

Civil engineering
Statybos inžinerija

PLIENO IR BETONO KOMPOZITINIŲ KOLONŲ IR
PLIENINIŲ SIJŲ MAZGAI

Andrej MUDROV*

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

Gauta 2021 m. gegužės 20 d.; priimta 2021 m. lapkričio 30 d.

Santrauka. Apskritojo skerspjūvio plieno ir betono kolonos pasižymi dideliu stiprumu ir standumu, tai teoriškai leistų sumažinti medžiagų sąnaudas statybose, bet jų privalumai praktiškai neišnaudojami. Lyginant su kitomis konstrukcijomis, kompozitinės kolonos sudaro nykstamai mažą rinkos dalį. Viena iš daugelio to priežasčių yra mazgų sudėtingumas ir virinimas statybvietėje, kuris lėtina ir brangina statybas. Neseniai rinkoje paplitus akliniams varžtams, atsirado naujos mazgų projektavimo galimybės, leidžiančios išvengti virinimo statybvietėje ir pagreitinančios montavimą. Šitame straipsnyje apžvelgiama plieno ir betono kompozitinių kolonų mazgų ir jų jungimo priemonių raida bei šių mazgų pritaikymo praktikoje galimybės. Išskirtinis dėmesys skirtas apskritojam pavidalo kolonomis, nes dėl jų formos šių kolonų mazgai yra mažiausiai tyrinėti. Straipsnyje pateikiama trumpa atliktų tyrimų santrauka ir nubrėžiamos tolimesnių tyrimų kryptys.

Reikšminiai žodžiai: kompozitinės kolonos, plienas ir betonas, metalinė sija, mazgai, lenkta plokštelė, apžvalga.

Įvadas

Kompozitinės plieno ir betono konstrukcijos, lyginant su gelžbetoninėmis ar net plieninėmis, Lietuvos statybos rinkoje sudaro nykstamai mažą dalį. Iš esmės jų panaudojimas apsiriboja kompozitinėmis sijomis, kai architektams perdangos lygyje reikia paslėpti rėmsijas. Visais kitais atvejais, jei nėra estetinių ar architektūrinių apribojimų, o tuo labiau jei kalbama apie kolonas, naudojamas gelžbetonis, ir viena iš daugelio to priežasčių yra kaina.

Iš pirmo žvilgsnio atrodytų, kad toks teiginys yra neteisingas dėl to, kad vamzdinės plieno ir betono kompozitinės kolonos pasižymi dideliu standumu ir stiprumu, todėl jas naudojant galima pastatyti statinį su mažesnėmis medžiagų sąnaudomis. Bet praktikoje konstrukcijos taip pat turi tenkinti ir gaisrinės saugos reikalavimus, pagal kuriuos betoninę kolonų šerdį tektų papildomai armuoti, nes plonas plieninis vamzdis greitai perkaistų ir prarastų laikomąją galią. Dėl šių priežasčių racionaliau yra apskritai atsisakyti brangaus plieninio kevalo ir tiesiog padidinti santykinai nebrangios betoninės šerdies matmenis – projektuoti gelžbetonines kolonas, kurių atsparumas ugniai priklauso tik nuo apsauginio betono sluoksnio.

Kita kompozitinių konstrukcijų aukštos kainos priežastis yra mazgai. Uždarų vamzdžių vidus yra sunkiai pasiekiamas, todėl praktiškai neįmanoma pritaikyti standartinių

varžtinių jungčių. Be to, apskritųjų vamzdžių atveju prie jų lenkto paviršiaus sudėtinga prijungti kitus elementus, todėl sijos prie kolonų liemens yra tiesiogiai privirinamos arba naudojami pertvariniai mazgai. Toks jungimo būdas reikalauja virinimo statybvietėje, kuriam taikoma griežta darbų kokybės kontrolė, branginanti ir lėtinanti statybas. Kaip alternatyva standiems mazgams, lankstinės jungtys su stačiais lakštais yra nemažiau brangios, nes siekiant užtikrinti mazgo laikomąją galią, tenka storinti plieninį kolonų kevalą.

Šiame straipsnyje apžvelgiama plieno ir betono kompozitinių kolonų mazgų ir jų jungimo priemonių raida. Straipsnyje išskirtinis dėmesys skiriamas apskritųjų kolonų jungtims, nes, lyginant su kvadratinio skerspjūvio kolonomis, dėl triašio betono įtempių būvio apskritos kolonos pasižymi didesne laikomąja galia ir deformatyvumu (Zhou et al., 2019). Neseniai rinkoje paplitus akliniams varžtams, atsirado galimybė apskritosioms kolonomis pritaikyti mazgus su lenkta galine plokšte. Tyrimų, susijusių su lenkto pavidalo tempiamu komponentu, praktiškai nėra, todėl apskritojam skerspjūvio kolonos ir dvitėjės sijos rėminė jungtis su lenkta galine plokšte yra naujas, mažai tyrinėtas mazgas. Tokios jungtys gali padėti išvengti virinimo statybvietėje, o dėl lenkto jų pavidalo itin padidėja jungties standumas (Goldsworthy & Gardner, 2006). Straipsnyje pateikiama trumpa atliktų tyrimų santrauka ir nubrėžiamos tolimesnių tyrimų kryptys.

*Autorius susirašinėti. El. paštas andrej.mudrov@vilniustech.lt

1. Kompozitinių konstrukcijų mazgai

Kompozitinių konstrukcijų ir jų mazgų raida neatsiejama nuo statybų technologijų vystymosi, kuris iš prigimties yra iteracinis procesas, atspindintis visą mažų patobulinimų ir naujovių seką. Kompozitinių elementų gamybos technologija per pastaruosius dešimtmečius smarkiai nepasikeitė, bet jų jungimo būdai itin išsivystė.

Lyginant su įprastomis plieninėmis ar gelžbetoninėmis konstrukcijomis, plieno ir betono kompozitas dėl bendros plieno kevalo ir betoninės šerdies sąveikos pasižymi didesne laikomąja galia ir standumu. Tai lėmė didelį tokių konstrukcijų paplitimą, labiausiai tuose pasaulio regionuose, kur yra poreikis statyti vis didesnio aukštingumo statinius sudėtingomis geologinėmis ir seisminėmis sąlygomis. Būtent seisminis aktyvumas nulėmė kompozitinių mazgų sparčią raidą ir įvairovę.

Lietuva pagal žemės drebėjimų tikimybę priskiriama prie mažo ar labai mažo aktyvumo sričių, bet ji nėra visiškai aseismiška. Teoriškai Lietuvos teritorijoje stipriausių žemės drebėjimų magnitudės gali siekti iki 5,7 balų (grunto dalelių virpesių pagreičių vertė yra $23,3 \pm 2,1 \text{ cm/s}^2$), tai potencialiai galėtų sukelti statinių pažeidimus (Pačėsa, 2016). Nepaisant to, žemės drebėjimų poveikis, projektuojant technologiškai nepavojingus statinius, nėra vertinamas, todėl didelė mazgų plastinė sukamoji geba nėra lemiantis rodiklis pasirenkant mazgo pavidalą.

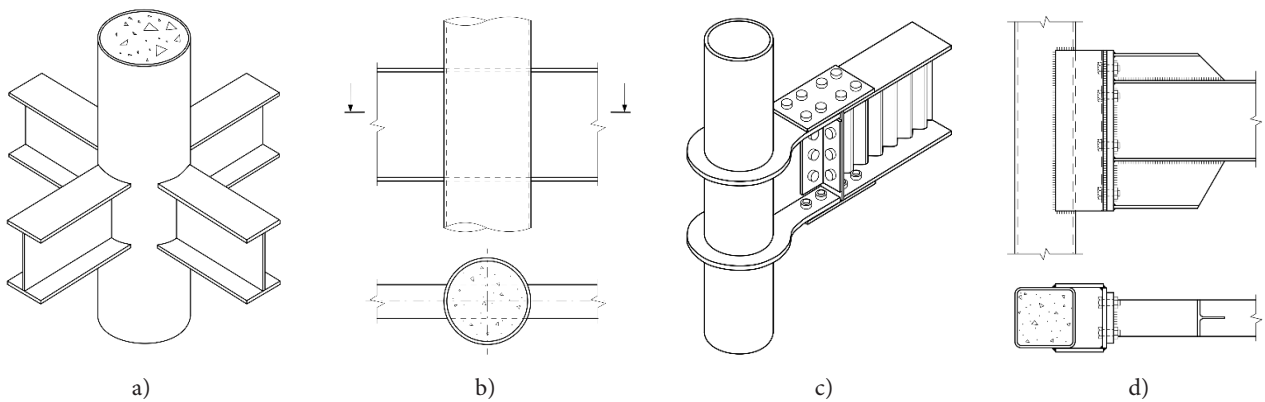
Pagal sijos prijungimo prie kolonos liemens būdą kompozitinių kolonų mazgus galima suskirstyti į tris

tipus: mazgus su pridurtinai privirintomis sijomis (1 pav., a); mazgus, kai sija praleidžiama kiaurai per koloną (1 pav., b); bei mazgus, kai sijos pritvirtinamos per tarpinius elementus, tokius kaip pertvaras (1 pav., c), lovius (1 pav., d), plokšteles (2 pav.) ir t. t.

Šios trys mazgų kategorijos dar papildomai galėtų būti suskirstytos pagal jungimo metodą į varžtinius ir virintinius, bet tokia triviali klasifikacija pagal pirminius požymius būtų neišsami – ji nusako gamybos technologiją ir nepasako nieko apie mazgų elgseną.

Tradiciskai mazgų elgsena apibūdinama pagal jų pradinį sukamąjį standį ir stiprumą. Pagal šias dvi charakteristikas mazgai gali būti suskirstomi į tris modelių tipus (1 lentelė): vientisus, iš dalies vientisus ir paprastus. Vientisi mazgai tarp sujungtų elementų užtikrina visišką pasisukimo vientisumą, o iš dalies vientisi mazgai dėl nepakankamo stiprumo ar mažo standžio gali užtikrinti ribotą vientisumą, o paprastieji mazgai (tariamai lankstiniai) neleidžia sukamajam vientisumui atsirasti (Jaspart, 1997).

Tariamai lankstiniai mazgai gali būti naudojami rėmuose, kuriuose horizontalius poveikius perima ryšių sistema. Tokie mazgai perduoda tik vertikalias atramines sijų reakcijas ir užtikrina nevaržomą sijų galų pasisukimą. Vienas iš tokių mazgų pavyzdžių yra varžtinės jungtys su stačiaisiais lakštais (2 pav., a). Tokios jungtys laikomos paprasčiausiu sijų prijungimo prie kolonų būdu, bet jų paprastumas ir pigumas atsveriamas nedidele laikomąja galia.



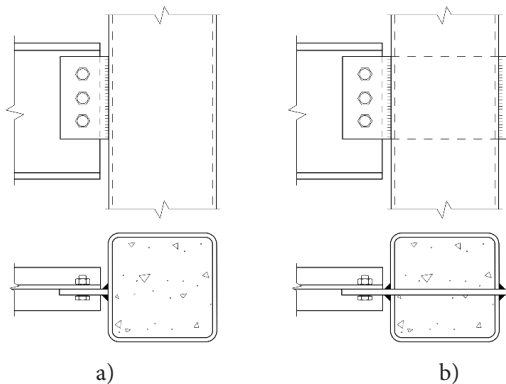
1 paveikslas. Kompozitinių konstrukcijų mazgai: a) mazgas su privirintomis sijomis (Chiew et al., 2001); b) mazgas su koloną kertančia sija (Khanouki et al., 2016); c) pertvarinis mazgas (Zhang et al., 2017); d) mazgas su loviu (Dubina et al., 2015)
 Figure 1. Connections in composite structures: a) with fully-welded beams (Chiew et al., 2001); b) with through beam (Khanouki et al., 2016); c) with diaphragms (Zhang et al., 2017); d) with reversed channels (Dubina et al., 2015)

1 lentelė. Mazgų modelių tipai (Jaspart, 1997)
 Table 1. Types of joint modelling (Jaspart, 1997)

Sukamasis standis	Laikomoji galia		
	Visa	Dalinė	Tariamai lankstinis
Standus	Vientisas	Dalinio vientisumo	–
Dalinio standumo	Dalinio vientisumo	Dalinio vientisumo	–
Tariamai lankstinis	–	–	Paprastasis
„–“ neturi prasmės			

Jungtyse su stačiais lakštais sutelkta skersinė jėga ekscentriškai perduodama į kolonos plieninį kevalą, todėl šios jungties laikomąją galią lemia kolonos vamzdžio vietinis takumas. Siekiant išvengti kolonos vietinės irties, turi būti didinamas vamzdžio storis – mažinamas kompozitinis efektas, arba lakštas turi būti praleidžiamas kiaurai per vamzdį (2 pav., b), tai technologiškai yra sudėtinga ir mažina tokios jungties patrauklumą.

Taip pat literatūroje pasitaiko ir kiti laikomosios galios didinimo būdai (Hassan et al., 2014), tokie kaip stiprinimas jungėmis (3 pav., a) ar kryžmai praleistu lakštu (3 pav., b). Pažymėtina, kad jungės, nors ir perskirsto vertikalią jėgą į betono šerdį, bet dėl mažos slinkties jų efektyvumas yra abejotinas (Mollazadeh & Wang, 2016). Nemažiau abejotinas yra ir dalinio vientisumo mazgas (4 pav.).

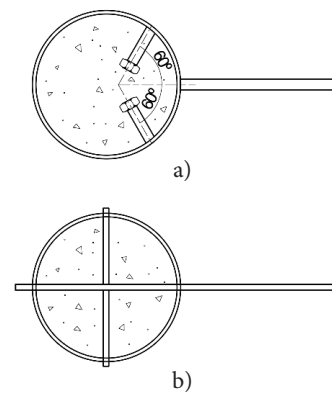


2 paveikslas. Varžtinės jungtys su stačiais lakštais (Mollazadeh & Wang, 2016)

Figure 2. Fin-plated connections (Mollazadeh & Wang, 2016)

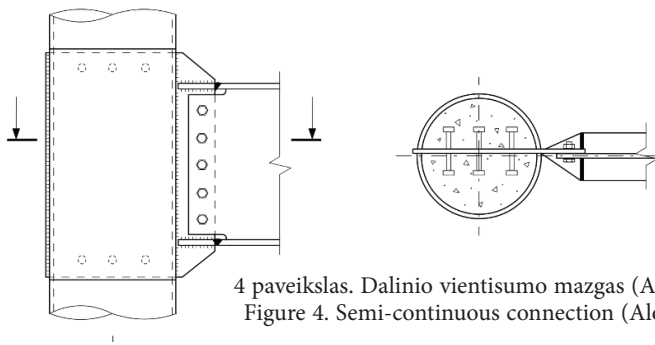
Šeštajame XX a. dešimtmetyje tarp inžinierių vyravo nuomonė, kad tik rėmai su vientisais virintiniais mazgais turi pakankamą laikomąją galią ir energijos išsklaidymo gebą atlaikyti žemės drebėjimą, o tokių rėmų seisminio poveikio sukeltos pažaidos apsiribos elementų vietinio pastovumo netekimu ar daliniu plastiškumu (Chen et al., 2015). Tai nulėmė, kad šiame pirminiame kompozitinių konstrukcijų vystymosi etape dominavo pertvariniai mazgai.

Pertvariniai mazgai būna su išorinėmis (5 pav., a), vidinėmis (5 pav., b), kertančios kolonos kevalą arba mišriomis (viršutine išorine ir apatine vidine) pertvaromis (Wang & Lee, 2015). Šie mazgai pasižymi ypač didele virinimo darbų apimtimi, todėl tai yra vienas iš brangiausių mazgų tipų (Dubina et al., 2015).

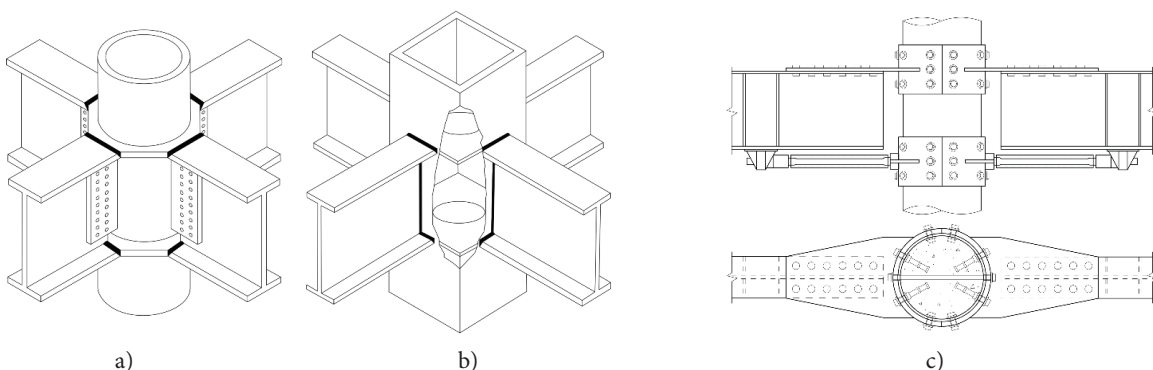


3 paveikslas. Plieninio kevalo stiprinimas (Hassan et al., 2014): a) jungėmis; b) kryžmai praleistos plokštelėmis

Figure 3. Strengthening of the tube wall (Hassan et al., 2014): a) with shear connections; b) with perpendicularly welded plates



4 paveikslas. Dalinio vientisumo mazgas (Alostaz & Schneider, 1996)
Figure 4. Semi-continuous connection (Alostaz & Schneider, 1996)



5 paveikslas. Pertvarinės kolonų ir sijų jungtys: a) išorinės (Wang & Lee, 2015); b) vidinės (Fukumoto & Morita, 2005); c) varžtinės (Oktavianus et al., 2018)

Figure 5. Diaphragm joint: a) external (Wang & Lee, 2015); b) internal (Fukumoto & Morita, 2005); c) bolted (Oktavianus et al., 2018)

Kaip alternatyva virintinėms jungtims gali būti laikomi mazgai su varžtais prie kolonos liemens pritvirtintomis pertvaromis (5 pav., c). Kiti autoriai (Kim & Choi, 2017) siūlo naikinti apatinę gniuždomą pertvarą, ją pakeitus vertikaliomis skylėtomis sąstandomis (6 pav., c). Be to, pastatuose su skirtingais kolonų žingsniais šis asimetrinis sprendinys leistų atsikvėpti įstrižų ar užleistinių vidinių pertvarų (6 pav., a, b).

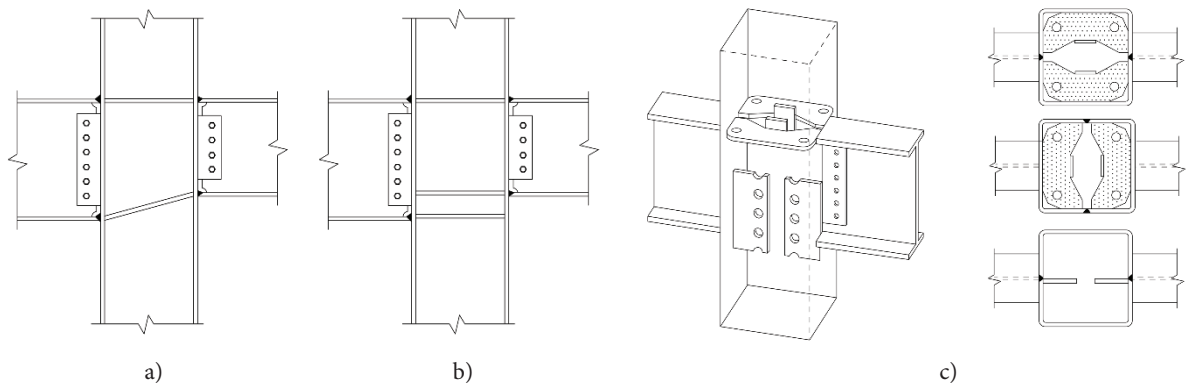
Bet, kaip parodė žemės drebėjimų padarinių analizė, rėminė sistema su standžiais mazgais nevisiškai pasiteisino. Vienais atvejais konstrukcijos po žemės drebėjimo išlieka tamprios būsenos (Chen et al., 2015), tai byloja apie mažą energijos išskaidomąją gebą, o kitais atvejais dėl įtempių santalkos ar nepakankamos suvirinimo darbų kokybės mazguose trapijai suyra virintinės siūlės (Toyoda, 1995). Visa tai paskatino stiprios kolonos ir silpnos sijos koncepcijos atsiradimą.

Ši koncepcija pagrįsta principu, kad esant vienodoms svyravimų amplitudėms rėmuose su silpnomis sijomis (7 pav., a) pasireikš kur kas mažesnis lankstų pasisu-

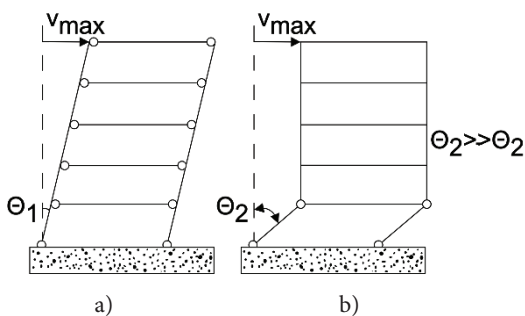
kimo kampas negu rėmuose su silpnomis kolonomis (7 pav., b).

Atsivėrus lankstams, rėmas virsta plastiniu mechanizmu, taip sugerdamas žemės drebėjimo energiją. Tam, kad neįvyktų konstrukcijų permanentinė griūtis, sijų mazgai turi ne tik užtikrinti lankstų pasisukamumą, bet ir būti pakankamai stiprūs, kad būtų išvengta trapios irties. Tai pasiekama sustiprinus jungtis papildomu armavimu, kuris nukrauna plieninį kevalą ir perduoda dalį sijos reakcijų tiesiai į betoną (9 pav.), arba alternatyviai – galima didinti ar mažinti sijos skerspjūvį (8 pav.), tai užtikrina, kad sija suirs anksčiau už mazgą.

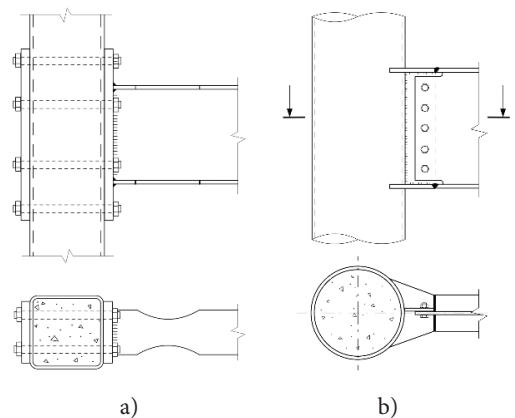
Literatūroje galima rasti daug kolonos plieninio kevalo sustiprinimo būdų ir šių stiprinimų derinių, iš kurių dažniausiai siūlomas stiprinimas jungėmis. Jungės gali būti privirintos iš kevalo vidaus (9 pav., c, d) arba įsuktos (9 pav., c), tam panaudojus aklinuosius varžtus su pailgintu koteliu. Taip pat galima rasti stiprinimo sprendinių su privirintais prie sijos juostų strypais (9 pav., a) ar kitais elementais, pavyzdžiui, tėjais (9 pav., b).



6 paveikslas. Vidinės pertvaros pastatuose su skirtingais kolonų žingsniais (Kim & Choi, 2017): a) įstrižos; b) užleistinės; c) asimetrinės
Figure 6. Internal diaphragms in frames with the different spans (Kim & Choi, 2017): a) sloped; b) overlapped; c) asymmetric



7 paveikslas. Plastinis rėmo mechanizmas (Bergmann et al., 1995): a) silpnos sijos; b) silpnos kolonos
Figure 7. Hinge-mechanism of the multi-storey frame (Bergmann et al., 1995): a) with the weak beams; b) with the weak columns



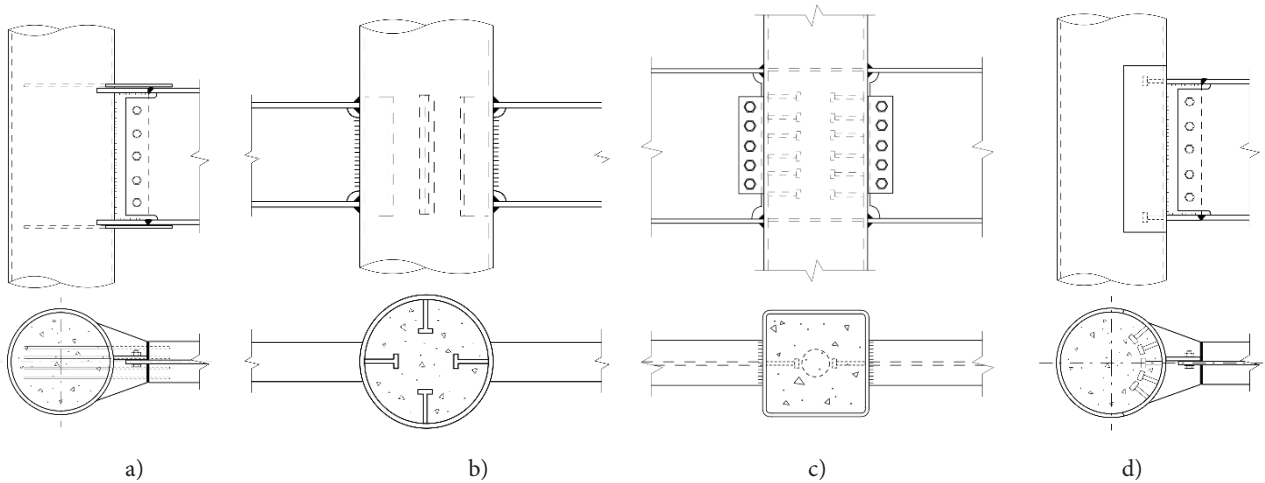
8 paveikslas. Sijos plastinės zonos ribojimas: a) mažinant sijos skerspjūvį (Dubina et al., 2015); b) didinant sijos skerspjūvį (Alostaz & Schneider, 1996)
Figure 8. Control of the plastic zone with: a) reduced beam section (Dubina et al., 2015); b) increased beam section (Alostaz & Schneider, 1996)

Po 1994 m. Northridge įvykusio žemės drebėjimo JAV statiniuose leidžiama projektuoti tik aprobuotas (angl. *prequalified*) jungtis, kurių laikomoji galia buvo patvirtinta natūriniais bandymais. Tam, kad projektuotojams nereikėtų bandyti atskirai kiekvieno mazgo, buvo sukurta jungtinė šešerių metų FEMA/SAC programa, siekiant standartizuoti tipines standžiasias varžtines jungtis, kodifikuoti jungčių būklės vertinimą, remontą, rekonstrukciją, gamybą ir projektavimą. Šios programos sukauptų žinių pagrindu galiausiai buvo išleistas ANSI/AISC 358-5 (An American National Standard, 2005) standartas, kuris apibrėžia aprobuotų mazgų tipologijas (10 pav.), jų gamybą bei projektavimą.

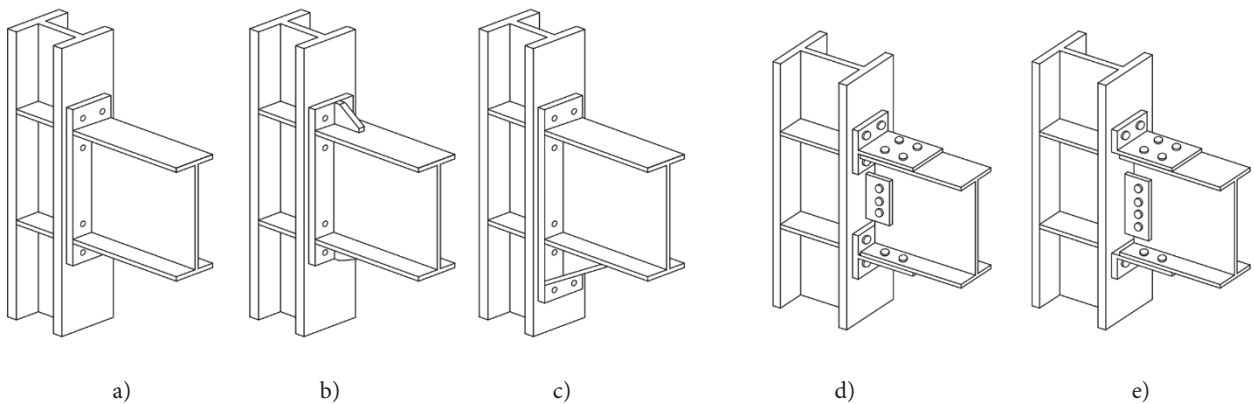
Europoje mazgų aprobavimo problemai spręsti buvo parengtas *Equaljoints+* (Landolfo et al., 2017) projektas, kurį vykdant išnagrinėti ir patvirtinti trys varžtinių (10 pav., a, b, c) ir vienas virintinio mazgo tipai. Šiems

mazgams nereikalingi natūriniai bandymai, tai atpigina ir pagreitina projektavimą.

Šiuo metu kompozitinių kolonų ir sijų mazgų konstrukcijose pastebima tendencija atsikratyti virinimo statybvietėje, todėl tyrėjai bando pritaikyti aprobuotas varžtines plieninių rėmų jungtis mazgams su kompozitinėmis kolonomis. Pasak Cheno ir kitų (Chen et al., 2015), varžtinės jungtys su stačiakampiais betono pripildytai vamzdžiais gali užtikrinti „panašią“ ar net geresnę elgseną, lyginant su virintiniais mazgais, bet šios jungtys turi vieną problemą – vamzdyje sudėtinga arba net neįmanoma užveržti veržlių. Dėl šios priežasties lygiagrečiai su aprobuotų mazgų pritaikymu vyksta ir jungimo priemonių kūrimas. Taip sparčiai vystomi akliniai varžtai, kuriuos užveržti galima be prieigos iš vidinės jungties pusės. Tai yra patentuoti gaminiai, kurių veikimo principas skiriasi priklausomai nuo gamintojo. Iš aklinių varžtų labiausiai paplitę yra



9 paveikslas. Mazgai su sustiprintu kolonos kevalu: a) stiprinimas strypais (Alostaz & Schneider, 1996); b) stiprinimas tėjais (Yang et al., 2019); c) stiprinimas jungėmis (Ricles et al., 2004); d) stiprinimas išpjaunant dalį kevalo (Alostaz & Schneider, 1996)
 Figure 9. Strengthening of the column shell: a) with embedded weldable bars (Alostaz & Schneider, 1996); b) T-shape stiffeners (Yang et al., 2019); c) shear connectors (Ricles et al., 2004); d) cutting out the part of tube (Alostaz & Schneider, 1996)



10 paveikslas. Aprobuoti mazgų tipai: a) su galine plokštele (Landolfo et al., 2017); b) su standinta galine plokštele (Landolfo et al., 2017); c) su stormena (Landolfo et al., 2017); d) su juostų jungiamaisiais tėjais (Wu et al., 2012); e) su juostų jungiamaisiais kampuočiais (Wu et al., 2012)
 Figure 10. Prequalified joints: a) extended endplate joint (Landolfo et al., 2017); b) extended stiffened endplate joint (Landolfo et al., 2017); c) haunched endplate joint (Landolfo et al., 2017); d) connection with tee stubs (Wu et al., 2012); e) connection with brackets (Wu et al., 2012)

pleištiniai (11 pav., a) ir varžtai su sulankstoma poveržle (11 pav., b), kuri pro padidintą skylę prakišama kartu su varžto galvute ir mova. Atskirai egzistuoja ir kitas tiesioginis varžto prijungimo prie kolonos būdas, kada specialiu karbido gražtu vamzdžio sienutėje suformuojamas sriegis (11 pav., c).

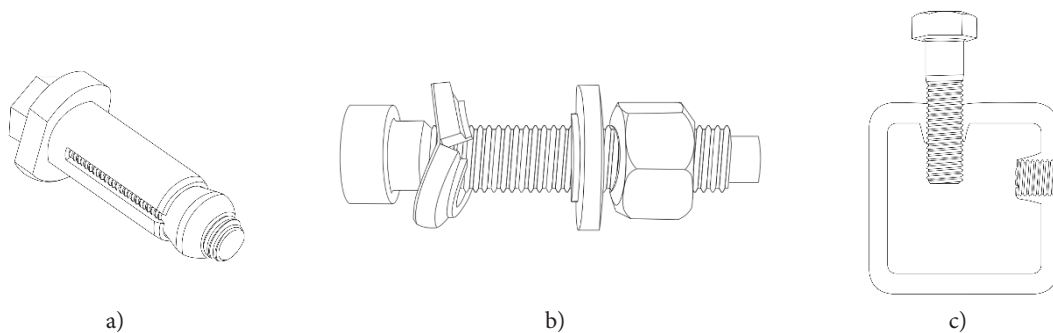
Be minėtų aklinių varžtų, sijos prie kolonų liemens gali būti pritvirtintos kevalą kertančiais virbalais (8 pav., a, 12 pav.). Tokiu atveju tempiami strypai inkaruojasi kitame vamzdžio šone ir veržlės praspaudimo galia yra kur kas didesnė nei aklinių varžtų. Bet tokios jungtys reikalauja padidinto tikslumo, kuris auga didėjant skylių skaičiui. Taip pat, surenkant tokį rėmą, būtų reikalingas laikinas išramstymas ir apmąstyta ryšių sistema, kol mazgas bus visiškai surinktas ir kolona pripildyta betonu.

Aprobuoti mazgai nesunkiai gali būti pritaikyti stačiakampio ir kvadratinio skerspjūvio kolonomis. Jų problema yra tik jungimo priemonės. Priešingai, apskritojo skerspjūvio kolonomis ištirtinėtų ir plačiai paplitusių varžtinių jungčių nėra. Iki šiol šių kolonų mazgų pasirinkimas yra ribotas – galima rinktis iš virintinių, varžtinių jungties su stačiaisiais lakštais ar kertančia sija.

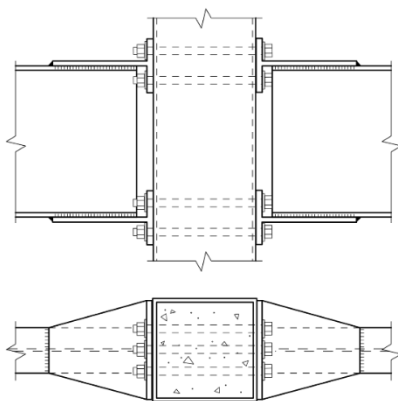
Neseniai, kartu su aklinių varžtų paplitimu, atsirado naujas mazgų tipas su lenkta galine plokšte ir betone inkaruotais varžtais (13 pav.). Šią apskritosioms kolonomis skirtą jungtį pasiūlė Anne Gardner ir Helen Goldsworthy

(Gardner & Goldsworthy, 1999), siekdamas sumažinti virinimą statybvietėje. Idėja sukurti tokį mazgą joms kilo nagrinėjant Yousefo Alostaz ir Stepheno Schneiderio bandymus (Alostaz & Schneider, 1996), kurių metų buvo nustatyta, kad jei prie viršutinės sijos juostos būtų privirinti ir į koloną įbetonuoti armatūriniai strypai (9 pav., a), galima išvengti kolonos kevalo irties ir pasiekti sijų plastinę lenkiamąją galią. Tačiau, priešingai negu Alostaz ir Schneiderio, Goldsworthy ir Gardner pasiūlyto mazgo tempiamos zonos įrašos dėl pailgintų varžtų pasiskirsto ne tik į betoną, bet ir į kevalą. Taip pat jos nustatė, kad apskritųjų kolonų mazgai dėl didesnio lenktų galinių plokštelių standžio yra ryškiai standesni už stačiakampių vamzdžių mazgus (Goldsworthy & Gardner, 2006).

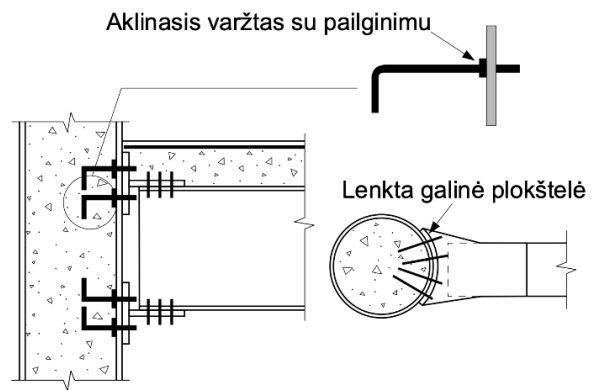
Be to, Anne Gardner ir Helen Goldsworthy atskirai išbandė tempiamus tėjinius elementus su lenkta galine plokšte ir keturiais varžtais vienoje eilėje (Gardner & Goldsworthy, 2005). Vėliau šis tyrimas buvo išplėstas, išbandžius tėjus su trimis varžtais (Yao et al., 2008). Šie bandymai parodė, kad įtempiai tarp tempiamų vidinių ir išorinių varžtų pasiskirsto nevienodai. Taip pat Yusakas Oktavianusas ir kiti (Oktavianus et al., 2014), sumodeliavę šiuos tempiamus tėjus baigtiniais elementais, nustatė, kad didinant kampą Θ tarp varžtų ir sijos ašies (14 pav.) mažėja varžtų ištraukiamoji galia ir tėjo standumas.



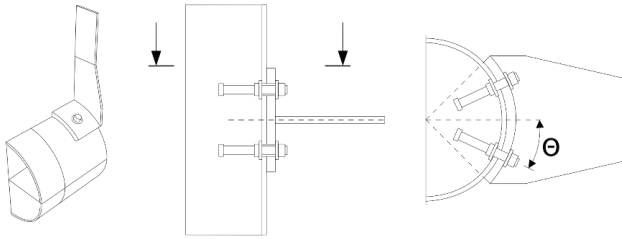
11 paveikslas. Akliniai varžtai: a) pleištinis varžtas; b) varžtas su sulankstoma poveržle; c) trintimi suformuotas sriegis
Figure 11. Blind bolts: a) expansion bolt; b) bolt with folding washer; c) joint with the friction formed threads



12 paveikslas. Jungtis su kertančiais virbalais (Ricles et al., 2004)
Figure 12. Connection with through bolts (Ricles et al., 2004)



13 paveikslas. Mazgas su lenkta galine plokšte ir pailgintais varžtais (Goldsworthy & Gardner, 2006)
Figure 13. Curved end plate connection with extended bolts (Goldsworthy & Gardner, 2006)



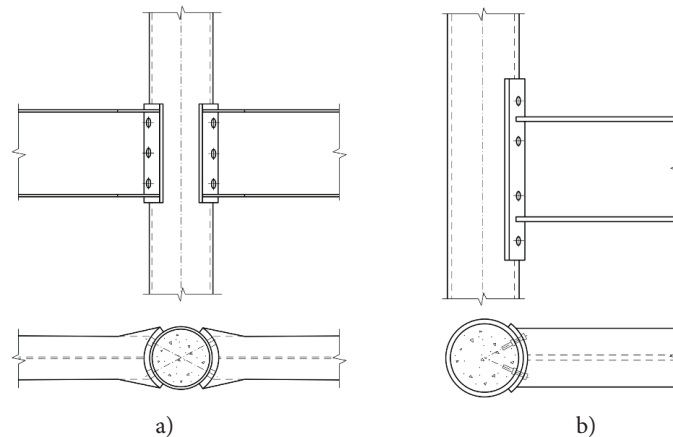
14 paveikslas. Tempiamas tĕjinis galinis elementas su lenkta galine plokštele (Oktavianus et al., 2014)
Figure 14. T-stub with curved end plate in tension (Oktavianus et al., 2014)

Tuo pačiu metu buvo nagrinėjamas ir pavienis įbetonuoto aklinojo inkarinio varžto komponentas, jo suirimo pobūdžiai, stiprumas bei standumas (Yao et al., 2011) ir pasiūlyti teoriniai inkarinio varžto modeliai (Oktavianus et al., 2017).

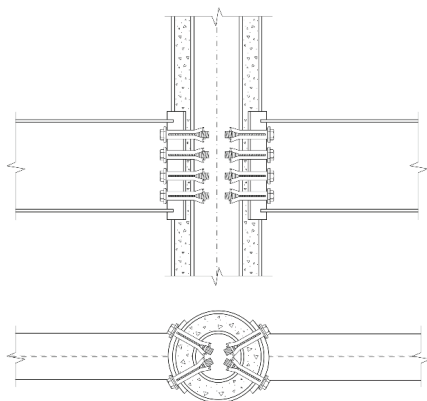
Be minėtų autorių, šiuos mazgus tyrinėjo Wangas su kolegomis (Wang et al., 2009), kurie išbandė ne tik dvipusius mazgus su sutapdinta lenkta galine plokšte-

le (15 pav., a), bet ir vienpusius mazgus su pailgintomis plokštelėmis (15 pav., b). Šių bandymų rezultatai vėliau buvo panaudoti atliekant parametrinę analizę (Wang & Zhang, 2017), kuri parodė, jog nuo varžtų įtempimo jėgos priklauso ne tik mazgo standumas, bet ir stiprumas, o tai nelabai dera su įprastų mazgų (su plokščia galine plokštele) elgsena (Jaspart & Maquoi, 1995). Taip pat šie mazgai buvo pritaikyti iš dalies betono pripildytoms plieno ir betono kolonomis su vidiniu koncentrišku kevalu (16 pav.).

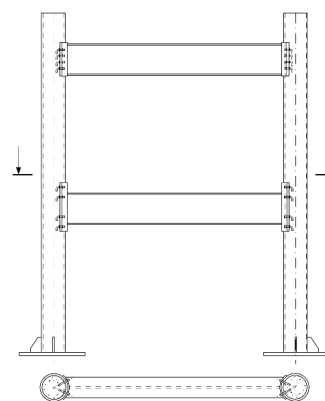
Nemažiau svarbūs tyrimai buvo atlikti ir su kompozitinėmis sijomis. Taip Thai ir kiti (Thai et al., 2017) patvirtino, kad apskritųjų kolonų mazgai su lenktomis galinėmis plokštelėmis yra standesni ir stipresni už kvadratinių kolonų jungtis su plokščia galine plokštele. Prie tokių pačių išvadų priėjo ir Wangas su kolegomis (Wang et al., 2018), išbandę vienpusius kompozitinės sijos mazgus. Tao ir kiti (Tao et al., 2017a) tyrinėjo mazgus su kompozitinėmis kolonomis iš nerūdijančiojo ir mažanglio plieno, jų tyrimo išvadose rašoma, kad gelžbetoninė perdanga gali sustiprinti ir sustandinti paprastąjį mazgą iki standaus, bet perdanga turėtų būti atitinkamai suarmuota, nes kitu atveju dėl armatūros trūkio gali pasireikšti trapi irtis.



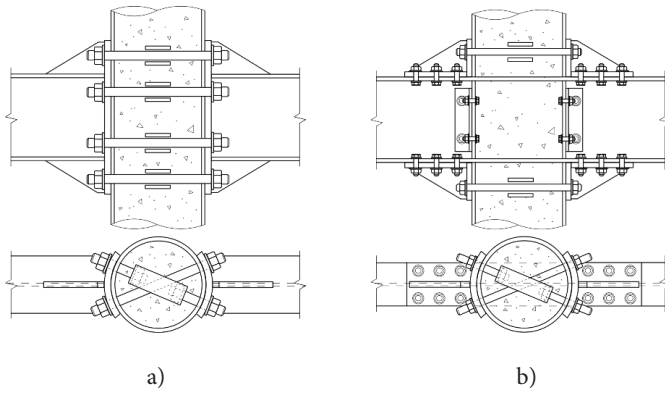
15 paveikslas. Mazgai su aklinaisiais varžtais: a) mazgas su sutapdinta lenkta galine plokštele (Wang & Zhang, 2017); b) mazgas su pailginta lenkta galine plokštele (Wang & Chen, 2012)
Figure 15. Connections with blind bolts (Wang & Zhang, 2017): a) joint with the curved flush end plate; b) joint with the curved extended end plate



16 paveikslas. Vidiniu koncentrišku kevalu armuotos iš dalies betono pripildytos kolonos mazgas (Guo et al., 2019)
Figure 16. Connection with the circular concrete filled double skin steel column (Guo et al., 2019)

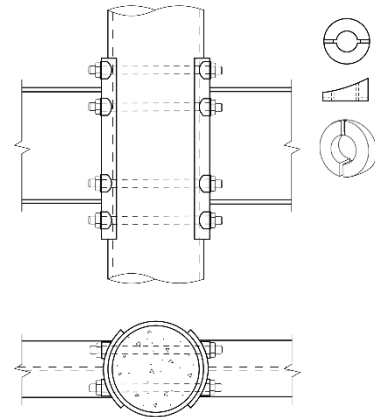


17 paveikslas. Rėmas su lenktomis galinėmis plokštelėmis (Wang & Wang, 2018)
Figure 17. Frame with curved end plated connections (Wang & Wang, 2018)



18 paveikslas. Virbalinės jungtys su kryžmai praleistomis jungėmis (Sheet et al., 2013): a) su standinta galine plokšte; b) su juostų jungiamaisiais kampuočiais

Figure 18. Connections with rods passing through the column (Sheet et al., 2013): a) stiffened extended end plates; b) bolted bracket



19 paveikslas. Mazgai su lygiagrečiai sijoms praleistais virbalais (Tao et al., 2017b)

Figure 19. Connection with the parallel rods (Tao et al., 2017b)

Mazgai su lenkta galine plokšte buvo tyrinėjami ir kaip konstrukcijos dalis. Per kelerius metus autorių kolektyvas cikline apkrova išbandė dviejų aukštų skirtingų tipų rėmus (17 pav.). Rėmai buvo tiek su paprastomis plieninėmis sijomis (Wang et al., 2019; Wang & Wang, 2018), tiek su kompozitinėmis (Wang et al., 2017a, 2017b). Taip pat buvo tyrinėjami rėmai su plono plieninio lakšto diafragmomis (Zhang et al., 2019). Kaip viena iš pagrindinių šių tyrimų išvadų buvo minima, kad esant vienodiems kolonų matmenims ir vamzdžių storiams rėmas su kvadratinio skerspjūvio kolonomis yra standesnis už rėmą su apskritąjo skerspjūvio kolonomis. Ir tai nenuostabu, nes tyrinėto plieninio kvadratinio skerspjūvio inercijos momentas yra 1,7 kartus didesnis už apskritąjo.

Kitas tyrinėtus jungčių tipas yra jungtys su kryžmai praleistais virbalais (18 pav.), kurias bandė Ikhlas Sheetas ir kiti (Sheet et al., 2013). Šio mazgo pagrindinis trūkumas yra tas, kad virbalai kertasi tarpusavyje, todėl vienas iš virbalų turi būti perpjautas, o perpjauto virbalų sujungimui naudojami „tiltukai“ – siauros lovio pavidalo detalės, kurioms montuoti reikėtų patekti į vamzdžio vidų. Taip pat neaišku, kaip šios sijos būtų montuojamos, nes prijungus vieną siją, taptų neįmanoma užmauti ant varžtų siją iš kito kolonos šono. Iš dalies šią problemą galima išspręsti lygiagrečiai su sijomis praleistais virbalais (19 pav.), bet šiuo atveju reikės gaminti specialias įžambias poveržles, be to, skylės virbalams tektų gręžti ne statmenai paviršiumi, tai apsunkintų gamybą.

Išvados

Šitame straipsnyje apžvelgti apskritąjo skerspjūvio plieno ir betono kompozitinių kolonų ir plieninių sijų mazgai bei jų pritaikymo praktikoje galimybės, iš kurių pertvariniai mazgai dėl didelės virinimo statybvietyje apimties ir kaštų yra vienas iš brangiausių mazgų tipų. Kaip alternatyva virinimui akliniai varžtai leidžia pritaikyti vamzdinėms kolonomis įprastinius mazgus su galine plokšte, o tinkamai inkaravus pailgintus varžtus betone, galima padidinti

tempiamos mazgo zonos laikomąją galią ir standį, nedinant vamzdžio sienelės storio. Panaudojus lenktą galinę plokštelę, šiuos mazgus galima pritaikyti ir apskritąjo skerspjūvio kolonomis. Tokie mazgai yra standesni ir stipresni už mazgus su plokščiomis galinėmis plokštelėmis. Tačiau kol kas jų panaudojimas praktikoje yra ribotas, nes nėra patikimų analitinių metodų, o atlikti tyrimai kelia daugiau klausimų, nei yra atsakymų, todėl tolimesniuose tyrimuose tikslinga:

- Sukurti tempiamo lenkto tėjinio galinio elemento modelius, kurie, atsižvelgiant į varžtų kampą, galėtų numatyti varžtų bei lenktos galinės plokštelės laikomąją galią. Taip pat reikėtų išsiaiškinti, kaip pasiskirsto jėgos tarp pavienių varžtų, kai vienoje eilėje yra daugiau kaip du varžtai.
- Iširti, kaip varžto išankstinio įtempimo jėga padidina mazgo laikomąją galią ir jungties standį.
- Sukurti tempiamo lenkto tėjinio galinio elemento standumo modelius, kad būtų galima patikimai prognozuoti mazgo sukamąjį standį.

Rėmimas, finansavimas

Šis darbas nebuvo finansuojamas.

Interesų deklaracija

Autoriai neturi interesų su kitomis suinteresuotomis organizacijomis ar asmenimis.

Literatūra

- Alostaz, Y. M., & Schneider, S. P. (1996). *Connections to concrete-filled steel tubes*. University of Illinois Engineering Experiment Station, College of Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- An American National Standard. (2005). *Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications (AISC 358-5)*. American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.

- Bergmann, R., Matsui, C., Meinsma, C., & Dutta, D. (1995). *Design Guide 5: For concrete filled hollow section columns under static and seismic loading*. Verlag TÜV Rheinland.
- Chen, Z., Qin, Y., & Wang, X. (2015). Development of connections to concrete-filled rectangular tubular columns. *Advanced Steel Construction*, 11(4), 408–426. <https://doi.org/10.18057/IJASC.2015.11.4.1>
- Chiew, S. P., Lie, S. T., & Dai, C. W. (2001). Moment resistance of steel I-beam to CFT column connections. *Journal of Structural Engineering*, 127, 1164–1172. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:10\(1164\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:10(1164))
- Dubina, D., Vulcu, C., Stratan, A., Ciutina, A., Grecea, D., Loan, A., Tremeeea, A., Braconi, A., Fülöp, L., Jaspert, J.-P., Demonceau, J.-F., Hoang, L., Comelieau, L., Kuhlmann, U., Kleiner, A., Rasche, C., Landolfo, R., D'Aniello, M., Portioli, F., ...Ferrini, M. (2015). *High strength steel in seismic resistant building frames (HSS-SERF)*. Publications Office of the European Union. https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/165258/1/KINA26933ENN_002.pdf
- Gardner, A. P., & Goldsworthy, H. M. (1999, December). Moment-resisting connections for composite frames. In *Proceedings of Conference on Mechanics of Structures & Materials* (pp. 309–314), Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Gardner, A. P., & Goldsworthy, H. M. (2005). Experimental investigation of the stiffness of critical components in a moment-resisting composite connection. *Journal of Constructional Steel Research*, 61(5), 709–726. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2004.11.004>
- Goldsworthy, H. M., & Gardner, A. P. (2006). Feasibility study for blind-bolted connections to concrete-filled circular steel tubular columns. *Structural Engineering and Mechanics*, 24(4), 463–478. <https://doi.org/10.12989/SEM.2006.24.4.463>
- Guo, L., Wang, J., Wu, S., & Zhong, L. (2019). Experimental investigation and analytical modelling of blind bolted flush or extended end plate connections to circular CFST columns. *Engineering Structures*, 192, 233–253. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.053>
- Hassan, M. M., Ramadan, H. M., Abdel-Mooty, M. N., & Mourad, S. A. (2014). Behavior of concentrically loaded CFT braces connections. *Journal of Advanced Research*, 5(2), 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.03.005>
- Jaspert, J. P., & Maquoui, R. (1995). *Effect of bolt preloading on joint behaviour*. <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/30588/1/Ef-effect%20of%20bolt%20preloading%20on%20joint%20behaviour.pdf>
- Jaspert, J. P. (1997). *Recent advances in the field of steel joints: Column bases and further configurations for beam-to-column joints and beam splices*. Universite de Liege, Faculte Des Sciences Appliques.
- Khanouki, M. M. A., Ramli Sulong, N. H., Shariati, M., & Tahir, M. M. (2016). Investigation of through beam connection to concrete filled circular steel tube (CFCST) column. *Journal of Constructional Steel Research*, 121, 144–162. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.01.002>
- Kim, S. H., & Choi, S. M. (2017). Tensile strength and concrete cone failure in CFT connection with internal diaphragms. *International Journal of Steel Structures*, 17(2), 643–652. <https://doi.org/10.1007/s13296-017-6021-9>
- Landolfo, R., D'Aniello, M., Costanzo, S., Tartaglia, R., Stratan, A., Dubina, D., Vulcu, C., Maris, C., Zub, C., Da Silva, L., Rebelo, C., Augusto, H., Shahbazian, A., Gentili, F., Jaspert, J.-P., Demonceau, J.-F., Van Hoang, L., Elghazouli, A., Tsitos, A., ...Hamreza, C. (2017). *European pre-QUALified steel JOINTS (EQUALJOINTS)*. Publications Office. <https://op.europa.eu/s/owuM>
- Mollazadeh, H. M., & Wang, C. Y. (2016). New mechanism of load introduction into concrete-filled steel tubular columns. *Journal of Structural Engineering*, 142(6), 04016016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001470](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001470)
- Oktavianus, Y., Chang, H., Goldsworthy, H. M., & Gad, E. F. (2017). Component model for pull-out behaviour of headed anchored blind bolt within concrete filled circular hollow section. *Engineering Structures*, 148, 210–224. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.056>
- Oktavianus, Y., Goldsworthy, H., Gad, E., Fernando, S., Pokharel, T., & Chang, H. (2018). Sub-assembly low damage connection incorporating blind-bolts and RBRFs subjected to cyclic loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 151, 280–296. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.09.026>
- Oktavianus, Y., Goldsworthy, H. M., & Gad, E. F. (2014). *Behaviour of headed anchor blind bolts embedded in concrete filled circular hollow section column*. Australian Earthquake Engineering Society.
- Pačėsa, A. (2016). *Platforminių mažo seisminio aktyvumo sričių seisminio pavojaus vertinimas Baltijos regiono pavyzdžiu*. Vilniaus universitetas.
- Ricles, J. M., Peng, S. W., & Lu, L. W. (2004). Seismic behavior of composite concrete filled steel tube column-wide flange beam moment connections. *Journal of Structural Engineering*, 130(2), 223–232. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:2\(223\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:2(223))
- Sheet, I. S., Gunasekaran, U., & MacRae, G. A. (2013). Experimental investigation of CFT column to steel beam connections under cyclic loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 86, 167–182. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2013.03.021>
- Tao, Z., Hassan, M. K., Song, T.-Y. Y., & Han, L.-H. H. (2017a). Experimental study on blind bolted connections to concrete-filled stainless steel columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 128, 825–838. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2016.10.016>
- Tao, Z., Li, W., Shi, B.-L., & Han, L.-H. (2017b). Behaviour of bolted end-plate connections to concrete-filled steel columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 134, 194–208. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2017.04.002>
- Thai, H.-T., Uy, B., & Aslani, F. (2017). Behaviour of bolted end-plate composite joints to square and circular CFST columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 131, 68–82. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2016.12.022>
- Toyoda, M. (1995). Failure experience in Hanshin Great Earthquake. *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 44(504Appendix), 198–199. https://doi.org/10.2472/jsms.44.504Appendix_198
- Wang, J., & Chen, L. (2012). Experimental investigation of extended end plate joints to concrete-filled steel tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 79, 56–70. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2012.07.016>
- Wang, J. F., Han, L. H., & Uy, B. (2009). Behaviour of flush end plate joints to concrete-filled steel tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(4), 925–939. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2008.10.010>
- Wang, J., Li, B., Wang, D., & Zhao, C. (2017a). Cyclic testing of steel beam blind bolted to CFST column composite frames with SBTD concrete slabs. *Engineering Structures*, 148, 293–311. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.065>
- Wang, J., Lu, J., Zhang, H., & Zhao, C. (2018). Experimental investigation on seismic performance of endplate composite joints to CFST columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 145, 352–367. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.03.006>

- Wang, J., Pan, X., & Peng, X. (2017b). Pseudo-dynamic tests of assembly blind bolted composite frames to CFST columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 139, 83–100. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.08.013>
- Wang, J., Pan, X., Peng, X., & Wang, J. (2019). Seismic response investigation and analyses of end plate moment-resisting CFST frames under pseudo-dynamic loads. *International Journal of Steel Structures*, 19, 1854–1874. <https://doi.org/10.1007/s13296-019-00250-2>
- Wang, J., & Wang, H. (2018). Cyclic experimental behavior of CFST column to steel beam frames with blind bolted connections. *International Journal of Steel Structures*, 18(3), 773–792. <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0089-8>
- Wang, J., & Zhang, N. (2017). Performance of circular CFST column to steel beam joints with blind bolts. *Journal of Constructional Steel Research*, 130, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.11.026>
- Wang, N., & Lee, M. J. (2015). Structural behavior of beam-to-column connections of circular CFST columns by using mixed diaphragms. *International Journal of Steel Structures*, 15(2), 347–364. <https://doi.org/10.1007/s13296-015-6007-4>
- Wu, Z., Zhang, S., & Jiang, S.-F. (2012). Simulation of tensile bolts in finite element modeling of semi-rigid beam-to-column connections. *International Journal of Steel Structures*, 12, 339–350. <https://doi.org/10.1007/s13296-012-3004-8>
- Yang, Y., Liu, X., Zhang, J., Liu, J., & Cheng, W. (2019). Behavior of large-scale connections between circular concrete-filled steel tubular columns and H-section steel beams. *Advances in Structural Engineering*, 23(2), 307–319. <https://doi.org/10.1177/1369433219870567>
- Yao, H., Goldsworthy, H., & Gad, E. (2008). Experimental and numerical investigation of the tensile behavior of blind-bolted T-Stub connections to concrete-filled circular columns. *Journal of Structural Engineering*, 134(2), 198–208. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:2\(198\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:2(198))
- Yao, H., Goldsworthy, H., Gad, E., & Fernando, S. (2011). *Experimental study on modified blind bolts anchored in concrete-filled steel tubular columns* [Conference presentation]. Australian Earthquake Engineering Society 2011 Conference, Barossa Valley, South Australia.
- Zhang, A. L., Li, S. H., Jiang, Z. Q., Fang, H., & Dou, C. (2017). Design theory of earthquake-resilient prefabricated sinusoidal corrugated web beam-column joint. *Engineering Structures*, 150, 665–673. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.088>
- Zhang, Z., Wang, J., Li, B., & Zhao, C. (2019). Seismic tests and numerical investigation of blind-bolted moment CFST frames infilled with thin-walled SPSWs. *Thin-Walled Structures*, 134, 347–362. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.10.009>
- Zhou, C., Chen, W., Ruan, X., & Tang, X. (2019). Experimental study on axial compression behavior and bearing capacity analysis of high titanium slag CFST columns. *Applied Sciences*, 9(10), 2021. <https://doi.org/10.3390/app9102021>

CONNECTIONS BETWEEN STEEL-CONCRETE COMPOSITE COLUMN AND STEEL BEAM

A. Mudrov

Abstract

Composite steel-concrete columns of circular cross-section have high strength and stiffness, which theoretically could help to reduce the cost of construction, but their advantages are still widely unexploited. In comparison with other constructions, composite columns account for a diminutive market share. One of the many reasons for this, is the complexity of connections that may require on-site welding, which not only slows down the construction, but also makes it more expensive. With the recent extensive development of blind bolts, new design options for the tube columns emerged. Such bolted joints would eliminate on-site welding and speed up installation. In this review a particular attention is paid to the circular columns, because these columns have the least studied connections. This article reviews the most recent stage in the development of the connections between steel-concrete composite columns and steel beams, as well as provides provisions for using such connections and outlines the directions for further research.

Keywords: composite columns, steel-concrete, steel beam, connections, curved end plate, review.