Steel Structures*, 15 (2015) 2, pp. 249–260
- [74] Karimi, M.R.B., Yaghin, M.A.L., Nezhad, R.M., Sadeghi, V., Aghabalaie, M.: Seismic Behavior of Steel Structure with Buckling-Restrained Braces, *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 9 (2015) 4.
- [75] Rossi, P.P.: Importance of Isotropic Hardening in the Modeling of Buckling Restrained Braces, *J. Struct. Eng.*, 141 (2015) 4, p. 04014124
- [76] Hosseinzadeh, Sh., Mohebi, B.: Seismic evaluation of all-steel buckling restrained braces using finite element analysis, *Journal of Constructional Steel Research*, 119 (2016), pp. 76–84
- [77] Almeida, A., Ferreira, R., Proenca, J.M., Gago, A.S.: Seismic retrofit of RC building structures with Buckling Restrained Braces, *Engineering Structures*, 130 (2017), pp. 14–22
- [78] Lin, P.C., Takeuchi, T., Matsui, R.: Seismic performance evaluation of single damped outrigger system incorporating buckling restrained braces, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 47 (2018), pp. 2343–2365
- [79] Rahnavard, R., Naghavi, M., Aboudi, M., Suleiman M.: Investigating modeling approaches of buckling-restrained braces under cyclic loads, *Case Studies in Construction Materials*, 8 (2018), pp. 476–488
- [80] Avci-Karatas, C., Celik, O.C., Eruslu, S.O.: Modeling of Buckling Restrained Braces (BRBs) using Full-Scale Experimental Data, *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 23 (2019) 10, 2019, pp. 4431–4444
- [81] Avci-Karatas, C., Celik, O.C., Yalcin, C.: Experimental investigation of aluminum alloy and steel core buckling restrained braces (BRBs), *Int. J. Steel Struct.*, 18 (2018) 2, pp. 650–673
- [82] Alborzi, M., Tahghighi, H., Azarbakht, A.: Numerical comparison on the efficiency of conventional and hybrid buckling-restrained braces for seismic protection of short-to-mid-rise steel buildings, *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 11 (2019), pp. 439–454
- [83] Jamkhaneh, M.E., Ebrahimi, A.H., Amiri, M.S.: Investigation of the Seismic Behavior of Brace Frames with New Corrugated All-Steel Buckling Restrained Brace, *International Journal of Steel Structures*, (2019), <https://doi.org/10.1007/s13296-018-00202-2>.
- [84] Naghavi, M., Rahnavard, R., Thomas, R.J., Malekinejad, M.: Numerical evaluation of the hysteretic behavior of concentrically braced frames and buckling restrained brace frame systems, *Journal of Building Engineering*, 22 (2019), pp. 415–428
- [85] Federal Emergency Management Agency: FEMA-440, Washington DC, USA, 2006.
- [86] European Committee for Standardization (CEN): Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance –Part 1.1: General rules, Seismic actions and rules for buildings, EN 1998-1-1, Brussels, 2005.

- [87] BSSC/FEMA: NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 450), Building Seismic Safety Council (BSSC) for Federal Emergency Management Agency (FEMA), National Institute of Building Sciences, Washington, D.C., USA, 2003.
- [88] ASCE: Minimum design loads for buildings and other structure, ASCE/SEI, 7 (2010) 10.
- [89] Mahamoudi, M., Zaree, M.: Determination the Response Modification Factors of Buckling Restrained Braced Frames, *Procedia Engineering*, 54 (2013), pp. 222-231
- [90] Moni M., Moradi S., Alam M.S.: Response modification factors for steel buckling restrained braced frames designed as per NBCC 2010, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2016.
- [91] Abou-Elfath H., Fahmy A.S., Khalifa K.M.: Response modification factors of buckling restrained braced frames designed according to the Egyptian code, *Alexandria Engineering Journal*, 57 (2018), pp. 2851-2864, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.07.001>.
- [92] Rahai A.R., Alenia M.M., Salehi S.M.F.: Cyclic Performance of Buckling Restrained Composite Braces, *International Journal of Civil Engineering*, 7 (2009), 1.
- [93] Abraham, E.J.: Conceptual investigation of partially buckling restrained braces, University of Pittsburgh, 2006.
- [94] Wu, A.C., Lin, P.C., Tsai, K.C.: High-mode buckling responses of buckling-restrained brace core plates, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 43 (2014), pp. 375-393
- [95] Housner, G.W.: Limit design of structures to resist earthquakes, Proceedings of the 1st World Conference Earthquake Engineering, Berkeley, CA, USA, 1956.
- [96] Kim, J., Choi, H., Chung, L.: Energy-based seismic design of structures with buckling-restrained braces, *Steel and Composite Structures*, 4 (2004) 6, pp. 437-452
- [97] Ye, L., Cheng, G., Qu, Z.: Study on energy-based seismic design method and the application for steel braced frame structures, Proceedings of The Sixth International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 2009.
- [98] Avila, J.D., Climent, A.B., Lucchini, A., Mollaiolli, F.: Energy-based seismic design methodology: A preliminary approach, Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake, Santiago de Chile, Chile, 2017.
- [99] Ma, C.: Energy-Based Seismic Design Method for EBFs Based on Hysteretic Energy Spectra and Accumulated Ductility Ratio Spectra, *Advances in Civil Engineering*, 2019.
- [100] Hoveidae, N., Rafezy, B.: Overall buckling behavior of all-steel buckling restrained braces, *J. Constr. Steel Res.*, (2012), pp. 151-158
- [101] Takeuchi et al.: Local buckling restraint condition for core plates in buckling restrained braces, *Tokyo J. Constr. Steel Res.*, 66 (2010), pp. 139-149
- [102] Takeuchi, T., Matsui, R., Nishimoto, K., Takahashi, S., Ohyama, T.: Effective buckling length for buckling restrained braces considering rotational stiffness at restrainer ends, *J. Struct. Constr. Eng.*, 639 (2009), pp. 925-934
- [103] Reno, M.L., Pohll M.N.: Incorporating buckling restrained braces (BRB) as part of the Auburn-foresthill bridge seismic retrofit, www.pwri.go.jp, 1.12.2021.
- [104] Munkhunur, T., Tagawa, H., Chen X.: Experimental study on slender buckling-restrained knee braces with round steel bar cores, *Front. Struct. Civ. Eng.*, 17 (2023) 1, pp. 99-112, <https://doi.org/10.1007/s11709-022-0875-4>.
- [105] CEN: EN 15129:2010, Anti-seismic devices, 2010.
- [106] Zsarnoczay, A.: Experimental and Numerical Investigation of Buckling Restrained Braced Frames for Eurocode Conform Design Procedure Development, PhD dissertation, Department of Structural Engineering, Budapest University of Technology and Economics, 2013.
- [107] Shimizu et al.: Design method to prevent buckling of low yield strength steel tube brace and fracturing of joints (part 1 & 2), Summaries of technical papers of annual meeting, Architectural Institute of Japan, Structural Engineering Section, 2007., pp. 781-784