



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Kompozitinių elementų šlyjamosios jungties tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Matas Pagrandis

Projekto autorius

Lekt. dr. Tadas Zingaila

Vadovas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Kompozitinių elementų šlyjamosios jungties tyrimai

Baigiamasis magistro projektas

Statybos inžinerija (6121EX008)

Matas Pagrandis

Projekto autorius

Lekt. dr. Tadas Zingaila

Vadovas

Doc. dr. Mindaugas Augonis

Recenzentas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Matas Pagrandis

Kompozitinių elementų šlyjamosios jungties tyrimai

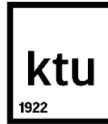
Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Mato Pagrandžio, baigiamasis projektas tema „Kompozitinių elementų šlyjamosios jungties tyrimai“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GAMINIŲ INŽINERIJA

Baigiamojo projekto tema (lietuvių k.):
KOMPOZITINIŲ ELEMENTŲ ŠLYJAMOSIOS JUNGTIES TYRIMAI

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanu potvarkiu Nr.: 2020 m lapkričio 30 d. Nr. V25-09-18

(lietuvių k.):
KOMPOZITINIŲ ELEMENTŲ ŠLYJAMOSIOS JUNGTIES TYRIMAI

(anglų k.):
ANALYSIS OF COMPOSITE ELEMENTS SHEAR CONNECTION

1.

Pradiniai duomenys darbui (pagal poreikį):

Baigiamojo projekto dalys:

	Atlikti
Įvadas	x
Literatūros apžvalga	x
Metodologija	x
Eksperimentiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Analitiniai tyrimai	x
Skaitiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Ekonominė dalis	<input type="checkbox"/>
Išvados	x

Kita informacija (pagal poreikį), susitikimų su vadovu savaitės diena (-os) bei laikas:

Vadovas:
(indėlis 100 %)

lekt. dr. Tadas Zingaila
pareigos, vardas, pavardė

parašas

Studentas:

Matas Pagrandis
pareigos, vardas, pavardė

parašas

Matas Pagrandis. Kompozitinių elementų šlyjamosios jungties tyrimai. Magistro baigiamasis projektas \ vadovas lekt. dr. Tadas Zingaila; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Statybos inžinerija (H200), Technologijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: Kompozitiniai elementai, šlyjamoji jungtis, galvelinės jungės, perforuotos lakštinės jungės, šlyjamosios jungties laipsnis.

Kaunas, 2021. 81 p.

Santrauka

Plieno ir betono kompozitinės konstrukcijos šiuolaikinėje statyboje atlieka vis svarbesnį vaidmenį, tačiau dėl sudėtingų ribinių būvių, irimo procesų ir detalių konfigūracijų, jos nėra iki galo iširtos.

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjama šlyjamąją jungtį užtikrinantys elementai – perforuotos lakštinės jungės. Atlikta šlyjamosios jungties literatūros analizė, kurioje išanalizuotos šlyjamosios jungties ypatybės bei jungties tipai. Taip pat, atliktas perforuotų lakštinių jungių analitinis tyrimas, kuriame buvo vertinami ankstesni mokslininkų išvesti skaičiavimų metodai, tiriama, kaip perforuotų lakštinių jungių parametrų konfigūracija paveikia šlyjamosios jungties stiprumą. Be to, palyginti šlyjamosios jungties stiprumo eksperimentinių tyrimų rezultatai su teoriniais ir nustatyta, kuris skaičiavimo metodas yra patikimiausias. Siekiant iširti praktinį jungių pritaikymą, buvo suprojektuotos trys sijos su galvelinėmis ir perforuotomis lakštinėmis jungėmis ir palyginta, kuriai jungei reikalingos didesnės plieno ir laiko sąnaudos.

Darbo apimtis – 53 p. teksto be priedų, 40 iliustr., 15 lent., 41 bibliografinių šaltinių. Atskirai pridedami darbo priedai.

Matas PAGRANDIS. Analysis of composite elements shear connection. Master's Final Degree \ Project supervisor lect. PhD. Tadas ZINGAILA; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Civil Engineering (H200), Technological Sciences.

Keywords: composite elements, shear connection, headed studs, "PERFOBOND" shear connector, shear connection degree.

Kaunas, 2021. 81.

Summary

Steel and concrete composite structures play an increasingly important role in modern construction, but due to complex limit states, failure modes, and difficult configurations, they are not fully investigated.

The elements of shear connections – "PERFOBOND" shear connectors, are analysed in the final master's thesis. It was performed literature review, where were analysed the features of shear connection and the types of shear connectors. Also, an analytical research of "PERFOBOND" shear connectors was performed, where various equations proposed by researchers in the recent past were evaluated for predicting the shear capacity. Also, theoretical and experimental shear capacities were compared in order to determine which calculation method is the most reliable. Moreover, to analyse the practical application of headed studs and "PERFOBOND" shear connectors, three composite beams were designed and compared by aspects of time and steel consumptions.

Turinys

Paveikslų sąrašas	8
Lentelių sąrašas	9
Įvadas.....	10
1. Literatūros analizė.....	11
1.1. Istorija.....	11
1.2. Bendrieji dalykai	11
1.3. Kompozitinio elemento deformacijos bei šlyjamosios jungties	13
1.4. Šlyjamosios jungties skirstymas.....	15
1.4.1. Standžios ir lanksčios šlyjamosios jungtys.....	15
1.4.2. Lokalios jungtys	15
1.4.3. Tęstinė šlyjamoji jungtis.....	18
1.5. Šlyjamosios jungties tipai.....	18
1.5.1. Galvelinės jungtys.....	18
1.5.2. Perforuotų lakštų jungtys	20
1.5.3. T formos perforuotų lakštų jungtys	21
1.5.4. Y formos jungtys	22
1.5.5. Lankstytų perforuotų lakštų jungtys	24
1.5.6. T-formos jungtys.....	24
1.5.7. Lovinio profilio jungtys	25
2. Analitinis tyrimas	26
2.1. Skaičiavimo metodai	26
2.2. Bandinių duomenys	30
2.3. Betono gniuždomojo stiprio įtaka šlyties stipriui.....	32
2.4. Jungių skylių diametro įtaka šlyties stipriui	33
2.5. Armatūros diametro įtaka šlyties stipriui	34
2.6. Perforuoto lakšto jungėje esančių skylių kiekio įtaka šlyties stipriui.....	35
2.7. Jungtys storio įtaka šlyties stipriui.....	36
2.8. Skaičiavimo metodų rezultatų palyginimas su eksperimentais	37
2.9. Perforuotos lakštinės jungtys stiprumo palyginimas su galvelinėmis jungtėmis.....	42
2.10. Kompozitinių sijų projektavimas	43
Išvados	49
Literatūros sąrašas	50
Priedai	54
1. priedas. Kompozitinės sijos su galvelinėmis jungtėmis projektavimas, atvejis nr. 1	54
2. priedas. Kompozitinės sijos su perforuotomis lakštinėmis jungtėmis projektavimas, atvejis nr. 1	69

Paveikslų sąrašas

1 pav. Kompozitinės sijos bendras darbas: a) ne kompozitinė elgsena; b) kompozitinė elgsena; [1]	11
2 pav. Kompozitinės sijos plastiškas įtempių pasiskirstymas [2]	12
3 pav. Dviejų kompozitiškai veikiančių elementų deformacijos – ε_{cj} ir ε_{aj} [4 p.71]	13
4 pav. Kompozitinio elemento praslydimai δ_L ir δ_R [4 p.72]	14
5 pav. a) Šlyties jėga tarp „c“ ir „a“ elementų veikianti jungties ilgyje ds ; b) šlyties jėgos ir praslydimo priklausomybės diagrama [4 p.70]	15
6 pav. Lokalios jungties jėgos „Vl“ sukeltos deformacijos [4 p.74]	16
7 pav. Galvelinės jungės [7]	19
8 pav. Betono kūgio suirimas [8]	20
9 pav. Galvelinės jungės suirimas [8]	20
10 pav. Perforuotų lakštų jungė [10]	21
11 pav. Perforuotų T formos lakštų jungė [13]	22
12 pav. Perforuotų Y formos lakštų jungė [16]	23
13 pav. Mechaninės Y formos jungės charakteristikos [17]	23
14 pav. Lankstytų perforuotų lakštų jungė [10]	24
15 pav. T formos jungės pozicija ant sijos [10]	25
16 pav. T formos jungės šlyjamojo stiprio dedamosios [19]	25
17 pav. Lovinio profilio jungė [10]	25
18 pav. Betono atsparumas ties jungės galu [22]	26
19 pav. Betono cilindrų horizontalus atsparumas šlyčiai [22]	26
20 pav. Armatūros atsparumas [22]	26
21 pav. Betono cilindrų vertikalus atsparumas šlyčiai [22]	26
22 pav. Betono suirimas: kairėje – viršutinėje plokštės dalyje, dešinėje – apatinėje [11]	27
23 pav. Jungės suirimas [23]	27
24 pav. a) vidinis suirimas; b) betono cilindro suirimas; c) armatūros suirimas [24]	27
25 pav. Stūmimo bandymo bandinys [11]	28
26 pav. A_{cc} – betoninės plokštės šlyjamasis plotas [19]	29
27 pav. Betono stiprio įtaka šlyties stipriui	32
28 pav. Skylės diametro įtaka šlyties stipriui	33
29 pav. Armatūros diametro įtaka šlyties stipriui	34
30 pav. Skylių kiekio įtaka šlyties stipriui	35
31 pav. Jungės storio įtaka šlyties stipriui	36
32 pav. Eksperimentinių ir teorinių skaičiavimų rezultatų palyginimas (1)	39
33 pav. Eksperimentinių ir teorinių skaičiavimų rezultatų palyginimas (2)	39
34 pav. Eksperimentinių ir teorinių skaičiavimų rezultatų palyginimas (3)	40
35 pav. Eksperimentinių ir teorinių skaičiavimų rezultatų palyginimas (4)	40
36 pav. Skaičiavimo metodų nuokrypių vidurkiai ir standartiniai nuokrypiai	41
37 pav. Galvelinės jungės išdėstymo schema	43
38 pav. Sijų ir perdangos plokštės skaičiuojamoji schema ir konstrukcijų parametrai	44
39 pav. Galvelinių jungių suvirinimo eiga [38]	46
40 pav. Pusiau automatinis suvirinimas apsauginių dujų aplinkoje [39]	47

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Skaičiavimo duomenys.....	31
2 lentelė. Betono stiprio įtakos šlyties stipriui tyrimo nekintantys dydžiai	32
3 lentelė. Skylės diametro įtakos šlyties stipriui tyrimo nekintantys dydžiai	33
4 lentelė. Armatūros diametro įtakos šlyties stipriui tyrimo nekintantys dydžiai.....	34
5 lentelė. Skylių kiekio įtakos šlyties stipriui tyrimo nekintantys dydžiai.....	35
6 lentelė. Jungės lakšto storio įtakos šlyties stipriui tyrimo nekintantys dydžiai	36
7 lentelė. Eksperimentinių ir teorinių skaičiavimų rezultatų palyginimui naudojamų bandinių parametrai	38
8 lentelė. Skaičiavimo metodų nuokrypių vidurkių ir standartinių nuokrypių skaitinės reikšmės ...	41
9 lentelė. Galvelinės jungės šlyties stiprio priklausomybė nuo jungės ir betono parametrų	43
10 lentelė. Skaičiavimų prielaidos	44
11 lentelė. Kompozitinių sijų projektavimo rezultatų suvestinė.....	45
12 lentelė. Šlyjamosios jungties plieno sąnaudos	46
13 lentelė. Perforuotų lakštinių jungių virintinių siūlių skaičiavimas	47
14 lentelė. Galvelinių jungių suvirinimo darbų laiko sąnaudų skaičiavimas.....	47
15 lentelė. Perforuotų lakštinių jungių suvirinimo darbų laiko sąnaudų skaičiavimas.....	48

Įvadas

Temos aktualumas. Miestams nuolatos augant ir naujosioms technologijoms vis žengiant į priekį, statybos taip pat sparčiai vystosi. Daugėja pastatų su išskirtinėmis architektūrinėmis idėjomis, didėja pastatų aukštingumas, didėja ir žmonių poreikiai bei keičiasi požiūris į tvarumą. Plieno ir betono kompozitinės konstrukcijos sprendžia projektavimo problemas, nes suteikia galimybę kurti pastatus su didesnėmis atviromis erdvėmis, plonesnėmis perdangomis, taip pat leidžia sutaupyti medžiagų ir spartina statybos darbus. Tačiau tokių konstrukcijų pritaikymas gali būti apsunkintas, dėl ribotų šlyjamųjų jungčių sprendinių projektuojant netipinius konstrukcinius elementus.

Mokslinė problema. Siekiant, kad plieninės sijos dirbtų kartu su betoninėmis plokštėmis ir veiktų kaip kompozitinė konstrukcija, yra būtina užtikrinti tarpusavio šlyjamąją jungtį. Šiandien šlyjamoji jungtis gali būti užtikrinta tik galvelinėmis jungėmis, nes tik toks jungties tipas yra plačiai ištyrinėtas ir apibrėžtas statybos normose bei standartuose. Tačiau yra ir alternatyvių jungių, pvz. perforuotos lakštinės jungės, kurios yra sąlyginai mažai ištyrinėtos ir nėra apibrėžtos projektavimo standartuose.

Tyrimo objektas – kompozitinių plieno-betono sijų šlyjamoji jungtis su galvelinėmis ir perforuotomis lakštinėmis jungėmis.

Darbo tikslas – išanalizuoti kompozitinių plieno-betono elementų „PERFOBOND“ tipo šlyjamųjų jungčių mechanines savybes bei kriterijus turinčius įtakos tokio tipo jungčių laikomajai galiai ir palyginti efektyvumą su galvelinėmis jungėmis.

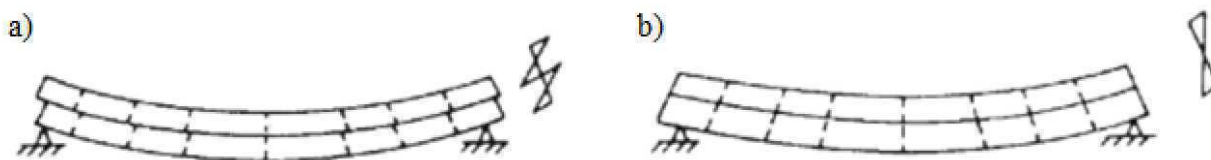
Darbo uždaviniai:

1. atlikti išsamią galimų plieno-betono kompozitinių jungčių literatūros analizę, apibrėžiant skirtingų jungčių privalumus ir trūkumus. Išnagrinėti mokslinėse publikacijose pateikiamus skaičiavimo metodus, bei surinkti ir susisteminti „PERFOBOND“ tipo jungčių eksperimentinių tyrimų rezultatus;
2. apskaičiuoti įvairių parametrų „PERFOBOND“ tipo jungtis taikant mokslininkų sukurtus analitinius metodus ir jungčių efektyvumą palyginti su standartinėmis galvelinių jungių jungtimis;
3. išanalizuoti analitiškai gautus „PERFOBOND“ tipo jungčių laikomosios galios rezultatus ir palyginti su kitų mokslininkų atliktais eksperimentiniais tyrimais;
4. suprojektuoti kompozitinių perdangų šlyjamąsias jungtis taikant galvelines ir „PERFOBOND“ tipų junges bei palyginti jų efektyvumą.

1. Literatūros analizė

1.1. Istorija

Plieno ir betono kompozitinės konstrukcijos pradėtos projektuoti prieš ~100 metų Jungtinėse Amerikos Valstijose. Projektuoti tiek pastatai, tiek tiltai. Jau tuo metu buvo žinoma, kad būtina užtikrinti abiejų medžiagų bendrą darbą, taip, kaip vaizduojama 1 pav. b), todėl tuo pačiu metu buvo užpatentuotos ir pirmosios šlyjamosios jungtys. 1929 metais paskelbta kompozitinių elementų lenkimo teorija, kuri yra paremta bendru abiejų konstrukcijų darbu.



1 pav. Kompozitinės sijos bendras darbas: a) ne kompozitinė elgsena; b) kompozitinė elgsena [1]

Pagrindinė kompozitinių konstrukcijų raida prasidėjo po 2-ojo pasaulinio karo, kai Vokietijoje trūko plieno išteklių ir buvo didelis poreikis ieškoti ekonomiškesnių statybos būdų. Vokietijos statybos standartas „DIN 1078“, išleistas 1954 metais, buvo pirmasis standartas, kuriame detalios aprašytos ir išanalizuotos kompozitinės konstrukcijos. Šis standartas buvo naudojamas ir kitose šalyse ir buvo nepakeičiamas keletą dešimtmečių. Vėliau, septintajame dešimtmetyje, Europos plieno ir betono asociacijos susivienijo bendram darbui ir 1981 metais išleido naują kompozitinių konstrukcijų projektavimo standartą – „ECCS, Composite Structures“. Tai dabartinio „Eurokodo 4“ pirmtakas, kuriame buvo aprašytos pagrindinės konstrukcijos – sijos, perdangos ir kolonos.

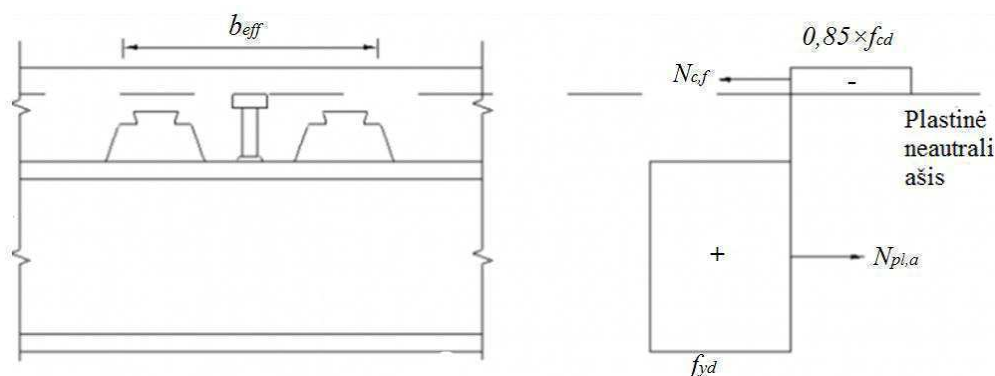
Devintajame dešimtmetyje buvo žengti pirmieji Eurokodo vystymosi žingsniai – pradėti ruošti išankstiniai standartai (angl. *prestandards*) „ENV–Eurocodes, CEN“. Galiausiai 2004 m. išleistas ir pradėtas naudoti dabartinis kompozitinių konstrukcijų Europos standartas – „EN 1994“. Šis standartas yra naudojamas valstybėse, kurios yra CEN narės (CEN – Europos standartizacijos komitetas, kuris jungia nacionalinius standartizacijos vienetus 34-iose Europos valstybėse). Kiekviena šalis turi Eurokodo vertimą į savo kalbą, o už tai yra atsakingi valstybių standartizacijos departamentai.

1.2. Bendrieji dalykai

Kompozitinės konstrukcijos – tai tokios konstrukcijos, kurias sudaro daugiau nei viena medžiaga. Betonas yra stiprus gniuždant, o plienas – ir gniuždant, ir tempiant. Projektuojant kompozitines konstrukcijas panaudojamos abiejų medžiagų geriausios savybės, tuo pačiu pašalinant ir silpnības, o tai leidžia projektuoti ypač efektyvias ir lengvasvores konstrukcijas. Tokio sprendinio pasirinkimas leidžia sutaupyti projektuojant ir kitas laikančiąsias konstrukcijas – kolonas bei pamatus. Taip pat kompozitinėms konstrukcijoms yra būdingas ir didelis montavimo greitis. Jos pasižymi mažesniu perdangos aukščiu, o tai leidžia projektuoti žemesnius pastatus – taupomi dideli kiekiai medžiagų.

2 pav. pateikiamas plastiškas įtempių pasiskirstymas dvitėje sijoje, kuri kompozitiškai veikia kartu su monolitine perdanga. Dažniausiai projektuojama taip, kad plastinė neutrali ašis yra ties betonu, o plienas yra tempiamas.

Siekiant, kad betonas veiktų kartu su plienu, yra būtina jas konstrukciškai sujungti. Plačiausiai yra naudojamos galvelinės jungės, kurios yra privirinamos prie plieninės sijos viršutinės lentynos, kaip parodyta 2 pav. Kompozitinėje perdangoje taip pat yra naudojami profiliuoti skardos lakštai, kurie būna privirinami kartu su galvelinėmis jungėmis. Profiliuota skarda kompozito stadijoje veikia kaip išorinis armavimas, o statybos metu veikia kaip darbo aikštelė ir pasitarnauja betono formavimui. Be to, profiliuota skarda montavimo metu suvaržo siją, ir taupo kranų darbo laiką, nes statybos metu profiliuoti lakštai yra montuojami pasitelkiant tik žmogaus darbą.



2 pav. Kompozitinės sijos plastiškas įtempių pasiskirstymas [2]

Dažniausiai naudojamos šlyjamosios jungės yra 19 mm skersmens galvelinės jungės [3], bet yra ir platesnis asortimentas. Vienas iš galvelinių jungių privalumų yra tas, kad jos užtikrina plastišką jungties darbą, vadinasi, šlyjamoji jungtis gali būti projektuojama remiantis plastiškumo teorija, nes numatoma, kad jėga persiskirsto tarp gretimų jungčių, o tai reikšmingai supaprastina projektavimą. Yra naudojamos ir kitokio tipo šlyjamosios jungtys, tačiau jos nėra apibrėžtos projektavimo standartais.

Pagrindiniai principai ir sąvokos, kurios apibrėžia kompozitinių konstrukcijų elgseną:

1. šlyjamoji jungtis – betoninių ir plieninių sudedamųjų dalių pakankamo stiprumo ir standumo jungtis, kad tos dvi dalys galėtų būti projektuojamos kaip vientisas konstrukcijos elementas;
2. pilna sąveika – kai įtempiai abejose medžiagose, sąveikos vietoje – lygūs;
3. dalinė sąveika – kai įtempiai abejose medžiagose, sąveikos vietoje – skiriasi;
4. pilna šlyjamoji jungtis – tai jungtis, kurioje didinant jungties atsparumą, nėra didinamas elemento atsparumas lenkimui;
5. dalinė šlyjamoji jungtis – tai jungtis, kurioje didinant jungties atsparumą, bus padidintas ir elemento atsparumas lenkimui;
6. šlyjamosios jungties praslydimas – dviejų sąveikaujančių medžiagų poslinkis išilgine kryptimi, viena kitos atžvilgiu;
7. šlyjamosios jungties standumas – lokalus šlyjamasis jungties standumas, kuris riboja praslydimus.

Visi elementai iš skirtingų medžiagų, kad veiktų kompozitiškai, privalo turėti šlyjamąją jungtį. Svarbu akcentuoti tai, kad skerspjūviuose, kuriuose abiejų medžiagų centrinės ašys sutampa, jungties jėgų nėra. Tokiuose skerspjūviuose įtempiai kiekvienoje dalyje pasiskirsto taip, kad įtempių atstojamoji tampa lygi nuliui. Dažniausiai tai yra abipusiai simetriški skerspjūviai, todėl centrinė ašis tarp abiejų medžiagų yra lygi nuliui.

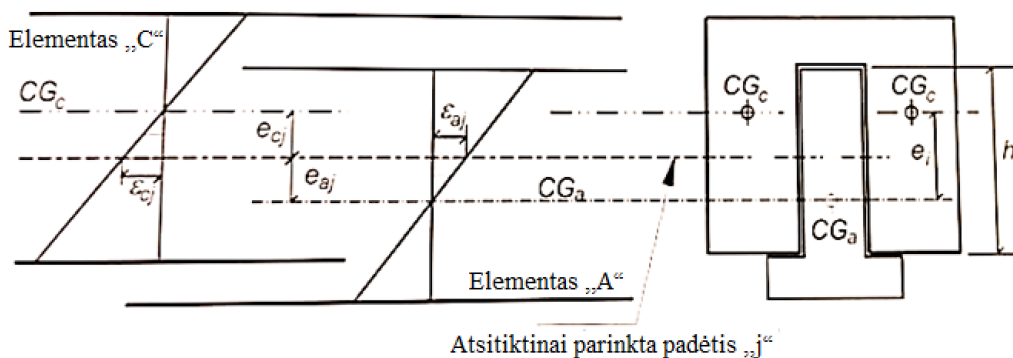
Šlyjamosios jungties sąvokos ir principai:

1. šlyjamoji jungtis – tai yra sąsaja tarp dviejų persidengiančių arba lygiagrečių medžiagų, kuriose šlyjamosios jėgos, veikiančios sąsajos kryptimi, yra skirtos subalansuoti skerspjūvyje veikiančių įtempių skirtumą. Elementas negali veikti kompozitiškai be jungties šlyjamųjų jėgų.
2. šlyjamosios jungties sąsaja vystosi išilgine kompozitinio elemento kryptimi, pasitelkiant mechaninius jungiamuosius elementus, kurie gali būti išdėstomi įvairiu atstumu.
3. šlyjamosios jungties lankstumas arba pastebimas praslydimas, sumažina efektyvųjį lenkiamąjį standumą, nes skaičiavimuose yra numatoma, kad jungtis yra visiškai standi.
4. šlyjamoji jungties jėga yra V_l – jungties šlyjamasis srautas arba išilginė šlyjamoji jėga, išreikšta per jungties ilgio vienetą.
5. šlyjamoji jungtis gali būti išilginė arba lokali, tačiau LST EN 1994-1-1 [4] apibrėžia tik išilginę jungtį.

Tuo atveju, kai kompozitinis rėmas yra suprojektuotas su pilna šlyjamąją jungtimi, konstrukcija gali suirti arba gniuždomoje betono srityje, arba tempiamoje plieno srityje. Suirimo sritis bus nulemta silpnesniojo elemento. Numačius mažesnę kiekį šlyjamųjų jungčių, bus suprojektuota dalinė šlyjamoji jungtis, tačiau standartuose yra nurodyti minimalūs reikalavimai, kad būtų išvengta perdėtų praslydimų tarp plieno ir betono, tai reikštų šlyjamosios jungties suirimą.

1.3. Kompozitinio elemento deformacijos be šlyjamosios jungties

Kompozitiniame elemente pirmiausiai yra analizuojami praslydimai, neįvertinant šlyjamosios jungties, siekiant įvertinti bendrą ryšį tarp lenkimo momento ir praslydimų. Numačius, kad 3 pav. pavaizduotame elemente, atsitiktinai parinktas taškas „j“, kurio vertikaloje plokštumoje yra galimi praslydimai. Visame taško aukštyje, jei nėra šlyjamųjų deformacijų, praslydimai vystosi vienodai.



3 pav. Dviejų kompozitiškai veikiančių elementų deformacijos – ϵ_{cj} ir ϵ_{aj} [4 p.71]

Pabrėžtina yra tai, kad įtvirtintos kraštinės aukštis yra apribotas dydžio $h_i > 0$. Taip pat vienintelė sąlyga susieta su tašku „j“ yra tokia, kad jis turi būti plotyje, apribotame h_i . Nors įtvirtintose elementų plokštumose ir nėra jungties standumo, yra numatoma, kad abi dalys įlinksta panašiai, o todėl ir kreivis κ yra randamas abejose dalyse taip pat, kaip ir visam elemente.

$$\kappa = \frac{M_a}{(EI)_a} = \frac{M_c}{(EI)_c} = \frac{M}{(EI)_{a+c}}; \quad (1)$$

čia κ – kreivis;

M_a – išorinis lenkimo momentas plieniniame elemente;

M_c – išorinis lenkimo momentas betoniniame elemente;
 $(EI)_a$ – plieninio elemento standumas;
 $(EI)_c$ – betoninio elemento standumas;
 $M = M_a + M_c$.

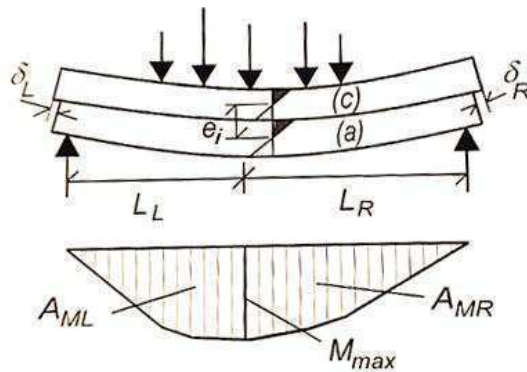
Kiekviename pasirinktame taške diferencialinis praslydimas yra lygus ilgio dx pokyčio skirtumui skirtingose pusėse, išilgine kryptimi. Tai gali būti nesunkiai nustatyta analizuojant deformacijas.

$$\varepsilon_{cj} = \frac{M e_{cj}}{(EI)_c}; \quad \varepsilon_{aj} = -\frac{M e_{aj}}{(EI)_a}; \quad (2)$$

čia e_{cj} – betoninio elemento ekscentricitetas nuo pasirinktos ašies;
 e_{aj} – plieninio elemento ekscentricitetas nuo pasirinktos ašies.

Vienodos kreivės reiškia tai, kad išorinis lenkimo momentas $M = M_c + M_a$ yra pasiskirstęs per abi medžiagas, priklausomai nuo lenkiamojo standumo:

$$M_c = M \times \frac{(EI)_c}{(EI)_{a+c}}; \quad M_a = M \times \frac{(EI)_a}{(EI)_{a+c}}; \quad (3)$$



4 pav. Kompozitinio elemento praslydimai δ_L ir δ_R [4 p.72]

Praslydimas δ_S vystosi akumuliaciniu principu, pradedant nuo taško, kuriame yra maksimalus lenkimo momentas, o skersinė jėga, kaip ir praslydimai, yra lygūs nuliui. Šis taškas įvertinamas, kaip praslydimų vystymosi pradžios taškas (žr. 4 pav.).

Praslydimas kairiajame krašte:

$$\delta_L = \frac{A_{ML} \times e_i}{(EI)_{a+c}}; \quad (4)$$

Praslydimas dešiniajame krašte:

$$\delta_R = \frac{A_{MR} \times e_i}{(EI)_{a+c}}; \quad (5)$$

čia δ_L – praslydimas kairiajame krašte;

A_{ML} ir A_{MR} – plotas po lenkimo momento diagramos kreivė, atitinkamai kairiajame ir dešiniajame kraštuose;

e_i – vertikalus atstumas tarp betoninio ir plieninio elementų centrų;
 $(EI)_{a+c}$ – kompozitinio elemento standumas.

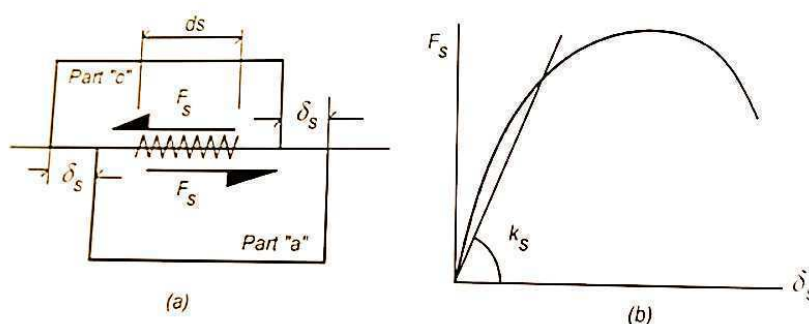
Jeigu elementas veikiamas simetriškos apkrovos, išilginės elemento krypties atžvilgiu, tai praslydimai kraštuose bus lygūs.

Svarbiausia mintis yra ta, kad vertinant įvairias padėtis, praslydimai skerspjūvio aukštyje h_i nekinta, o kinta tik išilginės krypties atžvilgiu. Centrinė atkarpa e_i yra visuose skerspjūviuose, nepriklausomai nuo h_i . Rezultatai yra lengvai pritaikomi ir elementams, kurių $h_i = 0$ (tai tradicinės kompozitinės sijos, minimos Eurokode 4). Pastaruosiuose elementuose yra tik viena plokštuma, kurioje gali vystytis praslydimas. Taip pat reikia atkreipti dėmesį ir į tai, kad nors maksimalaus momento taške praslydimas ir yra lygus nuliui, tačiau lenkimo momento įtempių skirtumas yra maksimalus.

1.4. Šlyjamosios jungties skirstymas

1.4.1. Standžios ir lanksčios šlyjamosios jungtys

Šlyjamosios jungties pagrindiniai parametrai pateikiami 5 pav. Šlyties jėga F_s veikia tarp jungiamųjų paviršių ir sukelia deformacijas medžiagų tarpusavio atžvilgiu – δ_s (praslydimas). Jungties standumas išreiškiamas $k_s = F_s / \delta_s$, o standžios jungties standumas – $k_s = \infty$. Lanksčios jungties reikšmė k_s yra baigtinis dydis, todėl būtina įvertinti praslydimą. Remiantis Euro kodu 4 [4], lanksčiosios jungtės – tokios, kurių geba deformuotis yra pakankama, kad pasiteisintų prielaida apie nagrinėjamos konstrukcijos šlyjamosios jungties idealią plastinę elgseną. Jungtė gali būti laikoma lanksti, jei charakteristinis poslinkis δ_{uk} yra ne mažesnis kaip 6 mm.



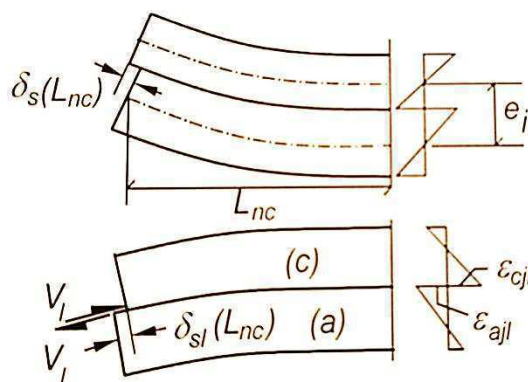
5 pav. a) Šlyties jėga tarp „c“ ir „a“ elementų veikianti jungties ilgyje ds ; b) šlyties jėgos ir praslydimo priklausomybės diagrama [4 p.70]

Šlyjamosios jungties standumas veikia šlyties srauto pasiskirstymą ir kompozitinio elemento efektyvųjų lenkimo standumą. Skaičiavimuose, paremtuose kompozitinio elemento plastiškumo teorija (angl. *elastic flexural theory*), dėl praktinių sumetimų yra vertinama, kad jungtis yra standi. Tai leidžia įvertinti tipinį maksimalų standumą lenkiant – $(EI)_{com}$.

Lanksčiose jungtyse praslydimas gali atsirasti įvairiose elemento dalyse. Siekiant tai įvertinti, reikia modifikuoti efektyvųjų standumą lenkiant ir su juo susijusias reikšmes. Lankstumo atvejų ekstremumai yra randami visiškai standžiose ($k_s = \infty$) ir visiškai lanksčiose jungtyse ($k_s = 0$). Dėl tokių priežasčių yra vengiama lokalių jungčių – jungiamieji elementai negali užtikrinti, kad nebus praslydimo tose vietose, kur jų nėra.

1.4.2. Lokališios jungtys

Esant lokalioms jungtims ir siekiant pašalinti praslydimą $\delta_s(x)$ ar tik jo dalį – ψ ($0 \leq \psi \leq 1$). Suminė šlyties jėga, veikianti sijos galuose, yra žymima V_1 (žr. 6 pav.)



6 pav. Lokalios jungties jėgos „ V_l “ sukeltos deformacijos[4 p.74]

Šlyties jėga V_l turi būti įvertinta taip:

- jungtis yra vertinama tokia lygyje, kuriame buvo nustatytas praslydimas, kol šlyjamosios jungties nebuvo. Pavyzdžiui, vertikali atkarpa nuo centrinės ašies CG_c ir CG_a , iki jungties yra e_{cj} ir e_{aj} .
- šlyties jėga abejose medžiagose yra priešingos krypties nei praslydimo deformacijos ir jie kompensuoja dalį $\psi\delta_s(L_{nc})$. Čia L_{nc} – ilgis nuo taško, kuriame veikia maksimalus lenkimo momentas, iki vertinamo taško, pavyzdžiui iki taško, kuriame praslydimas bus ribojamas arba panaikinamas.
- abiejose medžiagose deformacijos, susietos su V_l , randamos taip:

$$\varepsilon_{cjl} = -\left(\frac{V_l}{(EA)_c} + \frac{e_{cj}^2 \times V_l}{(EI)_c}\right); \quad (6)$$

$$\varepsilon_{ajl} = \left(\frac{V_l}{(EA)_a} + \frac{e_{aj}^2 \times V_l}{(EI)_a}\right); \quad (7)$$

čia ε_{cj} – betoninio elemento deformacijos;

ε_{aj} – plieninio elemento deformacijos;

V_l – suminė šlyties jėga.

- kadangi jungtis yra lokali, tai reiškia, kad abi medžiagos išlinksta vienodai, kaip vientasis elementas, tai praslydimas, priklausomas nuo L_{nc} , išreiškiamas:

$$\delta_{sl}(L_{nc}) = L_{nc}(\varepsilon_{cjl} - \varepsilon_{ajl}) = -v_l L_{nc}(1 + \alpha_i) \frac{(EA)_{a+c}}{(EA)_a \times (EA)_c}; \quad (8)$$

čia $\delta_{sl}(L_{nc})$ – praslydimas, priklausomas nuo L_{nc} ;

L_{nc} – ilgis nuo taško, kuriame veikia maksimalus lenkimo momentas, iki vertinamo taško.

Būtų galima pagalvoti, kad elementai su lokaliomis jungtimis, neturi pastovaus lenkiamojo standumo, tačiau efektyvusis standumas gali būti įvertintas pagal įlinkių dydį. Siekiant išlaikyti skaičiavimus kuo paprastesnius, simetrinėms lenkimo momento diagramoms yra numatoma, kad $L_{nc} = L / 2$ ir $A_{Mnc} / L_{nc} = A_m / L = \alpha_M \times M_{max}$

- vidurinės dalies įlinkis elemente be šlyjamosios jungties:

$$w_{nc} = k_M \frac{M_{max} \times L^2}{(EI)_{nc}} = k_M \frac{M_{max} \times L^2}{(EI)_{a+c}}; \quad (9)$$

- priešingos krypties įlinkis dėl lokalsios jungties jėgų, gaunamas pašalinus praslydimą:

$$w_{Vl} = -V_l \frac{e_i \times L^2}{8(EI)_{a+c}} = -\frac{\alpha_M \times M_{max} \times L^2}{8(EI)_{com}} \alpha_i; \quad (10)$$

čia w_{nc} – elemento įlinkis be šlyjamosios jungties;

w_{Vl} – priešingos krypties įlinkis, sukeltas dėl praslydimą stabdančių lokaliųjų jungties jėgų;

k_M ; α_M – koeficientai.

- suminis įlinkis elemento su lokaliomis jungtimis:

$$w_{lc} = w_{nc} + w_{Vl}; \quad (11)$$

- palyginimui, elemente, su nuolatine standžia šlyjamąją jungtimi, įlinkis w_{com} yra susijęs su lenkiamuoju standumu $(EI)_{com}$.
- įlinkis w_{lc} , elementuose su lokaliąją standžia šlyjamąją jungtimi, yra susijęs su efektyviuoju lenkiamuoju standumu, žymimu $(EI)_{lc}$. Tokiuose elementuose, lenkiamasis standumas nėra pastovus išilgai tarpatramio, tačiau lenkiamasis standumas yra toks pats atskirose medžiagose išilgai tarpatramio ilgio.

Mažiausi įlinkiai yra randami elementuose su nuolatine jungtimi, nes $(EI)_{a+c} < (EI)_{lc} \leq (EI)_{com}$. Skirtumas tarp standumų, elementuose su lokaliąja ir nuolatine jungtimi, gali būti palyginamas standumų santykiu, kuris arba yra lygus 1,0 arba didesnis. Tai priklauso nuo lenkimo momento diagramos.

$$\frac{(EI)_{com}}{(EI)_{lc}} = 1 + \alpha_i \left(1 - \frac{\alpha_M}{8k_M}\right); \quad (12)$$

čia $(EI)_{com}$ – elemento standumas su nuolatine šlyties jungtimi;

$(EI)_{lc}$ – elemento standumas su lokaliąją šlyties jungtimi.

Šis santykis gali būti išreiškiamas skaitinėmis reikšmėmis tam tikriems tipiniams atvejams:

- a) pastovus lenkimo momentas M_{max} , veikiantis elemento ilgyje L : $k_M = 1 / 8$; $\alpha_M = 1$;

$$w_{Vl} \frac{(EI)_{lc}}{(EI)_{com}} = 1; \quad (13)$$

- b) taškinė jėga, veikianti elemento centre: $k_M = 1 / 12$; $\alpha_M = 1 / 2$;

$$w_{Vl} \frac{(EI)_{lc}}{(EI)_{com}} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha_i}{4}}; \quad (14)$$

- c) išskirstyta tolygi apkrova, veikianti per visą tarpatramio ilgį: $k_M = 5 / 48$; $\alpha_M = 2 / 3$

$$w_{Vl} \frac{(EI)_{lc}}{(EI)_{com}} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha_i}{5}}; \quad (15)$$

Visuose atvejuose, išskyrus a), standumo santykis yra mažesnis už 1,0 ir santykis priklauso nuo kompozitinio standumo parametro α_i . Plonųjų perdangų sijose santykis artėja prie vieneto, o tuo tarpu tradiciniame sijyne, dėl kompozitinio standumo parametrų, santykis yra ženkliai mažesnis. Taip pat, plonosiose perdangose mažesnis ir įlinkis.

1.4.3. Tęstinė šlyjamoji jungtis

Elemente, su pilnai sąveikaujančia šlyjamąją jungtimi, jėgų atstojamosios N_c ir N_a yra tiesiogiai proporcingos išoriniam lenkimo momentui M , kai skerspjūvyje neveikia ašinės jėgos. Jėgų atstojamosios $N_a = -N_c = N$ randamos:

$$N = \frac{M \times \alpha_i}{e_i 1 + \alpha_i}; \quad (16)$$

Svarbiausia sąlyga jėgų atstojamajai gauti nepriklausomai nuo sąveikos laipsnio, visiškos ar dalinės, yra ta, kad šlyties srautas veikiantis išilgine elemento kryptimi, gali būti išlaikyta priklausomybė $v_l = dN / dx$.

Jungtyje su visiška sąveika, įtempių atstojamosios pokytis yra tiesiogiai proporcingas vertikaliajai elemento skersinei jėgai.

$$V_l dx = dN \rightarrow V_l = \frac{dN}{dx} = \frac{1}{e_i} \frac{\alpha_i}{1 + \alpha_i} \frac{dM}{dx} = \frac{1}{e_i} \frac{\alpha_i}{1 + \alpha_i} V; \quad (17)$$

$$v_l^1 = \frac{1}{e_i} \frac{\alpha_i}{1 + \alpha_i}; \quad (18)$$

Šlyjamasis srautas gali būti pažymimas taip: $v_l = v_l^1 V$. Čia v_l^1 – jungties šlyjamasis srautas, kurį galima aprašyti ir kitomis formulėmis, tačiau tai veda į tą patį skaitinį dydį.

Taip pat verta pažymėti, kad šlyjamasis srautas v_l yra suminis dydis visų taškų, kurie yra jungties sąveikos plote, išreikštas per ilgio vienetą. Šlyjamąjo srauto pasiskirstymas per elemento ilgį nėra svarbus. Yra tik viena sąlyga pasiskirstymui – jungtis turi būti pajėgi priimti ir perskirstyti išilginę šlyties jėgą, kad elementas veiktų kompozitiškai.

Pilnai sąveikaujančioje jungtyje tampriame kompozitiniame elemente šlyjamasis srautas pasiskirsto proporcingai vertikaliajai šlyties jėgai, o proporcingumas yra žymimas vienetiniu šlyties srautu.

Standžios jungtys praktikoje yra retos, tačiau tinkamumo ribiniame būvyje didelė dalis šlyjamųjų jungčių yra priskiriamos „praktiškai standžioms“. Jungtyje atsiradę maži lankstumai sukuria situacijas, kai vertikalioji šlyties jėga tampa didžiausia ties atramomis, $v_{l,max} < V_{max} v_l^1$, kai kitur galioja linijinė priklausomybė nuo vertikaliosios šlyties jėgos.

1.5. Šlyjamosios jungties tipai

1.5.1. Galvelinės jungtės

Pats populiariausias šlyjamosios jungties tipas, plačiausiai naudojamas ir vienintelis apibrėžtas Europos statybos normose (Eurokode 4) – galvelinės jungtės (angl. *Headed studs*) (žr. 7 pav.). Jos yra projektuojamos taip, kad gamybos procese, jas virinant prie laikančiųjų elementų, jos veiktų kaip

lankinio suvirinimo elektrodas. Toks gamybos procesas gali būti automatizuotas ir lengvai atliekamas tiek gamyklose, tiek statybvietėje, todėl šios jungtys yra taip plačiai naudojamos.



7 pav. Galvelinės jungės [7]

Šios jungtys yra plačiai ištyrinėtos [5] ir yra išvestos įvairios formulės jungties stiprumui įvertinti. Atlikta daug tyrimų, išbandyta daug bandinių su įvairiais išdėstymo bei dydžių parametrais. Stūmimo ir kompozitinio darbo tyrimai atskleidė pajėgumus šlyčiai. Siekiant ištirti galvelinių jungių darbą monolitinėse perdangos plokštėse, buvo sukurti tikslūs baigtinių elementų modeliai, kurie atskleidė šlyties laikomąsias galias, praslydimų elgsenas bei suirimo pobūdžius. Vėliau buvo sukurti baigtinių elementų modeliai, kurie galėjo įvertinti ir netiesinę jungties elgseną.

Jungės stiprumo riba, gali būti laikoma, kaip suirimo ribos apkrova, padalinta iš jungių skaičiaus. Taip pat, galvelinės jungties laikomoji galia priklauso nuo kelių parametru. Vienas iš svarbiausių – strypo diametras, jungės aukštis ir jos tempiamasis stipris, o taip pat ir betono gniuždomasis stipris bei tamprumo modulis.

Remiantis Eurokodo 4 6.6.1.2 punktu [4], galvelinės jungės, kurių bendrasis ilgis po suvirinimo yra ne mažiau kaip 4 kartus didesnis už skersmenį, o vardinis skersmuo yra ne mažesnis kaip 16 mm ir ne didesnis kaip 25 mm, galima laikyti, kad yra lanksčiosios iki tokių šlyjamosios jungties standumo laipsnio ribų, kurias nusako santykis $\eta = n / n_f$. Taip pat bendrasis jungės aukštis turi būti ne mažesnis kaip 3 jungės skersmenys. Galvelės skersmuo nemažesnis kaip 1,50 skersmens, o aukštis ne mažesnis kaip 0,40 skersmens. Jungių žingsnis turi būti nemažesnis kaip 5 skersmenys.

Remiantis Dennis Lam [8] atliktu tyrimu yra galimi trys suirimo būdai:

- 1) betono kūgio suirimas (žr. 8 pav.), kai jungės paveikiamos tik nežymiai. Betonas, esantis aplink jungę, neatlaiko gniuždymo įtempių pirmiau nei jungės pasiekia takumo ribą. Gniuždomasis suirimas formuojasi per betono storį ir aplink jungę suformuoja kūgio formą.



8 pav. Betono kūgio suirimas [8]

- 2) jungės suirimas (žr. 9 pav.), kai betonas paveikiamas tik nežymiai. Tai suirimo būdas, kuriame neatlaiko jungės, nes pasiekia takumo ribą, o betono stiprumo riba lieka nepasiekta.



9 pav. Galvelinės jungės suirimas [8]

- 3) kompleksinis suirimo būdas, kai betonas ir jungės pasiekia savo įtempių ribas.

Galvelinių jungių privalumai:

- 1) plačiai ištyrinėtos ir apibrėžtos projektavimo standartuose;
- 2) užtikrina plastišką elemento elgseną;
- 3) greita konstrukcijų gamyba dėl paprasto ir greito virinimo būdo;
- 4) tolygiai paskirsto šlytį visomis kryptimis.

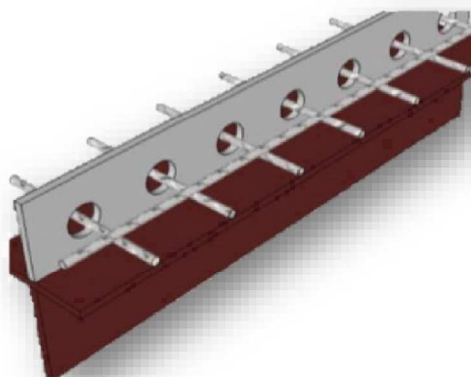
Galvelinių jungių trūkumai:

- 1) reikalingas didelis kiekis jungių;
- 2) virinimui reikalingas specialus prietaisas;
- 3) mažas jungių pasirinkimas;
- 4) neatsparios nuovargiui.

1.5.2. Perforuotų lakštų jungės

Vokietijoje pradėta vystyti šlyjamoji jungtis – perforuotų lakštų jungės (angl. *Perfobond ribs*), kurios yra sudarytos iš kiaurymėtų lakštų, privirintų prie laikančiojo plieninio elemento (žr. 10 pav.). Betonas pratekęs pro skylės ir pasiekęs projektinį stiprį, suformuoja tarsi kaiščius, kurie suteikia stiprumo abejomis kryptimis, tiek vertikaliai, tiek horizontaliai. Siekiant išvengti betono trūkinėjimų tose zonose, kur tempiamieji sluoksniai yra viršuje, yra įprasta naudoti armatūros strypus, juos prakišant pro lakštuose esančias skylės. Armatūroje veikiančios jėgos yra perduodamos tiesiai į

plieninę juostą. Muhit [10] teigia, kad 1 metras perforuotos lakštinės jungės, atitinka 18 vienetų dvejomis eilėmis išdėstytų 22 mm skersmens galvelinių jungių.



10 pav. Perforuotų lakštų jungė [10]

Candido-Martins [11] teigia, kad perforuotų lakštinių jungių elgsena yra priklausoma nuo kelių parametrų – skylių skaičiaus, lakšto aukščio, ilgio ir storio bei betono gniuždomojo stiprio ir skersinio armavimo tankumo. Jungės yra laikomos plastiškomis, nes poslinkis yra didesnis kaip 6 mm, o tai apibrėžia Eurokodas 4 [4] 6.6.1.1.5 punktas, išskyrus dvieiles junges – jų poslinkis, tyrimo metu, buvo nepakankamas, tačiau tai išaugino laikomąją galią. Taip pat, ši jungtis užtikrina, kad keliamosios jėgos būtų kur kas mažesnės nei plieno-betono praslydimai.

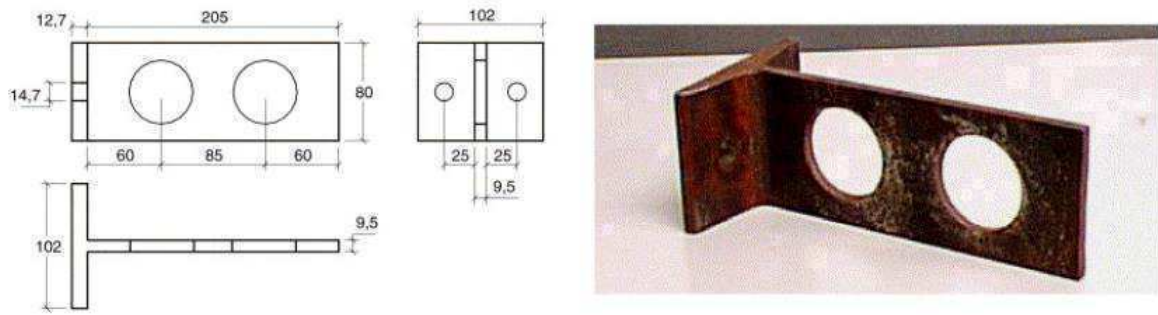
Mažiausiai keturios galvelinės jungės (priimkim, kad kiekvienos laikomoji galia yra 74 kN) atitinka vieną perforuotą lakštinę jungę su viena 12 mm skersine armatūra. Kiekviena papildoma skylė sustiprina šlyjamąją jungtį apytiksliai 5 %. Minimaliai reikalinga bent viena skylė, kad būtų užtikrinta tinkama jungties elgsena ir būtų išvengta nepageidaujamo kėlimo. Kita vertus, pastebėta, kad betono cilindrių indėlis stiprumui nėra toks žymus kaip kitų parametrų – atraminės plokštelės ar armavimo. Verta paminėti, kad armavimas pakankamai žymiai padidina jungties laikomąją galią – 12 mm skersmens armatūra padidina 20 %, 20 mm – 30 %. Taip pat, armatūra sumažina keliamąjį poslinkį.

Privalumai:

- 1) nesudėtinga konstrukcija;
- 2) ekonomiška gamyba;
- 3) užtikrina sąlyginai stiprią šlyjamąją jungtį;
- 4) užtikrina plastišką šlyjamąją jungtį.

1.5.3. T formos perforuotų lakštų jungės

2009 metais, vystant perforuotų lakštų jungių tyrimus Vianna J. [12] pristatė šlyjamosios jungties alternatyvą – T formos perforuotų lakštų jungės (angl. *T-perfobond* arba *T-Rib connector*) (žr. 11 pav.). T formos jungė, nuo pirminės jungės skiriasi tuo, kad papildomai pridedamas plieno lakštas, kuris veikia kaip užkarda. Poreikis apjungti didelio stiprumo užkardos tipo jungtis kartu su šiek tiek lankstumo ir keliamuoju stiprumu, privertė vystyti naujosios jungės tyrimus ir plėtojimą.



11 pav. Perforuotų T formos lakštų jungė [13]

Tokios jungės privalumas yra tas, kad apjungiamas didelio atsparumo užkardos tipo jungė kartu su keliamuoju atspariu bei šiek tiek tamprumo.

Šiame tyrime buvo atlikti stūmimo bandymai, kurie parodė, kad T formos jungės turi didelį šlyties atsparį, kurį pasiekia su sąlyginai mažu jungių kiekiu. Verta pridurti ir tai, kad jungės gali būti gaminamos iš šaltai formuotų konstrukcijų atliekų ir privirinamos elementariais metodais, o tai stipriai sumažintų išlaidas bei virinimo darbų apimtį.

T formos jungės, tyrimo metu, praslydo mažiau nei 6 mm, o remiantis Euro kodu 4 [4], praslydimas yra permažas, kad būtų galima vertinti jog šlyties jėga pasiskirsto plastiškai. Tai nėra problema, jei skaičiavimo modelis įvertina būtent tokį įtempių pasiskirstymą.

Tyrimo taip pat paaiškėjo, kad betono stipris atlieka didesnę vaidmenį nei armatūros ar skylių įtaka. Didžioji dalis bandinių parodė, kad skylės ir armatūra pridėjo sąlyginai mažus atsparumo prieaugius. Chul Hun Chung [14] atlikto tyrimo rezultatai rodo, kad kiekviena papildoma skylė atitinkamai padidina šlyties stiprį 1,6 %, 3,7 % ir 5,2 %. Šlyties stipris taip pat didėja priklausomai nuo plokštelės stiprio ir didėja tol, kol pasiekiamas sijos stiprumas.

Privalumai:

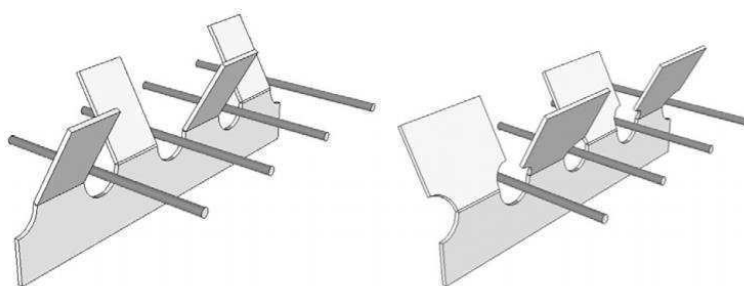
- 1) sąlyginai didelis šlyjamasis stiprumas;
- 2) ekonomiška, nes gali būti gaminama iš plieninių atliekų.

Trūkumai:

- 1) neužtikrina plastiškos šlyjamosios jungties;
- 2) neapibrėžta projektavimo normose.

1.5.4. Y formos jungės

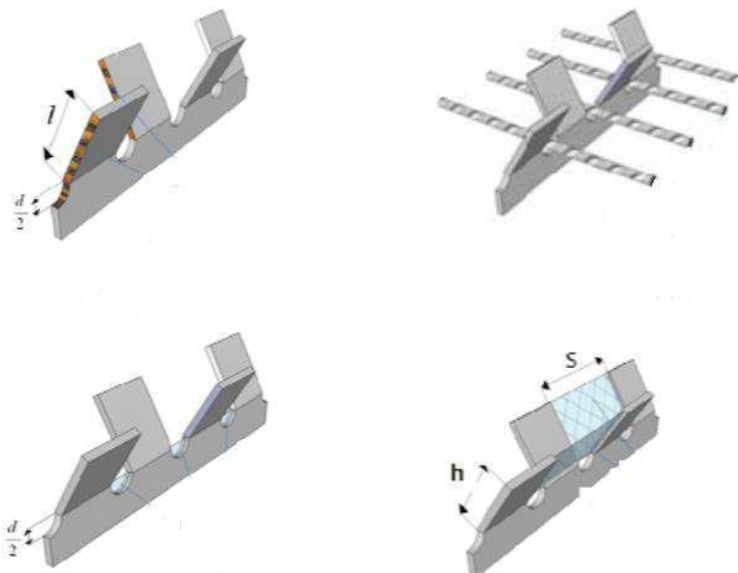
2011 metais Pietų Korėjoje Kim S. [15] pristatė naujas Y formos šlyjamąsias junges (angl. *Y-Rib connector*), kurias sudaro Y formos lankstyti lakštai su apvaliomis išpjovomis (žr. 12 pav.). Šios jungtys užtikrindavo šlyjamąją jungtį ir tamprumą kartu. Vėliau paaiškėjo, kad jos turi didesnę šlyties atsparumą, tamprumą bei didesnę pradinį standumą nei paprastoji perforuotų lakštų jungė. Todėl šios jungės demonstravo tarsi idealią konstrukcinę elgseną.



12 pav. Perforuotų Y formos lakštų jungė [16]

Pristatytame skaičiavimo modelyje yra vertinama: armatūros stiprumas, betono stiprumas ties skylėmis ir ties Y formos lankstų briaunomis.

2014 metais Pietų Korėjoje Sang-Hyo Kim [16] atliko šių jungių tyrimą, kurio metu Y jungės buvo lyginamos su standartinėmis galvelinėmis jungėmis (žr. 13 pav.). Paaiškėjo, kad naujosios jungės turi didesnę standumą ir stiprumą, nei galvelinės. Taip pat, Y jungės turi mažesnę santykinę deformaciją, kai veikianti jėga yra tokia pati. Tyrimo metu nustatyta, kad didesnis stipris yra lemiamas to, kad padidėja jungties sukibimas.



13 pav. Mechaninės Y formos jungės charakteristikos [17]

Remiantis tyrimu [18] Y formos jungės puikiai atlaiko daugkartinius apkrovimo ciklus – per 650 tūkst. ciklų jungės praslydimas padidėjo tik 0,01 mm.

13 pav. pavaizduota mechaninės savybės, kurios įtakoja jungės stiprį:

- 1) laikomosios plokštumos plotas;
- 2) armatūros skerspjūvio plotas;
- 3) betono cilindrai susiformuojantys kiaurai skylės;
- 4) betoninio spraustelio plotas susiformavusio tarp Y formos plokštelių.

Privalumai:

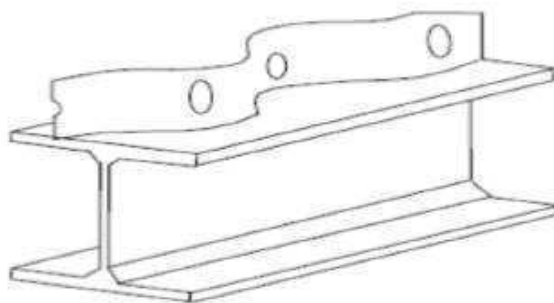
- 1) pakankamai didelė laikomoji geba;
- 2) užtikrintas plastiškumas;
- 3) puikiai atlaiko apkrovimo ciklus [18].

Trūkumai:

- 1) mažai ištyrinėta;
- 2) neapibrėžta projektavimo standartais;
- 3) pakankamai sudėtinga gamyba.

1.5.5. Lankstytų perforuotų lakštų jungės

Lankstytų perforuotų lakštų jungės (angl. *Oscillating perfobondstrips*) – tai jungės, kurios yra sudaryta iš lankstytų perforuotų lakštų, kuri privirinama prie plieninio elemento juostos kampinėmis siūlėmis (žr. 14 pav.). Šios jungtys, remiantis moksline publikacija [10], lyginant su galvelinėmis jungtimis ir T formos jungtimis, turi didesnę laikomąją galią. Pasiekus laikomosios galios piką ir tuomet sumažinus apkrovą, jungties stiprumas tampa pakankamai nuviliantis. Kitą vertus, naudojant lengvasvorį betoną, betoną sustiprintą fibromis arba stiprųjį betoną, tai lankstytos PERFOBOND juostos veikia pakankamai gerai. Šios jungtys yra itin retos ir labai mažai ištyrinėtos.



14 pav. Lankstytų perforuotų lakštų jungė [10]

Privalumai:

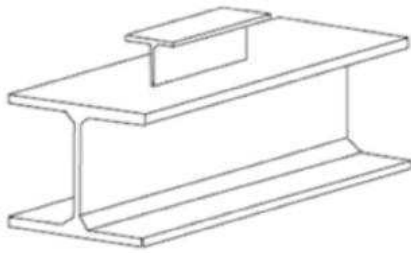
- 1) tinkamos naudoti kartu su lengvasvoriu arba fibromis stiprintu betonu.

Trūkumai:

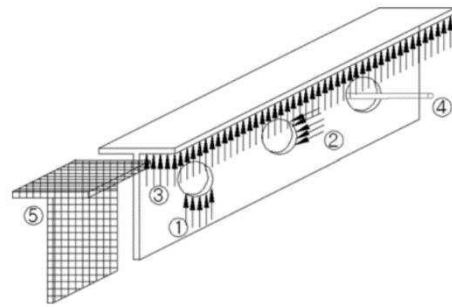
- 1) atsparumas ciklinei apkrovai yra nuviliantis;
- 2) mažai ištyrinėta ir standartais neapibrėžta jungtis.

1.5.6. T-formos jungės

Tai jungtis sudaryta iš standartiško T formos profilio privirinto prie H arba I profilių su dvejomis kartinėmis siūlėmis (žr.15 pav.). Kadangi T formos elemento skerspjūvio plotas yra didesnis už alternatyvių jungčių ir dėl savo formos, tokia jungtis gali suvaržyti kompozitinį elementą nuo plieno ir betono vertikalios atsiskyrimo. T formos jungties elgsena yra labai palanki. Įtempiai T elemento viršuje yra labai aukšti, nes skerspjūvio plotas yra santykinai mažas, todėl atsiranda lokalieji betono sutrupėjimai, o tai priveda prie dalinai plastiškos elgsenos. Jungtis yra pastebimai stipresnė ir elastingesnė, jeigu naudojamas betonas sustiprintas fibromis ar stiprusis betonas. 16 pav. pavaizduota šlyjamojo stiprio dedamosios: 1) ir 2) betono cilindro stiprumas; 3) plieninės lentynos lenkiamasis stiprumas; 4) armatūros atsparumas; 5) betono atsparumas.



15 pav. T formos jungės pozicija ant sijos [10]



16 pav. T formos jungės šlyjamojo stiprio dedamosios [19]

Privalumai:

- 1) užtikrina keliamąjį atsparį;
- 2) papras gamyba;
- 3) panaudojamos antrinės žaliavos.

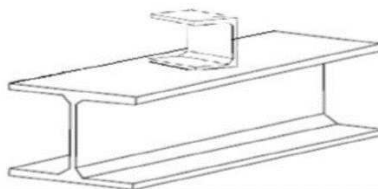
Trūkumai:

- 1) šlyties atsparis nėra itin didelis;
- 2) pirminiai betono pleišėjimai, dėl didelių įtempių ir mažo T elemento skerspjūvio ploto.

1.5.7. Lovinio profilio jungės

Ant sijos viršutinės lentynos statmena kryptimi privirinti lovinio profilio elementai veikia kaip šlyjamoji jungtis. Shervin Maleki [20] ir Mahdi Shariati [21] teigia, kad lovinio profilio jungės (angl. *channel*) (žr. 17 pav.) yra plačiai naudojamos tiek tiltų, tiek ir namų statybose. Nepaisant to, kad jungės dar nėra plačiai ištyrinėtos, tačiau jos vis labiau populiarėja. Šios jungės yra privirinamos prie sijų įprasta suvirinimo sistema, tai jas padaro patikimesnes už galvelines junges. Be to nereikia taikyti patikrinimo procedūrų, tokių kaip jungių lenkimo bandymų. Taip pat šios jungės yra stipresnės už galvelines junges, dėl to viena lovinė jungė gali pakeisti daugybę galvelinių jungių.

Elementai su tokia šlyjamąją jungtimi dažniausiai suirdavo dėl betono suirimo [10]. Bandiniai pasiekdavo 12 – 33 % didesnę atsparį (priklausomai nuo jungties ilgio), kai buvo naudojamos monolitinės plokštės vietoj plokščių su profiliuotu paklotu. Jungės sienelės storis turėjo įtakos tik tada, kai jungė būdavo silpnesnė už betoną, kitais atvejais reikšmės neturėjo.



17 pav. Lovinio profilio jungė [10]

Privalumai:

- 1) ekonomiška gamyba;
- 2) sąlyginai didelė laikomoji geba.

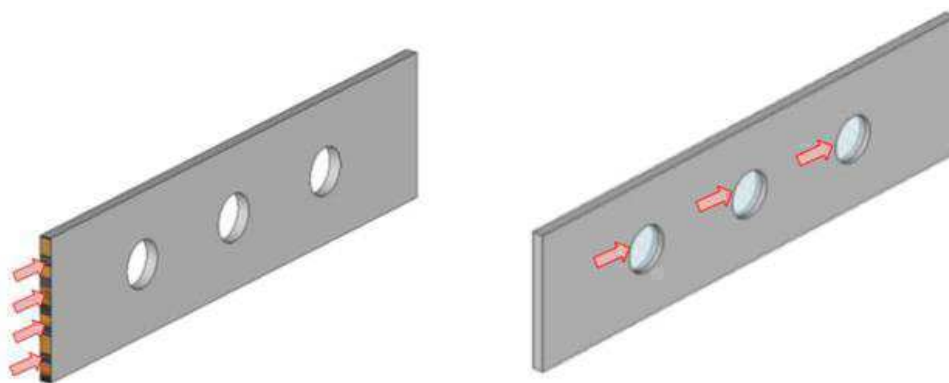
Trūkumai:

- 1) nepasiekiami reikiama deformacija, kad jungė būtų galima vertinti, kaip plastišką.

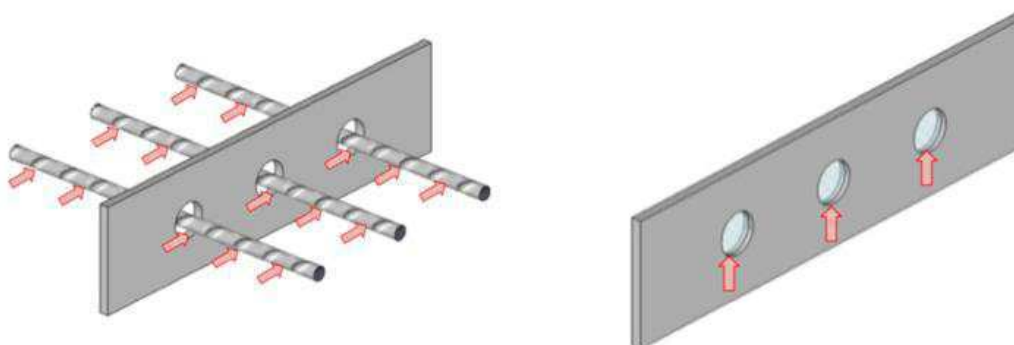
2. Analitinis tyrimas

2.1. Skaičiavimo metodai

Pirmieji skaičiavimo metodai buvo išvesti dar 1994 metais. Vėliau ši jungtis susilaukė daugiau mokslininkų dėmesio ir ji pradėta intensyviau tirti. Skirtingi mokslininkai pasiūlė įvairius skaičiavimo metodus. Daugumos skaičiavimo metodų principas yra panašus – vertinamos trys dedamosios: betono atsparumas ties jungės galu (žr. 18 pav.), armatūros atsparumas (žr. 20 pav.) bei betono cilindrų, susiformavusių per jungės skylės, atsparumas šlyčiai (žr. 19 ir 21 pav.).



18 pav. Betono atsparumas ties jungės galu [22] **19 pav.** Betono cilindrų horizontalus atsparumas šlyčiai [22]



20 pav. Armatūros atsparumas [22]

21 pav. Betono cilindrų vertikalus atsparumas šlyčiai [22]

Šie skaičiavimuose vertinami parametrai atspindi jungės suirimo galimybes: gali suirti betonas (žr. 22, 24b pav.), gali suirti jungė (žr. 23 pav.) bei armatūra (žr. 24c pav.).

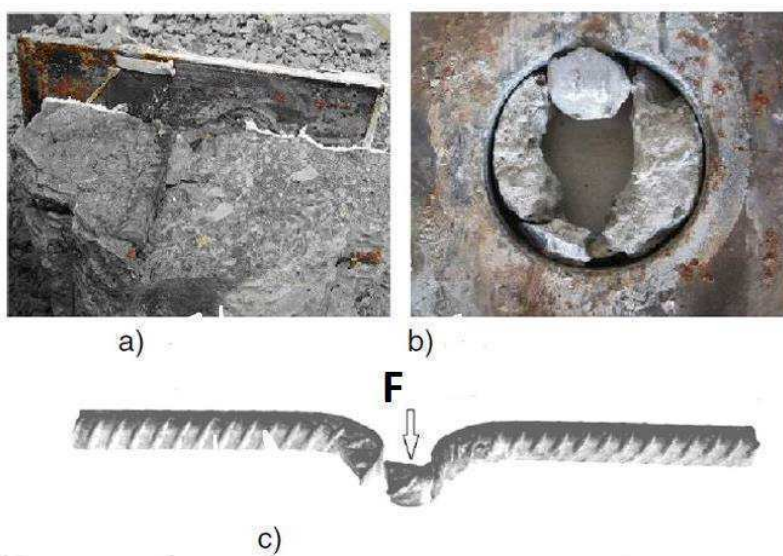
Skaičiavimo metodai tarpusavyje skiriasi įtakos koeficientais bei keletas metodų įvertina tik vienos skylės stiprumą, todėl reikia atlikti papildomus skaičiavimus norint įvertinti visos jungės stiprumą.



22 pav. Betono suirimas: kairėje – viršutinėje plokštės dalyje, dešinėje – apatinėje [11]

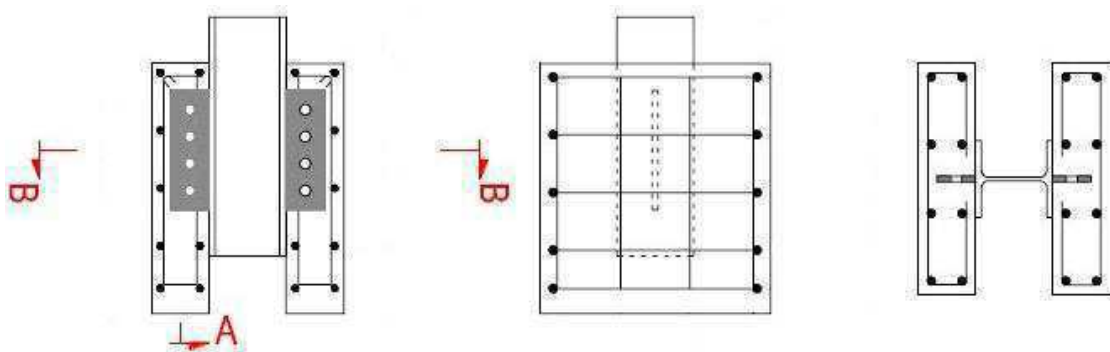


23 pav. Jungės suirimas [23]



24 pav. a) vidinis suirimas; b) betono cilindro suirimas; c) armatūros suirimas [24]

Pagrindinis perforuotų jungių tyrimo metodas yra stūmimo bandymas, kuris yra detalai aprašytas Eurokode 4 [4] ir yra skirtas tirti galvelines junges, tačiau gali būti pritaikomas ir perforuotoms lakštinėms jungėms. Bandinį sudaro plieninė dvitėjinė sija, prie jos lentynų privirintos dvi perforuotų lakštų jungės ir dvi betoninės plokštės su armatūros karkasais (žr. 25 pav.). Betono plokštės yra atremiamos ant standaus pagrindo, o plieninė sija apkraunama. Apkrova iš pradžių didinama pakopomis iki 40 % prognozuojamos irties apkrovos, o po to 25 kartus keičiama nuo 5 % iki 40 % prognozuojamos irties apkrovos. Tolesnis apkrovos didinimas turi būti taikomas pakopomis, kad irtis neįvyktų ankščiau kaip per 15 min [4].



25 pav. Stūmimo bandymo bandinys [11]

1994 metais Kanadoje *Oguejiofor ir Hosain* atliko stūmimo bandymo tyrimus [25] ir pasiūlė pirmąją regresyvio analizės lygtį perforuotų lakštinių jungių šlyties stiprio įvertinimui. Remiantis vėlesnio Ahn [26] tyrimo rezultatais, tai ši lygtis (19) pervertina jungės stiprumą, nes vertina per didelį betono atsparumą ties jungės galu bei per didelę armavimo įtaką [26], todėl tolimesniame tyrime analizuojama nebus. Antroji lygtis (20) buvo išvesta 1997 metais, atlikus stūmimo bandymų skaitinės analizės tyrimus [27]. Joje jau yra įvertinamas ir jungės aukštis bei storis, kai tuo metu pirmojoje lygtyje buvo vertinamas betoninės plokštės šlyties plotas.

$$q_u = 0,59 \times A_{cc} \times f_{ck}^{0,5} + 1,233A_{tr} \times f_y + 2,871n \times D^2 \times f_c^{0,5}; \quad (19)$$

$$q_u = 4,5h_{sc} \times t_{sc} \times f_c + 0,91A_{tr} \times f_y + 3,31n \times D^2 \times f_c^{0,5}; \quad (20)$$

čia q_u – perforuotos lakštinės jungės nominalus šlyties stipris [N];

D – skylių diametras (mm);

h_{sc} – lakšto aukštis (mm);

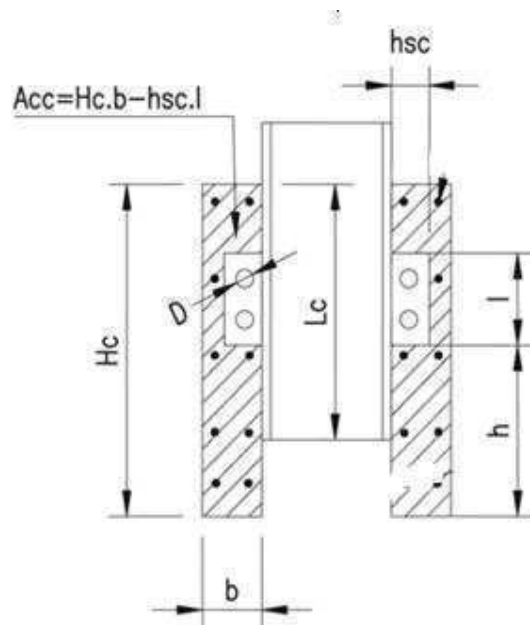
t_{sc} – lakšto storis (mm);

f_{ck} – betono gniuždomasis cilindrinis stipris (MPa);

f_y – armatūros tempiamasis stipris (MPa);

A_{cc} – betoninės plokštės šlyjamasis plotas (mm²)(žr. 26 pav.);

A_{tr} – armatūros suminis skerspjūvio plotas (mm²).



26 pav. A_{cc} – betoninės plokštės šlyjamasis plotas [19]

1997 ir 2002 metais Japonijos universitete *Ushijima* atliktame tyrime [28], kuriame buvo tyrinėta perforuotų lakštinių jungių praslydimų elgsena bei siekiama išvesti skaičiavimų modelius. Remiantis daugialypių regresinių tyrimų (tyrimo būdas, kai bandoma paaiškinti santykį tarp vieno pastovaus kintamojo ir vieno ar daugiau nepriklausomų kintamųjų) rezultatais, skelbtus įvairiuose šaltiniuose bei būtent šio tyrimo rezultatais, buvo išvestos dviejų tipų formulės. Pirmoji formulė skirta apskaičiuoti jungėms, kuriose nėra papildomos armatūros (21), o antroji (22), kai papildoma armatūra per skylės yra naudojama. Abi formulės įvertina tik vienos jungės skylės stiprumą.

$$q_u = 3,38D^2 \left(\frac{t_{sc}}{D}\right)^{0.5} f_{ck} - 39; \quad (21)$$

$$q_u = 1,45 \left[(d^2 - d_{st}^2) f'_c + d_{st}^2 \times f_y \right] - 26,1; \quad (22)$$

čia d_{st} – armatūros diametras (mm);

2002 metais Čikagoje atliktame moksliniame tyrime [29] *Medbery ir Shahrooz* pasiūlė konservatyvesnį skaičiavimų metodą, kuris taip pat, paremtas stūmimo bandymais. Ši formulė (23) buvo kuriama *Oguejiofor ir Hosain* metodo pagrindu, tačiau papildomai įvertinant cheminį ryšį tarp plieno ir betono paviršiaus.

$$q_u = 0,747b \times h \times f_{ck}^{0.5} + 0,413b_f \times L_c + 0,9A_{tr} \times f_y + 1,66n \times \pi(D/2)^2 f_{ck}^{0.5}; \quad (23)$$

čia b – plokštės aukštis (mm);

h – plokštės aukštis žemiau jungės (mm);

b_f – plieninės sijos lentynos plotis (mm);

L_c – betono ir plieninės sijos lentynos kontakto ilgis (mm).

2002 metais *Verissimo* [30] pristatė metodą (24), kuris taip pat buvo paremtas *Oguejiofor ir Hosain* metodu:

$$q_u = 4,04 \times \frac{h_{sc}}{b} h_{sc} t_{sc} f_c + 2,37nD^2 f_c^{0.5} + 0,16A_{cc} f_c^{0.5} + 31,85 \times 10^6 \left(\frac{A_{tr}}{A_{cc}} \right); \quad (24)$$

čia A_{tr} – plotas, lygus iš betono plokštės išilginio ploto atėmus jungės plotą (mm^2)

2007 metais Kinijoje *Al-Darzi* atliko baigtinių elementų tyrimą [31], kuriame buvo simuliuotas stūmimo testas. Gauti rezultatai buvo palyginti su realiais bandymais. Tyrimo tikslas nustatyti kelių parametų įtaką (jungės aukščio, storio, skerspjuvio ploto, plieno stiprio, armavimo įtaką, betono gniuždomojo stiprio, jungių skylių) jungių atsparumui. Remiantis šiais tyrimais buvo pasiūlyta formulė:

$$q_u = 0,762h_{sc} t_{sc} f_{ck} + (255309 - 7,59 \times 10^{-4} A_{tr} \times f_y) + 3,97nD^2 f_{ck}^{0.5}; \quad (25)$$

2009 metais Pietų Korėjoje atliktame stūmimo bandymų tyrime gauti rezultatai buvo palyginti su skaičiavimo modeliuose gautais rezultatais. Tyrimo metu nustatyti formulių netikslumai bei korekcijos taip, kad jos įvertintų jungių išdėstymą, aukštį bei tarpus. Pastebėta, kad *Medberry* ir *Shahrooz* metodas tiksliausiai įvertino šlyties atsparį.

2009 metais Kinijoje buvo pristatytas *Weichen XUE* metodas [32], kuris įvertiną vienos lakšto skylės šlyjamąjį stiprumą:

$$q_u = 2,93\pi(D^2 - d_s^2) \times f_t + 0,289\pi d_s^2 f_y; \quad (26)$$

čia d_s – armatūros diametras (mm);

f_t – betono tempiamasis stipris (MPa);

2010 metais Pietų Korėjoje *Ahn* atliko tyrimus [26], kuriuose buvo pasiūlytas metodas, išvestas remiantis stūmimo bandymų regresinės analizės būdu:

1) kai jungės išdėstytos viena eile:

$$q_u = 3,14h_{sc} t_{sc} f_c + 1,21A_{tr} f_y + 2,9n \left(\frac{D}{2} \right)^2 f_{ck}^{0.5}; \quad (27)$$

2) kai jungės išdėstytos dvejomis eilėmis:

$$q_u = 2,76h_{sc} t_{sc} f_c + 1,06A_{tr} f_y + 3,32n \left(\frac{D}{2} \right)^2 f_c^{0.5}; \quad (28)$$

2.2. Bandinių duomenys

Siekiant palyginti skaičiavimo metodus buvo parinkta bandinių imtis. Dalis bandinių parametų yra parinkti remiantis *Jing Zhang* atliktu tyrimu [33], kuriame yra įvardinti konstrukciniai jungės parametų apribojimai: betono plokštės aukštis 150 – 200 mm, jungės lakšto storis 5 – 16 mm ir aukštis 76 – 150 mm, armatūros diametras nedidesnis nei 25 mm. Kiti parametrai buvo parinkti pagal jau atliktus bandymus, pasirenkant eksperimentuose naudotus dydžius (žr. 1 lent.).

1 lentelė. Skaičiavimo duomenys

Eil. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Žymėjimas	h_{sc}	l_{sc}	t_{sc}	f_{ck}	$f_{ctk 0.05}$	b	h	d_{st}	A_{tr}	f_y	n	D	L_c	b_f	A_{cc}
Vnt.	mm	mm	mm	MPa	MPa	mm	mm	mm	mm ²	MPa	vnt.	mm	mm	mm	cm ²
Betono klasės įtaka															
I	100	350	12	20	2,2	150	325	16	602,9	500	3	40	1000	260	1150
II	100	350	12	25	2,6	150	325	16	602,9	500	3	40	1000	260	1150
III	100	350	12	30	2,9	150	325	16	602,9	500	3	40	1000	260	1150
IV	100	350	12	40	3,5	150	325	16	602,9	500	3	40	1000	260	1150
V	100	350	12	45	3,8	150	325	16	602,9	500	3	40	1000	260	1150
VI	100	350	12	50	4,1	150	325	16	602,9	500	3	40	1000	260	1150
Skylės diametro įtaka															
I	100	350	12	30	2,9	150	325	16	602,9	500	3	35	1000	260	1150
II	100	350	12	30	2,9	150	325	16	602,9	500	3	45	1000	260	1150
III	100	350	12	30	2,9	150	325	16	602,9	500	3	55	1000	260	1150
Armatūros diametro įtaka															
I	100	350	12	30	2,9	150	325	10	235,5	500	3	40	1000	260	1150
II	100	350	12	30	2,9	150	325	12	339,1	500	3	40	1000	260	1150
III	100	350	12	30	2,9	150	325	16	602,9	500	3	40	1000	260	1150
IV	100	350	12	30	2,9	150	325	20	942	500	3	40	1000	260	1150
V	100	350	12	30	2,9	150	325	25	1471,9	500	3	40	1000	260	1150
Skylių kiekio įtaka															
I	100	350	12	30	2,9	150	325	16	201	500	1	40	1000	260	1150
II	100	350	12	30	2,9	150	325	16	401,9	500	2	40	1000	260	1150
III	100	350	12	30	2,9	150	325	16	602,9	500	3	40	1000	260	1150
IV	100	350	12	30	2,9	150	325	16	803,8	500	4	40	1000	260	1150
Jungės storio įtaka															
I	100	350	10	30	2,9	150	325	16	602,9	500	3	40	1000	260	1150
II	100	350	12	30	2,9	150	325	16	602,9	500	3	40	1000	260	1150
III	100	350	16	30	2,9	150	325	16	602,9	500	3	40	1000	260	1150

Šiame darbe bus analizuojama jungės šlyties stiprio priklausomybė nuo:

- 1) betono klasės;
- 2) jungės skylių diametro;
- 3) jungės skylių kiekio;
- 4) armatūros diametro;
- 5) jungės lakšto storio.

Bandymas atliekamas tiriant tik perforuotų lakštų junges, kurios yra armuotos kiaurai lakšto skyles. Bandymo metu kinta tik tiriamasis dydis, o visi kiti dydžiai yra pastovūs. Taip pat numatyta, kad betono ir plieninės sijos lentynos ilgis – $L_c = 1000$ mm. Plieninė sija – HEB 260. Plokštės plotis žemiau jungės – $h = 325$ mm, jungė yra per vidurį ilgio L_c . Kiekviename įtakos tyrimo skyriuje bus pateikiamas vieno atvejo skaičiavimas, kurio algoritmas buvo pritaikytas ir kitiems šlyties stiprio skaičiavimams. Šie skaičiavimai atliekami *Oguejiofor ir Hosain* skaičiavimų metodu, nes būtent šis metodas 2.8 skyriuje buvo nustatytas esantis pačiu patikimiausiu.

2.3. Betono gniuždomojo stiprio įtaka šlyties stipriui

Nagrinėjant betono įtaką, buvo parinktas ir platus spektras betono kategorijų pagal stiprumo klasę. Remiantis tuo, kad Eurokodas 4 [4] nenagrinėja kompozitinių elementų, kurių betono klasė mažesnė nei C20/25 ir aukštesnė kaip C60/75, tai šiame darbe taip pat nagrinėjama nebus. *Weichen XUE*, tai vienintelis metodas, kuris įvertina ir tempiamąjį betono stiprumą, todėl šiame bandyme buvo du kintamieji dydžiai. 2 lentelėje pateikiami nekintantys dydžiai, naudoti betono stiprio įtakos skaičiavimuose.

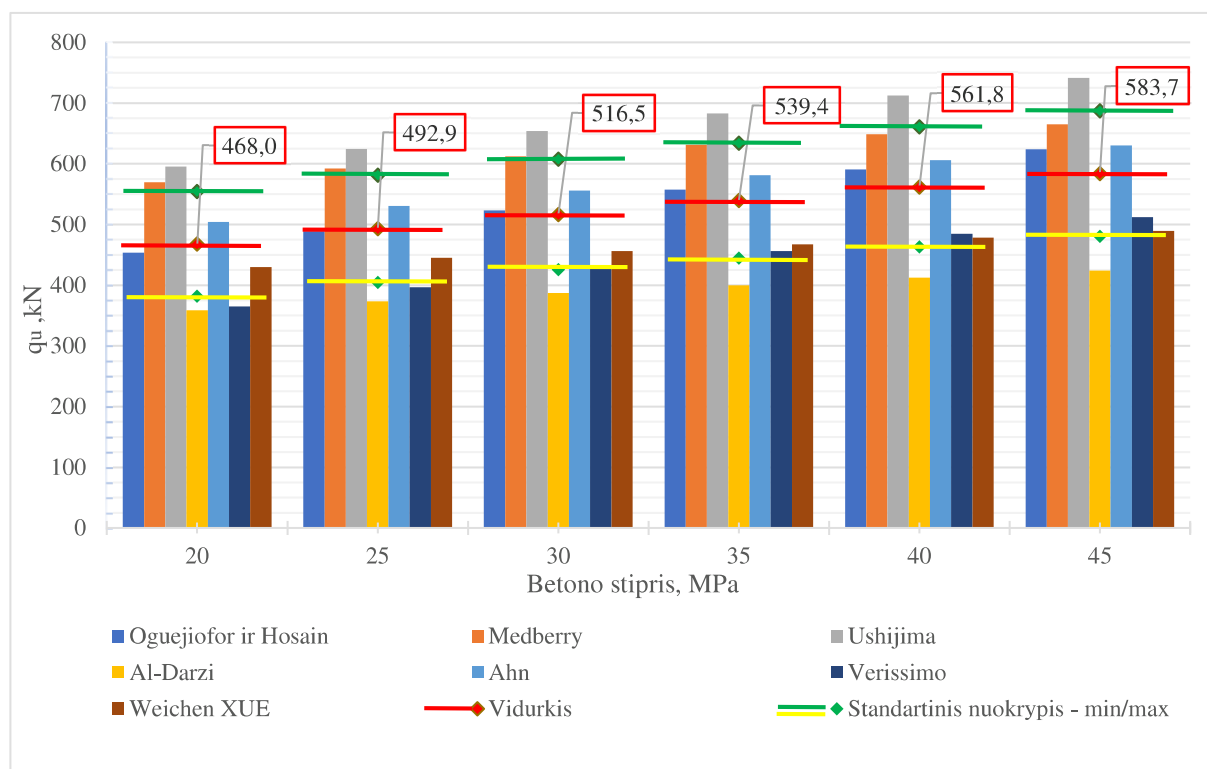
2 lentelė. Betono stiprio įtakos šlyties stipriui tyrimo nekintantys dydžiai

h_{sc}	l_{sc}	t_{sc}	b	h	d_{st}	f_y	n	D	L_c	b_f	A_{cc}
mm	mm	mm	mm	mm	mm	MPa	vnt.	mm	mm	mm	mm ²
100	350	12	150	325	16	500	3	40	1000	260	115000

Šlyties stiprio skaičiavimas:

$$q_u = 4,5 \times h_{sc} t_{sc} f_{ck} + 0,91 A_{tr} f_y + 3,31 n D^2 f_{ck}^{0,5} = 4,5 \times 100 \times 12 \times 30 + 0,91 \times 602,9 \times 500 + 3,31 \times 3 \times 40^2 \times 30^{0,5} = 523,3 \text{ kN}; \quad (29)$$

čia $D = 40 \text{ mm}$; $h_{sc} = 100 \text{ mm}$; $t_{sc} = 12 \text{ mm}$; $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$;
 $f_y = 500 \text{ MPa}$; $A_{tr} = 602,9 \text{ mm}^2$; $n = 3 \text{ vnt.}$; $d_{st} = 16 \text{ mm}$.



27 pav. Betono stiprio įtaka šlyties stipriui

Analizuojant 27 paveikslą yra pastebima, kad skirtingi metodai pateikia pakankamai skirtingus rezultatus – skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios apskaičiuotos šlyjamiosios gebos vyrauja tarp 236,8 ir 335,3 kN. Standartinis nuokrypis yra lygus tarp 86 ir 103 kN. Taip pat pastebima, kad standartinis nuokrypis didėja, didėjant betono klasei, o tai reiškia, kad išauga ir skaičiavimų paklaida.

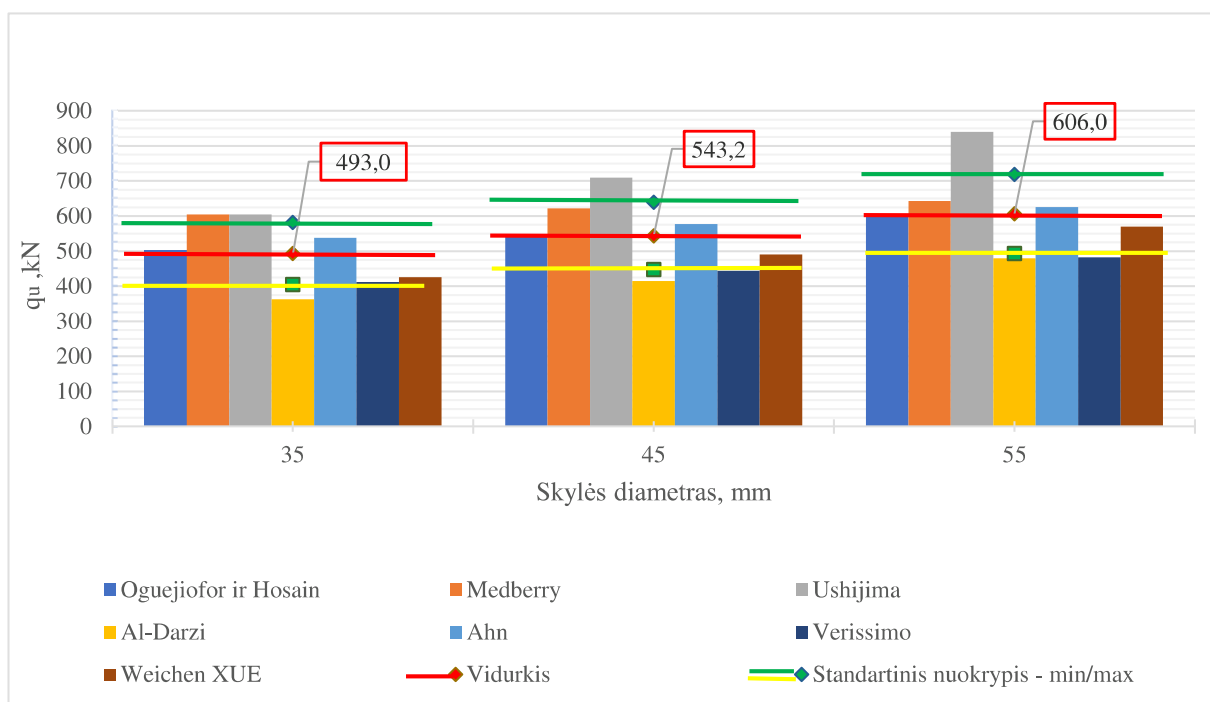
Didžiausios reikšmės yra gaunamas *Ushijima*, o mažiausios *Al-Darzi* metodais. Skirtingos metodikos skirtingai vertina betono įtaką. Didžiausia įtaka apskaičiuota *Verissimo* metodu – pakeitus betono klasę iš C20/25 į C45/50, buvo pasiektas 40,4 % prieaugis. Panašus rezultatas gautas ir *Oguejiofor ir Hosain* metodu – 37,6 %. Mažiausias prieaugis pasiektas *Medberry* ir *Weichen XUE* - 16,8 % ir 13,8 % atitinkamai. Galima nustatyti, kad betono stipris daro įtaką šlyjamajam stipriui – kiekviena stipresnė betono klasė padidina jungės stiprį apie 5 % – 25 kN.

2.4. Jungių skylių diametro įtaka šlyties stipriui

Skaičiavimo metodai įvertina perforuotų lakštų jungės skylių diametrą, nes jam didėjant, didėja ir betono kaiščio diameteras. Betono suformuotas kaištis yra veikiamas šlyties, tiek horizontaliai, tiek vertikaliai. Eksperimentiniuose tyrimuose [33] skylės diameteras kinta tarp 30 – 60 mm, o šiame tyrime parinktos trys reikšmės, kurios perteikia jungių skylės diametro įtaką šlyties stipriui. 3 lentelėje pateikiami nekintantys dydžiai, naudoti skylės diametro įtakos skaičiavimuose.

3 lentelė. Skylės diametro įtakos šlyties stipriui tyrimo nekintantys dydžiai

h_{sc}	l_{sc}	t_{sc}	f_{ck}	b	h	d_{st}	f_y	n	L_c	b_f	A_{cc}
mm	mm	mm	MPa	mm	mm	mm	MPa	vnt.	mm	mm	mm ²
100	350	12	30	150	325	16	500	3	1000	260	115000



28 pav. Skylės diametro įtaka šlyties stipriui

Šlyties stiprio skaičiavimas:

$$q_u = 4,5 \times h_{sc} t_{sc} f_{ck} + 0,91 A_{tr} f_y + 3,31 n D^2 f_{ck}^{0,5} = 4,5 \times 100 \times 12 \times 30 + 0,91 \times 602,9 \times 500 + 3,31 \times 3 \times 35^2 \times 30^{0,5} = 502,9 \text{ kN}; \quad (30)$$

čia $D = 35 \text{ mm}$; $h_{sc} = 100 \text{ mm}$; $t_{sc} = 12 \text{ mm}$; $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$;
 $f_y = 500 \text{ MPa}$; $A_{tr} = 602,9 \text{ mm}^2$; $n = 3 \text{ vnt.}$; $d_{st} = 16 \text{ mm}$.

Po atliktų skaičiavimų, galima pastebėti (žr. 28 pav.), kad rezultatai tarp skirtingų metodikų kinta panašiai, kaip ir betono įtakos skaičiavimuose – standartinis nuokrypis yra tarp 88 – 112 kN.

Didžiausios reikšmės gautos taip pat *Ushijima* metodu, o mažiausios *Al-Darzi* metodu. Reikšmių vidurkis yra tarp 493 ir 606 kN. Didžiausia įtaka pasiekta skaičiuojant *Ushijima* ir *Weichen XUE* metodais – 38,8 % ir 33,8 % atitinkamai. Mažiausia įtaka *Medberry* metodu – 6,4 %. Šie skaičiavimai leidžia nustatyti, kad padidinus skylės diametrą 10 mm, šlyjamasis stipris padidėja apie 10 %, o tai yra apie 50 kN.

2.5. Armatūros diametro įtaka šlyties stipriui

Perforuotų lakštų jungės armavimas turi didelę įtaką konstrukcijos stiprumui ir elgsenai [20]. Jungės yra armuojamos armatūros strypus prakišant per jungėje esančias skylės. Vadovaujantis eksperimentiniais tyrimais [33] armavimas yra atliekamas strypais, kurių diametras kinta tarp 25 – 100 mm. 4 lentelėje pateikiami nekintantys dydžiai, naudoti armatūros diametro įtakos skaičiavimuose.

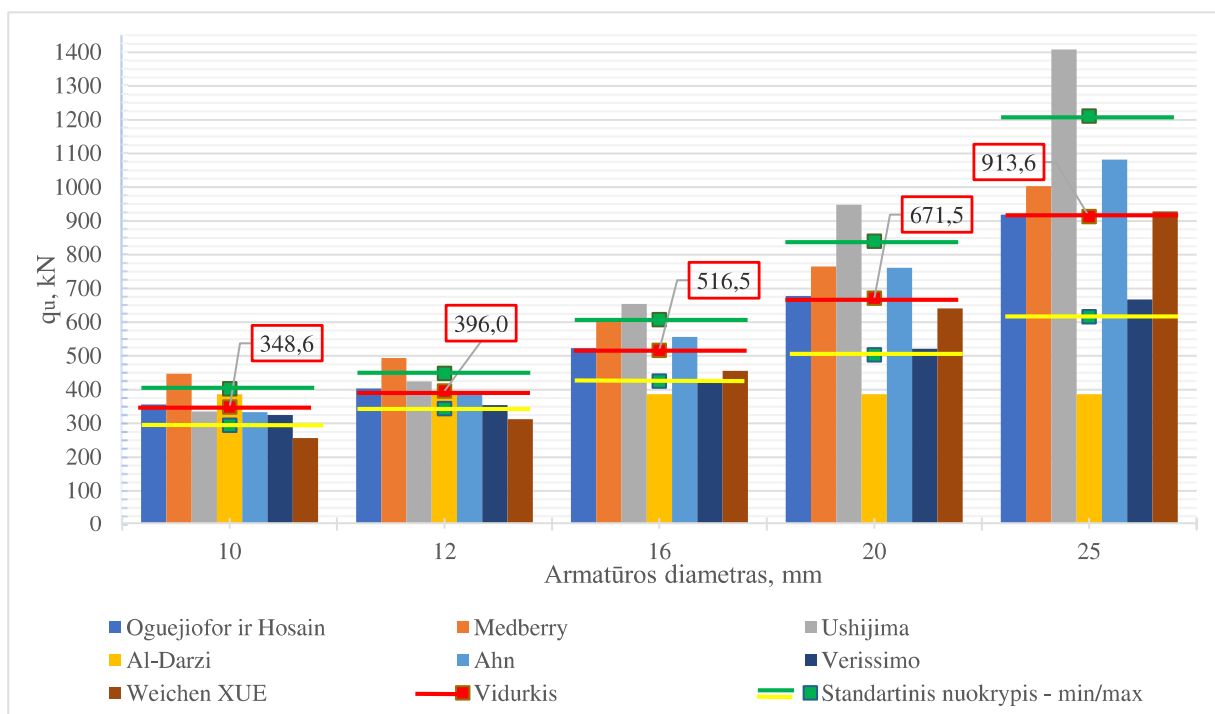
4 lentelė. Armatūros diametro įtakos šlyties stipriui tyrimo nekintantys dydžiai

h_{sc}	l_{sc}	t_{sc}	f_{ck}	b	h	f_y	n	D	L_c	b_f	A_{cc}
mm	mm	mm	MPa	mm	mm	MPa	vnt.	mm	mm	mm	mm ²
100	350	12	30	150	325	500	3	40	1000	260	115000

Šlyties stiprio skaičiavimas:

$$q_u = 4,5 \times h_{sc} t_{sc} f_{ck} + 0,91 A_{tr} f_y + 3,31 n D^2 f_{ck}^{0,5} = 4,5 \times 100 \times 12 \times 30 + 0,91 \times 399,12 \times 500 + 3,31 \times 3 \times 40^2 \times 30^{0,5} = 403,3 \text{ kN}; \quad (31)$$

čia $D = 40 \text{ mm}$; $h_{sc} = 100 \text{ mm}$; $t_{sc} = 12 \text{ mm}$; $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$;
 $f_y = 500 \text{ MPa}$; $A_{tr} = 399,12 \text{ mm}^2$; $n = 3 \text{ vnt.}$; $d_{st} = 12 \text{ mm}$.



29 pav. Armatūros diametro įtaka šlyties stipriui

Remiantis gautais duomenimis, pavaizduotais 29 pav., pirmiausiai matyti, kad *Ushijima* metodas stipriai išsiskiria savo šlyties stiprio prieaugiu – 320 %, truputi atsiliekantis *Weichen XUE* 262,5

%. *Al-Darzi* metodas išsiskiria iš visų kitų, nes armatūros diametro įtaka yra neįvertinama. Standartinis nuokrypis kinta nuo 52,4 iki 297,5 kN, o tai reiškia, kad maksimali paklaida gaunama beveik tris kartus didesnė nei 2.3 – 2.4 skyriuose, kuriuose buvo vertinama betono klasės ir skylių dydžio įtakos.

Padidinus armatūros diametrą, vidutinė šlyties stiprio reikšmė padidėja apie 30 % (kai diametras padidėja 4 mm), o tai yra lygu nuo 120 iki 242 kN. Galima daryti išvadą, kad armatūros diametras turi ~ 4 kartus didesnę įtaką nei betono klasė ir 3 kartus didesnę įtaką nei jungių skylių diametras.

2.6. Perforuoto lakšto jungėje esančių skylių kiekio įtaka šlyties stipriui

Siekiant išlaikyti skaičiavimų rezultatus palyginamus pagal kintamų dydžių įtaką, yra numatoma kuo daugiau dedamųjų laikyti konstanta. Todėl atliekant skylių kiekio įtakos skaičiavimus, kad išlaikyti jungės ilgį pastovų, buvo numatytas maksimalus skylių kiekis – 4. Norint projektuoti daugiau skylių, reikėtų didinti jungės ilgį. Minimalus skylių kiekis – 1 vnt. Jungės skylių kiekis atlieka du vaidmenis – tai daro nustato betono cilindro skerspjūvio plotą, bei armatūros suminį skerspjūvio plotą. 5 lentelėje pateikiami nekintantys dydžiai, naudoti skylių kiekio įtakos skaičiavimuose.

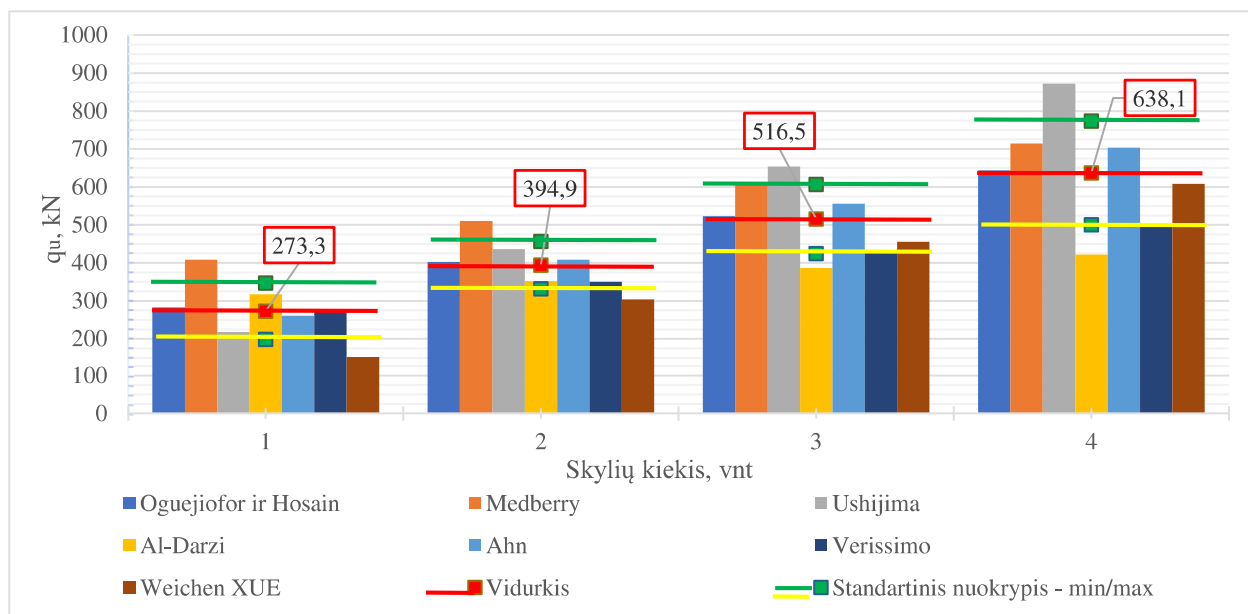
5 lentelė. Skylių kiekio įtakos šlyties stipriui tyrimo nekintantys dydžiai

h_{sc}	l_{sc}	t_{sc}	f_{ck}	b	h	d_{st}	f_y	D	L_c	b_f	A_{cc}
mm	mm	mm	MPa	mm	mm	mm	MPa	mm	mm	mm	mm ²
100	350	12	30	150	325	16	500	40	1000	260	115000

Šlyties stiprio skaičiavimas:

$$q_u = 4,5 \times h_{sc} t_{sc} f_{ck} + 0,91 A_{tr} f_y + 3,31 n D^2 f_{ck}^{0.5} = 4,5 \times 100 \times 12 \times 30 + 0,91 \times 401,9 \times 500 + 3,31 \times 2 \times 40^2 \times 30^{0.5} = 402,9 \text{ kN}; \quad (32)$$

čia $D = 40 \text{ mm}$; $h_{sc} = 100 \text{ mm}$; $t_{sc} = 12 \text{ mm}$; $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$;
 $f_y = 500 \text{ MPa}$; $A_{tr} = 401,9 \text{ mm}^2$; $n = 2 \text{ vnt.}$; $d_{st} = 16 \text{ mm}$.



30 pav. Skylių kiekio įtaka šlyties stipriui

Apžvelgiant skaičiavimų rezultatus, pavaizduotus 30 pav., yra pastebima, kad *Ushijima* ir *Weichen XUE* metodai, kaip ir ankstesniuose poskyriuose, išsiskiria šlyties stiprio prieaugiu ir padidinus skylių kiekį nuo 1 iki 4, gaunamas 300 % prieaugis. Vidutinis prieaugis yra apie 155 %, o mažiausias prieaugis pasiekiamas skaičiuojant *Al-Darzi* ir *Medberry* metodais – 32,8 ir 74,8 % atitinkamai. Standartinis nuokrypis kinta nuo 62,5 iki 136 kN. Vidutinis šlyjamasis stipris yra tarp 304,3 ir 679,3 kN, priklausomai nuo skylių kiekio. Padidinus skylių kiekį iki dviejų, šlyties stiprio vidurkis padidėjo daugiausiai – 44,5 %. Toliau kiekviena papildoma skylė turi vis mažesnę įtaką šlyties stipriui: kai 3 skylės, stipris padidėja 30,8 %, kai 4 skylės – 23,5 %. Šiame bandyme, kiekviena papildoma skylė prie vidutinio šlyjamąjo stiprio pridėjo po 121,6 kN.

2.7. Jungės storio įtaka šlyties stipriui

Siekiant ištirti šio tipo šlyjamąsias jungtis, yra būtina nustatyti, kokią įtaką turi jungės storis, nes tai turi įtakos statybos ekonomijai – storesni lakštai sukelia didesnę plieno poreikį, bei didesnių suvirinimo siūlių ir ilgesnio virinimo proceso. 6 lentelėje pateikiami nekintantys dydžiai, naudoti jungės storio įtakos skaičiavimuose.

6 lentelė. Jungės lakšto storio įtakos šlyties stipriui tyrimo nekintantys dydžiai

h_{sc}	l_{sc}	f_{ck}	b	h	d_{st}	f_y	n	D	L_c	b_f	A_{cc}
mm	mm	MPa	mm	mm	mm	MPa	vnt.	mm	mm	mm	mm ²
100	350	30	150	325	16	500	3	40	1000	260	115000

Šlyties stiprio skaičiavimas:

$$q_u = 4,5 \times h_{sc} t_{sc} f_{ck} + 0,91 A_{tr} f_y + 3,31 n D^2 f_{ck}^{0,5} = 4,5 \times 100 \times 16 \times 30 + 0,91 \times 602,9 \times 500 + 3,31 \times 3 \times 40^2 \times 30^{0,5} = 577,3 \text{ kN}; \quad (33)$$

čia $D = 40 \text{ mm}$; $h_{sc} = 100 \text{ mm}$; $t_{sc} = 16 \text{ mm}$; $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$;
 $f_y = 500 \text{ MPa}$; $A_{tr} = 602,9 \text{ mm}^2$; $n = 3 \text{ vnt.}$; $d_{st} = 16 \text{ mm}$.



31 pav. Jungės storio įtaka šlyties stipriui

Apžvelgiant skaičiavimų rezultatus pavaizduotus 31 paveiksle, pastebima, kad jungės storis turi mažą įtaką šlyties stipriui. Prieaugis yra fiksuojamas skaičiuojant tik šiais metodais – *Oguejiofor* ir *Hosain* 16,3 %, *Ahn* 10,5 % ir *Verissimo* 11,8 %. Kiti metodai vertina taip, kad jungės storis šlyties stipriui poveikio neturi. Vidutinis šlyties stiprio padidėjimas yra apie 10 % (9 – 19 kN). Standartinis nuokrypis yra tarp 89,9 ir 93,4 kN ir mažėja didėjant lakšto storiui, o tai reiškia, kad mažėja ir paklaida.

2.8. Skaičiavimo metodų rezultatų palyginimas su eksperimentais

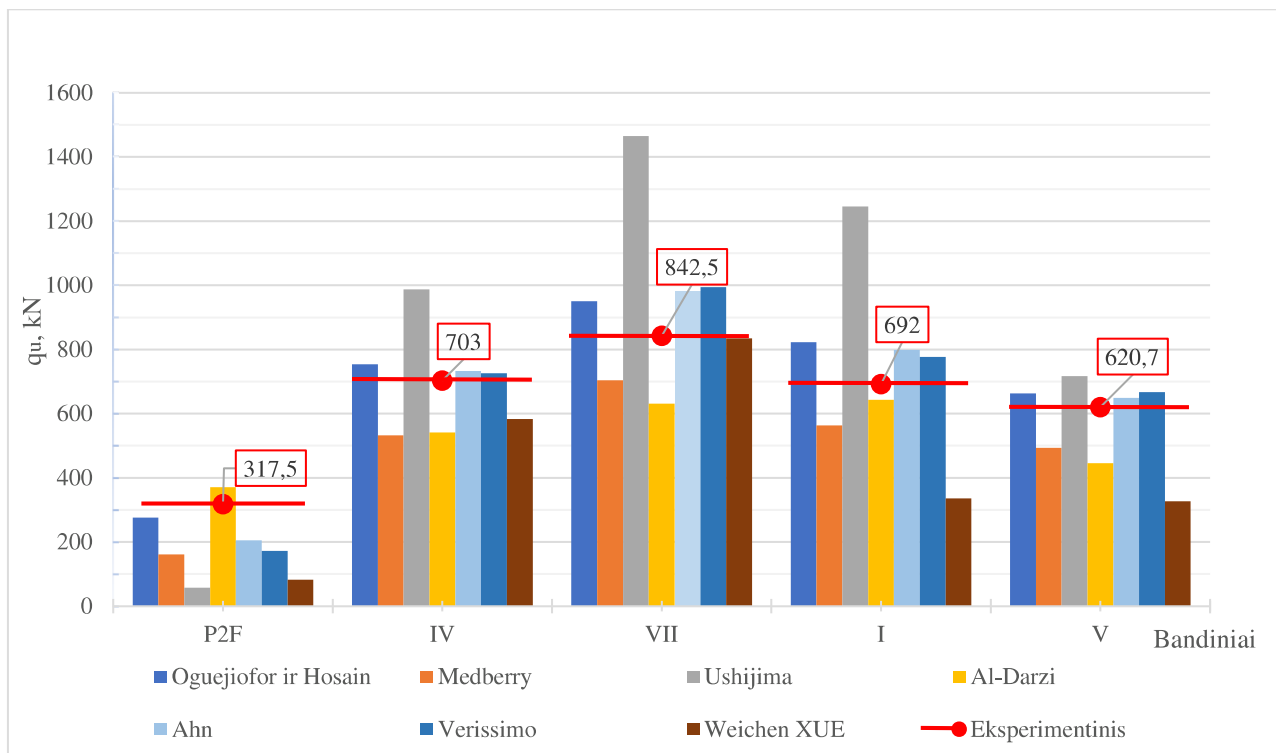
Projektuojant inovatyvias konstrukcijas, kai taikomos modernios skaičiavimo metodikos, dažniausiai remiamasi eksperimentinių tyrimų rezultatais. Iškilus būtinybei patikrinti teorinius kriterijus, kuriais aprašomi ribiniai įtempių ir deformacijų būviai, yra taikomi eksperimentiniai metodai. Daugumoje atvejų šie metodai yra nepakeičiami, nes dėl sudėtingų irimo procesų ar detalių konfigūracijos, teoriškai išvesti stiprumo skaičiavimo metodai yra nepatikimi arba neįmanomi.

Šiame darbe yra būtina nustatyti perforuotos lakštines jungės stiprumo skaičiavimo metodų patikimumą. Tai leis įvertinti, kuris iš metodų yra pranašiausias ir tinkamiausias praktiniam pritaikymui. Šiam tikslui pasiekti buvo lyginami eksperimentiniais stūmimo bandymais gauti rezultatai su teoriškai apskaičiuotomis reikšmėmis, taikant anksčiau minimus skaičiavimo metodus. Kadangi šiame darbe eksperimentiniai tyrimai atliekami nebuvo, todėl remiamasi mokslinėse publikacijos publikuotais eksperimentiniais bandymais [11, 32, 33, 26, 34, 35]. Publikacijos atrinktos pagal bandinių konfigūracijų atsekamumą, nes norint apskaičiuoti jungės stiprumą, reikia žinoti bandinių parametrus. Išnagrinėjus publikacijas, tolimesniam tyrimui buvo parinkta 20 nepriklausomų ir skirtingų bandinių. Bandiniai skyrėsi jungės ilgiu ($l_{sc} = 180 - 500$ mm), aukščiu ($h_{sc} = 76,2 - 150$ mm), storiu ($t_{sc} = 5 - 16$ mm), be to ir skylių kiekiu ($n = 4 - 8$ mm), jų diametru ($D = 30 - 60$ mm) ir pro jas einančių armatūrų diametru ($d_s = 10 - 20$ mm) (žr. 7 lent.), siekiant nustatyti skaičiavimo metodų patikimumą taikant platų jungių parametrų konfigūracijų spektrą.

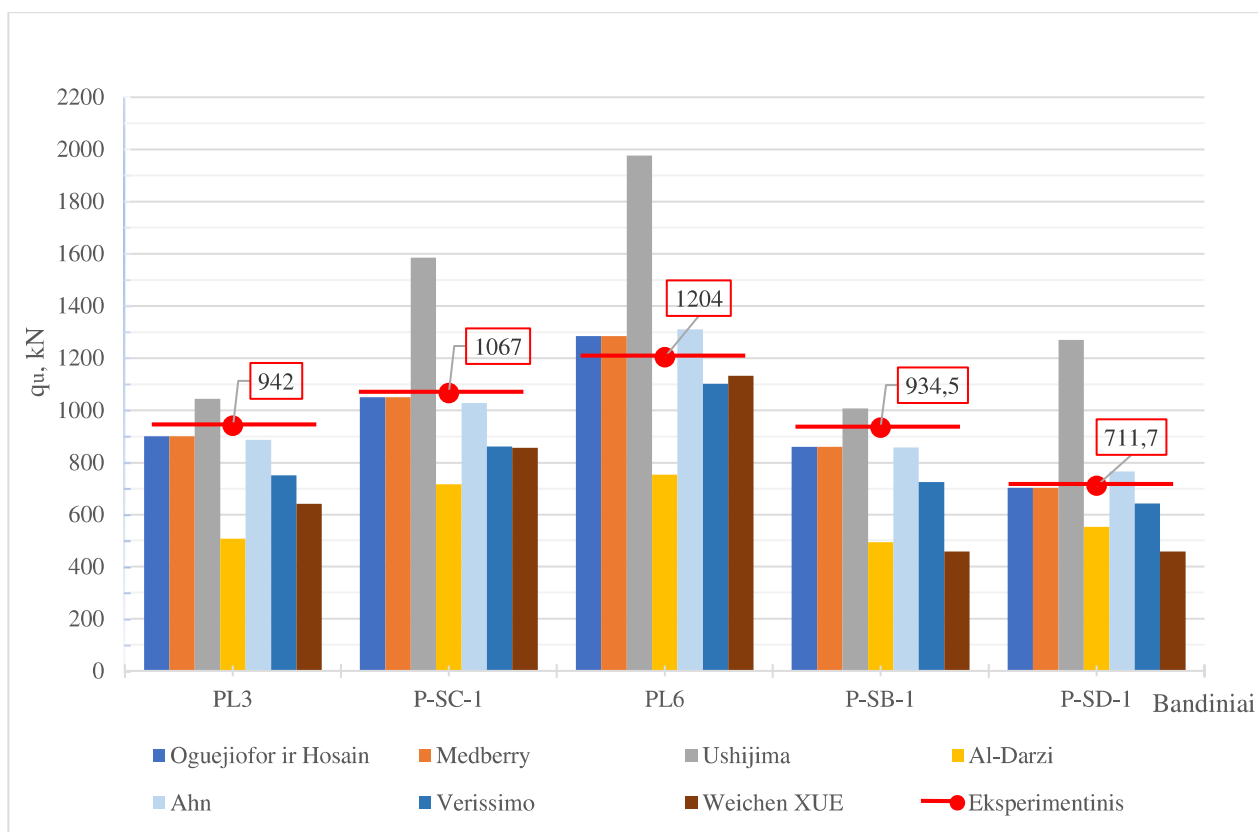
7 lentelė. Eksperimentinių ir teorinių skaičiavimų rezultatų palyginimui naudojamų bandinių parametrai

		Eil. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
		Žymėjimas	h_{sc}	l_{sc}	t_{sc}	f_{ck}	f_{ctk}	b	h	d_{st}	A_{tr}	f_y	n	D	L_c	b_f	A_{cc}	P_u
		Vnt.	mm	mm	mm	MPa	MPa	mm	mm	mm	mm ²	MPa	vnt.	mm	mm	mm	mm ²	kN
Eil. Nr.	Šaltinio Nr.	Bandinio pavadinimas																
1	[11]	P2F	100	310	15	31	2,5	150	150	0	0,0	0	4	30	500	200	44000	317,5
2	[32]	IV	100	350	12	54,1	3,9	150	150	16	803,8	361,7	4	45	650	260	62500	703,0
3		VII	100	350	12	48	3,5	150	150	20	1256,0	361,7	4	55	650	260	62500	842,5
4		I	100	350	12	50,6	3,7	150	150	16	803,8	361,7	4	55	650	260	62500	692,0
5		V	100	350	12	53,3	3,8	150	150	16	803,8	351,7	4	35	650	260	62500	620,7
6	[33]	PL3	100	350	16	53,6	3,7	150	150	16	803,8	492,5	4	40	650	260	62500	942,0
7		P-SC-1	100	350	16	49,4	3,25	150	150	16	803,8	492,5	4	60	650	260	62500	1067,0
8		PL6	100	350	16	53,1	3,6	150	150	16	1205,8	492,5	6	50	650	260	62500	1204,0
9		P-SB-1	100	350	16	48,9	3,5	150	150	16	803,8	492,5	4	40	650	260	62500	934,5
10		P-SD-1	100	350	5	49,4	3,5	150	150	16	803,8	492,5	4	50	650	260	62500	711,7
11		P-SE-1	100	350	10	50,8	3,7	150	150	16	803,8	492,5	4	50	650	260	62500	873,8
12		P-SF-1	100	350	16	50,8	3,7	150	150	16	1205,8	492,5	6	50	650	260	62500	1140,1
13		P-SG-1	100	350	16	27,2	2,2	150	150	16	803,8	492,5	4	50	650	260	62500	589,3
14	P-SI-1	100	350	16	50,8	3,6	150	150	20	1256,0	445	4	50	650	260	62500	977,2	
15	[26]	PF-S-C-2	129	500	6	33,33	2,6	211	100	16	1607,7	350	8	55	600	400	62100	1264,0
16		PF-S-C50-A	129	500	6	52,6	3,8	211	100	16	1607,7	350	8	55	600	400	62100	1393,5
17		PF-S-C30-A	129	500	6	32,7	2,6	211	100	16	1607,7	350	8	55	600	400	62100	1177,5
18	[34]	P-2F-AR-120-A	76,2	180	12,5	51,9	3,7	200	150	10	314,0	500	4	35	600	260	106284	443,0
19		P-2F-AR-200-A	150	180	12,5	51,9	3,7	200	150	10	314,0	500	4	35	600	260	93000	549,7
20	[35]	P2F-AR12	80	300	15	31,44	2,5	150	75	12	452,2	500	4	30	575	220	62250	398,9

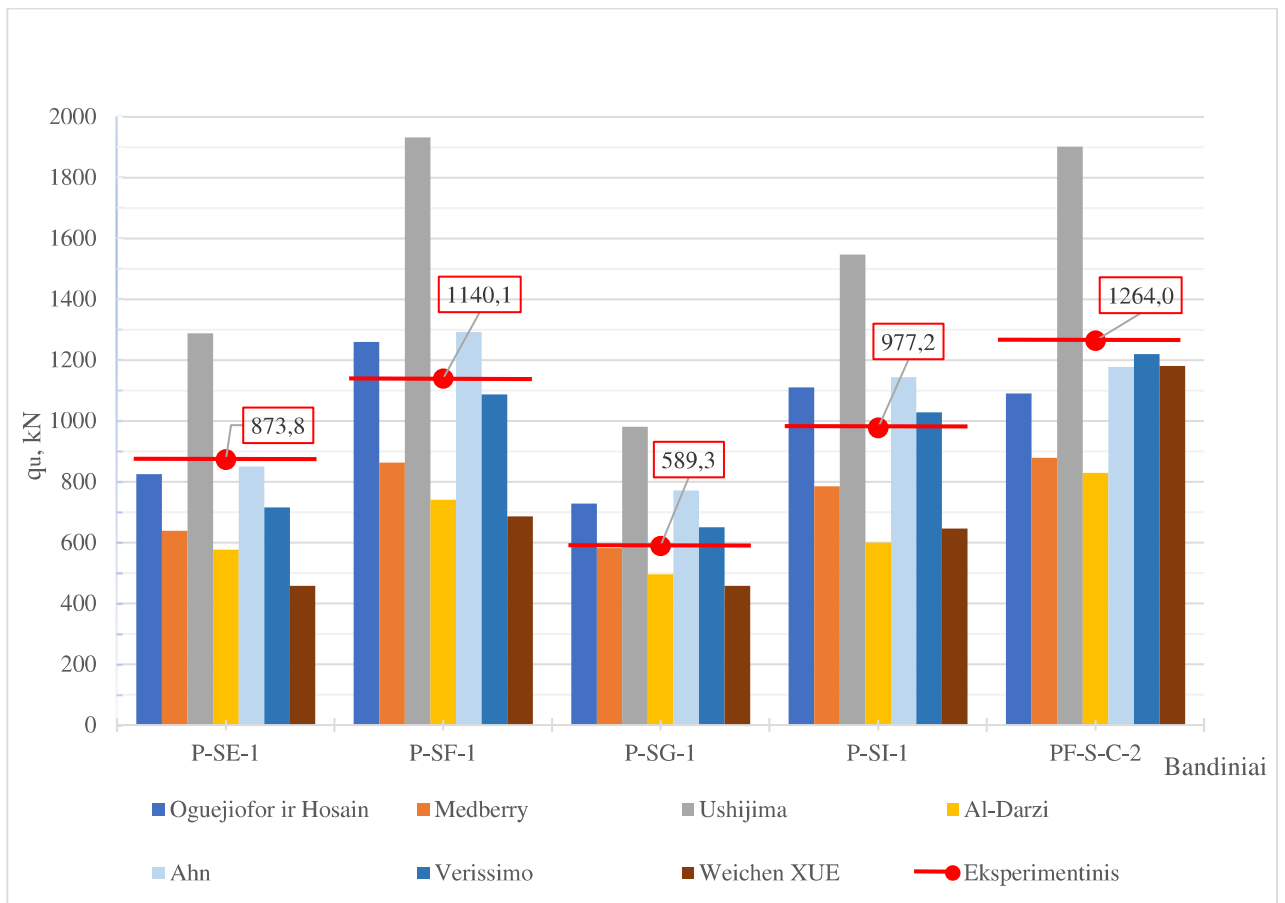
Skaičiavimo metodų patikimumas buvo nustatytas remiantis apskaičiuotu šlyties stiprio nuokrypiu nuo eksperimentiškai gauto bandinio stiprumo. Apskaičiavus skirtingų bandinių nuokrypius buvo nustatytas procentinis visų bandinių nuokrypių vidurkis ir standartinis nuokrypis (žr. 32 – 35 pav.). Tai reikšmės, pagal kurias buvo nustatomas skaičiavimo metodų patikimumas.



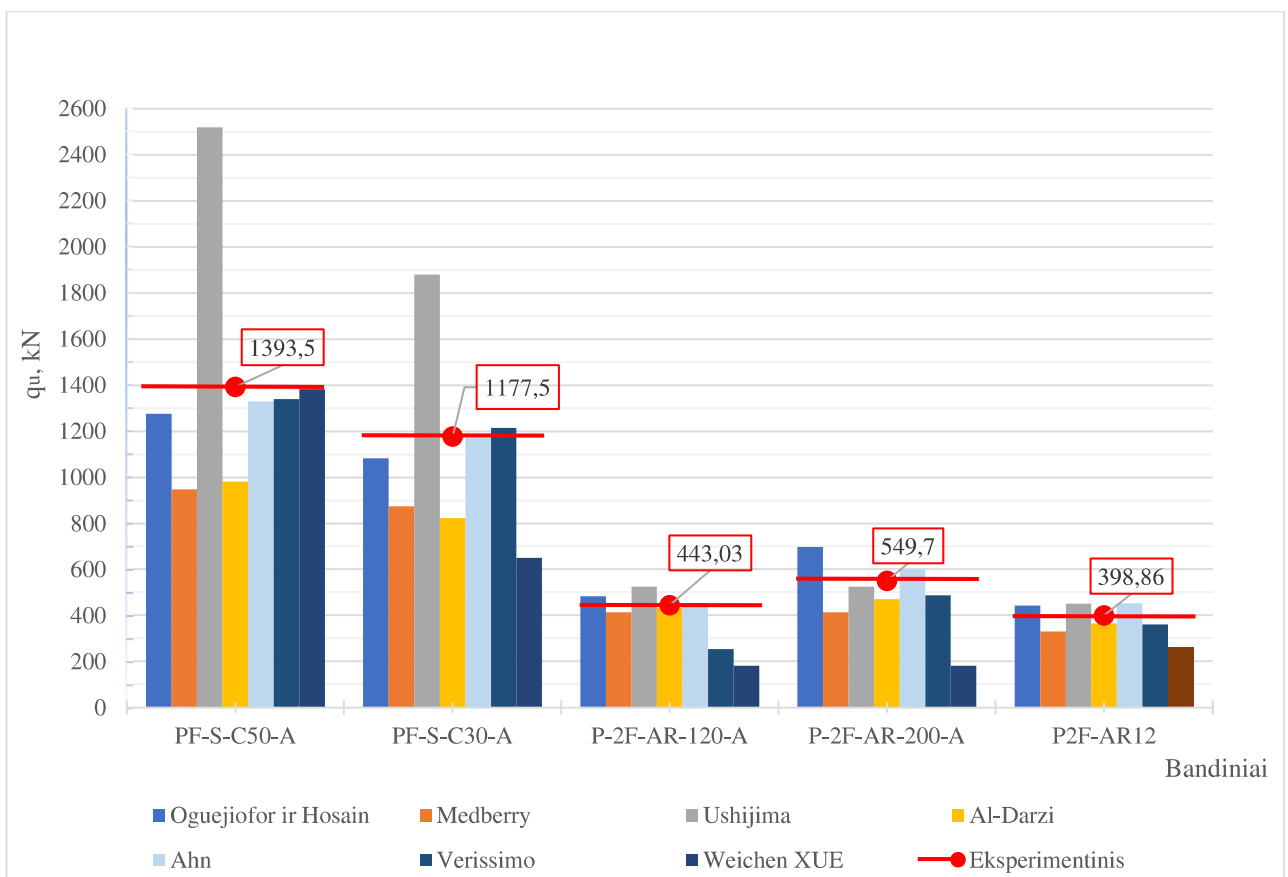
32 pav. Eksperimentinių ir teorinių skaičiavimų rezultatų palyginimas (1)



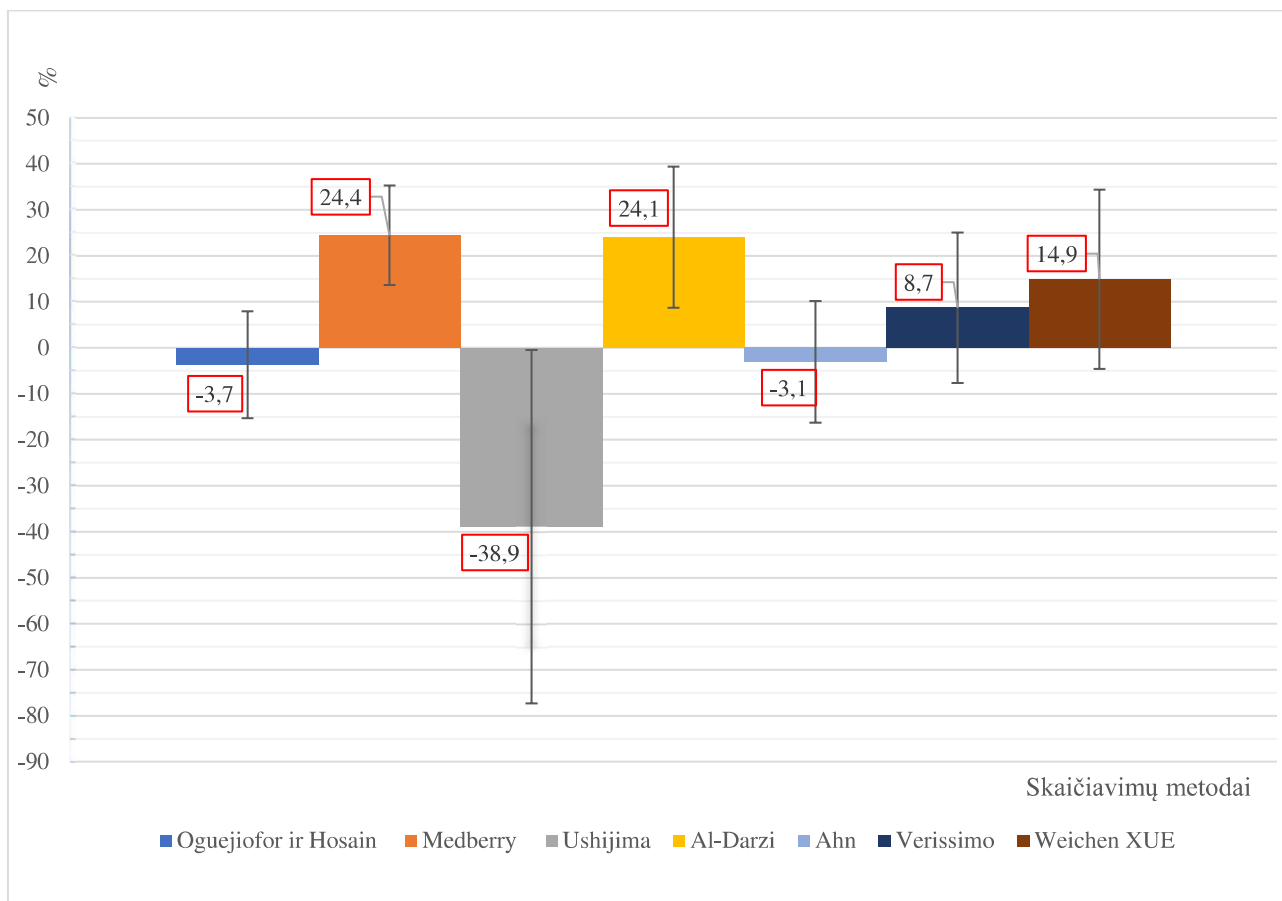
33 pav. Eksperimentinių ir teorinių skaičiavimų rezultatų palyginimas (2)



34 pav. Eksperimentinių ir teorinių skaičiavimų rezultatų palyginimas (3)



35 pav. Eksperimentinių ir teorinių skaičiavimų rezultatų palyginimas (4)



36 pav. Skaičiavimo metodų nuokrypių vidurkiai ir standartiniai nuokrypiai

8 lentelė. Skaičiavimo metodų nuokrypių vidurkių ir standartinių nuokrypių skaitinės reikšmės

Eil. Nr.	Skaičiavimo metodas	Nuokrypio vidurkis, %	Standartinis nuokrypis, %
1	Oguejiofor ir Hosain	-3,66	11,64
2	Medberry	24,45	10,82
3	Ushijima	-38,90	38,43
4	Al-Darzi	24,07	15,35
5	Ahn	-3,06	13,24
6	Verissimo	8,68	16,36
7	Weichen XUE	14,88	19,48

Analizuojant nuokrypių vidurkių ir standartinių nuokrypių diagramą (žr. 8 lent., 36 pav.), galima pastebėti, kad patys patikimiausi yra *Oguejiofor ir Hosain*, nes būtent šis metodas pateikia rezultatus, kurie yra artimiausi eksperimentinėms reikšmėms – nuokrypių vidurkis 3,66 %, o standartinis nuokrypis 11,64 %. Jei vertinti patikimumą tik pagal nuokrypio vidurkį, tai galima susidaryti klaidingą įspūdį, kad *Ahn* metodas yra patikimiausias, tačiau atkreipus dėmesį į standartinio nuokrypio vertes, galima pastebėti, kad *Ahn* metodikos rezultatai svyruoja 2 % daugiau nei *Oguejiofor ir Hosain*. Kitą vertus, *Ahn* metodas yra sąlyginai patikimas, nes kiti skaičiavimo metodai pateikia 1,5 – 2 kartus didesnę rezultatų išsibarstymą nuo vidutinės nuokrypių reikšmės. Didžiausi nuokrypiai yra apskaičiuojami *Ushijima* metodika. Šiam metodui būdingas ir didžiausias nuokrypių vidurkis ir didžiausias standartinis nuokrypis, todėl galima vertinti, kad *Ushijima* metodas yra labiausiai nepatikimas. Taip pat vertėtų atkreipti dėmesį į *Medberry* metodiką. Nors nuokrypių vidurkis ir yra sąlyginai didelis, tačiau standartinis nuokrypis yra pats mažiausias. Tai leidžia daryti

išvadą, kad metodika nėra tiksli, nes šlyties stipris yra nepakankamai įvertinamas, tačiau yra tobulintina, nes rezultatai nėra išsiskleidę ir yra artimi vidurkiui. Įvedus empirinį koeficientą, būtų galima pasiekti mažiausią nuokrypių vidurkį bei mažiausią standartinį nuokrypį.

2.9. Perforuotos lakštinės jungės stiprumo palyginimas su galvelinėmis jungėmis

Galvelinės jungės yra vienintelis šlyjamosios jungties tipas, kuris yra standartizuotas tarptautinės organizacijos ISO ir įvairiais statybos standartais ir šiai dienai alternatyvios nesudėtingai pritaikomos jungties nėra. Moksliskai tyrinėjant naujus kompozitinės jungties tipus yra prasminga juos palyginti su galvelinėmis jungėmis ir išsiaiškinti ar naujasis tipas yra konkurencingas galvelinėms jungėms. Šiame darbe, siekiant atlikti nuodugnų palyginimą, nagrinėjama koks yra galvelinių jungių šlyjamasis stipris priklausomai nuo šlyjamosios jungties parametrų.

Galvelinės jungės parametrai parinkti remiantis „LST EN ISO 13918. Suvirinimas. Smeigės ir keraminiai žiedai smeigėms privirinti lankiniu būdu“ [36] (žr. 9 lent.). Jungių skersmuo – d , parinktas: 16, 19, 22 ir 25 mm; aukštis h_{sc} – 100 mm (aukštis turėtų būti ne mažesnis kaip $3d$, jei šios sąlygos yra laikomasi, tai tikslus jungės ilgis neturi įtakos jungės stiprumui), f_u – 360 MPa. Betono stiprumo klasės parinktos tarp C30/37 ir C50/60, taip kad būtų galima nustatyti kaip betono stiprumas paveikia šlyties stiprį. Atliekant galvelinės jungės šlyties stiprio analizę, siekiant gauti skaičiavimų rezultatus, kuo artimesnius eksperimentinėms reikšmėms, kad tolimesniuose skyriuose būtų galima palyginti galvelinių jungių stiprumą su perforuotų lakštinių jungių, buvo nuspręsta laikyti, kad galvelinės jungės skaičiuotinio šlyjamojo stiprio dalinis koeficientas $\gamma_V = 1,0$ (Eurokode 4, nurodyta $\gamma_V = 1,25$).

Galvelinės jungės stiprumo skaičiavimai yra apibrėžti LST EN 1994-1-1 [4] standarte, kuriame nurodyta, kad automatu privirintos galvelinės jungės skaičiuotinė šlyjamoji galia turi būti nustatoma taip:

$$P_{Rd} = \frac{0,8 * \frac{f_u \pi d^2}{4}}{\gamma_V} = \frac{0,8 * 360 * 3,14 * \frac{22^2}{4}}{1,0} = 109,4 \text{ kN}; \quad (34)$$

arba:

$$P_{Rd} = \frac{0,29 * \alpha d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}}}{\gamma_V} = \frac{0,29 * 1,0 * 22^2 * \sqrt{32 * 38}}{1,0} = 160,25 \text{ kN}; \quad (35)$$

Parentama mažesnioji reikšmė, kai $\alpha = 1,0$, nes $h_{sc} / d = 100 / 22 > 4$

čia: P_{Rd} – skaičiuotinė šlyjamoji galia;

$f_u = 360$ MPa – nustatytasis tempiamasis ribinis jungės medžiagos stipris, bet ne didesnis kaip 500 N/mm²;

$f_{ck} = 53,6$ MPa – charakteristinis cilindrinis ne mažesnio kaip 1750 kg/m³ tankio nagrinėjamo amžiaus betono (Parinkta remiantis PL3 bandymu [33]) gniuždomasis stipris;

$d = 22$ mm – jungės skersmuo, $16 \leq d \leq 25$ mm;

$\gamma_V = 1,25$ – šlyjamosios jungties dalinis koeficientas;

$h_{sc} = 100$ mm – bendrasis vardinis jungės aukštis;

$E_{cm} = 38$ GPa – betono tamprumo modulis.

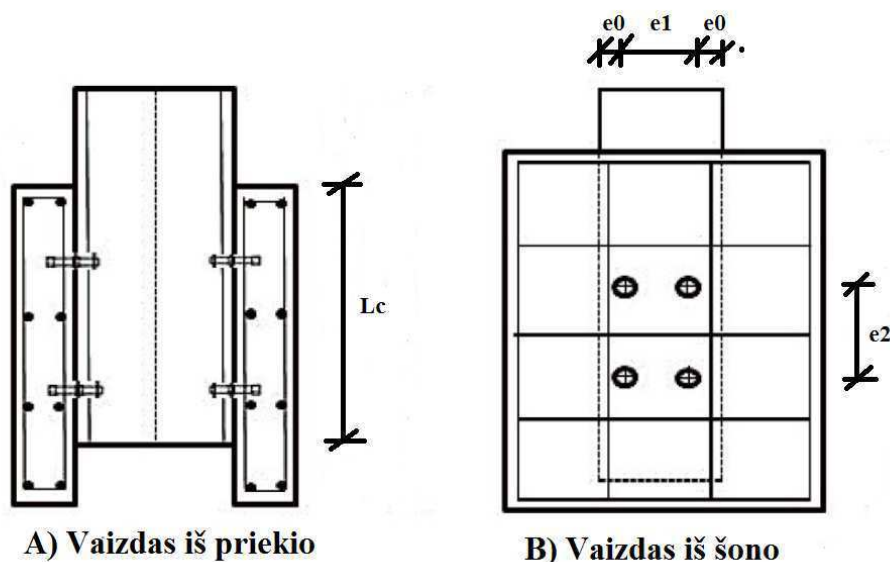
9 lentelė. Galvelinės jungės šlyties stiprio priklausomybė nuo jungės ir betono parametrų

Eil. Nr.	d, mm	f _u , MPa	γ _v	P _{Rd.plienas} , kN	P _{Rd.betonas} , kN				
					C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
1	16	360	1,0	57,9	72,7	81,0	87,8	94,5	101,0
2	19			81,6	102,6	114,2	123,9	133,2	142,4
3	22			109,4	137,5	153,1	166,1	178,6	190,9
4	25			141,3	177,6	197,7	214,5	230,7	246,5

Nagrinėjant atliktus skaičiavimus (žr. 9 lent.), pastebima, kad šlyties stipris yra nulemiamas pagal plieno stiprumo sąlyga, o betono klasės didinimas nepadidina šlyties stiprio. Galima nustatyti, kad vidutinis galvelinės jungės stipris yra 97,6 kN, o tai reiškia, kad yra reikalinga nuo 3 iki 14 vienetų galvelinių jungių, kad būtų pasiektas lygiavertis šlyties stipris perforuotoms lakštinėms jungėms, kurių analizės rezultatai pateikiami 7 lentelėje. Verta pastebėti, kad jungių kiekis negali visiškai atspindėti šlyties galios lygiavertiškumo, nes galvelinės jungės turi būti išdėstomos ant sijos, atsižvelgiant į apribojimus nurodytus Eurokode 4 [4]. Visų pirma, jungės turi būti sukonstruotos taip, kad aplink jungės pagrindą būtų galima tinkamai sutankinti betoną. Taip pat, virš jungės būtinas apsauginis sluoksnis, ne mažesnis kaip 20 mm. Atstumas e₀ – nuo jungės iki sijos krašto, turi būti ne mažesnis kaip 20 mm. Jungių žingsnis šlyties jėgos kryptimi turi būti ne mažesnis kaip 5d, o atstumas tarp jungių eilių šlyties jėgai statmena kryptimi turi būti ne mažesnis kaip 2,5d.

Išdėstymo apribojimai (žr. 37 pav.):

- e₀ ≥ 20 mm;
- e₁ = 2,5 × d = 2,5 × 22 = 55 mm;
- e₂ = 5 × d = 5 × 22 = 110 mm.



37 pav. Galvelinės jungės išdėstymo schema

2.10. Kompozitinių sijų projektavimas

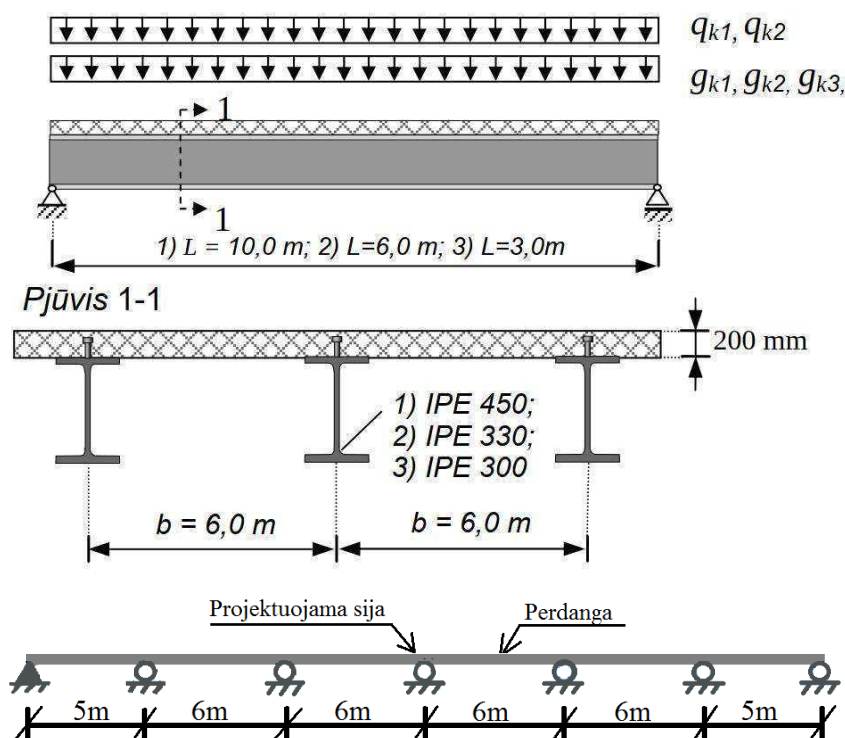
Siekiant atlikti išsamią perforuotų lakštinių jungių analizę tikslinga atlikti praktinį kompozitinių sijų projektavimo tyrimą ir įvertinti koks galvelinių ir perforuotų lakštinių jungių poreikis yra konkrečioje konstrukcijoje. Kompozitinių sijų projektavimas atliktas trimis skirtingoms sijoms, kurios skiriasi

ilgiu (10 m, 6 m, 3 m). Numatoma, kad visi parametrai – sijų žingsnis, apkrovos, įlinkių ribojimai, medžiagų savybės ir t.t., yra visoms sijoms vienodi. Sijos projektuojamos pagal LST EN 1994-1-1 [4] standarto reikalavimus ir remiantis „Composite Structures according to Eurocode 4“ [37].

Skaičiavimai atliekami pagal 10 lentelėje pateiktus duomenis ir 38 pav. pateiktas skaičiuojamąsias schemas.

10 lentelė. Skaičiavimų prielaidos

Aprašymas	Parametras
Sijų plieno klasė	S355
Betono klasė	C30/37
Sijų tarptraimis	1) 10 m 2) 6 m 3) 3 m
Nuolatinės apkrovos	Betono savasis svoris – pagal plokštę; Grindų danga – 2,5 kN/m ² ; Sijos savasis svoris – nuo 0,4 iki 0,7 kN/m;
Kintamos apkrovos	C1 – 3 kN/m ² ; pertvaros – 0,8 kN/m ²
Gelžbetoninės plokštės aukštis	200 mm
Gelžbetoninės plokštės armavimas	d16 c/c 200
Ribinis įlinkis nuo kintamų apkrovų eksploatacijos metu	L / 360
Ribinis sijos įlinkis eksploatacijos stadijoje nuo visų apkrovų	L / 250
Mínimalus savasis sijų svyravimų dažnis	4 Hz
Betono valkšnumo koeficientas	2
Daroma prielaida, kad kompozitinės sijos yra priešgaisrinamos ugniai atspariomis medžiagomis, todėl jos neprojektuojamos ugniaatsparumui	



38 pav. Sijų ir perdangos plokštės skaičiuojamoji schema ir konstrukcijų parametrai

11 lentelė. Kompozitinių sijų projektavimo rezultatų suvestinė

Sijos Nr.		1		2		3	
Šlyjamosios jungties tipas		Galvelinė jungė	Perf. lakštinė jungė	Galvelinė jungė	Perf. lakštinė jungė	Galvelinė jungė	Perf. lakštinė jungė
Sijos ilgis, m		10		6		3	
Lenkimo momentas, M_{Ed} , kNm		1147		412,8		103,2	
Skersinė jėga, V_{Ed} , kNm		458,7		275,2		137,6	
Plieninis profilis		IPE 450		IPE 330		IPE 300	
Skerspjūvio klasė		1		1		1	
Sienutės šlyties klupamoji galia		Tikrinti nereikia		Tikrinti nereikia		Tikrinti nereikia	
Šlytis, $V_{Ed} / V_{pl,Rd} < 1$		0,44		0,486		0,262	
Efektyviųjų juostų plotis, m		2,62	2,5	1,62	1,5	0,75	
Betono plokštės aukštis, mm		200		200		200	
Galvelinės jungės	Jungčių skersmuo, mm	19	-	19	-	19	-
	Jungčių ilgis, po suvirinimo, mm	100	-	100	-	100	-
Perforuotos lakštinės jungės	Lakšto aukštis, mm	-	115	-	110	-	110
	Lakšto ilgis, mm	-	300	-	245	-	100
	Lakšto storis, mm	-	15	-	10	-	10
	Skylių diametras, mm	-	40	-	35	-	30
	Skylių kiekis	-	4	-	3	-	1
	Armatūros diametras, mm	-	16	-	12	-	10
Jungės stiprumas, P_{Rd} , kN		65,33	479,12	65,33	242,36	65,33	147,4
Jungčių skaičius $L / 2$ ilgyje		50	7	20	6	12	6
Šlyjamosios jungties laikomoji galia, V_{LRd} , kN		3266	3354	1307	1454	783,9	884,4
Šlyjamosios jungties laipsnis		0,931	0,956	0,962	0,761	0,41	0,463
Minimalus jungties standumas		0,55		0,43		0,4	
Neutrali ašis, kai jungtis standi		Betone		Betone		Betone	
Lenkimo momentas, kurį atlaiko sija, kai jungtis standi, $M_{pl,Rd}$, kNm		1353	1346	630,89	625,59	525,42	
$M_{Ed} / M_{pl,Rd} < 1$		0,848	0,852	0,654	0,66	0,196	
Lenkimo momentas, kurį atlaiko sija, kai jungtis dalinio standumo, M_{Rd} , kNm		1301	1314	521,74	544,42	347,1	164,95
$M_{Ed} / M_{Rd} < 1$		0,881	0,873	0,791	0,758	0,302	0,284
$M_{pl,Rd} / M_{pl,a,Rd} < 2,5$		2,24	2,23	2,21	2,19	2,36	
Viršsijinė armatūra	Diametras, mm	16		16		16	
	Žingsnis, mm	150	200	200		200	
Sijos įlinkis nuo kintamų apkrovų, mm		7,78	7,85	1,4	1,4	0,06	
Ribinis sijos įlinkis nuo kintamų apkrovų, mm		27,8		16,7		8,3	
Sijos ilgalaikis įlinkis nuo eksploatacijos stadijos nuolatinių apkrovų, mm		19,9	20,1	3,6	3,7	0,162	
Bendras sijos įlinkis, mm		27,65	27,97	4,96	10,5	0,217	
Ribinis sijos įlinkis, mm		40		24		12	
Savųjų svyravimų dažnis, Hz		5,86	5,84	10,82	10,72	38,2	38,2

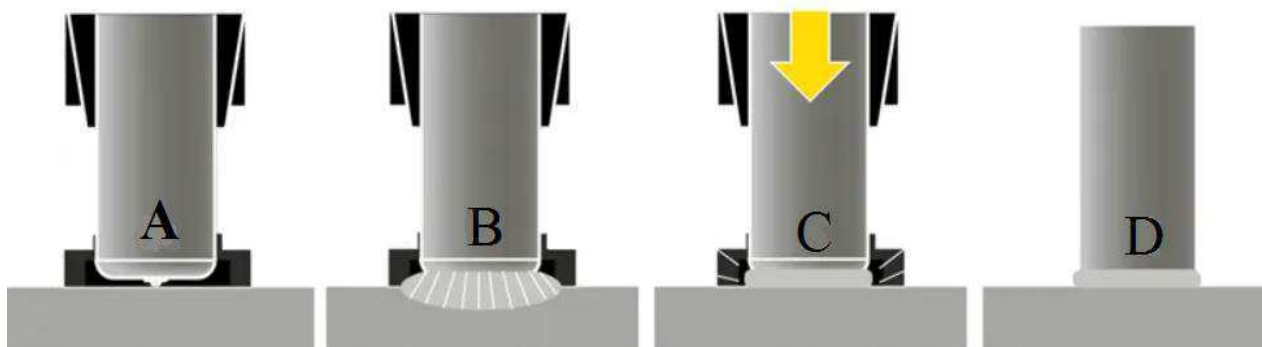
Atliekant sijų praktinių skaičiavimų analizę, sijoms buvo patikrinti stiprumo ir tinkamumo ribiniai būviai eksploatacijos stadijoje. Dėl to, remiantis Eurokodo 4 reikalavimais buvo parinktas šlyties

jungčių kiekis taip, kad būtų užtikrintas reikiamas šlyties standumas. Kompozitinių sijų skaičiavimai, 1 varianto su galvelinėmis ir perforuotomis lakštinėmis jungėmis, pateikiami prieduose (žr. 1 – 2 priedai), kitų variantų skaičiavimai atliekami tokiu pačiu algoritmu, todėl jų skaičiavimai nepateikiami. Pateikiama tik visų variantų skaičiavimo rezultatų suvestinė 11 lentelėje, kurią analizuojant, galima pastebėti, kad reikalingas galvelinių jungčių kiekis yra nuo 2 iki 7 kartų didesnis nei perforuotų lakštinių jungčių. Kita vertus, kiekis neatspindi plieno sąnaudų, nes perforuotos lakštinės jungės yra daug didesnės už galvelines junges, todėl 12 lentelėje pateikiamas plieno sąnaudų skaičiavimas. Nustatyta, kad perforuotoms lakštinėms jungėms reikia 59 – 134 % daugiau plieno.

12 lentelė. Šlyjamosios jungties plieno sąnaudos

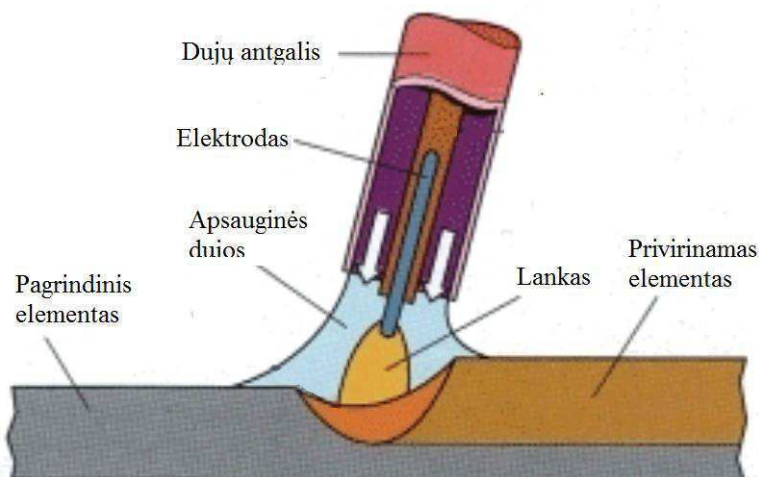
Sijos Nr.	1		2		3	
Šlyjamosios jungties tipas	Galvelinė jungė	Perf. lakštinė jungė	Galvelinė jungė	Perf. lakštinė jungė	Galvelinė jungė	Perf. lakštinė jungė
Jungčių skaičius $L/2$ ilgyje	50	7	20	6	12	6
Suminis jungčių skaičius	100	14	40	12	24	12
Vienos jungės svoris, <i>kg</i>	0,27	4,04	0,27	2,10	0,27	0,86
Suminis jungčių svoris, <i>kg</i>	27	56,5	10,8	25,2	6,48	10,3
Jungčių svorio skirtumas	+109,30%		+133,57%		+58,89%	

Gaminant kompozitines sijas ir parenkant šlyjamosios jungties tipą reikėtų atsižvelgti ir į gamybos darbo laiko sąnaudas. Abu šlyties jungčių tipai yra virinami prie laikančiosios sijos skirtingais būdais. Galvelinės jungės yra privirinamos specialiu prietaisu. 39 pav. yra pavaizduotas galvelinių jungčių suvirinimo seka: a) jungė įstatoma į prietaisą ir nukreipiama į projektinę padėtį ant sijos paviršiaus; b) suvirinimas pradedamas paleidžiant aukštą elektros srovę, jungė šiek tiek pasikelia ir susiformuoja elektros lankas c) jungė įspaudžiama į išsilydžiusi plieno baseiną, o keraminė apsauga suformuoja apsauginį sluoksnį; d) pašalinamas keraminis apsauginis sluoksnis, siūlė apžiūrima ir suvirinimas atliktas.



39 pav. Galvelinių jungčių suvirinimo eiga [38]

Tuo tarpu perforuotos lakštinės jungės yra privirinamos kampinėmis siūlėmis MIG/MAG būdu (lankinis suvirinimas inertinių / aktyvių dujų aplinkose) (žr. 40 pav.).



40 pav. Pusiau automatinis suvirinimas apsauginių dujų aplinkoje [39]

Kadangi suvirinimo būdai yra skirtingi, todėl tikslinga palyginti, kuriam šlyties jungių tipui privirinti bus sugaišta mažiau laiko. Remiantis galvelinių jungių suvirinimo aparatų gamintojo pateikiamomis charakteristikomis [40], viena galvelinė jungė, kurios skersmuo yra 19 mm, gali būti privirinama per 20 sek. Perforuotoms lakštinėms jungėms reikalingos virintinės siūlės dydžio skaičiavimas pateikiamas 13 lentelėje. Kampinės siūlės vidutinis suvirinimo greitis yra 35 cm per min. [41], tačiau tai yra tik dalis projektinės siūlės, pvz. norint pasiekti siūlę a7, reikia virinti 3 kartus.

13 lentelė. Perforuotų lakštinių jungių virintinių siūlių skaičiavimas

Sijos Nr.	1	2	3
f_u - vardinė silpnesnės iš sujungtų dalių tempiamoji stiprio riba, MPa	510	510	510
b_w – koeficientas	0,9	0,9	0,9
P_{Rd} - jungės šlyjamoji geba, kN	479,12	242,4	147,4
L - siūlės ilgis, mm	600	490	200
l_{eff} - efektyvusis siūlės ilgis, mm	586	480	186
$\tau_{l,lim}$ - ribiniai šlyjamieji įtempiai siūlės plokštumoje ir lygiagretūs su siūlės ašimi, MPa	523,5	523,5	523,5
a - siūlės storis, mm	7	5	7
τ_l - Veikiantys šlyjamieji įtempiai siūlės plokštumoje ir lygiagretūs su siūlės ašimi, MPa	467,2	403,9	452,8
Išnaudojimas, %	89,2	77,2	86,5

13 – 14 lentelėse pateikiamas suvirinimo darbų laiko sąnaudų skaičiavimai, anksčiau suprojektuotoms sijos.

14 lentelė. Galvelinių jungių suvirinimo darbų laiko sąnaudų skaičiavimas

Sijos Nr.	1	2	3
Galvelinės jungės, vnt. / min	4	4	4
Jungių skaičius sijoje	100	40	24
Sugaištas laikas, min	25	10	6

15 lentelė. Perforuotų lakštinių jungių suvirinimo darbų laiko sąnaudų skaičiavimas

Sijos Nr.	1	2	3
Perforuotų lakštinių jungių kiekis sijoje	7	6	6
Suvirinimo greitis mm/min	350	350	350
Siūlių kiekis, reikalingas projektiniam siūlės storiui pasiekti, vnt	3	1	3
Suvirinimo siūlių suminis ilgis, mm	12600	2940	3600
Sugaištas laikas, min	36	8,4	10,3

Atlikus darbo sąnaudų skaičiavimus galima daryti išvadą, kad suvirinimo greičiui daug įtakos turi perforuotų lakštinių jungių virintinės siūlės dydis. Jeigu projektinį siūlės aukštį galima pasiekti vienu degiklio pravedimu, tai perforuotos lakštinės jungės gali būti privirintos greičiau. Šiuo atveju, sijai Nr. 2 sugaištama apie 1,5 min mažiau virinant perforuotas lakštines junges, nei galvelines junges. Kitoms sijoms, kai projektinė siūlė yra a7 ir reikalingi trys pravedimai, tuomet virinimo laikas tampa trumpesnis nuo 4 iki 11 min, kai naudojamos galvelinės jungės.

Išvados

- Galvelinės jungės – tai vienintelė šlyjamoji jungtis aprašoma standarte Eurokodas 4, tačiau yra ir alternatyvių jungių:
 - perforuotos lakštinės jungės;
 - T-formos perforuotos lakštinės jungės;
 - Y-formos jungės;
 - lankstytosios perforuotos lakštinės jungės;
 - lovinio profilio jungės.
- Mokslininkai, tyrę perforuotas lakštines junges, yra pasiūlę šlyjamojo stiprio skaičiavimo metodus, kuriuose įvertinami trys kintamieji su skirtingais įtakos koeficientais:
 - betono stiprumas ties jungėmis;
 - armatūros stiprumas;
 - betono kaiščių stiprumas.
- Nustatyta jungės parametrų įtaka šlyjamajai jungėi:
 - betono stiprį padidinus per vieną klasę į aukštesnę, jungės stipris padidėja apie 5 % (25 kN);
 - jungėje išpjautų skylių skersmenį padidinus per 10 mm, šlyjamasis stipris padidėja apie 10 % (50 kN);
 - armatūros skersmenį padidinus per 4 arba 5 mm, vidutinė šlyties stiprio reikšmė padidėja apie 30 %;
 - skylių kiekį padidinus iki dviejų vienetų, šlyties stiprio vidurkis padidėjo daugiausiai – 44,5 %, o kiekviena papildoma skylė turi vis mažesnę įtaką šlyties stipriui;
 - jungės storį padidinus per 4 mm, įtaka jungės šlyties stipriui mažiausia – apie 10 % (14 kN);
- Atlikus eksperimentinių rezultatų palyginimą su teoriniais, buvo nustatyta, kad *Oguejiofor ir Hosain* pasiūlytas skaičiavimo metodas yra patikimiausias, kurio nuokrypių vidurkis yra 3,66 %, o standartinis nuokrypis 11,64 %. *Medberry* pasiūlytas metodas galėtų tapti patikimesniu, jei būtų įvestas papildomas pataisos koeficientas, kadangi standartinis nuokrypis yra pats mažiausias 10,82 %, o nuokrypių vidurkis 24,5 %.
- Atlikus praktinį siūlytą projektavimą ir praktiškai palyginus galvelinių ir perforuotų lakštinių jungių praktinį pritaikomumą, buvo nustatyta, kad reikalingas galvelinių jungių kiekis yra nuo 2 iki 7 kartų didesnis, tačiau plieno sąnaudos yra vidutiniškai 2 kartus mažesnės;
- Jeigu perforuotoms lakštinėms siūlėms reikalinga siūlė ($\leq a_5$), kuriai galima privirinti vienu degiklio pravedimu, tai tokios jungės virinimo darbų laiko sąnaudos bus ~15 % mažesnės. Galvelinių jungių privirinimas tampa ~44 % efektyvesnis, jei perforuotoms lakštinėms jungėms reikalingas daugiau nei vienas degiklio pravedimas.

Literatūros sąrašas

1. NETHERCOT, David A. *Composite construction: vadovėlis* [interaktyvus]. Spon Press 11 New Fetter Lane, London [žiūrėta 2020-03-30]. ISBN 0-203-45733-1. Prieiga per: <https://bit.ly/2JtZdV2>.
2. STEELCONSTRUCTION.INFO, *Composite construction*. SCI [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: https://www.steelconstruction.info/Composite_construction.
3. SHIM Chang-Su, *Static behaviour of large stud shear connectors*. [interaktyvus], 2004, 1853-1860, [žiūrėta 2020-11-12]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029604002500>
4. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1994-1-1]. *Eurokodas 4. Kompozitinių plieninių-betoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005.
5. JAYAS B.S., *Behaviour of headed studs in composite beams: push-out tests*. [interaktyvus] 2011, Kanada DOI:10.1139/I88-032 [žiūrėta 2020-11-12]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/237190168_Behaviour_of_headed_studs_in_composite_beams_push-out_tests
6. LESKELÄ, Matti. *Behaviour and design of steel-concrete composite structures*. Finland: M&P Paino Oy, Lahti, 2017. PG 0917.
7. STUD WELDING, *Shear connectors 19x125 mm on steel beams*. Bolte GmbH [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: <https://bit.ly/2UGoJFq>
8. LAM, Dennis. *Capacities of headed stud shear connectors in composite steel beams with precast hollowcore slabs*. [interaktyvus]. 2007, 63(9), 1160-1174 [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X06002471?via%3Dihub>
9. KIM S. and S.PARK. *Generalized formulation for shear resistance on Y-type perfobond rib shear connectors*. [interaktyvus]. 2017. 128, 245-260 [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X16302681#f0005>
10. MUHIT, Bin Imrose. *Various types of shear connectors in composite structures: vadovėlis* [interaktyvus]. Composite Structures Lab, Pietų Korėja 2015. DOI: 10.13140 [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/275340980_Various_Types_of_Shear_Connectors_in_Composite_Structures_A_Review
11. CANDIDO - MARTINS J.P.S. *Experimental evaluation of the structural response of Perfobond shear connectors*. [interaktyvus]. 2010 1976-1985 [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029610000842>
12. VIANNA J.da.C. *Structural behaviour of T-Perfobond shear connectors in composite girders: An experimental approach*. [interaktyvus]. 2008 2381-2391 [žiūrėta 2020-03-31]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029608000187>
13. VEKASCO P.C.G. da S. *Semi-rigid composite frames with perfobond and T-rib connectors Part 1: Full scale tests*. [interaktyvus] 2007, 263-279. [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X06000721#fig1>
14. CHUNG C. H., *Shear strength of T-type Perfobond rib shear connectors*. [interaktyvus] 2016, 1824-1834 [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-015-0095-8>

15. KIM S. H. *Shear resistance characteristic and ductility of Y-type perfobond rib shear connector. Steel and composite structures* [interaktyvus]. 2015, 497-517. [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: <https://doi.org/10.12989/SCS.2015.18.2.497>
16. KIM S.H. *Behaviour of composite girder with Y-type perfobond rib shear connectors* [interaktyvus]. 2014, 275-289. [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X14002545>
17. OCHIRFORJ A. *Group effect of Y-type perfobond rib shear connectors.* [interaktyvus] 2018. [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/331344986_Group_effect_of_Y-type_perfobond_rib_shear_connectors
18. KIM K.S. *Residual strength of Y-type perfobond rib shear connectors to cyclic load on highway bridge.* [interaktyvus]. 2015. [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: http://www.i-asem.org/publication_conf/ase15/2.ICSCS15/2t/T3C.08.SC165_2065F.pdf
19. CHUNG Chul Hun, *Shear strength of T-type Perfobond rib shear connectors.* [interaktyvus] 2015, KSCE Journal of Civil Engineering, 1824-1834(2016). [žiūrėta 2020-11-12]. Prieiga per: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-015-0095-8>
20. MALEKI S. *Behaviour of channel shear connectors, Part 1: Experimental study.* [interaktyvus]. 2008, 1333-1340. [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X08000163>
21. SHARIATI Mahdi, *Behaviour of channel shear connectors in normal and light weight aggregate concrete (experimental and analytical study),* [interaktyvus], 2010 Advanced Materials Research 168-170, [žiūrėta 2020-11-12]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/237062159_Behavior_of_Channel_Shear_Connectors_in_Normal_and_Light_Weight_Aggregate_Concrete_Experimental_and_Analytical_Study
22. KIM. S. *Experimental shear resistance evaluation of Y-type perfobond rib shear connector.* [interaktyvus]. 2013, 1-18. [žiūrėta 2020-05-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X12002775#f0005>
23. VIANNA J.da.C. *A parametric study of perfobond rib shear of Perfobond and T-Perfobond shear connectors' structural response.* [interaktyvus]. 2009, 408-421. [žiūrėta 2020-05-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X08000709>
24. SU Q-T. *Experimental research on bearing mechanism of perfobond rib shear connectors.* [interaktyvus]. 2013. [žiūrėta 2020-05-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X13003350>
25. HOSAIN M.U. *A parametric study of perfobond rib shear connectors.* [interaktyvus]. 1994, 614-625. [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1139/l94-063>
26. AHN J-H. *Shear resistance of the perfobond-rib shear connector depending on concrete strength and rib arrangement.* [interaktyvus] 2010, 1295-1307. [žiūrėta 2020-05-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X10001070>
27. OGUEJIOFOR E.C. Hosain M.U. *Numerical analysis of push-out specimens with perfobond rib connectors.* [interaktyvus]. 2002, 2-12. [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per:
28. YOSHITAKA U. *An experimental study on shear characteristics of perfobond strip and its rational strength equations.* [interaktyvus]. 2001, 1066-1075. [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: <https://pdfs.semanticscholar.org/7c47/a6df174c6f12c7a98f0b563a8316ce112e38.pdf>

29. MEDBERRY S.B. *Perfobond shear connector for composite construction*. [interaktyvus]. 2002, 2-12. [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: <https://www.aisc.org/Perfobond-Shear-Connector-for-Composite-Construction>
30. VERISSIMO G.S. *Design and experimental analysis of a new shear connector for steel and concrete composite structures*. 3rd International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management.[interaktyvus] 2006. 1313-1322. [žiūrėta 2020-05-25]. Prieiga per: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/6895/1/PC%2017-Design%20and%20experimental%20analysis%20of%20a%20new%20shear%20connector.pdf>
31. AL-DARZI, Suhaib. *Finite element simulation and parametric studies of perfobond rib connector*. [interaktyvus]. 2007, 122-127. [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/276949356_Finite_Element_Simulation_and_Parametric_Studies_of_Perfobond_Rib_Connector
32. XUE W. *Experimental studies on shear behaviour of perfobond connectors*, [interaktyvus]. 2009, 103-111. [žiūrėta 2020-09-29]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/279711827_Experimental_studies_on_shear_behavior_of_perfobond_connectors
33. ZHANG J. *Experimental study of short-term and long-term behavior of perfobond connectors*. [interaktyvus]. 2018, 462-474. [žiūrėta 2020-03-30]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X18306151>
34. VIANNA J. da. C. *Experimental study of Perfobond shear connectors in composite construction*, [interaktyvus], 2013, 62-75. [žiūrėta 2020-09-29]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143974X12002428>
35. COSTA-NEVES L.F. *Perforated shear connectors on composite girders under monotonic loading: An experimental approach*, [interaktyvus], 2013, 721-737. [žiūrėta 2020-09-29]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029613002861>
36. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN ISO 13918]. *Suvirinimas. Smeigės ir keraminiai žiedai smeigėms privirinti lankiniu būdu*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, [interaktyvus], 2018. [žiūrėta 2020-10-29]. Prieiga per: https://view.elaba.lt/standartai/view?search_from=aleph&id=1261518 \
37. DARKO DUJMOVIČ, BORIS ANDROIČ. *Composite Structures according to Eurocode 4. Worked examples: vadovėlis* [interaktyvus]. Ernst and Sohn, Kroatija, 2015 [žiūrėta 2020-11-11]. ISBN 978-3-433-03107-0. Prieiga per: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783433604908>
38. STUDENT LESSON. *What is arc stud welding and its techniques*. [interaktyvus], 2020. [žiūrėta 2020-11-11]. Prieiga per: <https://studentlesson.com/what-is-arc-stud-welding/>
39. STEELCONSTRUCTION.INFO, *Welding* [žiūrėta 2020-11-12]. Prieiga per: <https://www.steelconstruction.info/Welding>
40. A NELSON FASTENER SYSTEMS COMPANY. *Stud Welding Equipment*, [interaktyvus], 2016. [žiūrėta 2020-11-11]. Prieiga per: <https://www.stanleyengineeredfastening.com/-/media/web/sef/resources/docs/nelson/equipment-catalog.ashx?la=en&hash=7FB209DEBB373794C5887A9D9753B80FE19C96B0>
41. UAB „Vingis“, *MIG/MAG suvirinimo parametrai*, [interaktyvus], 2019. [žiūrėta 2020-11-12]. Prieiga per: <https://www.suvirinimas.lt/lt/blog/migmag-suvirinimo->

[parametrai?fbclid=IwAR1qvkliZW3Sf8c4gsaG-polRCsmTdPV8L-EukykZfaqgIXaCFtGfcMhXvg](#)

Priedai

1 priedas. Kompozitinės sijos su galvelinėmis jungėmis projektavimas, atvejis nr. 1

1. Pradiniai duomenys

Sijos tarptraimis: $L := 10 \text{ m}$

Sijų žingsnis: $b := 6 \text{ m}$

Plokštės storis: $h_p := 200 \text{ mm}$

2. Daliniai koeficientai

Apkrovų patikimumo koeficientai:

$$\gamma_G := 1.35 \quad \gamma_Q := 1.30$$

Plieno daliniai patikimumo koeficientai:

$$\gamma_{M0} := 1.00 \quad \gamma_{M1} := 1.00 \quad \gamma_{M2} := 1.25$$

Šlyjamosios jungties daliniai patikimumo koeficientai:

$$\gamma_V := 1.25$$

Betono dalinis patikimumo koeficientas:

$$\gamma_c := 1.5$$

Armatūros dalinis patikimumo koeficientas:

$$\gamma_s := 1.15$$

3. Apkrovos

Kintamos apkrovos kategorija - C: $q_{k.1} := 3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ $q_{d.1} := q_{k.1} \cdot \gamma_Q = 3.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Pertvaros: $q_{k.2} := 0.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ $q_{d.2} := q_{k.2} \cdot \gamma_Q = 1.04 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Betono savasis svoris: $g_{k.1} := 5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ $g_{d.1} := g_{k.1} \cdot \gamma_G = 6.75 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Grindų danga: $g_{k.2} := 2.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ $g_{d.2} := g_{k.2} \cdot \gamma_G = 3.375 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$

Sijos savasis svoris

$$g_{k.3} := 0.7 \frac{kN}{m}$$

$$g_{d.3} := g_{k.3} \cdot \gamma_G = 0.95 \frac{kN}{m}$$

Sijoje veikiančios įrašos:

$$M_{Ed} := 1147 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{Ed} := 458.7 \text{ kN}$$

4. Betono savybės

Betono klasė: C30/37

Charakteristinis betono stipris:

$$f_{ck} := 30 \text{ MPa}$$

Skaičiuotinis betono stipris:

$$f_{cd} := \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 20 \text{ MPa}$$

Kirstinis betono tamprumo modulis:

$$E_{cm} := 32 \text{ GPa}$$

5. Plieno savybės

Charakteristinis plieno stipris:

$$f_{yk} := 355 \text{ MPa}$$

Skaičiuotinis plieno stipris:

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_{M1}} = 355 \text{ MPa}$$

$$E_s := 210 \text{ GPa}$$

6. Galvelinių jungių parinkimas

Jungių skersmuo:

$$d_w := 19 \text{ mm}$$

Nominalus jungių ilgis po suvirinimo (ISO 13918:2008):

$$h_{sc} := 100 \text{ mm}$$

Tempiamasis stipris:

$$f_u := 360 \text{ MPa}$$

Jungių konstravimo sąlygų patikrinimas:

```
p6.6.1.2.1 := || if  $h_{sc} \geq 4 \cdot d_w$  ||  
|| "Sąlyga tenkinama" ||  
|| else ||  
|| "Sąlyga netenkinama, reikia padidinti jungių aukštį" ||
```

p6.6.1.2.1 = "Sąlyga tenkinama"

```
p6.6.5.2.1 := || if  $h_{sc} \leq h_p - 20 \text{ mm}$  ||  
|| "Sąlyga tenkinama" ||  
|| else ||  
|| "Sąlyga netenkinama, reikia sumažinti jungių aukštį" ||
```

p6.6.5.2.1 = "Sąlyga tenkinama"

7. Stiprumo ribinis būvis

7.1. Plieninio profilio parinkimas

Profilio parinkimas:

IPE 450

$$h_{beam} := 450 \text{ mm} \quad b_{beam} := 190 \text{ mm} \quad t_w := 9.4 \text{ mm} \quad t_f := 14.6 \text{ mm} \quad r := 21 \text{ mm}$$

$$c := h_{beam} - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r = 378.8 \text{ mm} \quad I_y := 33740 \text{ cm}^4 \quad W_{el.y} := 1500 \text{ cm}^3$$

$$W_{pl.y} := 1702 \text{ cm}^3 \quad A := 98.82 \text{ cm}^2 \quad c_1 := \frac{(b_{beam} - t_w - 2 \cdot r)}{2} = 69.3 \text{ mm}$$

7.2. Skerspjūvio klasifikacija

$$\varepsilon := \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_{yd}}} = 0.814$$

Lenkimo veikiamo sienutė:

$$\text{Sienutės.klasė} := \begin{cases} \text{if } \frac{c}{t_w} \leq 72 \cdot \varepsilon & = \text{“1 klasė”} \\ \text{“1 klasė”} \\ \text{else if } 72 \cdot \varepsilon < \frac{c}{t_w} \leq 83 \cdot \varepsilon & \\ \text{“2 klasė”} \\ \text{else if } 83 \cdot \varepsilon < \frac{c}{t_w} \leq 124 \cdot \varepsilon & \\ \text{“3 klasė”} \\ \text{else} & \\ \text{“4 klasė”} \end{cases}$$

Gniuždymo veikiamo lentyna:

$$\text{Lentynos.klasė} := \left\{ \begin{array}{l} \text{if } \frac{c_1}{t_f} \leq 9 \cdot \varepsilon \\ \quad \parallel \text{ "1 klasė"} \\ \text{else if } 9 \cdot \varepsilon < \frac{c_1}{t_f} \leq 10 \cdot \varepsilon \\ \quad \parallel \text{ "2 klasė"} \\ \text{else if } 10 \cdot \varepsilon < \frac{c_1}{t_f} \leq 14 \cdot \varepsilon \\ \quad \parallel \text{ "3 klasė"} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{ "4 klasė"} \end{array} \right. = \text{"1 klasė"}$$

Skerspjūvis yra 1-os klasės

7.3. Efektyviųjų juostų pločio nustatymas

Jungių skaičius skerspjūvyje:

$$n_w := 2$$

Atstumas tarp jungių:

$$b_0 := 120 \text{ mm}$$

$$e_0 := \frac{(b_{beam} - b_0 - d_w)}{2} = 25.5 \text{ mm}$$

$$p6.6.5.6.2 := \left\{ \begin{array}{l} \text{if } e_0 > 20 \text{ mm} \\ \quad \parallel \text{ "Atstumas iki krašto tinkamas"} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{ "Atstumas iki krašto per mažas"} \end{array} \right. = \text{"Atstumas iki krašto tinkamas"}$$

$$p6.6.5.7.4 := \left\{ \begin{array}{l} \text{if } b_0 > 4 \cdot d_w \\ \quad \parallel \text{ "Atstumas tarp jungių tinkamas"} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{ "Atstumas tarp jungių per mažas"} \end{array} \right.$$

$$p6.6.5.7.4 = \text{"Atstumas tarp jungių tinkamas"}$$

$$b_{e1} := \frac{L}{8} = 1.25 \text{ m} \quad b_{e2} := \frac{L}{8} = 1.25 \text{ m}$$

$$b_{eff} := b_{e1} + b_{e2} + b_0 = 2.62 \text{ m}$$

$$Patikra := \begin{cases} \text{if } b_{eff} < b \\ \quad \text{“efektyvusis juostų plotis teisingas”} \\ \text{else} \\ \quad \text{“efektyvusis juostų plotis neteisingas”} \end{cases}$$

$$Patikra = \text{“efektyvusis juostų plotis teisingas”}$$

7.4. Jungių laikomosios galios skaičiavimas

Laikomoji galia vientisoje plokštėje:

$$\alpha := \begin{cases} \text{if } 4 > \frac{h_{sc}}{d_w} > 3 \\ \quad 0.2 \cdot \left(\frac{h_{sc}}{d_w} + 1 \right) \\ \text{else} \\ \quad \text{if } \frac{h_{sc}}{d_w} > 4 \\ \quad \quad 1 \end{cases} = 1$$

Jungės stiprumas:

$$P_{Rdsolid1} := \frac{\left(0.8 \cdot f_u \cdot \pi \cdot \frac{d_w^2}{4} \right)}{\gamma_V} = 65.325 \text{ kN}$$

Betono stiprumas:

$$P_{Rdsolid2} := \frac{\left(0.29 \cdot \alpha \cdot d_w^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}} \right)}{\gamma_V} = 82.06 \text{ kN}$$

Jungės laikomosios galios parinkimas:

$$P_{Rdsolid} := \min(P_{Rdsolid1}, P_{Rdsolid2}) = 65.325 \text{ kN}$$

$$P_{Rd} := P_{Rdsolid} = 65.325 \text{ kN}$$

7.5. Šlyjamosios jungties standumo laipsnio skaičiavimas

Jungių žingsnis: $s_{beam} := 150 \text{ mm}$

p6.6.5.5.3 := $\left\{ \begin{array}{l} \text{if } s_{beam} > 6 \cdot h_p \\ \quad \text{“Atstumas tarp jungių centrų per didelis”} \\ \text{else if } s_{beam} > 800 \text{ mm} \\ \quad \text{“Atstumas tarp jungių centrų per didelis”} \\ \text{else} \\ \quad \text{“Atstumas tarp jungių centrų tinkamas”} \end{array} \right.$

p6.6.5.5.3 = “Atstumas tarp jungių centrų tinkamas”

p6.6.5.7.3 := $\left\{ \begin{array}{l} \text{if } s_{beam} > 5 \cdot d_w \\ \quad \text{“Atstumas tarp jungių centrų tinkamas”} \\ \text{else} \\ \quad \text{“Atstumas tarp jungių centrų per mažas”} \end{array} \right.$

p6.6.5.7.3 = “Atstumas tarp jungių centrų tinkamas”

Jungių skaičius L/2 ilgyje:

$$n := n_w \cdot \frac{\left(\frac{L}{2} - \frac{h_{beam}}{2} \right)}{s_{beam}} = 63.667$$

Priimu:

$$n := 50$$

Šlyjamosios jungties laikomoji galia:

$$V_{LRd} := n \cdot P_{Rd} = (3.266 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

Maksimali gniuždymo jėga, kurią atlaiko betonas:

$$N_{cRd} := 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b_{eff} \cdot h_p = (8.908 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

Maksimali tempimo jėga, kurią atlaiko plieninė sija:

$$N_{pLRd} := A \cdot f_{yd} = (3.508 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

$$N_{cf} := \min(N_{cRd}, N_{pLRd}) = (3.508 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

$$\eta_1 := \frac{V_{LRd}}{N_{cf}} = 0.931$$

$$\eta_{min1} := 0.4 \quad \eta_{min2} := 1 - \left(\frac{(355 \text{ MPa})}{f_{yk}} \right) \cdot \left(0.75 - 0.03 \cdot L \cdot \frac{1}{m} \right) = 0.55$$

$$\eta_{min} := \max(\eta_{min1}, \eta_{min2}) = 0.55$$

$$\eta_{sc} := \begin{cases} \text{if } \eta_1 < 1 \\ \quad \eta_1 \\ \text{else} \\ \quad 1 \end{cases} \quad \eta_{sc} = 0.931$$

7.6. Sienutės šlyties klupamoji galia

$$\eta := 1.20$$

$$h_w := h_{beam} - 2 \cdot t_f = 420.8 \text{ mm}$$

$$p5.1.2 := \begin{cases} \text{if } \frac{h_w}{t_w} > 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta} \\ \quad \text{“Reikia tikrinti šlyties klupamąją galią ir įrengti sąstandas”} \\ \text{else} \\ \quad \text{“Šlyties klupamosios galios tikrinti nereikia”} \end{cases}$$

$$p5.1.2 = \text{“Šlyties klupamosios galios tikrinti nereikia”}$$

7.7. Šlytis

$$A_{V1} := A - 2 b_{beam} \cdot t_f + (t_w + 2 r) t_f = (5.084 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

$$A_{V2} := \eta \cdot h_w \cdot t_w = 0.005 \text{ m}^2$$

$$A_V := \max(A_{V1}, A_{V2}) = 0.005 \text{ m}^2$$

$$V_{pl.Rd} := \frac{A_V \cdot \left(\frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} = (1.042 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} = 0.44$$

$$\check{\text{Slytis}} := \begin{cases} \text{if } \frac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} \\ \quad \text{“Laikomoji galia tenkinama”} \\ \text{else} \\ \quad \text{“Laikomoji galia netenkinama”} \end{cases} = \text{“Laikomoji galia tenkinama”}$$

Skersinės jėgos įtaka lenkiamajai galiai:

$$\rho := \begin{cases} \text{if } \frac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} < 0.5 \\ \quad 0 \\ \text{else} \\ \quad \left(2 \cdot \frac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} - 1 \right)^2 \end{cases} = 0$$

7.8. Lenkiamoji galia (kai $\eta_{sc}=1$)

$$A_w := h_w \cdot t_w = (3.956 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

$$A_{red} := A - A_w \cdot \rho = (9.882 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

Nustatome neutralios ašies vietą:

$$N_{plRd} := A_{red} \cdot f_{yd} = (3.508 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

$$N_{cRd} = (8.908 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

$n.a :=$ if $N_{cRd} < N_{plRd}$ | = "neutrali ašis yra betone"
|| "neutrali ašis yra plieniniame profilyje"
else
|| "neutrali ašis yra betone"

Randame x:

$$x_{pl} := \frac{N_{plRd}}{b_{eff} \cdot 0.85 \cdot f_{cd}} = 78.763 \text{ mm}$$

Apskaičiuojame jėgos petį:

$$z_1 := \frac{h_{beam}}{2} + h_p - \frac{x_{pl}}{2} = 385.618 \text{ mm}$$

Nustatome, kokį lenkiamąjį momentą atlaiko sija, esant visiškai standžiai šlyjamajai jungčiai:

$$M_{plRd} := z_1 \cdot N_{plRd} = (1.353 \cdot 10^3) \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{plRd}} = 0.848 \quad \square < 1$$

Plieninio elemento lenkiamoji geba:

$$M_{pl.a.Rd} := W_{pl.y} \cdot f_{yd} = 604.21 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Nustatome, kokį lenkiamąjį momentą atlaiko sija, esant dalinei šlyjamajai jungčiai:

$$M_{Rd} := M_{pl.a.Rd} + (M_{plRd} - M_{pl.a.Rd}) \cdot \eta_{sc} = (1.301 \cdot 10^3) \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$UC_{fin.M} := \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = 0.882 \quad \blacksquare < 1$$

$$\frac{M_{plRd}}{M_{pl.a.Rd}} = 2.239 \quad \blacksquare < 2.5$$

7.9. Išilginė betoninių plokščių šlytis

Viršsijinės armatūros patikrinimas:

$$h_f := h_p = 200 \text{ mm}$$

Apskaičiuojami šlyties įtempiai:

$$\nu_{Ed} := \frac{\frac{N_{cRd}}{2}}{\left(h_f \cdot \frac{L}{2}\right)} = 4.454 \text{ MPa}$$

Viršsijinės skersinės armatūros reikiamas plotas, kai kampas θ parenkamas tarp 26° ir 45° :

$$\theta := 29 \text{ deg}$$

$$f_{sk} := 500 \text{ MPa}$$

$$A_t := \nu_{Ed} \cdot \frac{h_f}{\left(\cot(\theta) \cdot \frac{f_{sk}}{\gamma_s}\right)} = (1.136 \cdot 10^3) \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{mm}^2$$

Esamas armatūros kiekis:

$$d_t := 16 \text{ mm} \quad s_t := 150 \text{ mm}$$

$$A_{t.real} := \pi \cdot \frac{d_t^2}{s_t \cdot 4} = (1.34 \cdot 10^3) \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Betono juostos laikomosios galios spyrių sutrupinimui patikrinimas:

$$\nu := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}}\right) = 0.528$$

$$\nu_{Rd} := \nu \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) = 4.478 \text{ MPa}$$

$$\nu_{Rd.patikra} := \begin{cases} \text{if } \frac{\nu_{Ed}}{\nu_{Rd}} < 1 \\ \quad \text{“betono juostos laikomoji galia pakankama”} \\ \text{else} \\ \quad \text{“betono juostos laikomoji galia nepakankama”} \end{cases}$$

$$\nu_{Rd.patikra} = \text{“betono juostos laikomoji galia pakankama”}$$

8. Tinkamumo ribinio būvio patikra eksploatacijos stadijoje

Kompozitinės sijos standumo nustatymas:

$$A_c := b_{eff} \cdot h_p = 0.524 \text{ m}^2$$

$$EA_c := E_{cm} \cdot A_c = (1.677 \cdot 10^{10}) \text{ N}$$

$$I_c := b_{eff} \cdot \frac{h_p^3}{12} = 0.002 \text{ m}^4$$

$$EI_c := E_{cm} \cdot I_c = (5.589 \cdot 10^7) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

$$A_a := A = 0.01 \text{ m}^2$$

$$EA_a := E_s \cdot A_a = (2.075 \cdot 10^9) \text{ N}$$

$$I_a := I_y = (3.374 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^4$$

$$EI_a := E_s \cdot I_a = (7.085 \cdot 10^7) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

$$EA_{ac} := EA_a + EA_c = (1.884 \cdot 10^{10}) \text{ N}$$

$$EI_{ac} := EI_a + EI_c = (1.267 \cdot 10^8) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

$$e_i := h_p + \frac{h_{beam}}{2} + \frac{h_p}{2} = 0.525 \text{ m}$$

Kompozitinės sijos standumo rodiklis:

$$\alpha_i := \frac{e_i^2}{EI_{ac}} \cdot \frac{EA_a \cdot EA_c}{EA_{ac}} = 4.016$$

Kompozitinės sijos standumas lygus:

$$EI_{com} := (1 + \alpha_i) \cdot EI_{ac} = (6.357 \cdot 10^8) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

Charakteristinė kintama apkrova eksploatacijos stadijoje:

$$q_k := (q_{k.1} \cdot L + q_{k.2} \cdot L) = 38 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN}$$

Sijos įlinkis nuo kintamų apkrovų:

$$\delta_q := 5 \cdot q_k \cdot \frac{L^4}{384 \cdot EI_{com}} = 7.783 \text{ mm}$$

Ribinis sijos įlinkis nuo kintamų apkrovų:

$$\delta_{rib.q} := \frac{L}{360} = 27.778 \text{ mm}$$

$$\frac{\delta_q}{\delta_{rib.q}} = 0.28$$

Kompozitinės sijos ilgalaikio standumo nustatymas:

$$\psi_L := 1.1 \quad \varphi_t := 2.0$$

$$E_{cc} := \frac{E_{cm}}{1 + \psi_L \cdot \varphi_t} = (1 \cdot 10^4) \text{ MPa}$$

$$A_c = 0.524 \text{ m}^2$$

$$EA_{cLT} := E_{cc} \cdot A_c = (5.24 \cdot 10^9) \text{ N}$$

$$I_c := b_{eff} \cdot \frac{h_p^3}{12} = 0.002 \text{ m}^4$$

$$EI_{cLT} := E_{cc} \cdot I_c = (1.747 \cdot 10^7) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

$$A_a := A = 0.01 \text{ m}^2$$

$$EA_a := E_s \cdot A_a = (2.075 \cdot 10^9) \text{ N}$$

$$I_a := I_y = (3.374 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^4$$

$$EI_a := E_s \cdot I_a = (7.085 \cdot 10^7) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

$$EA_{acLT} := EA_a + EA_{cLT} = (7.315 \cdot 10^9) \text{ N}$$

$$EI_{acLT} := EI_a + EI_{cLT} = (8.832 \cdot 10^7) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

$$e_i := h_p + \frac{h_{beam}}{2} + \frac{h_p}{2} = 0.525 \text{ m}$$

Kompozitinės sijos standumo rodiklis:

$$\alpha_{iLT} := \frac{e_i^2}{EI_{acLT}} \cdot EA_a \cdot \frac{EA_{cLT}}{EA_{acLT}} = 4.639$$

Kompozitinės sijos ilgalaikis standumas lygus:

$$EI_{comLT} := (1 + \alpha_{iLT}) \cdot EI_{acLT} = (4.98 \cdot 10^8) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

Charakterinė nuolatinė eksploatacijos apkrova veikianti siją:

$$g_k := g_{k.1} \cdot L + g_{k.2} \cdot L + g_{k.3} = 76 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN}$$

Sijos ilgalaikis įlinkis nuo eksploatacijos stadijos nuolatinių apkrovų:

$$\delta_{gLT} := 5 \cdot g_k \cdot \frac{L^4}{384 \cdot EI_{comLT}} = 19.87 \text{ mm}$$

Bendras sijos įlinkis eksploatacijos stadijoje:

$$\delta_{tot.} := \delta_q + \delta_{gLT} = 27.653 \text{ mm}$$

Ribinis sijos įlinkis eksploatacijos stadijoje:

$$\delta_{lim} := \frac{L}{250} = 40 \text{ mm}$$

$$\delta_{tot.patikra} := \text{if } \frac{\delta_{tot.}}{\delta_{lim}} < 1 \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} = \text{“įlinkis leistinas”}$$

|| “įlinkis leistinas”

else

|| “įlinkis neleistinas”

9. Sijos vibracijų patikrinimas

$$e_d := b \cdot (g_{k.1} + g_{k.2}) + g_{k.3} = 46 \frac{kN}{m}$$

Įlinkis nuo nuolatinių apkrovų:

$$\delta := \frac{5}{384} e_d \cdot \frac{L^4}{EI_{com}} = 9.421 \text{ mm}$$

Naturalus svyravimų dažnis:

$$f := \frac{18}{\sqrt{9.421}} = 5.864 \text{ Hz}$$

$$f_{patikra} := \begin{cases} \text{if } f > 4 \\ \quad \text{“Svyravimų dažnis tinkamas”} \\ \text{else} \\ \quad \text{“Svyravimų dažnis netinkamas”} \end{cases} = \text{“Svyravimų dažnis tinkamas”}$$

2. Kompozitinės sijos su perforuotomis lakštinėmis jungėmis projektavimas, atvejis nr. 2

1. Pradiniai duomenys

Sijos tarpatramis: $L := 10 \text{ m}$

Sijų žingsnis: $b := 6 \text{ m}$

Plokštės storis: $h_p := 200 \text{ mm}$

2. Daliniai koeficientai

Apkrovų patikimumo koeficientai:

$$\gamma_G := 1.35 \quad \gamma_Q := 1.30$$

Plieno daliniai patikimumo koeficientai:

$$\gamma_{M0} := 1.00 \quad \gamma_{M1} := 1.00 \quad \gamma_{M2} := 1.25$$

Šlyjamosios jungties daliniai patikimumo koeficientai:

$$\gamma_V := 1.25$$

Betono dalinis patikimumo koeficientas:

$$\gamma_c := 1.5$$

Armatūros dalinis patikimumo koeficientas:

$$\gamma_s := 1.15$$

3. Apkrovos

Kintamos apkrovos kategorija - C	$q_{k.1} := 3.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	$q_{d.1} := q_{k.1} \cdot \gamma_Q = 3.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
----------------------------------	---	--

Pertvaros	$q_{k.2} := 0.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	$q_{d.2} := q_{k.2} \cdot \gamma_Q = 1.04 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
-----------	---	---

Betono savasis svoris	$g_{k.1} := 5.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	$g_{d.1} := g_{k.1} \cdot \gamma_G = 6.75 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
-----------------------	---	---

Grindų danga	$g_{k.2} := 2.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$	$g_{d.2} := g_{k.2} \cdot \gamma_G = 3.375 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
--------------	---	--

Sijos savasis svoris $g_{k.3} := 0.7 \frac{kN}{m}$ $g_{d.3} := g_{k.3} \cdot \gamma_G = 0.95 \frac{kN}{m}$

Sijoje veikiančios įrašos:

$$M_{Ed} := 1147 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$V_{Ed} := 458.7 \text{ kN}$$

4. Betono savybės

Betono klasė: C30/37

Charakteristinis betono stipris:

$$f_{ck} := 30 \text{ MPa}$$

Skaičiuotinis betono stipris:

$$f_{cd} := \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 20 \text{ MPa}$$

Kirstinis betono tamprumo modulis:

$$E_{cm} := 32 \text{ GPa}$$

5. Plieno savybės

Charakteristinis plieno stipris:

$$f_{yk} := 355 \text{ MPa}$$

Skaičiuotinis plieno stipris:

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_{M1}} = 355 \text{ MPa} \quad E_s := 210 \text{ GPa}$$

6. Jungių parinkimas

Lakšto aukštis:

$$h_{sc} := 115 \text{ mm}$$

Lakšto ilgis:

$$l_{sc} := 300 \text{ mm}$$

Lakšto storis:

$$t_{sc} := 15 \text{ mm}$$

Skylių diametras:

$$D := 40 \text{ mm}$$

Skylių kiekis:

$$n := 4$$

Armatūros suminis skerspjūvio plotas:

$$d_{st} := 16 \text{ mm}$$

$$A_{tr} := n \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{st}}{2} \right)^2 = 804.248 \text{ mm}^2$$

Armatūros tempiamasis stipris:

$$f_y := 500 \text{ MPa}$$

Jungių konstravimo sąlygų patikrinimas:

$$p6.6.5.2.1 := \begin{cases} \text{if } h_{sc} \leq h_p - 20 \text{ mm} \\ \quad \parallel \text{ "Sąlyga tenkinama"} \\ \quad \text{else} \\ \quad \parallel \text{ "Sąlyga netenkinama, reikia sumažinti jungių aukštį"} \end{cases}$$

$$p6.6.5.2.1 = \text{"Sąlyga tenkinama"}$$

7. Stiprumo ribinis būvis

7.1. Plieninio profilio parinkimas

Profilio parinkimas:

IPE 450

$$h_{beam} := 450 \text{ mm} \quad b_{beam} := 190 \text{ mm} \quad t_w := 9.4 \text{ mm} \quad t_f := 14.6 \text{ mm} \quad r := 21 \text{ mm}$$

$$c := h_{beam} - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r = 378.8 \text{ mm} \quad I_y := 33740 \text{ cm}^4 \quad W_{el.y} := 1500 \text{ cm}^3$$

$$W_{pl.y} := 1702 \text{ cm}^3 \quad A := 98.82 \text{ cm}^2 \quad c_1 := \frac{(b_{beam} - t_w - 2 \cdot r)}{2} = 69.3 \text{ mm}$$

7.2. Skerspjūvio klasifikacija

$$\varepsilon := \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_{yd}}} = 0.814$$

Lenkimo veikiamo sienutė:

$$\begin{aligned} \text{Sienutės.klasė} := & \left\{ \begin{array}{l} \text{if } \frac{c}{t_w} \leq 72 \cdot \varepsilon \\ \quad \parallel \\ \quad \text{"1 klasė"} \\ \text{else if } 72 \cdot \varepsilon < \frac{c}{t_w} \leq 83 \cdot \varepsilon \\ \quad \parallel \\ \quad \text{"2 klasė"} \\ \text{else if } 83 \cdot \varepsilon < \frac{c}{t_w} \leq 124 \cdot \varepsilon \\ \quad \parallel \\ \quad \text{"3 klasė"} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \\ \quad \text{"4 klasė"} \end{array} \right. = \text{"1 klasė"} \end{aligned}$$

Gniuždymo veikiamo lentyna:

$$\begin{aligned} \text{Lentynos.klasė} := & \left\{ \begin{array}{l} \text{if } \frac{c_1}{t_f} \leq 9 \cdot \varepsilon \\ \quad \parallel \\ \quad \text{"1 klasė"} \\ \text{else if } 9 \cdot \varepsilon < \frac{c_1}{t_f} \leq 10 \cdot \varepsilon \\ \quad \parallel \\ \quad \text{"2 klasė"} \\ \text{else if } 10 \cdot \varepsilon < \frac{c_1}{t_f} \leq 14 \cdot \varepsilon \\ \quad \parallel \\ \quad \text{"3 klasė"} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \\ \quad \text{"4 klasė"} \end{array} \right. = \text{"1 klasė"} \end{aligned}$$

Skerspjūvis yra 1-os klasės

7.3. Efektyviųjų juostų pločio nustatymas

Jungių skaičius skerspjūvyje:

$$n_w := 1$$

$$e_0 := \frac{(b_{beam} - t_{sc})}{2} = 87.5 \text{ mm}$$

$$p6.6.5.6.2 := \left\| \begin{array}{l} \text{if } e_0 > 20 \text{ mm} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} \text{“Atstumas iki krašto tinkamas”} \\ \text{else} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} \text{“Atstumas iki krašto per mažas”} \end{array} \right\| \end{array} \right\| \end{array} \right\| = \text{“Atstumas iki krašto tinkamas”}$$

$$b_{e1} := \frac{L}{8} = 1.25 \text{ m} \quad b_{e2} := \frac{L}{8} = 1.25 \text{ m}$$

$$b_{eff} := b_{e1} + b_{e2} = 2.5 \text{ m}$$

$$Patikra := \left\| \begin{array}{l} \text{if } b_{eff} < b \\ \quad \left\| \begin{array}{l} \text{“efektyvusis juostų plotis teisingas”} \\ \text{else} \\ \quad \left\| \begin{array}{l} \text{“efektyvusis juostų plotis neteisingas”} \end{array} \right\| \end{array} \right\| \end{array} \right\|$$

Patikra = “efektyvusis juostų plotis teisingas”

7.4. Jungių laikomosios galios skaičiavimas

Jungės stiprumas:

$$P_{Rd} := \frac{4.5 \cdot h_{sc} \cdot t_{sc} \cdot f_{ck} + 0.91 \cdot A_{tr} \cdot f_y + 3.31 \cdot n \cdot D^2 \cdot f_{ck}^{0.5}}{\gamma_V}$$

čia:

$$h_{sc} = 0.115 \text{ m} \quad t_{sc} = 0.015 \text{ m} \quad A_{tr} = (8.042 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^2 \quad f_y = (5 \cdot 10^8) \text{ Pa}$$

$$n = 4 \quad D = 0.04 \text{ m} \quad f_{ck} = (3 \cdot 10^7) \text{ (Pa)}$$

$$P_{Rd} := \frac{\left(4.5 \cdot 0.115 \cdot 0.015 \cdot 3 \cdot 10^7 + 0.91 \cdot 8.042 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^8 + 3.31 \cdot 4 \cdot 0.04^2 \cdot (3 \cdot 10^7)^{0.5}\right)}{1.25 \cdot 1000} = 479.122$$

$$P_{Rd} := 479.122 \text{ kN}$$

.5. Šlyjamosios jungties standumo laipsnio skaičiavimas

Jungčių žingsnis: $s_{beam} := 500 \text{ mm}$

Jungčių skaičius L/2 ilgyje:

$$n := n_w \cdot \frac{\left(\frac{L}{2} - \frac{h_{beam}}{2}\right)}{s_{beam}} = 9.55$$

Priimu: $n := 7$

Šlyjamosios jungties laikomoji galia:

$$V_{LRd} := n \cdot P_{Rd} = (3.354 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

Maksimali gniuždymo jėga, kurią atlaiko betonas:

$$N_{cRd} := 0.85 \cdot f_{cd} \cdot b_{eff} \cdot h_p = (8.5 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

Maksimali tempimo jėga, kurią atlaiko plieninė sija:

$$N_{pLRd} := A \cdot f_{yd} = (3.508 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

$$N_{cf} := \min(N_{cRd}, N_{pLRd}) = (3.508 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

$$\eta_1 := \frac{V_{LRd}}{N_{cf}} = 0.956$$

$$\eta_{min1} := 0.4 \quad \eta_{min2} := 1 - \left(\frac{(355 \text{ MPa})}{f_{yk}}\right) \cdot \left(0.75 - 0.03 \cdot L \cdot \frac{1}{m}\right) = 0.55$$

$$\eta_{min} := \max(\eta_{min1}, \eta_{min2}) = 0.55$$

$$\eta_{sc} := \begin{cases} \text{if } \eta_1 < 1 \\ \eta_1 \\ \text{else} \\ 1 \end{cases} \quad \eta_{sc} = 0.956$$

7.6. Sienutės šlyties klupamoji galia

$$\eta := 1.20$$

$$h_w := h_{beam} - 2 \cdot t_f = 420.8 \text{ mm}$$

$$p5.1.2 := \begin{cases} \text{if } \frac{h_w}{t_w} > 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta} \\ \text{“Reikia tikrinti šlyties klupamąją galią ir įrengti sąstandas”} \\ \text{else} \\ \text{“Šlyties klupamosios galios tikrinti nereikia”} \end{cases}$$

$$p5.1.2 = \text{“Šlyties klupamosios galios tikrinti nereikia”}$$

7.7. Šlytis

$$A_{V1} := A - 2 b_{beam} \cdot t_f + (t_w + 2 r) t_f = (5.084 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

$$A_{V2} := \eta \cdot h_w \cdot t_w = 0.005 \text{ m}^2$$

$$A_V := \max(A_{V1}, A_{V2}) = 0.005 \text{ m}^2$$

$$V_{pl.Rd} := \frac{A_V \cdot \left(\frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} = (1.042 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} = 0.44$$

$$\check{\text{Slytis}} := \begin{cases} \text{if } \frac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} \\ \text{“Laikomoji galia tenkinama”} \\ \text{else} \\ \text{“Laikomoji galia netenkinama”} \end{cases} = \text{“Laikomoji galia tenkinama”}$$

Skersinės jėgos įtaka lenkiamajai galiai:

$$\rho := \begin{cases} \text{if } \frac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} < 0.5 \\ 0 \\ \text{else} \\ \left(2 \cdot \frac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} - 1 \right)^2 \end{cases} = 0$$

7.8. Lenkiamoji galia ($\eta_{sc}=1$)

$$A_w := h_w \cdot t_w = (3.956 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

$$A_{red} := A - A_w \cdot \rho = (9.882 \cdot 10^3) \text{ mm}^2$$

Nustatome neutralios ašies vietą:

$$N_{plRd} := A_{red} \cdot f_{yd} = (3.508 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

$$N_{cRd} = (8.5 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

$$n.a := \begin{cases} \text{if } N_{cRd} < N_{plRd} \\ \text{“neutrali ašis yra plieniniame profilyje”} \\ \text{else} \\ \text{“neutrali ašis yra betone”} \end{cases} = \text{“neutrali ašis yra betone”}$$

Randame x:

$$x_{pl} := \frac{N_{plRd}}{b_{eff} \cdot 0.85 \cdot f_{cd}} = 82.544 \text{ mm}$$

Apskaičiuojame jėgos petį:

$$z_1 := \frac{h_{beam}}{2} + h_p - \frac{x_{pl}}{2} = 383.728 \text{ mm}$$

Nustatome, kokį lenkiamąjį momentą atlaiko sija, esant visiškai standžiai šlyjamajai jungčiai:

$$M_{plRd} := z_1 \cdot N_{plRd} = (1.346 \cdot 10^3) \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{plRd}} = 0.852 \quad \blacksquare < 1$$

Plieninio elemento lenkiamoji geba:

$$M_{pl.a.Rd} := W_{pl.y} \cdot f_{yd} = 604.21 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Nustatome, kokį lenkiamąjį momentą atlaiko sija, esant dalinei šlyjamajai jungčiai:

$$M_{Rd} := M_{pl.a.Rd} + (M_{plRd} - M_{pl.a.Rd}) \cdot \eta_{sc} = (1.314 \cdot 10^3) \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$UC_{fin.M} := \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} = 0.873 \quad \blacksquare < 1$$

$$\frac{M_{plRd}}{M_{pl.a.Rd}} = 2.228 \quad \blacksquare < 2.5$$

7.9. Išilginė betoninių plokščių šlytis

Viršsijinės armatūros patikrinimas:

$$h_f := h_p = 200 \text{ mm}$$

Apskaičiuojami šlyties įtempiai:

$$\nu_{Ed} := \frac{\frac{N_{cRd}}{2}}{\left(h_f \cdot \frac{L}{2}\right)} = 4.25 \text{ MPa}$$

Viršsijinės skersinės armatūros reikiamas plotas, kai kampas θ parenkamas tarp 26° ir 45° :

$$\theta := 27 \text{ deg}$$

$$f_{sk} := 500 \text{ MPa}$$

$$A_t := \nu_{Ed} \cdot \frac{n_f}{\left(\cot(\theta) \cdot \frac{f_{sk}}{\gamma_s} \right)} = 996.122 \frac{1}{m} \cdot mm^2$$

Esamas armatūros kiekis:

$$d_t := 16 \text{ mm} \quad s_t := 200 \text{ mm}$$

$$A_{t.real} := \pi \cdot \frac{d_t^2}{s_t \cdot 4} = (1.005 \cdot 10^3) \frac{mm^2}{m}$$

Betono juostos laikomosios galios spyrių sutrupinimui patikrinimas:

$$\nu := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} \right) = 0.528$$

$$\nu_{Rd} := \nu \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) = 4.272 \text{ MPa}$$

$$\nu_{Rd.patikra} := \text{if } \frac{\nu_{Ed}}{\nu_{Rd}} < 1 \left. \begin{array}{l} \text{||} \text{ "betono juostos laikomoji galia pakankama"} \\ \text{else} \\ \text{||} \text{ "betono juostos laikomoji galia nepakankama"} \end{array} \right|$$

$$\nu_{Rd.patikra} = \text{"betono juostos laikomoji galia pakankama"}$$

8. Tinkamumo ribinio būvio patikra eksploatacijos stadijoje

Kompozitinės sijos standumo nustatymas:

$$A_c := b_{eff} \cdot h_p = 0.5 \text{ m}^2$$

$$EA_c := E_{cm} \cdot A_c = (1.6 \cdot 10^{10}) \text{ N}$$

$$I_c := b_{eff} \cdot \frac{h_p^3}{12} = 0.002 \text{ m}^4$$

$$EI_c := E_{cm} \cdot I_c = (5.333 \cdot 10^7) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

$$A_a := A = 0.01 \text{ m}^2$$

$$EA_a := E_s \cdot A_a = (2.075 \cdot 10^9) \text{ N}$$

$$I_a := I_y = (3.374 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^4$$

$$EI_a := E_s \cdot I_a = (7.085 \cdot 10^7) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

$$EA_{ac} := EA_a + EA_c = (1.808 \cdot 10^{10}) \text{ N}$$

$$EI_{ac} := EI_a + EI_c = (1.242 \cdot 10^8) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

$$e_i := h_p + \frac{h_{beam}}{2} + \frac{h_p}{2} = 0.525 \text{ m}$$

Kompozitinės sijos standumo rodiklis:

$$\alpha_i := \frac{e_i^2}{EI_{ac}} \cdot \frac{EA_a \cdot EA_c}{EA_{ac}} = 4.077$$

Kompozitinės sijos standumas lygus:

$$EI_{com} := (1 + \alpha_i) \cdot EI_{ac} = (6.305 \cdot 10^8) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

Charakteristinė kintama apkrova eksploatacijos stadijoje:

$$q_k := (q_{k.1} \cdot L + q_{k.2} \cdot L) = 38 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN}$$

Sijos įlinkis nuo kintamų apkrovų:

$$\delta_q := 5 \cdot q_k \cdot \frac{L^4}{384 \cdot EI_{com}} = 7.848 \text{ mm}$$

Ribinis sijos įlinkis nuo kintamų apkrovų:

$$\delta_{rib.q} := \frac{L}{360} = 27.778 \text{ mm}$$

$$\frac{\delta_q}{\delta_{rib.q}} = 0.283$$

Kompozitinės sijos ilgalaikio standumo nustatymas:

$$\psi_L := 1.1 \quad \varphi_t := 2.0$$

$$E_{cc} := \frac{E_{cm}}{1 + \psi_L \cdot \varphi_t} = (1 \cdot 10^4) \text{ MPa}$$

$$A_c = 0.5 \text{ m}^2$$

$$EA_{cLT} := E_{cc} \cdot A_c = (5 \cdot 10^9) \text{ N}$$

$$I_c := b_{eff} \cdot \frac{h_p^3}{12} = 0.002 \text{ m}^4$$

$$EI_{cLT} := E_{cc} \cdot I_c = (1.667 \cdot 10^7) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

$$A_a := A = 0.01 \text{ m}^2$$

$$EA_a := E_s \cdot A_a = (2.075 \cdot 10^9) \text{ N}$$

$$I_a := I_y = (3.374 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^4$$

$$EI_a := E_s \cdot I_a = (7.085 \cdot 10^7) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

$$EA_{acLT} := EA_a + EA_{cLT} = (7.075 \cdot 10^9) \text{ N}$$

$$EI_{acLT} := EI_a + EI_{cLT} = (8.752 \cdot 10^7) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

$$e_i := h_p + \frac{h_{beam}}{2} + \frac{h_p}{2} = 0.525 \text{ m}$$

Kompozitinės sijos standumo rodiklis:

$$\alpha_{iLT} := \frac{e_i^2}{EI_{acLT}} \cdot EA_a \cdot \frac{EA_{cLT}}{EA_{acLT}} = 4.619$$

Kompozitinės sijos ilgalaikis standumas lygus:

$$EI_{comLT} := (1 + \alpha_{iLT}) \cdot EI_{acLT} = (4.917 \cdot 10^8) \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

Charakteristinė nuolatinė eksploatacijos apkrova veikianti siją:

$$g_k := g_{k.1} \cdot L + g_{k.2} \cdot L + g_{k.3} = 76 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN}$$

Sijos ilgalaikis įlinkis nuo eksploatacijos stadijos nuolatinių apkrovų:

$$\delta_{gL T} := 5 \cdot g_k \cdot \frac{L^4}{384 \cdot EI_{comLT}} = 20.124 \text{ mm}$$

Bendras sijos įlinkis eksploatacijos stadijoje:

$$\delta_{tot.} := \delta_q + \delta_{gL T} = 27.972 \text{ mm}$$

Ribinis sijos įlinkis eksploatacijos stadijoje:

$$\delta_{lim} := \frac{L}{250} = 40 \text{ mm}$$

$$\delta_{patikra} := \begin{cases} \text{if } \frac{\delta_{tot.}}{\delta_{lim}} < 1 & \text{=} \text{"įlinkis leistinas"} \\ \quad \parallel & \text{"įlinkis leistinas"} \\ \quad \text{else} & \\ \quad \parallel & \text{"įlinkis neleistinas"} \end{cases}$$

9. Sijos vibracijų patikrinimas

$$e_d := b \cdot (g_{k.1} + g_{k.2}) + g_{k.3} = 46 \frac{kN}{m}$$

Įlinkis nuo nuolatinių apkrovų:

$$\delta := \frac{5}{384} e_d \cdot \frac{L^4}{EI_{com}} = 9.5 \text{ mm}$$

Naturalus svyravimų dažnis:

$$f := \frac{18}{\sqrt{9.5}} = 5.84 \text{ Hz}$$

$$f_{patikra} := \begin{cases} \text{if } f > 4 & \text{=} \text{"Svyravimų dažnis tinkamas"} \\ \quad \parallel & \text{"Svyravimų dažnis tinkamas"} \\ \quad \text{else} & \\ \quad \parallel & \text{"Svyravimų dažnis netinkamas"} \end{cases}$$