

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Deividas Martinavičius

PLIENINIŲ IR KOMPOZITINIŲ HSQ SIJŲ TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Dr. Nerijus Adamukaitis

KAUNAS, 2017

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

PLIENINIŲ IR KOMPOZITINIŲ HSQ SIJŲ TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Statybos inžinerija (kodas 621H20001)

Vadovas

(parašas) Dr. Nerijus Adamukaitis
(data)

Recenzentė

(parašas) Doc. dr. Jolanta Šadauskienė
(data)

Projektą atliko

(parašas) Deividas Martinavičius
(data)

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS

(Fakultetas)

Deividas Martinavičius

(Studento vardas, pavardė)

Statybos inžinerija, 621H20001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Plieninių ir kompozitinių HSQ sijų tyrimas“

AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA

2017 m. gegužės 22 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Deivido Martinavičiaus**, baigiamasis projektas tema „Plieninių ir kompozitinių HSQ sijų tyrimas“ 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)

Martinavičius, Deividas. Plieninių ir Kompozitinių HSQ Sijų Tyrimas. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas dr. Nerijus Adamukaitis; Kauno Technologijos Universitetas, Statybos ir Architektūros fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Technologijos mokslai; Statybos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *plienas, kompozitas, sija, baigtiniai elementai, plastiškumas*

Kaunas, 2017. 108 p.

SANTRAUKA

Darbo tikslas – ištirti plieninių ir kompozitinių HSQ sijų mechanines savybes. Darbą sudaro keturios pagrindinės dalys. Pirmojoje dalyje apžvelgta literatūra: kitų autorių tirtos kompozitinės sijos, įvairūs gniuždomo betono modeliai. Antrojoje dalyje sijos projektuotos pagal Eurokodą. Įvertinta, kaip sijų skerspjūvio plotas kinta, veikiant skirtingoms apkrovoms, naudojant skirtingus sijų aukščius ir pločius. Trečiojoje dalyje tirtos kompozitinės HSQ ir trapecinės sijos. Skerspjūviai parinkti, skaičiuojant pagal pagrindinius medžiagų atsparumo principus. Sijos ištirtos baigtinių elementų metodu, naudojant programą „ABAQUS“. Baigtinių elementų metodu gauti rezultatai palyginti su teoriniais skaičiavimais. Palygintos kompozitinės HSQ ir trapecinės sijos. Ketvirtojoje dalyje tiriamos plieninės ir kompozitinės HSQ sijos. Atliktas praktinis eksperimentas ir teoriniai skaičiavimai, naudojant tiek plastinį, tiek tamprųjį įtempių pasiskirstymą. Sijos čia taip pat ištirtos baigtinių elementų metodu. Teoriškai gauti rezultatai palyginti su eksperimentiniais.

Apibendrinant darbą suformuluotos 5 pagrindinės išvados. Darbo apimtis be priedų yra 98 psl., kuriuose pateikta 119 paveikslukų, 15 lentelių ir 33 literatūros šaltiniai.

Martinavičius, Deividas. *Research on Steel and Composite HSQ Beams: Master's thesis* / supervisor PhD Nerijus Adamukaitis. The Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Technology science; Civil engineering

Key words: steel, composite, beam, finite elements, plasticity

Kaunas, 2017. 108 p.

SUMMARY

The aim of the thesis is to explore mechanical properties of steel and composite HSQ beams. Master's thesis contains four parts. The literature is reviewed in the first part: composite beams investigated by other authors, various models of concrete in compression. Design of beams according to Eurocode is carried out in the second part. In this part the variation of steel cross-section area depending on various factors (forces acting, depth and width of the beam) is evaluated. The third part deals with composite HSQ and trapezoid beams. Calculations are made in this part. The cross-sections are designed in accordance with main mechanical principles. Finite element analysis is carried out using “ABAQUS” software. The results of calculations and finite element analysis are compared. Composite HSQ beams and trapezoid beams are also compared. The fourth part deals with steel and composite HSQ beams. It consists of several steps: practical experiment, theoretical calculations using plastic and elastic stress distribution, finite element analysis. Theoretical results are compared to experimental.

To summarize master's thesis 5 main conclusions are given. The main part of the thesis consists of 98 pages of text, 119 figures, 15 tables and 33 references.

Turinys

Įvadas.....	11
1. Literatūros analizė.....	13
1.1. Plieninės HSQ sijos	13
1.2. Kompozitinės plieno-betono sijos	14
1.3. Kompozitinės plieno-betono sijos, veikiamos gaisro	18
1.4. Betono suvaržymo įtaka gniuždomajam stipriui	19
1.5. Literatūros apibendrinimas	22
1.6. Tyrimo objektas ir tyrimo metodai	22
2. Plieninių HSQ sijų skaičiavimai pagal Eurokodą	24
2.1. Skerspjūvių klasės pagal Eurokodą. Pradiniai tyrimo duomenys.....	24
2.2. HSQ sijų skaičiavimas pagal Eurokodą, darant prielaidą, kad skerspjūvis gali pasiekti plastinę lenkiamąją galią.....	27
2.3. HSQ sijų skaičiavimas pagal Eurokodą, darant prielaidą, kad skerspjūvis negali pasiekti plastinės laikomosios galios.....	32
2.4. Skyriaus rezultatai ir išvados	37
3. Teoriniai kompozitinių sijų skaičiavimai ir tyrimas baigtinių elementų metodu.....	40
3.1. Tyrimo baigtinių elementų metodu aprašymas.....	40
3.2. Sijų parinkimas pagal vienodą skerspjūvio plotą ir jų tyrimas	47
3.2.1. Sijų parinkimas	47
3.2.2. Sijų tyrimas baigtinių elementų metodu.....	52
3.3. Sijų parinkimas pagal vienodą plastinę lenkiamąją galią ir jų tyrimas.....	54
3.3.1. Sijų parinkimas	54
3.3.2. Sijų tyrimas baigtinių elementų metodu.....	55
3.4. Skyriaus išvados	57
4. HSQ sijų praktinis eksperimentas ir teorinė analizė	58
4.1. Praktinis eksperimentas	58
4.1.1. Eksperimento bandiniai ir įranga.....	58
4.1.2. Eksperimento eiga	60
4.1.3. Eksperimento rezultatai	62
4.2. Eksperimento sijų teoriniai skaičiavimai	64
4.2.1. Skaičiavimai, taikant plastinį įtempių pasiskirstymą skerspjūvyje	64
4.2.2. Skaičiavimai pagal klasikinę tamprumo teoriją	68

4.3. Eksperimento sijų analizė baigtinių elementų metodu ir visų eksperimento rezultatų palyginimas	76
4.3.1. Plieninės sijos	79
4.3.2. Kompozitinės sijos be armatūros.....	81
4.3.3. Kompozitinės sijos su armatūra.....	88
4.3.4. Skirtingų tipų sijų palyginimas.....	91
4.4. Skyriaus išvados	92
5. Išvados.....	93
6. Literatūros šaltiniai.....	95
7. Asmeninių mokslinių publikacijų sąrašas	98
Priedai.....	99

Paveikslėlių sąrašas

1.1 pav. Plieninės HSQ sijos: standartinė – kairėje, su paaukštinimais – viduryje, kraštinė sija – dešinėje	13
1.2 pav. Lu, F. [4] sijų skerspjūvis.....	14
1.3 pav. Lu, F. [4] eksperimento rezultatai	14
1.4 pav. Lu, F. [4] naudotas Schneider [20] betono modelis	14
1.5 pav. Soundararajan, A. [5] eksperimento rezultatai. Apkrovų-įlinkių priklausomybės, naudojant skirtingų tipų betoną	15
1.6 pav. Han, L. [4] sijų skerspjūvis	15
1.7 pav. Han, L. [4] betono įtempių-deformacijų priklausomybės kompozitinėms apvalaus skerspjūvio sijoms	15
1.8 pav. Han, L. [4] betono įtempių-deformacijų priklausomybės kompozitinėms stačiakampio skerspjūvio sijoms	15
1.9 pav. Han, L. [4] siūlomas lenkiamojo stiprio koeficientas stačiakampėms sijoms.....	15
1.10 pav. Han, L. [4] siūlomas lenkiamojo stiprio koeficientas apvalioms sijoms.....	15
1.11 pav. Zhan, Y. ir kt. [3] principinė sijų momentų-įlinkių priklausomybė	17
1.12 pav. Zhan, Y. ir kt. [3] naudota suvaržyto betono kreivė.....	17
1.13 pav. Zhan, Y. ir kt. [3] eksperimentų lenkimo momentų-kreivio priklausomybės charakteringi taškai.....	17
1.14 pav. Zhan, Y. ir kt. [3] tirtų sijų skerspjūviai.....	17
1.15 pav. Zhan, Y. ir kt. [3] lenkimo momentų-įlinkių kreivės skirtingų tipų sijoms	17
1.16 pav. Arvind, M. ir kt. [7] kompozitinės sijos plieninis profilis.....	18
1.17 pav. Preethi, G. ir Elangovan, R. [8] kompozitinės sijos plieninis profilis.....	18
1.18 pav. Kent, D. C. ir Park, R. [16] suvaržyto ir nesuvaržyto betono modelis kvadratinei g/b kolonai	20
1.19 pav. Perea, T ir Leon, R. T. [21] suvaržyto betono kvadratinėse kompozitinėse kolonose įtempių-deformacijų kreivės.....	20

1.20 pav. Perea, T ir Leon, R. T. [21] suvaržyto betono apvaliose kompozitinėse kolonose įtempių-deformacijų kreivės.....	20
1.21 pav. Huang, C. ir kt. [13] suvaržyto ir nesuvaržyto betono modeliai kompozitinei kolonai	21
1.22 pav. Murugesan Reddiar, M. K. [11] suvaržyto ir nesuvaržyto betono modelis	21
1.23 pav. Mander, J. B. [12] suvaržyto ir nesuvaržyto betono modelis kvadratinei g/b kolonai..	21
1.24 pav. Aktyvusis betono suvaržymas	21
1.25 pav. Pasyvusis betono suvaržymas	21
1.26 pav. Magistro baigiamojo darbo tyrimų schema.....	23
2.1 pav. Plieninių sijų skaičiavimo algoritmas.....	25
2.2 pav. HSQ sijos matmenys	27
2.3 pav. HSQ sijos plastinis įtempių pasiskirstymas	30
2.4 pav. HSQ sijos matmenys	32
2.5 pav. HSQ sijos tamprus įtempių pasiskirstymas	35
2.6 pav. Plieninių HSQ sijų skerspjūvio plotų-lenkimo momentų priklausomybės	39
3.1 pav. S355 klasės konstrukcinio plieno įtempių-santykinų deformacijų priklausomybė [31]	42
3.2 pav. S500 klasės armatūros plieno įtempių-santykinų inžinerinių deformacijų priklausomybė	42
3.3 pav. „CDP“ betono modelis. Gniuždomo betono įtempių-santykinų deformacijų priklausomybė [30].....	43
3.4 pav. Gniuždomo betono C30/37 netiesinė įtempių-santykinų deformacijų priklausomybė..	43
3.5 pav. „CDP“ betono modelis. Tempiamo betono įtempių-santykinų deformacijų priklausomybė [30].....	43
3.6 pav. Tempiamo betono įtempių-plyšio pločio priklausomybė pagal CEB FIB [23]	44
3.7 pav. Tempiamo betono C30/37 įtempių-plyšio pločio priklausomybė.....	44
3.8 pav. Eksperimento sijų apkrovimas, atrama ir vidurinis sijos taškas.....	45
3.9 pav. Eksperimente naudojamų sijų apkrovimas, paslanki šarnyrinė atrama.....	45
3.10 pav. Eksperimento sijų skaičiuojamoji schema ir lenkimo momentų diagrama.....	46
3.11 pav. Teoriškai nagrinėjamų sijų skaičiuojamoji schema ir lenkimo momentų diagrama	46
3.12 pav. Teoriškai nagrinėjamos sijų apkrovimas.....	46
3.13 pav. Teoriškai nagrinėjamos sijos galinės plokštelės atrama.....	46
3.14 pav. Sukibimas tarp plieninio profilio ir betono	47
3.15 pav. Sukibimas tarp betono ir armatūros.....	47
3.16 pav. Sukibimas tarp HSQ sijos ir atraminės plokštelės.....	47
3.17 pav. Kompozitinės HSQ sijos skerspjūvio skaičiuojamoji schema	47
3.18 pav. Kompozitinės trapecinės sijos skerspjūvio skaičiuojamoji schema	49
3.19 pav. Kompozitinė HSQ sija A.....	49
3.20 pav. Kompozitinė trapecinė sija B	49
3.21 pav. Sijos A lenkimo momentų-įlinkių kreivė	52
3.22 pav. Sijos B lenkimo momentų-įlinkių kreivė	52
3.23 pav. Sijos C lenkimo momentų-įlinkių kreivė	52
3.24 pav. Sijos D lenkimo momentų-įlinkių kreivė	52
3.25 pav. Sijos E lenkimo momentų-įlinkių kreivė	52

3.26 pav. HSQ sijų ir trapecinių sijų lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės, kai sijų plieninio skerspjūvio plotas vienodas	53
3.27 pav. HSQ sijų ir trapecinių sijų apatinių juostų kraštinių taškų lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės, kai sijų plieninio skerspjūvio plotas vienodas.....	54
3.28 pav. Sijos E skerspjūvis ties viduriu	54
3.29 pav. Sijos C skerspjūvis ties viduriu	54
3.30 pav. Sijos B1 lenkimo momentų-įlinkių kreivė	55
3.31 pav. Sijos C1 lenkimo momentų-įlinkių kreivė	55
3.32 pav. Sijos D1 lenkimo momentų-įlinkių kreivė	56
3.33 pav. HSQ sijų ir trapecinių sijų lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės (parinkta pagal 900 kNm).....	56
3.34 pav. HSQ sijų ir trapecinių sijų apatinių juostų kraštų lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės (parinkta pagal 900 kNm)	56
4.1 pav. Toni Technik presas betono bandiniams	59
4.2 pav. Hidraulinis presas GRM-1.....	59
4.3 pav. Šarnyrinė atrama.....	59
4.4 pav. Paslanki šarnyrinė atrama.....	59
4.5 pav. Apkrovų perdavimo plokštelės, cilindrai ir traversa	59
4.6 pav. Sumontuoti įlinkio matavimo prietaisai	59
4.7 pav. Hidraulinis presas GRM-1 ir sija, paruošta lenkimo bandymui.....	59
4.8 pav. Sijos prieš betonavimą.....	60
4.9 pav. Sijos po betonavimo	60
4.10 pav. Betono bandiniai	60
4.11 pav. Sijos lenkimo eksperimentas.....	61
4.12 pav. Sijų lenkimo eksperimento rezultatai	63
4.13 pav. Plieninio skerspjūvio skaičiuojamoji schema	64
4.14 pav. Kompozitinio skerspjūvio be armatūros skaičiuojamoji schema	65
4.15 pav. Kompozitinio skerspjūvio su armatūra skaičiuojamoji schema	66
4.16 pav. Papildomi matmenys sijos skerspjūvio redukavimui	69
4.17 pav. Kompozitinis skerspjūvis su armatūra. Santykinės deformacijos	72
4.18 pav. Kompozitinis skerspjūvis su armatūra. Įtempiai	72
4.19 pav. Kompozitinis skerspjūvis be armatūros. Santykinės deformacijos	74
4.20 pav. Kompozitinis skerspjūvis be armatūros. Įtempiai	74
4.21 pav. Plieninis skerspjūvis be armatūros. Santykinės deformacijos ir įtempiai	74
4.22 pav. Eksperimente naudoto betono įtempių-santykinių deformacijų priklausomybės	76
4.23 pav. Murugesan Reddiar, M. K. [11] modelis suvaržytam ir nesuvaržytam betonui	76
4.24 pav. Sijai NR1 eksperimente naudoto betono įtempių-santykinių deformacijų priklausomybės. Suvaržytas ir nesuvaržytas betonas	77
4.25 pav. Sijai NR2 eksperimente naudoto betono įtempių-santykinių deformacijų priklausomybės. Suvaržytas ir nesuvaržytas betonas	78
4.26 pav. Plieninės sijos NR1-M baigtinių elementų modelio ir eksperimento lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės, teorinių skaičiavimų rezultatai.....	79

4.27 pav. Plieninės sijos NR2 baigtinių elementų modelio ir eksperimento lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės, teorinių skaičiavimų rezultatai	79
4.28 pav. Sijos viršutinės juostos suvirinimas	80
4.29 pav. Sijos viršutinės juostos suvirinimas iš vidaus	80
4.30 pav. Sijos apatinės juostos suvirinimas tik iš išorės.....	80
4.31 pav. Teoriškai nagrinėtas idealizuotas skerspjūvis (kairėje) ir eksperimente tirtos sijos principinis skerspjūvis	80
4.32 pav. Plieninės sijos NR1-M Von Miseso įtempiai ties teorine skerspjūvio takumo riba.....	80
4.33 pav. Plieninės sijos NR2-M Von Miseso įtempiai ties teorine skerspjūvio takumo riba.....	80
4.34 pav. Kompozitinės sijos (be armatūros) NR1-K baigtinių elementų modelių lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės. Sukibimas standus. Suvaržytas ir nesuvaržytas betonas	81
4.35 pav. Kompozitinės sijos (be armatūros) NR1-K baigtinių elementų modelių ir eksperimento lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės. Įvairūs sukibimo variantai. Suvaržytas ir nesuvaržytas betonas	82
4.36 pav. Kompozitinės sijos (be armatūros) NR1-K baigtinių elementų modelių ir eksperimento lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės, teorinių skaičiavimų rezultatai	82
4.37 pav. Eksperimentinė ir teorinė sijos NR1-M lenkimo momentų-įlinkių kreivės, teorinė sijos NR1-K kreivė ir tiriamų taškų žymėjimas.....	83
4.38 pav. Plieninės sijos NR1-M Von Miseso įtempiai kreivės 1 taške. Pjūvis ties konc. apkrova	83
4.39 pav. Kompozitinės sijos NR1-K plieninio profilio Von Miseso įtempiai kreivės 2 taške....	83
4.40 pav. Kompozitinės sijos NR1-K betono normaliniai įtempiai kreivės 2 taške	83
4.41 pav. Kompozitinės sijos (be armatūros) NR2-K baigtinių elementų modelių lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės. Sukibimas standus. Suvaržytas ir nesuvaržytas betonas	84
4.42 pav. Kompozitinės sijos (be armatūros) NR2-K baigtinių elementų modelių ir eksperimento lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės. Įvairūs sukibimo variantai. Suvaržytas ir nesuvaržytas betonas	84
4.43 pav. Kompozitinės sijos (be armatūros) NR1-K baigtinių elementų modelių ir eksperimento lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės, teorinių skaičiavimų rezultatai	85
4.44 pav. Eksperimentinė ir teorinė sijos NR2-M lenkimo momentų-įlinkių kreivės, teorinė sijos NR2-K kreivė ir tiriamų taškų žymėjimas.....	85
4.45 pav. Plieninės sijos NR2-M Von Miseso įtempiai kreivės 1 taške. Pjūvis ties konc. apkrova	86
4.46 pav. Kompozitinės sijos NR2-K plieninio profilio Von Miseso įtempiai kreivės 2 taške....	86
4.47 pav. Kompozitinės sijos NR2-K betono normaliniai įtempiai kreivės 2 taške	86
4.48 pav. Kompozitinės sijos (su armatūra) NR1-KA baigtinių elementų modelių lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės. Įvairūs sukibimo variantai. Suvaržytas ir nesuvaržytas betonas	88
4.49 pav. Kompozitinės sijos (su armatūra) NR1-KA baigtinių elementų modelių lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės, teorinių skaičiavimų rezultatai	88
4.50 pav. Kompozitinės sijos (su armatūra) NR2-KA baigtinių elementų modelių lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės. Įvairūs sukibimo variantai. Suvaržytas ir nesuvaržytas betonas	89

4.51 pav. Kompozitinės sijos (su armatūra) NR2-KA baigtinių elementų modelių lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės, teorinių skaičiavimų rezultatai	89
4.52 pav. Skirtingų sijos NR1 variantų (NR1-M, NR1-K, NR1-KA) lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės.....	91
4.53 pav. Skirtingų sijos NR2 variantų (NR2-M, NR2-K, NR2-KA) lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės.....	91

Lentelių sąrašas

2.1 lent. Apkrovos plieninėms HSQ sijoms.....	26
2.2 lent. Sijų ilgiai, rėmų žingsniai ir įrašos	27
2.3 lent. HSQ sijos matmenys	28
2.4 lent. HSQ sijos matmenys	32
2.5 lent. HSQ sijų parinkimo rezultatai.....	37
3.1 lent. Sijų parinkimas „analogiško skerspjūvio“ atžvilgiu	51
3.2 lent. Sijų parinkimas pagal vienodą lenkiamąją galią.....	55
4.1 lent. Eksperimento sijos	58
4.2 lent. Betono sudėtis	60
4.3 lent. Gniuždomo betono kubelių matmenys ir gniuždomasis stipris	62
4.4 lent. Prizmelių 100x100x300 matmenys ir tamprumo modulis	62
4.5 lent. Prizmelių 100x100x400 matmenys, lenkiamasis stipris ir apskaičiuotas tempiamasis stipris	62
4.6 lent. Eksperimento sijų plastinės lenkiamosios galios, neutraliosios ašys.....	67
4.7 lent. Kompozitinių sijų mechaninės charakteristikos, lenkiamoji galia ir įlinkiai.....	75
4.8 lent. Plieninių sijų mechaninės charakteristikos, lenkiamoji galia ir įlinkiai.....	75

Įvadas

Temos aktualumas

Statybos sektoriuje vis labiau populiarėja plonų grindų sistemos. Jos pasižymi tuo, kad perdangos plokštės ir sijos yra viename lygyje. Tai reiškia, jog plokštės atremiamos ant plieninių ar kompozitinių sijų apatinių juostų. Naudojant tokią sistemą, gaunami lygūs, estetiškai patrauklūs paviršiai, gali būti sumažinamas patalpų tūris. Pakeičiant gelžbetonines RT tipo sijas į plonų grindų sistemą su plieninėmis arba kompozitinėmis sijomis, galima sumažinti aukšto aukštį 200–500 mm. Pavyzdžiui, esant 15 aukštų pastatui, būtų sutaupoma 3–7,5 m pastato aukščio arba galima būtų pastatyti papildomus 1–3 aukštus.

Plonų grindų sistemoms yra įprasta naudoti plienines arba kompozitines sijas. Plieninių sijų pavyzdys yra HSQ sijos, o kompozitinių – trapecinės sijos, užpildytos betonu. Naudojant plienines sijas tiesiog yra sumažinamas aukšto aukštis, o naudojant kompozitines sijas papildomai išnaudojami ir kiti privalumai: padidinamas sijų standumas (sumažėja vibracijos ir įlinkiai), ženkliai padidėja gaisrinis atsparumas. Be to, kompozitinės sijos, suinkaruotos armatūros strypais su perdangomis, į bendrą konstrukcinį darbą įtraukia ir perdangos plokštes. Pastebima, kad labai mažai mokslinių tyrimų yra atlikta apie trapecines sijas, o sprendimas užbetonuoti HSQ sijas ir naudoti jas kaip kompozitines nėra tirtas ar svarstytas. Tikėtina, kad užbetonavimas padidins HSQ sijos stiprumą, o tokio tipo sijos galėtų būti alternatyva trapecinėms sijoms. Dėl šių priežasčių kompozitinės HSQ sijos reikalauja mechaninių savybių ištyrimo.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Darbo tikslas – ištirti plieninių ir kompozitinių HSQ sijų mechanines savybes.

Siekiant užsibrėžto tikslo yra sprendžiami šie uždaviniai:

1. Nustatyti optimalaus plieninės HSQ sijos skerspjūvio parinkimo gaires.
2. Palyginti kompozitinių HSQ ir kompozitinių trapecinių sijų lenkimo momentų-įlinkių kreives.
3. Eksperimentiškai nustatyti plieninių ir kompozitinių HSQ sijų lenkimo momentų-įlinkių kreives.
4. Palyginti eksperimentiškai gautas lenkimo momentų-įlinkių priklausomybes su teorinėmis kreivėmis ir skaičiavimais.

Mokslinis naujumas

Darbe iširtas naujo tipo HSQ sijos skerspjūvis, kurio mechaninės savybės yra palankesnės nei iki šiol naudotų plieninių HSQ sijų.

Praktinė vertė

Kompozitines HSQ sijas būtų galima naudoti kaip alternatyvą trapecinėms kompozitinėms sijoms. Kadangi HSQ sijų sienutės yra statmenos, tai vertinant technologinį aspektą ir lyginant su trapecinėmis sijomis, tokių sijų gamyba galimai yra patogesnė.

Publikacijos ir tyrimai, atlikti studijų metu

Kompozitinių konstrukcijų tema studijų metu buvo publikuotas straipsnis „Influence of Heat Treatment Regimes on Mechanical Properties of NSC-UHPC Composite Members“, kuris buvo išspausdintas TDB mokslo žurnale „Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering“. Tema taip pat buvo pristatyta tarptautinėje konferencijoje „Advanced Construction 2016“.

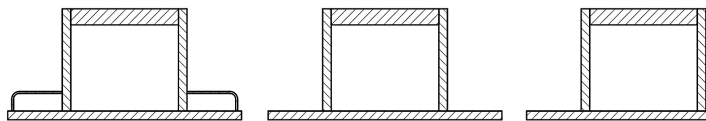
Studijų metu publikuotas su baigiamojo darbo tema nesusijęs straipsnis „Evaluation of Base Ground Stiffness on Statically Indeterminate Framed Building Structures“, kuris buvo išspausdintas žurnale „Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering“ ir pristatytas konferencijoje „Advanced Construction 2016“.

Buvo sudalyvauta tarptautinėje konferencijoje „CRETE 2016“. Atlikti bandymai ir parengtas standinis pranešimas, kurio pavadinimas yra „The Influence of Stiffness of interface on Layered Floor Plates Structural Behaviour Using Industrial Waste in the Middle Layer“. Tyrime nagrinėti betono bandiniai, sudaryti iš skirtingo betono sluoksnių, todėl bandinius galima vadinti kompozitiniais.

1. Literatūros analizė

1.1. Plieninės HSQ sijos

Bzdawka, K. [1] savo disertacijoje nagrinėjo pastatų, kurių karkasą sudaro kompozitinės kolonos ir plieninės HSQ sijos, konstrukcijas. Autorius teigė, kad ypatingai svarbus faktorius yra sijų-kolonų jungčių standumas. Vienas iš pirminių šio autoriaus tikslų buvo ištirti vadinamųjų pusiau standžių jungčių panaudojimo tikslumą. Bzdawka, K. [1] vertino santykinį jungčių standumą, kurio ribos pagal Monforton, G. R. [19] metodą yra tarp 0 ir 1. Kai jungties santykinio standumo reikšmė yra 0, jungtis yra šarnyrinė, o kai 1 – standi. Autorius padarė išvadą, jog optimaliausia konstrukcijų įrengimo kaina gaunama, kai jungties standumas pagal Monforton, G. R. [19] metodą yra 0,6–0,7. Taigi, pirminė hipotezė, jog pusiau standžių jungčių panaudojimas gali būti ekonomiškai pasitvirtino. Savo disertacijoje Bzdawka, K. [1] naudojo PSO („Particle Swarm Optimization“) optimizavimo algoritimą. Autorius šiame darbe įvertino ir tam tikrus specialiuosius poveikius, tokius kaip gaisras. Gaisro atvejis buvo analizuojamas baigtinių elementų metodu. Teoriškai gaisro poveikis kompozitinėms kolonomis apskaičiuotas pagal Eurokodą. Bzdawka, K. [1] savo darbe naudojo S355, S460 ir S700 klasės plieną. Jis nustatė, kad stiprių plieną tikslinga naudoti tuomet, kai reikia didelių tarpatramių (kai sijų tarpatramis yra virš 12 m, o perdangos – virš 15 m). S700 klasės plieną ekonomiškiausia buvo naudoti, kai perdangos plokščių ilgis buvo 16 m, o sijų – 13,5 m. Tokiu atveju konstrukcijos iš S700 klasės plieno buvo apie 3% pigesnės nei konstrukcijos, pagamintos iš S355 klasės plieno [1].



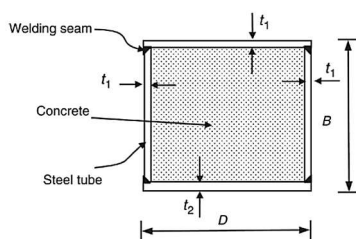
1.1 pav. Plieninės HSQ sijos: standartinė – kairėje, su paaukštinimais – viduryje, kraštinė sija – dešinėje

Buddenbaum Glans, S. ir Arbman Karlsson, K. [2] disertacijos tyrimuose baigtinių elementų metodu analizavo ir pagal Eurokodą [24] skaičiavo HSQ sijas. Autorių tikslas buvo ištirti Eurokodo modelį, kuriuo remiantis plieninės konstrukcijos pagal laikomąją galią yra skirstomos į galinčias ir negalinčias pasiekti plastinio stiprio. Šis skirstymas Eurokode priklauso nuo to, kokioms skerspjūvio klasėms priskiriami gniuždomi konstrukcijos elementai. Šių skerspjūvio klasių yra keturios. Autoriai pastebi, kad nėra sklandaus perėjimo tarp plastiško modelio ir tampraus, todėl gaunami netikslumai, skaičiuojant kai kurioms skerspjūvio klasėms priskirtų sijų atsparumą. Šiame darbe pastebima, kad Eurokodas pervertina konstrukcijų, kurios priklauso 1 ir 2 klasei, stiprį.

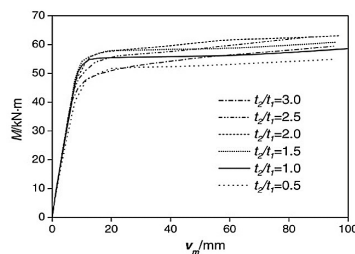
Labiausiai (iki 10 %) pervertinama perėjimo iš 1 klasės į 2 zonoje. 3 klasei priklausančių sijų, kurios yra arti 2 klasės ribos, stipris pagal šį modelį yra per mažas. Dar kita situacija yra skerspjūvio klasei artėjant link 4 klasės ir 4 klasėje. Čia sijų atsparumas pagal Eurokodą įvertinamas tiksliausiai ir niekada nėra pervertinamas. Šiame darbe siūloma taikyti tampriai plastinį modelį, kuriame turėtų būti interpoliuojama. Teigiama, kad dabartinis Eurokodo modelis yra netikslus ir elementų, priklausančių tam tikroms klasėms, stiprio pervertinimas gali būti pavojingas [2].

1.2. Kompozitinės plieno-betono sijos

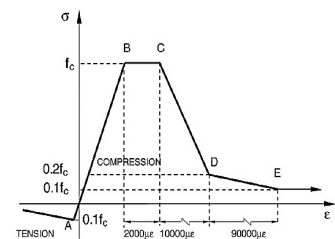
Įvairių autorių darbuose yra tirtos skirtingų tipų kompozitinės sijos. Viename iš tokių darbų Lu, F. [4] tyrė sudėtinio skerspjūvio kvadratinės kompozitinės plieno-betono sijas (žr. 1.2 pav.). Šio darbo tikslas buvo iširti, kokią įtaką sijų lenkiamajai galiai turi plieninių skerspjūvio elementų storis. Sijų viršutinės juostos ir sienučių storiai buvo vienodi, o apatinės juostos – beveik visais atvejais skirtingas. Visais atvejais bendras sijos plieninių elementų ir betono skerspjūvio plotas buvo vienodas. Skyrėsi tik santykis tarp sijos plieninių elementų storio. Nustatyta, kad kai storio santykis tarp apatinės sijos juostos ir visų likusių elementų buvo tarp 1,5 ir 2, tokios sudėtinio skerspjūvio sijos turėjo iki 5 procentų didesnę lenkiamąją galią, lyginant su sijomis, kurių visi plieniniai elementai yra vienodo storio. Didinant šį santykį virš 2.6, sijos pradėdavo tekėti anksčiau, tačiau toliau didėjant įlinkiui, lenkimo momentas būdavo didesnis nei etaloninių sijų, kurių elementų storiai buvo vienodi (žr. 1.3 pav.). Sijų lenkiamoji galia skaičiuota pagal įvairias metodikas, atlikta baigtinių elementų analizė. Kontaktą tarp plieno ir betono autorius modeliavo, naudodamas trinties koeficientą, kurio reikšmė lygi 0,25. Sijos viduje esantis betonas laikomas suvaržytu, todėl jis aprašytas pagal Schneider, S. P. [20] modelį (žr. 1.4 pav.). Pagal šį modelį betonas pasiekia didžiausią įtempį f_{cm} . Toliau didėjant apkrovai ir santykinėi deformacijai, stipris kurį laiką dar išlieka toks pat ir nemažėja [4].



1.2 pav. Lu, F. [4] sijų skerspjūvis

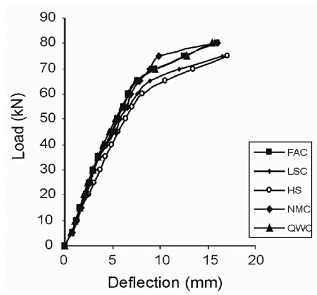


1.3 pav. Lu, F. [4] eksperimento rezultatai

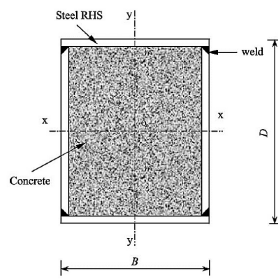


1.4 pav. Lu, F. [4] naudotas Schneider [20] betono modelis

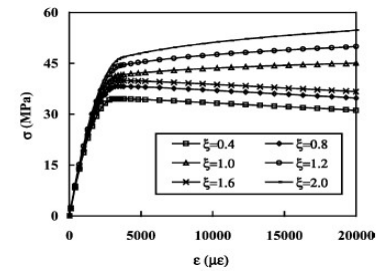
Soundararajan, A. ir Shanmugasundaram, K. [5] tyrė betonų užpildytas plienines stačiakampio skerspjūvio sijas. Nagrinėtos įvairių tipų betonų (normalus betono mišinys „NWC“, lakiųjų pelenų betonas „FAC“, karjero atliekų betonas „QWC“, mažo stiprio skaldytų plytų kalkinis betonas „LSC“) užpildytos sijos ir sijos be betono (žr. 1.5 pav.). Buvo atlikti lenkimo bandymai, naudojant dvi koncentruotas apkrovas. Išmatuoti įlinkiai, kreiviai, santykinės deformacijos sijų centre, gautos apkrovų-įlinkių priklausomybės. Iš gautų rezultatų matyti, kad sijos, užpildytos betonų, suiro plastiškai. Jos pasiekė plastinę laikomąją galią. Nebuvo užfiksuotas joks nestabilumas (išklupimas ir t.t.). Sijų stipris dauguma atvejų padidėjo ~25 proc., lyginant su paprasta plienine sija. Ne toks žymus padidėjimas (16 proc.) užfiksuotas tik tuo atveju, kai buvo naudotas mažo stiprumo betonas. Sijų stipriai apskaičiuoti pagal CIDECT metodiką. Nustatyta, jog apskaičiuotas rezultatas buvo nežymiai mažesnis nei stipris, gautas eksperimento metu [5].



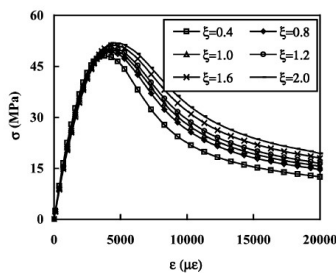
1.5 pav. Soundararajan, A. [5] eksperimento rezultatai. Apkrovų-įlinkių priklausomybės, naudojant skirtingų tipų betoną



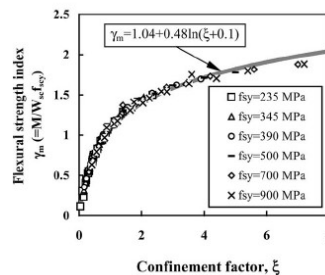
1.6 pav. Han, L. [4] sijų skerspjūvis



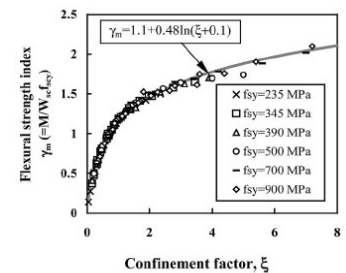
1.7 pav. Han, L. [4] betono įtempių-deformacijų priklausomybės kompozitinėms apvalaus skerspjūvio sijoms



1.8 pav. Han, L. [4] betono įtempių-deformacijų priklausomybės kompozitinėms stačiakampio skerspjūvio sijoms



1.9 pav. Han, L. [4] siūlomas lenkiamojo stiprio koeficientas stačiakampėms sijoms



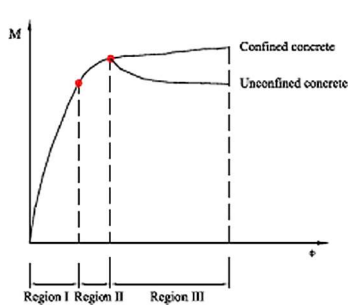
1.10 pav. Han, L. [4] siūlomas lenkiamojo stiprio koeficientas apvalioms sijoms

Han, L. [4] atliko didelio masto tyrimą, kuriame buvo tiriamos kvadratinės ir stačiakampės kompozitinės sijos (žr. 1.6 pav.). Jas sudarė tuščiaviduris plieninis profilis (sudėtinio skerspjūvio)

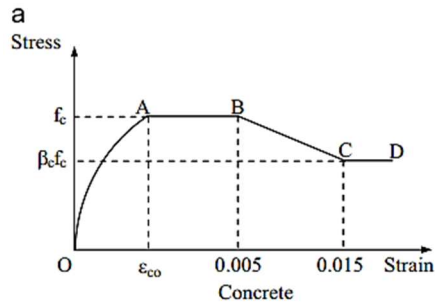
ir viduje esantis betonas. Iš viso eksperimentiškai buvo ištirta 16 sijų. Atlikti lenkimo bandymai, apkraunant sijas dviem koncentruotomis jėgomis. Bandymų metu gautos lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės. Sulaužius sijas, pastebėta, kad visos jos suiro plastiškai ir sklandžiai. Atlikus tyrimus buvo pasiūlytas mechaninis modelis, kuriuo naudojantis galima prognozuoti tokio tipo kompozitinių sijų stiprumą. Teigiama, kad šiuo modeliu gauti rezultatai pakankamai gerai sutampa su gautais eksperimentiškai. Pagal įvairias metodikas buvo apskaičiuoti sijų lenkiamieji stipriai. Pavyzdžiui, AIJ ir AISC metodikomis naudojantis buvo gauti gana konservatyvūs rezultatai (~20 % mažesnis stipris). Skaičiuojant pagal EC4 [26] ir siūlomą metodiką, rezultatai gauti panašesni į eksperimentines reikšmes (~10 % mažesnės reikšmės). Pagal tų pačių šaltinių metodikas apskaičiuotas ir sijų standumas. Remiantis dauguma metodikų (BS5400, EC4, AISC) buvo gautos didesnės reikšmės nei eksperimento metu. Skaičiuojant pagal AIJ metodiką, gautos nežymiai mažesnės reikšmės nei eksperimentiškai [4]. Taigi, metodika yra tinkama tokio tipo skaičiavimams. Tyrime betonas laikomas suvaržytu, jo įtempių-santykinių deformacijų kreivė yra kitokia nei įprasto betono. Jos pobūdis priklauso nuo koeficiento ξ (žr. 1.7 ir 1.8 pav.), kuris priklauso nuo skerspjūvio tipo (stačiakampis arba apvalus), plieninio profilio ir betono skerspjūvio plotų, betono klasės. Pagal šį koeficientą galima nustatyti lenkiamojo stiprio koeficientą kompozitinėms sijoms ir supaprastintai apskaičiuoti lenkiamąją sijos galią (žr. 1.9 ir 1.10 pav.).

Zhan, Y. ir kt. [3] tyrė kompozitines stačiakampio skerspjūvio sijas su iš anksto įtemptais lynais (žr. 1.14 pav.). Eksperimentiškai buvo ištirtos 8 sijos. Išoriniai sijų matmenys visais atvejais buvo vienodi. Skyrėsi plieninio skerspjūvio elementų storiai, panaudotos kelios betono klasės ir keli lynų išdėstymo variantai. Pradinė hipotezė buvo, jog lynai sumažina tempiamo betono pleišėjimą, o sumažėjęs pleišėjimas nulemia tai, jog padidėja betono suvaržymo įtaka. Tai patvirtino atlikti sijų lenkimo bandymai, kurių metu jos apkrautos viena arba dviem koncentruotomis jėgomis. Suirimas įvyko, pasiekus plastinę lenkiamąją galią. Gniuždomam betonui buvo naudojamas tiek suvaržyto (žr. 1.12 pav.), tiek paprasto betono modelis. Palyginus kreives, gautas naudojant šiuos skirtingus gniuždomo betono modelius, pastebėta, kad su eksperimentiniais rezultatais gerai sutapo pirmoji kreivė, kurioje betonas vertinamas kaip suvaržytas (žr. 1.15 pav.). Iki ženklių plastinių deformacijų atsiradimo kreivės sutampa, tačiau, naudojant nesuvaržyto betono modelį, sijos stipris vėliau pradeda mažėti (žr. 1.11 pav.). Toks mažėjimas eksperimento metu neužfiksuotas. Lyginant literatūroje tirtas sijas, kuriose pleišėjimo momentas pasiektas, veikiant apie 5 proc. maksimalios lenkiamosios galios momento, tokio tipo

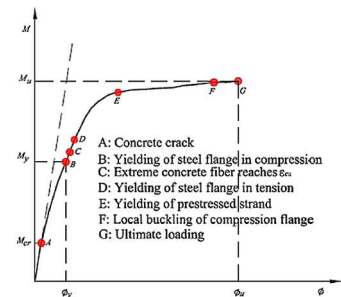
sijose pleišėjimas prasidėjo ties 19 proc. riba. Lyginant sijas su įtempiamais lynais ir be jų, skaičiuojant gautas iki 50 proc. standumo skirtumas. Gavus teorines minėtų dviejų tipų sijų lenkimo momentų-įlinkių kreives, pastebėta, jog sijų be lynų stipris yra linkęs mažėti (1.15 pav.), prasidėjus žymioms plastinėms deformacijoms [3]. Kita vertus, ši tyrimo dalis yra ginčytina. Galima tikėtis, kad įtempiami lynai padidina betono suvaržymo įtaką, tačiau negalima teigti, jog sijose be lynų betono suvaržymo įtaka nebūtų pastebima. Tai parodo šiame magistro baigiamajame darbe atlikti tyrimai, kurie aprašomi tolimesniuose skyriuose.



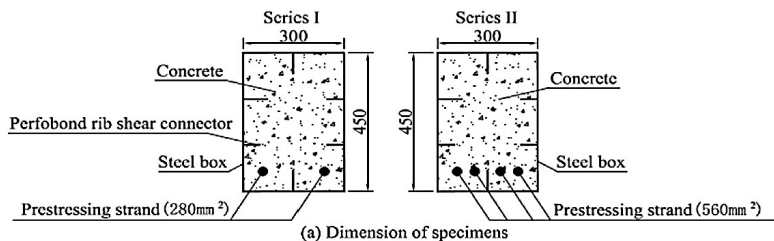
1.11 pav. Zhan, Y. ir kt. [3] principinė sijų momentų-įlinkių priklausomybė



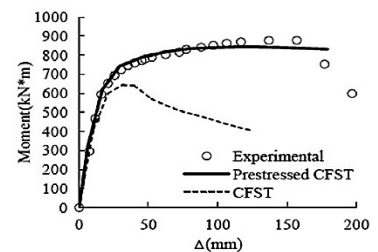
1.12 pav. Zhan, Y. ir kt. [3] naudota suvaržyto betono kreivė



1.13 pav. Zhan, Y. ir kt. [3] eksperimentų lenkimo momentų-kreivio priklausomybės charakteringi taškai



1.14 pav. Zhan, Y. ir kt. [3] tirtų sijų skerspjūviai



1.15 pav. Zhan, Y. ir kt. [3] lenkimo momentų-įlinkių kreivės skirtingų tipų sijoms

Arvind, M. ir kt. [7] tyrė kompozitines sijas eksperimentiškai. Sijos buvo iš pagamintos iš plonasienių (1–3 mm) plieno lakštų, kurie dengė betoną iš trijų pusių (žr. 1.16 pav.). Šoniniai lakštai buvo sujungti ryšiais, kurių išdėstymas buvo kas 100 mm arba 150 mm. Sukibimas buvo užtikrinamas, naudojant plienines junges. Eksperimentų metu matuoti įlinkiai ir kreiviai. Didesnę lenkiamąją galią turėjo sija su tankiau išdėstytais ryšiais. Autoriai teigia, jog taip nutiko dėl didesnės betono suvaržymo įtakos. Pats suirimas įvyko taip: pirmiausiai atsiskyrė plieniniai lakštai,

dėl klupumo pradėjo formotis bangos plieno lakštuose, tuomet plienas pradėjo tekėti, o betonas trupėt [7].

Panašų tyrimą atliko Preethi, G. ir Elangovan, R. [8]. Čia sijos (žr. 1.17 pav.) buvo šiek tiek kitokios. Jos buvo suarmuotos apatinėje dalyje. Aprašytas suirimo pobūdis buvo toks pats kaip ir Arvind, M. ir kt. [7] sijų, tačiau čia buvo pastebėtas ir plieninių jungių atsiskyrimas nuo plieninio lakšto suvirinimo vietose. Tyrimų metu sijos išnagrinėtos ir teoriškai: sijos analizuotos baigtinių elementų metodu ir apskaičiuotas jų stipris. Mažiausias sijos stiprumas (22 kNm) buvo gautas baigtinių elementų metodu, o didžiausias – skaičiuojant teoriškai (25 kNm). Eksperimentiškai gautas rezultatas buvo tarpinis – 23,8 kNm [8].



1.16 pav. Arvind, M. ir kt. [7]
kompozitinės sijos plieninis profilis



1.17 pav. Preethi, G. ir Elangovan, R. [8] kompozitinės sijos
plieninis profilis

1.3. Kompozitinės plieno-betono sijos, veikiamos gaisro

Populiari tema, tiriant įvairių tipų kompozitines sijas, yra gaisrinis atsparumas. Taip yra todėl, kad užbetonavimas padidina šių konstrukcijų atsparumą aukštomis temperatūroms, todėl jį būtina nuodugniai ištirti. Pavydžiui, Maraveas, C. [15] tyrė trapecines sijas, kurių paskirtis yra analogiška kaip ir šiame magistro darbe tiriamų kompozitinių HSQ sijų. Minėtame tyrime buvo nagrinėtos keturių tipų trapecinės sijos, įvertinant šiluminį plėtimąsi ir jo nevertinant. Tyrimui panaudota standartinė ISO 834-1 gaisro kreivė. Gaisras sijas veikė iš apačios, kadangi būtent apatinės sijų juostos būna atviros. Tyrimų metu nustatyta, kad sijų gaisrinį atsparumą daugiausiai ribojo įlinkiai. Vertinant šį faktorių, sijų gaisrinis atsparumas siekė ~60 min. Neapsaugotų nuo gaisro apatinių juostų temperatūra pakilo iki 700 °C po 60 min ir iki 850 °C po 90 min. Užfiksuotas žymus temperatūrinis gradientas. Temperatūrų skirtumas tarp neapsaugotos nuo gaisro apatinės juostos ir betono apsuptos viršutinės juostos buvo nuo 630 (60 min) iki 800 °C (120 min) [15]. Kita vertus, šie tyrimai gali neatspindėti realios situacijos, kadangi sijos mechaniniu požiūriu parinktos neracionaliai. Sijų apatinės juostos storis per didelis, lyginant su viršutine juosta. Be to, santykinai per storos ir sienutės, kadangi pakankamai kerpamajai galiai išlaikyti pakanka ženkliai plonesnių.

1.4. Betono suvaržymo įtaka gniuždomajam stipriui

Kaip matoma išnagrinėtuose straipsniuose, skirtingų tipų kompozitinėse ir gelžbetoninėse konstrukcijose (sijos, kolonos ir t.t.) yra naudojama speciali gniuždomo betono įtempių-deformacijų priklausomybė. Jau senai žinoma, kad iš išorės suvaržytas betonas dirba kitaip. Jis tampa plastiškesnis (gali daugiau deformuotis) ir pasiekti didesnį gniuždomąjį stiprį.

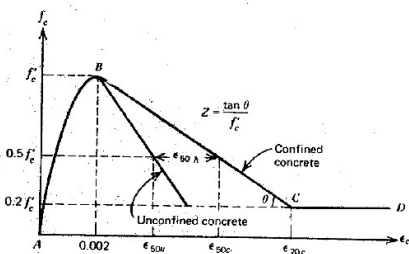
Kai kuriuose konservatyvesniuose modeliuose nurodoma, kad padidėja tik plastiškumas. Vienas iš tokių pavyzdžių yra Kent, D. C. ir Park, R. [16] modelis, skirtas gelžbetoninėms kolonomis (žr. 1.18 pav.). Tokiose kolonose betoną suvaržo skersinė armatūra. Suvaržymo įtaka yra tuo didesnė, kuo didesnis skersinės armatūros skersmuo, armatūros klasė, jos išdėstymo tankis ir kuo žemesnė betono klasė. Taip pat suvaržymo įtaka priklauso ir nuo gelžbetoninio elemento skerspjuvio matmenų, skersinės armatūros formos. Mander, J. B. [12] modelis taip pat yra skirtas gelžbetoninėms kolonomis, tačiau čia suvaržyto betono kreivė atrodo kitaip. Pagal šį modelį dėl suvaržymo išauga ir betono stipris. Mander, J. B. [12] modelyje (žr. 1.23 pav.) išskiriamos dvi gelžbetoninės kolonos zonos: betonas, esantis viduje, vertinamas kaip suvaržytas, o esantis išorėje – kaip nesuvaržytas. Šioms dviem zonoms taikomos skirtingos įtempių-deformacijų priklausomybės.

Khaleek, A. ir kt. [14] tyrė betono suvaržymo įtaką gelžbetoninių kolonų stipriui. Buvo tiriamos apvalios ir kvadratinės 300 mm ilgio kolonos. Naudojama dviejų tipų skersinė armatūra: seisminė (užlenkta 135° kampu) ir paprasta (užlenkta 90° kampu). Didžiausią laikomąją galią pasiekė apvalios kolonos. Be to, pastebėta, kad kolonos su seismine armatūra pasiekė didesnį stiprį nei kolonos su paprasta armatūra. Kaip ir minėta įvairiuose literatūros šaltiniuose, mažinant skersinės armatūros ($\phi 5$ mm) išdėstymo žingsnį, kolonų stiprumas didėjo. Kvadratinės kolonos su skersine armatūra, išdėstyta 150 mm žingsniu, buvo 50 proc. stipresnės. Kai skersinė armatūra buvo išdėstyta 25 mm žingsniu, stipris buvo daugiau nei 3 kartus didesnis nei kolonos be skersinės armatūros ir daugiau nei 2 kartus didesnis nei kolonos su 150 mm skersinės armatūros žingsniu. Apvalių kolonų su skersine armatūra (25 mm žingsniu) stipris buvo keturis kartus didesnis nei kolonų be skersinės armatūros [14].

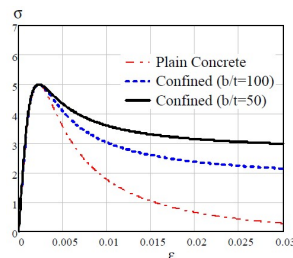
Yra sukurta įvairių modelių, kuriais naudojantis galima įvertinti betono suvaržymo įtaką kompozitinėse konstrukcijose. Tokio modelio pavyzdys yra Huang, C. [13] modelis (žr. 1.21 pav.). Šiuose modeliuose suvaržymo įtaka priklauso nuo betoną supančio plieninio profilio klasės ir

storio. Aukštesnės klasės plieninis profilis su storesnėmis sienutėmis betoną suvaržo labiau, todėl labiau išauga jo stipris ir plastiškumas. Sakino, K. ir Sun, Y. P. [18] modelis yra tinkamas tiek gelžbetoninėms, tiek kompozitinėms konstrukcijoms. Čia išskiriami du atvejai: kai plieninis profilis yra apvalus ir stačiakampis. Remiantis šiuo modeliu, didesnę įtaką betono suvaržymui turi apvalus profilis. Kai skerspjūvis kvadratinis, pagal šį modelį padidėja tik plastiškumas. Šį modelį savo darbe panaudojo Perea, T ir Leon, R. T. [21] (žr. 1.19 ir 1.20 pav.).

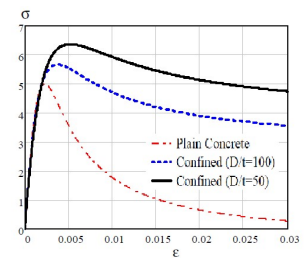
Murugesan Reddiar, M. K. [11] modelis (žr. 1.22 pav.) yra sukurtas, remiantis Mander, J. B [12] ir Li, B. bei kt. [17] bandymų rezultatais. Čia pagrindinis kintamasis yra koeficientas K , kuris reiškia suvaržyto ir nesuvaržyto betono stiprumo santykį. Šio koeficiento reikšmė priklauso nuo betono klasės. $K=1$, kai betonas nesuvaržytas. Kai $K=2$, suvaržyto betono stipris yra du kartus didesnis nei nesuvaržyto. Šis modelis yra patogus, nes juo naudojantis galima gauti tiek suvaržyto, tiek nesuvaržyto betono įtempių-deformacijų priklausomybes. Gana lengvai galima apskaičiuoti tiek įtempius, kai turimos santykinės deformacijos, tiek santykinės deformacijas, kai turimi tik įtempiai [11]. Modelis patogus, nes yra tik vienas kintamasis, kuriuo įvertinama suvaržymo įtaka. Šio modelio autorius teigia, jog skaičiuojant šiuo metodu, rezultatai gaunami labai panašūs į gaunamus Mander, J. B. [12] metodu.



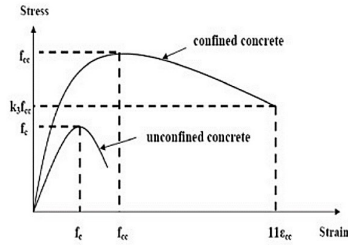
1.18 pav. Kent, D. C. ir Park, R. [16] suvaržyto ir nesuvaržyto betono modelis kvadratinei g/b kolonai



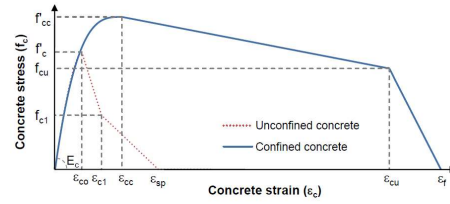
1.19 pav. Perea, T ir Leon, R. T. [21] suvaržyto betono kvadratinėse kompozitinėse kolonose įtempių-deformacijų kreivės



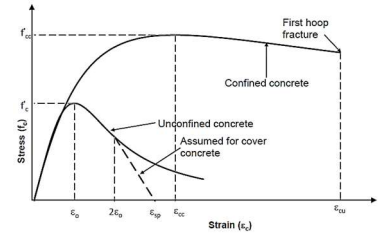
1.20 pav. Perea, T ir Leon, R. T. [21] suvaržyto betono apvaliose kompozitinėse kolonose įtempių-deformacijų kreivės



1.21 pav. Huang, C. ir kt. [13] suvaržyto ir nesuvaržyto betono modeliai kompozitinei kolonai



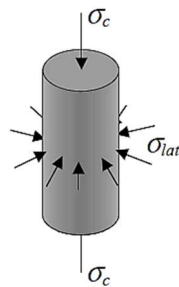
1.22 pav. Murugesan Reddiar, M. K. [11] suvaržyto ir nesuvaržyto betono modelis



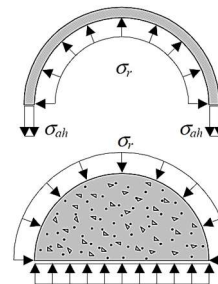
1.23 pav. Mander, J. B. [12] suvaržyto ir nesuvaržyto betono modelis kvadratinei g/b kolonai

Betono suvaržymas paprastai yra skirstomas į *aktyvųjį* ir *pasyvųjį*. Aktyvusis suvaržymas veikia tuomet, kai išoriškai pridėta skersinė jėga spaudžia betoną iš visų pusių. Skersinė jėga šiuo atveju yra statmena pagrindinei apkrovai. Pasyviojo suvaržymo atvejis yra tuomet, kai betonui plėstis neleidžia jį ribojantis plieninis vamzdinis profilis arba skersinė armatūra. Esant abiejų šių tipų suvaržymui, betono stipris didėja, tačiau daugiausiai stiprumas gali išaugti aktyviojo suvaržymo atveju, kai yra didelė skersinė jėga, spaudžianti betoną iš visų pusių. Johansson, M. ir Akesson, M. [10] atliko tyrimus su betonu, pridėjus įvairaus dydžio skersinę jėgą. Esant nesuvaržytam betonui, jo stipris buvo 43,5 MPa. Aktyvusis suvaržymas buvo vis didinamas. Kai suvaržymo įtempiai siekė 43 MPa, betono stiprumas išaugo iki 184,2 MPa (~400 proc.) [10].

Pasyviojo suvaržymo atveju, suvaržymas, apkraunant konstrukciją, taip pat nuolat kinta. Pradiniame etape, kol apkrovos dar mažos, plieno Puasono koeficientas yra didesnis nei betono, todėl jis plečiasi greičiau nei betonas. Dėl šios priežasties pradiniame etape betonas nesuvaržomas ir dirba taip pat kaip nesuvaržytas. Didėjant apkrovai, prasideda netamprios betono deformacijos. Netrukus skersinės deformacijos pasiveja plieno deformacijas ir tolimesnis konstrukcijos apkrovimas lemia tai, jog atsiranda betono suvaržymas. Dėl šios priežasties išauga betono stipris. [10]



1.24 pav. Aktyvusis betono suvaržymas



1.25 pav. Pasyvusis betono suvaržymas

1.5. Literatūros apibendrinimas

Kompozitinės sijos plonų grindų sistemoms yra naujoviškas ir perspektyvus sprendimas. Literatūroje yra randami keli straipsniai, kuriuose tirtos įprastos plieninės HSQ sijos. Be to, yra tirta nemažai įvairių tipų kompozitinių konstrukcijų: kompozitinės kvadratinės arba apvalios kolonos, kvadratinės plieno-betono sijos be armatūros arba su įtempta armatūra, asimetrinės dvitėjinės sijos su skardos paklotu ant apatinės arba viršutinės juostos, sijos su plonasiensiais plieno lakštais iš trijų pusių. Apžvelgiant literatūrą, pastebima, kad labai mažai viešai prieinamų tyrimų yra atlikta apie trapecines sijas, o sprendimas užbetonuoti HSQ sijas ir tirti jas kaip kompozitines literatūroje dar nematytas. Tikėtina, kad užbetonavimas padidins sijos stiprumą, o tokio tipo sijos galėtų būti naudojamos kaip alternatyva trapecinėms sijoms. Dėl šių priežasčių kompozitinės HSQ sijos reikalauja mechaninių savybių ištyrimo.

1.6. Tyrimo objektas ir tyrimo metodai

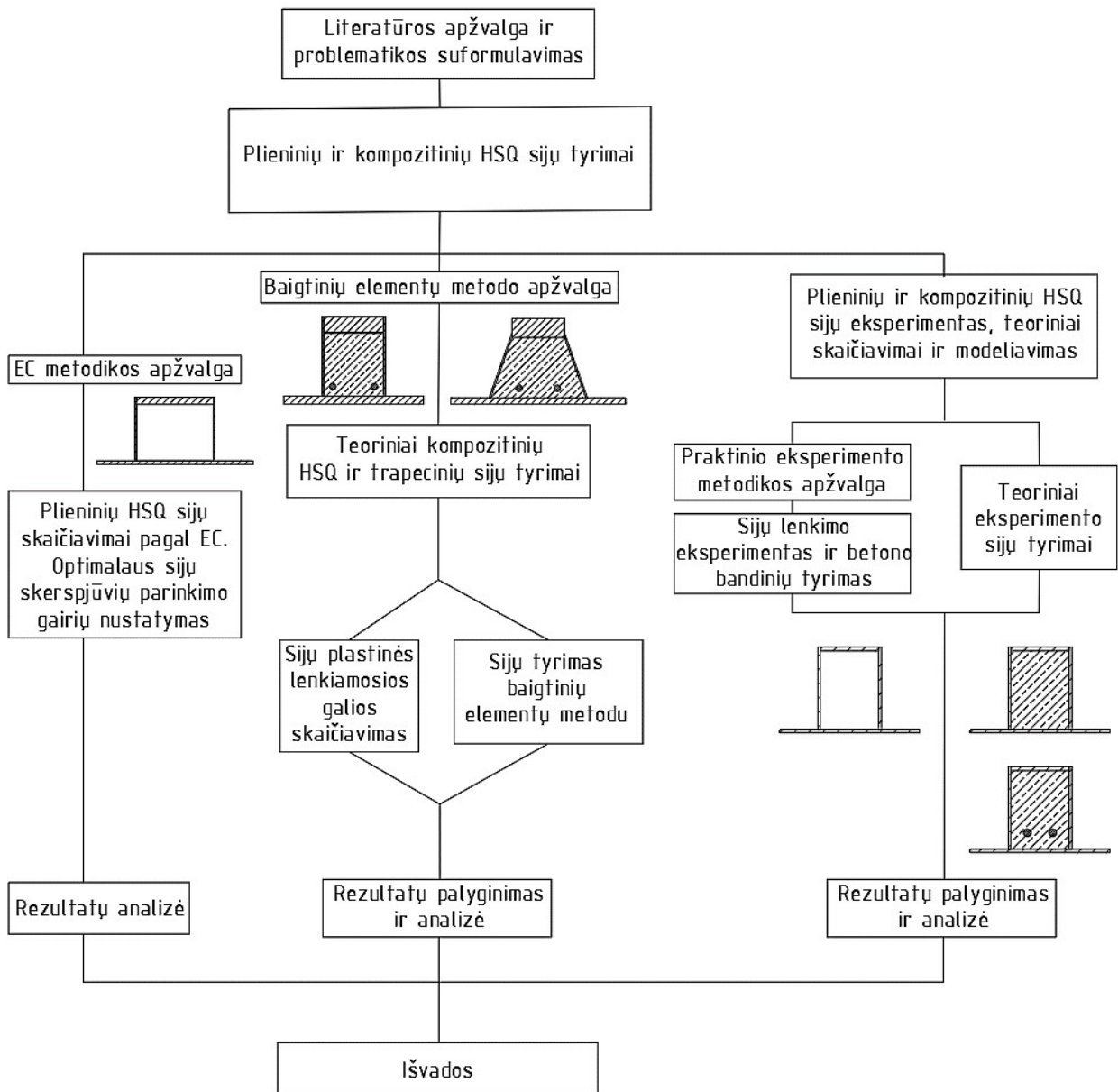
Pagrindinis šio darbo tyrimo objektas yra plieninės ir kompozitinės HSQ sijos. Palyginimui su kompozitinėmis HSQ sijomis pasirinktos kompozitinės trapecinės sijos. Visos sijos tiriamos kaip atskiri konstrukciniai elementai. Kitos konstrukcijos (pvz., perdangos plokštės) šiame tyrime naudojamos tik sijų aukščio apribojimams ir apkrovoms nustatyti. Bendras kompozitinės sijos atskirų elementų konstrukcinis darbas vertinamas tik sijos viduje. Sąveika tarp perdangos plokščių, betoninių grindų ir sijų čia nėra tiriama nei eksperimentiškai, nei teoriškai.

Šiame darbe numatomi trys pagrindiniai tyrimo metodai:

1. Teoriniai skaičiavimai, remiantis Eurokodais (žr. 2 skyrių) ir pagrindiniais mechanikos principais.
2. Tyrimai baigtinių elementų metodu, naudojant programą „ABAQUS“. Metodika aprašyta 3.1. skyriuje.
3. Eksperimentiniai tyrimai. Aprašymas pateiktas 4.1. skyriuje.

Tyrimą sudaro trys dalys. Pirmojoje dalyje plieninės HSQ sijos projektuojamos pagal Eurokodus [24 ir 25]. Antrojoje dalyje tiriamos kompozitinės HSQ ir kompozitinės trapecinės sijos. Čia naudojami du tyrimo metodai: teoriniai skaičiavimai ir baigtinių elementų analizė. Trečiojoje dalyje plieninės ir kompozitinės HSQ sijos tiriamos eksperimentiškai. Atliekamas sijos lenkimo bandymas. Tos pačios sijos vėliau analizuojamos baigtinių elementų metodu. Be to, atliekami ir teoriniai skaičiavimai.

Šiame baigiamajame darbe skirtingos tyrimų metodikos nėra aprašomos viename skyriuje, kadangi tyrimas susideda iš atskirų dalių. Kai kurios metodikos naudojamos tik viename skyriuje, o kitos – keliuose. Taigi, nuspręsta, kad naudojama tyrimo metodika bus aprašoma prie konkrečios tyrimo dalies. Skaičiavimai pagal Eurokodus [24 ir 25] atliekami 2 skyriuje, todėl čia ir pateikiamos formulės iš šių reglamentų. Tyrimas baigtinių elementų metodu atliekamas trečiame ir ketvirtame skyriuje. Šios metodikos aprašymas pateikiamas trečio skyriaus pradžioje. Eksperimentiniai tyrimai aprašyti ketvirto skyriaus pradžioje. Visų šiame darbe atliekamų tyrimų schema pateikiama 1.26 pav.



1.26 pav. Magistro baigiamojo darbo tyrimų schema

2. Plieninių HSQ sijų skaičiavimai pagal Eurokodą

2.1. Skerspjūvių klasės pagal Eurokodą. Pradiniai tyrimo duomenys

Plieninių HSQ sijų stiprumą galima apskaičiuoti, naudojantis Eurokode [24] pateiktomis formulėmis. Sijų skerspjūvis nėra standartinis, todėl mechaninės charakteristikos apskaičiuojamos, taikant įprastus mechanikos principus.

Pagal Eurokodą gniuždomi sijų skerspjūvių elementai (sijos juostos, sienutės) yra skirstomi į keturias klases. Sijos klasė yra priskiriama pagal žemiausios klasės gniuždomą sijos skerspjūvio elementą. Pagal šias klases yra nustatoma sijos geba pasiekti plastinę lenkiamąją galią. 1 ir 2 klasės sijų skerspjūviai gali pasiekti plastinę lenkiamąją galią. 3 ir 4 klasės sijų skerspjūvių galimybės pasiekti šią galią yra ribotos. Eurokode [24] išskiriamos keturios skerspjūvių klasės:

1. Skerspjūviai, kurie gali sudaryti analizei pagal plastiškąjį modelį reikiamą sukamosios gebos plastinį lankstą, kai bendroji galia nesumažėja.
2. Skerspjūviai, kurie pasiekia savo plastinę lenkiamąją galią, tačiau dėl vietinio klupumo jų sukamoji geba yra ribota.
3. Skerspjūviai, kuriuose įtempiai plieninio elemento kraštiniame gniuždomame sluoksnyje, kai daroma tampriojo įtempių pasiskirstymo prielaida, gali pasiekti stiprį pagal takumo ribą, tačiau vietinis klupumas neleidžia pasiekti plastinės lenkiamosios galios.
4. Skerspjūviai, kuriuose vietinis klupumas įvyksta prieš pasiekiant stiprį pagal takumo ribą vienoje ar daugiau skerspjūvio dalių [24].

Pagal priskirtą skerspjūvio klasę skaičiavimuose yra naudojamas atitinkamas įtempių skerspjūvyje pasiskirstymas. Jei sija gali pasiekti plastinę lenkiamąją galią – naudojame stačiakampius įtempių pasiskirstymo blokus. Jei sija šios galios pasiekti negali – skaičiuojame stiprumą pagal tamprųjų įtempių pasiskirstymą. Priklausomai nuo daromos prielaidos, ženkliai skiriasi sijų laikomoji galia. Be to, skiriasi ir pačios skaičiavimų metodikos. 2.1 pav. pateikiamas algoritmas sijų skaičiavimui, priklausomai nuo skerspjūvio klasės.

Šiame skyriuje parenkami įvairūs sijų skerspjūviai, priklausomai nuo veikiančios apkrovos, sijos tarpatramio, skersinių rėmų išdėstymo žingsnio ir perdangos plokštės storio. Naudojimo apkrova visais atvejais laikoma lygi 5 kN/m^2 . Grindų storis ant perdangų visais atvejais yra 80 mm storio. Perdangos plokštės skiriasi, priklausomai nuo skersinių rėmų žingsnio. Ilgėjant perdangos plokštei, didėja perdangos plokštės storis ir jos svoris. Kartu su perdangos plokštės storium didėja ir HSQ sijos sienutės aukštis. Taigi, naudojamos perdangos storis yra apribojimas HSQ sijos skaičiavimuose. Perdangos plokščių svoriai preliminariai gauti iš UAB „Betonika“ katalogo [32]. Plokščių skaičiavimas ir projektavimas nėra šio tyrimo objektas, todėl kai kurie su plokštėmis susiję dydžiai (iš katalogo) dėl tyrimo vaizdumo yra pakoreguoti.

Šioje tyrimo dalyje naudojami įvairūs sijos ilgiai: 6, 9, 12 m. Perdangų ilgiai yra 6, 9, 12 ir 15 m. Apskaičiuotos sijų įrašos visoms galimoms sijos ir perdangos ilgio kombinacijoms (žr. 2.1 ir 2.2 lent.). Pagal gautas įrašas kiekvienam atvejui parenkama po kelias skirtingas sijas. Pradedama nuo siauresnių sijų, vėliau jos platinamos, o skerspjūvio elementai daromi plonesni. Numatomi apribojimai, kad sijos apatinės juostos plotis yra ne daugiau nei 3,5 karto didesnis už viršutinės juostos plotį. Be to, apatinė juosta ne platesnė nei 1,1 m.

Šios tyrimo dalies tikslas yra išsiaiškinti, kokie turėtų būti sijų skerspjūviai, norint gauti mažiausias medžiagų sąnaudas. Norima išsiaiškinti, kokią įtaką medžiagų sąnaudoms turi sijos skerspjūvio klasė ir sijos sienutės aukštis. Planuojama įvertinti sijos lenkiamąją galią mažinančių koeficientų įtaką.

2.1 lent. Apkrovos plieninėms HSQ sijoms

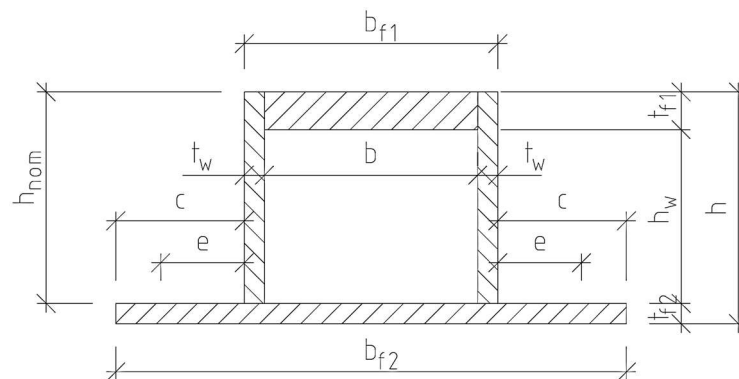
Pastato konstrukcinių variantų grupė	Skersinių rėmų žingsnis, m	Perdangos pl. storis, mm	Savasis pl. svoris (char.), kN/m^2	80 mm grindys (char.), kN/m^2	Naud. apkrova (char.), kN/m^2	Viso (char.) kN/m^2	Viso (skaič.) kN/m^2	Apkrova juostai (skaič.), kN/m
M-1.1... M-1.3	6	200	3,33	1,962	5	10,292	14,644	43,933
M-2.1... M-2.3	9	250	4,03	1,962	5	10,992	15,589	70,151
M-3.1... M-3.3	12	320	4,55	1,962	5	11,512	16,291	97,747
M-4.1... M-4.3	15	400	5,34	1,962	5	12,302	17,358	130,183

2.2 lent. Sijų ilgiai, rėmų žingsniai ir įrašos

Konstruktinis variantas	Sijos ilgis	Skersinių rėmų žingsnis	Apribojimas: sijos sienutės aukštis	Lenkimo momentas	Skersinė jėga
Grupė NR1					
M-1.1	6 m	6 m	200 mm	395,16 kNm	263,60 kN
M-1.2	9 m	6 m	200 mm	889,17 kNm	395,39 kN
M-1.3	12 m	6 m	200 mm	1581,14 kNm	527,19 kN
Grupė NR2					
M-2.1	6 m	9 m	250 mm	631,93 kNm	420,91 kN
M-2.2	9 m	9 m	250 mm	1417,49 kNm	631,36 kN
M-2.3	12 m	9 m	250 mm	2521,63 kNm	841,82 kN
Grupė NR3					
M-3.1	6 m	12 m	320 mm	890,19 kNm	586,48 kN
M-3.2	9 m	12 m	320 mm	1976,52 kNm	879,72 kN
M-3.3	12 m	12 m	320 mm	3510,27 kNm	1172,97 kN
Grupė NR4					
M-4.1	6 m	15 m	400 mm	1209,46 kNm	781,10 kN
M-4.2	9 m	15 m	400 mm	2645,06 kNm	1171,64 kN
M-4.3	12 m	15 m	400 mm	4676,94 kNm	1562,19 kN

2.2. HSQ sijų skaičiavimas pagal Eurokodą, darant prielaidą, kad skerspjūvis gali pasiekti plastinę lenkiamąją galią

2.2 pav. pateikti sijos matmenų žymėjimai, naudojami šiame skyriuje.



2.2 pav. HSQ sijos matmenys

Numatoma, kad šiame skyriuje skaičiuojama sija pasieks plastinę lenkiamąją galią. Šią prielaidą patikrinsime. Skaičiuosime siją pagal 2.2 lent. pateiktą atvejį 4.1.

h_{nom}	t_w	$t_{f,1}$	$t_{f,2}$	$b_{f,1}$	$b_{f,2}$	c	b	h_w	h
400	6	20	12	630	870	120	618	380	412

Tikrinama pagal įrašas: $M_{Ed}=1209,46$ kNm, $V_{Ed}=781,1$ kN.

Skerspjūvio elementų priskyrimas klasėms. Skaičiuojame skerspjūvio plotą:

$$A_{sijos}=2 \cdot t_w \cdot h_w + t_{f,1} \cdot b_{f,1} + t_{f,2} \cdot b_{f,2} = 2 \cdot 6 \cdot 380 + 20 \cdot 630 + 12 \cdot 870 = 27600 \text{ mm}^3 \quad (2.1)$$

Skaičiuojamas neutraliosios tampriosios ašies atstumas nuo sijos apačios:

$$z_{0,y} = \frac{\left(\frac{b_{f,2} \cdot t_{f,2}^2}{2} + 2 \cdot t_w \cdot h_w \cdot \left(\frac{h_w}{2} + t_{f,2} \right) + t_{f,1} \cdot b_{f,1} \cdot \left(\frac{t_{f,1}}{2} + h_w + t_{f,2} \right) \right)}{A_{sijos}} =$$

$$= \frac{\left(\frac{870}{2} \cdot 12^2 + 2 \cdot 6 \cdot 380 \cdot \left(\frac{380}{2} + 12 \right) + 12 \cdot 630 \cdot \left(\frac{20}{2} + 380 + 12 \right) \right)}{27600} = 219,165 \text{ mm} \quad (2.2)$$

Inercijos momentas neutraliosios ašies atžvilgiu skaičiuojamas visiems sijos elementams atskirai ir susumuojamas:

Viršutinė juosta:
$$I_{y,f,1} = \frac{b_{f,1} \cdot t_{f,1}^3}{12} + b_{f,1} \cdot t_{f,1} \cdot \left(z_{0,y} - h + \frac{t_{f,1}}{2} \right)^2 =$$

$$= \frac{630 \cdot 20^3}{12} + 630 \cdot 20 \cdot \left(219,165 - 412 + \frac{20}{2} \right)^2 = 42,162 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 \quad (2.3)$$

Apatinė juosta:
$$I_{y,f,2} = \frac{b_{f,2} \cdot t_{f,2}^3}{12} + b_{f,2} \cdot t_{f,2} \cdot \left(z_{0,y} - \frac{t_{f,2}}{2} \right)^2 =$$

$$= \frac{870 \cdot 12^3}{12} + 870 \cdot 12 \cdot \left(219,165 - \frac{12}{2} \right)^2 = 47,451 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 \quad (2.4)$$

Sienutė:
$$I_{y,w} = \frac{t_w \cdot h_w^3}{12} + t_w \cdot h_w \cdot \left(z_{0,y} - t_{f,2} - \frac{h_w}{2} \right)^2 =$$

$$= \frac{6 \cdot 380^3}{12} + 6 \cdot 380 \cdot \left(219,165 - 12 - \frac{380}{2} \right)^2 = 2,811 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 \quad (2.5)$$

Bendras inercijos momentas y ašies atžvilgiu:

$$I_y = I_{y,f,1} + I_{y,f,2} + 2 \cdot I_{y,w} = 42,162 \cdot 10^7 + 47,451 \cdot 10^7 + 2 \cdot 2,811 \cdot 10^7 = 95,235 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 \quad (2.6)$$

Skaičiuojama viršutinės juostos klasė. Koeficientas, priklausantis nuo plieno klasės:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814 \quad (2.7)$$

Viršutinės juostos pločio ir storio santykis:

$$\frac{b_{f1} - 2 \cdot t_w}{t_{f1}} = \frac{630 - 2 \cdot 6}{20} = 30,9 \quad (2.8)$$

Juosta priklauso 2 klasei, kadangi pastarasis santykis:

$$38 \cdot \varepsilon = 38 \cdot 0,814 = 30,917 > 30,9 > 33 \cdot \varepsilon = 33 \cdot 0,814 = 26,849 \quad (2.9)$$

Sienelių skerspjūvio klasė šioje dalyje priklauso nuo skerspjūvio elementų matmenų ir koeficiento α , kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\alpha = (h_w - (z_{pl,y} - t_{f,2})) = (380 - (162,2 - 18)) = 0,263 \quad (2.10)$$

Čia: $z_{pl,y}$ – plastinė neutralioji ašis, kurią skaičiuojame pagal formulę:

$$z_{pl,y} = \frac{\left(\frac{A_{sijos}}{2} - t_{f,2} \cdot b_{f,2}\right)}{2 \cdot t_w} + t_{f,2} = \frac{\left(\frac{27600}{2} - 12 \cdot 870\right)}{2 \cdot 6} + 12 = 292 \text{ mm} \quad (2.11)$$

$$\text{Sienutės aukščio ir storio santykis: } \frac{h_w}{t_w} = \frac{380}{6} = 63,333 \quad (2.12)$$

$$\text{Ribinis santykis antrai klasei: } \frac{456 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} = \frac{456 \cdot 0,814}{13 \cdot 0,263 - 1} = 153,243 \quad (2.13)$$

$$\text{Ribinis santykis pirmai klasei: } \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} = \frac{396 \cdot 0,814}{13 \cdot 0,263 - 1} = 133,079 \quad (2.14)$$

Sienutė priklauso pirmai klasei, kadangi $63,333 < 133,079$. Pagal žemiausios klasės skerspjūvio elementą įvertinama, kad skerspjūvio klasė yra antra.

$$\text{Apatinės juostos lenkimas: } M_{p,Ed} = e \cdot Q_{max} = 80 \cdot 130,183 = 10414 \text{ kNmm} = 10,414 \text{ kNm} \quad (2.15)$$

Apatinės juostos vieno tiesinio metro plastinė lenkiamoji galia:

$$M_{pl,Rd} = \frac{t_{f,2}^2}{4} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{12^2}{4} \cdot \frac{355}{1} = 12780 \text{ kNmm} = 12,78 \text{ kNm} \quad (2.16)$$

Čia: $\gamma_{M0} = 1, f_y = 355 \text{ MPa}$ – plieno takumo riba

$$\text{Skaičiuojame apatinės juostos stiprio išnaudojimą: } \frac{M_{p,Ed}}{M_{p,Pl,Rd}} = \frac{10,414}{12,78} = 0,815 \quad (2.17)$$

Šlyjamoji galia. Ją skaičiuosime vietose, kur skersinė jėga didžiausia, t.y., ties atramomis.

Skaičiuojame šlyties plotą dėžiniam profiliui:

$$A_v = \eta(2 \cdot h_w \cdot t_w) = 1(2 \cdot 380 \cdot 6) = 4560 \text{ mm}^2 \quad (2.18)$$

Čia: $\eta = 1$

Plastinė šlyjamoji galia:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)}{\gamma_{M0}} = \frac{4560 \cdot \left(\frac{355}{\sqrt{3}}\right)}{1} = 934,615 \cdot 10^3 \text{ N} = 934,615 \text{ kN} \quad (2.19)$$

Tikrinama sąlyga:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} = \frac{781,1}{934,615} = 0,836 < 1 \quad (2.20)$$

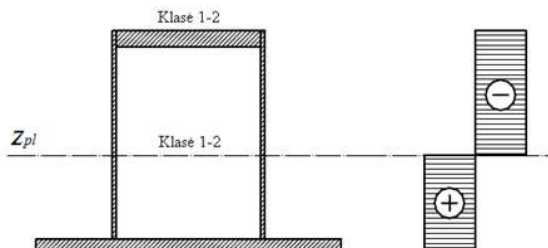
Kai sienutė yra liauna, reikia tikrinti kerpamąją galią, įvertinant sienutės klupumą. Klupumą vertinti reikia, jei:

$$\frac{h_w}{t_w} > \frac{72 \cdot \varepsilon}{\eta} \quad (2.21)$$

$$\frac{202}{5} = 40,4 < \frac{72 \cdot 0,814}{1,2} = 48,84$$

40,4 < 48,84, todėl sienutės klupumo dėl skersinės jėgos tikrinti nereikia.

Lenkiamoji galia. Šiuo atveju sija dirba plastiškai, kadangi viršutinė juosta ir sienutė yra 1 klasės. Plastinis įtempių pasiskirstymas pavaizduotas 2.3 pav.



2.3 pav. HSQ sijos plastinis įtempių pasiskirstymas

Lenkiamoji galia skaičiuojama pagal formulę:

$$M_{pl,Rd,y} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.22)$$

Čia: W_{pl} – plastinis atsparumo momentas

Išnaudojimas yra didesnis už 0.5, todėl mažinamas sienutės stipris. Skaičiuojame koef.:

$$\rho = \left(2 \cdot \frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1\right)^2 = (2 \cdot 0,836 - 1)^2 = 0,451 \quad (2.23)$$

$$f_{y,web}=(1-\rho)\cdot f_y=(1-0,451)\cdot 355=194,93 \text{ MPa} \quad (2.24)$$

Sijos apatinės juostos išnaudojimas yra virš 0,5, todėl reikia naudoti efektyvųjį apatinės juostos plotį:

$$b_{f,2,eff}=b_{f,2}\cdot\sqrt{1-\left(\frac{M_{p,Ed}}{M_{p,Pl,Rd}}\right)^2}=870\cdot\sqrt{1-(0,815)^2}=504,233 \text{ mm} \quad (2.25)$$

Juostų atsparumo momentas:

$$\begin{aligned} W_{pl,y,f}&=\left(b_{f,2,eff}\cdot t_{f,2}\cdot\left(z_{pl,y}-\frac{t_{f,2}}{2}\right)\right)+\left(b_{f,1}\cdot t_{f,1}\cdot\left(h-z_{pl,y}-\frac{t_{f,1}}{2}\right)\right)= \\ &=\left(504,233\cdot 12\cdot\left(292-\frac{12}{2}\right)\right)+\left(630\cdot 20\cdot\left(412-292-\frac{20}{2}\right)\right)=3,117\cdot 10^6 \text{ mm}^3 \end{aligned} \quad (2.26)$$

Sienelių atsparumo momentas:

$$\begin{aligned} W_{pl,y,w}&=2\cdot\left(t_w\cdot(z_{pl,y}-t_{f,2})\cdot\frac{(z_{pl,y}-t_{f,2})}{2}+t_w\cdot(h_w-z_{pl,y}+t_{f,2})\cdot\frac{(h_w-z_{pl,y}+t_{f,2})}{2}\right)= \\ &=t_w\cdot\left((z_{pl,y}-t_{f,2})^2+(h_w-z_{pl,y}+t_{f,2})^2\right)=6\cdot\left((292-12)^2+(380-292+12)^2\right)=0,53\cdot 10^6 \text{ mm}^3 \end{aligned} \quad (2.27)$$

Plastinė lenkiamoji galia:

$$\begin{aligned} M_{pl,Rd}&=W_{pl,y,w}\cdot f_{y,web}+W_{pl,y,f}\cdot f_y=3,117\cdot 10^6\cdot 194,93+0,53\cdot 10^6\cdot 355= \\ &=1209,758\cdot 10^6 \text{ Nmm}=1209,758 \text{ kNm} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Išnaudojimas lenkimui ties sijos viduriu:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}}=\frac{1209,46}{1209,758}=1 \quad (2.29)$$

Indukuotas juostos klupimas sienutės plokštumoje. Kad klupimas neįvyktų, turi būti tenkinama sąlyga:

$$\frac{h_w}{t_w}\leq k\cdot\frac{E}{f_{yf}}\cdot\sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} \quad (2.30)$$

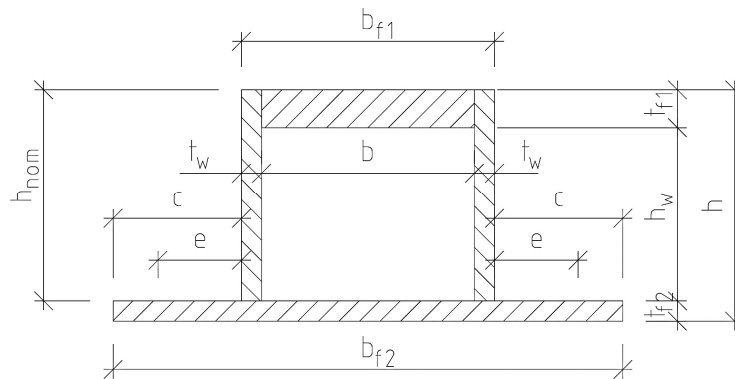
Čia: k – koeficientas, priklausantis nuo sijos klasės. Kai klasė antra, koef. lygus 0,4.

A_w – sienelių plotas; A_{fc} – gniuždomos juostos plotas; f_{yf} – gniuždomos juostos stipris

$$\frac{380}{6}=63,333<0,4\cdot\frac{210000}{355}\cdot\sqrt{\frac{2\cdot 2\cdot 380}{630\cdot 20}}=142,347$$

Sąlyga tenkinama, todėl klupimas neįvyks.

2.3. HSQ sijų skaičiavimas pagal Eurokodą, darant prielaidą, kad skerspjūvis negali pasiekti plastinės laikomosios galios



2.4 pav. HSQ sijos matmenys

Numatoma, kad šiame skyriuje skaičiuojama sija negalės pasiekti plastinės laikomosios galios. Šią prielaidą patikrinsime. Skaičiuosime siją pagal 2.2 lent. pateiktą atvejį 3.1.

2.4 lent. HSQ sijos matmenys

h_{nom}	t_w	$t_{f,1}$	$t_{f,2}$	$b_{f,1}$	$b_{f,2}$	c	b	h_w	h
320	5	20	16	540	780	120	530	300	336

Tikrinama pagal įrašas: $M_{Ed}=890,19$ kNm, $V_{Ed}=586,48$ kN.

Skerspjūvio elementų priskyrimas klasėms. Skaičiuojame skerspjūvio plotą:

$$A_{sijos}=2 \cdot t_w \cdot h_w + t_{f,1} \cdot b_{f,1} + t_{f,2} \cdot b_{f,2} = 2 \cdot 5 \cdot 300 + 20 \cdot 540 + 16 \cdot 780 = 26280 \text{ mm}^2 \quad (2.31)$$

Skaičiuojamas neutraliosios tampriosios ašies atstumas nuo sijos apačios:

$$z_{0,y} = \frac{\left(\frac{b_{f,2} \cdot t_{f,2}^2}{2} + 2 \cdot t_w \cdot h_w \cdot \left(\frac{h_w}{2} + t_{f,2} \right) + t_{f,1} \cdot b_{f,1} \cdot \left(\frac{t_{f,1}}{2} + h_w + t_{f,2} \right) \right)}{A_{sijos}} =$$

$$= \frac{\left(\frac{780}{2} \cdot 16^2 + 2 \cdot 5 \cdot 300 \cdot \left(\frac{300}{2} + 16 \right) + 16 \cdot 540 \cdot \left(\frac{20}{2} + 300 + 16 \right) \right)}{26280} = 156,721 \text{ mm} \quad (2.32)$$

Inercijos momentas neutraliosios ašies atžvilgiu yra skaičiuojamas visiems sijos elementams atskirai ir susumuojamas.

Viršutinė juosta:
$$I_{y,f,1} = \frac{b_{f,1} \cdot t_{f,1}^3}{12} + b_{f,1} \cdot t_{f,1} \cdot \left(z_{0,y} - h + \frac{t_{f,1}}{2} \right)^2 =$$

$$= \frac{540 \cdot 20^3}{12} + 540 \cdot 20 \cdot \left(156,721 - 336 + \frac{20}{2} \right)^2 = 30,984 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 \quad (2.33)$$

Apatinė juosta:
$$I_{y,f,2} = \frac{b_{f,2} \cdot t_{f,2}^3}{12} + b_{f,2} \cdot t_{f,2} \cdot \left(z_{0,y} - \frac{t_{f,2}}{2} \right)^2 =$$

$$= \frac{780 \cdot 12^3}{16} + 780 \cdot 13 \cdot \left(156,721 - \frac{16}{2} \right)^2 = 27,63 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 \quad (2.34)$$

Sienutė:
$$I_{y,w} = \frac{t_w \cdot h_w^3}{12} + t_w \cdot h_w \cdot \left(z_{0,y} - t_{f,2} - \frac{h_w}{2} \right)^2 =$$

$$= \frac{5 \cdot 300^3}{12} + 5 \cdot 300 \cdot \left(156,721 - 16 - \frac{300}{2} \right)^2 = 1,138 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 \quad (2.35)$$

Bendras inercijos momentas y ašies atžvilgiu:

$$I_y = I_{y,f,1} + I_{y,f,2} + 2 \cdot I_{y,w} = 30,984 \cdot 10^7 + 27,63 \cdot 10^7 + 2 \cdot 1,138 \cdot 10^7 = 60,889 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 \quad (2.36)$$

Skaičiuojama viršutinės juostos klasė. Viršutinės juostos pločio ir storio santykis:

$$\frac{b_{f,1} - 2 \cdot t_w}{t_{f,1}} = \frac{540 - 2 \cdot 5}{20} = 26,5 \quad (2.37)$$

Juosta priklauso 2 klasei, kadangi pastarasis santykis:

$$26,5 < 33 \cdot \varepsilon = 33 \cdot 0,814 = 26,849 \quad (2.38)$$

Sienelių skerspjūvio klasė šioje dalyje priklauso nuo skerspjūvio elementų matmenų ir koeficiento α , kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\alpha = \left(h_w - (z_{pl,y} - t_{f,2}) \right) = (300 - (82 - 16)) = 0,78 \quad (2.39)$$

Čia: $z_{pl,y}$ – plastinė neutralioji ašis, kurią skaičiuojame pagal formulę:

$$z_{pl,y} = \frac{\left(\frac{A_{sijos}}{2} - t_{f,2} \cdot b_{f,2} \right)}{2 \cdot t_w} + t_{f,2} = \frac{\left(\frac{26280}{2} - 16 \cdot 780 \right)}{2 \cdot 5} + 16 = 82 \text{ mm} \quad (2.40)$$

Sienutės aukščio ir storio santykis:
$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{300}{6} = 50 \quad (2.41)$$

Ribinis santykis antrai klasei:
$$\frac{456 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} = \frac{456 \cdot 0,814}{13 \cdot 0,78 - 1} = 40,592 \quad (2.42)$$

Ribinis santykis pirmai klasei:
$$\frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1} = \frac{396 \cdot 0,814}{13 \cdot 0,78 - 1} = 35,251 \quad (2.43)$$

Sienutė priklauso žemesnei nei antrai klasei, kadangi $50 > 40,592$. Skaičiuosime ar sienutė gali būti priskiriama bent trečiai klasei, kadangi ketvirta klasė HSQ sijoms neleistina:

$$\varphi_w = \frac{z_{0,y} - t_{f,2}}{h_w - (z_{0,y} - t_{f,2})} = \frac{156,721 - 16}{300 - (156,721 - 16)} = -0,833 > -1 \quad (2.44)$$

Ribinis sienutės aukščio ir storio santykis:

$$\frac{42 \cdot \varepsilon}{0,67+0,33 \cdot \varphi_w} = \frac{42 \cdot 0,814}{0,67+0,33 \cdot (-0,833)} = 90,295 \quad (2.45)$$

Sienutė priklauso trečiai klasei, kadangi $50 < 90,295$. Pagal žemiausios klasės skerspjūvio elementą nustatoma, kad skerspjūvio klasė yra trečia. Taigi, šiai sijai naudosime platinį įtempių pasiskirstymą.

$$\text{Apatinės juostos lenkimas: } M_{p,Ed} = e \cdot Q_{max} = 80 \cdot 97,747 = 7819 \text{ kNmm} = 7,819 \text{ kNm} \quad (2.46)$$

Apatinės juostos vieno tiesinio metro lenkiamoji galia:

$$M_{el,Rd} = \frac{t_f \cdot 2^2}{6} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{16^2}{6} \cdot \frac{355}{1} = 15147 \text{ kNmm} = 15,147 \text{ kNm} \quad (2.47)$$

Čia: $\gamma_{M0} = 1$

Skaičiuojame apatinės juostos stiprio išnaudojimą:

$$\frac{M_{p,Ed}}{M_{p,el,Rd}} = \frac{7,819}{15,147} = 0,516 \quad (2.48)$$

Tangentinių įtempių tikrinimas. Jei tikrinama pagal tamprųjų įtempių pasiskirstymą kritiniame taške, tai naudojama formulė:

$$\frac{\tau_{Ed}}{\frac{f_y}{(\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0})}} = \frac{202,461}{\frac{355}{(\sqrt{3} \cdot 1)}} = 0,988 < 1 \quad (2.49)$$

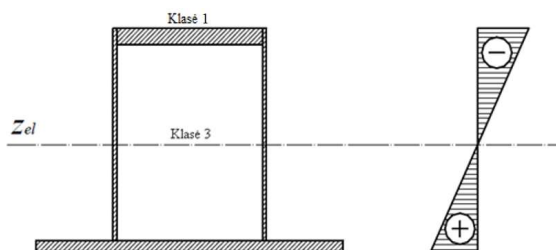
Čia: τ_{Ed} – tangentiniai įtempiai

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} \cdot S}{I \cdot t} = \frac{586,48 \cdot 10^3 \cdot 2,102 \cdot 10^{-3}}{6,089 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 0,05} = 202,461 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 202,461 \text{ Mpa} \quad (2.50)$$

Čia: S – statinis skerspjūvio dalies tarp taško, kuriame skaičiuojama šlytis, ir skerspjūvio krašto momentas aplink sunkio centro ašį; I – viso skerspjūvio inercijos momentas; t – sienučių storis.

$$\begin{aligned} S &= \frac{\left(h - z_{0,y} - \frac{t_{f,1}}{2}\right) \cdot (b_{f,1} \cdot t_{f,1}) + \left(h - z_{0,y} - \frac{t_{f,1}}{2}\right) \cdot 2t_w \cdot \frac{\left(h - z_{0,y} - \frac{t_{f,1}}{2}\right)}{2}}{10^9} = \\ &= \frac{\left(336 - 156,721 - \frac{20}{2}\right) \cdot (540 \cdot 35) + \left(336 - 156,721 - \frac{20}{2}\right) \cdot 2 \cdot 5 \cdot \frac{\left(336 - 156,721 - \frac{20}{2}\right)}{2}}{10^9} = \\ &= 2,102 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (2.51)$$

Tangentiniai įtempiai neviršija leistinos normos. Toliau skaičiuojama *lenkiamoji galia*.



2.5 pav. HSQ sijos tamprus įtempių pasiskirstymas

Lenkiamoji galia pagal efektyvųjį skerspjūvio plotą bendruoju atveju skaičiuojama:

$$M_{el,Rd,y} = \frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{I_y}{(h-z_{0,y}) \cdot \gamma_{M0}} \quad (2.52)$$

Apatinės juostos išnaudojimas lenkimui yra didesnis už 0.5, todėl reikia mažinti apatinės juostos skaičiuojamąją plieno takumo ribą:

$$f_{y,eff} = f_y \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{M_{p,Ed}}{M_{p,el,Rd}} \right)^2} = 355 \cdot \sqrt{1 - (0,516)^2} = 304,031 \text{ MPa} \quad (2.53)$$

Skaičiuojame lenkiamąją galią:

$$M_{el,Rd} = \frac{I_{y,f1}}{(h-z_{0,y}) \cdot \gamma_{M0}} \cdot f_y + \frac{I_{y,f2}}{(h-z_{0,y}) \cdot \gamma_{M0}} \cdot f_{y,eff} + \frac{I_{y,w}}{(h-z_{0,y}) \cdot \gamma_{M0}} \cdot f_y \quad (2.54)$$

$$M_{el,Rd} = \frac{30,984 \cdot 10^{-2}}{(336-156,721) \cdot 1} \cdot 355 + \frac{27,63 \cdot 10^{-2}}{(336-156,721) \cdot 1} \cdot 304,031 + \frac{1,138 \cdot 10^{-2}}{(336-156,721) \cdot 1} \cdot 355 =$$

$$1127,156 \cdot 10^3 \text{ Nm} = 1127,156 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{el,Rd}} = \frac{890,19}{1127,156} = 0,79 \quad (2.55)$$

Įtempių tikrinimas labiausiai tempiamoje zonoje atliekamas sijos viduryje. Atsparumo momentas tempiamo krašto atžvilgiu:

$$W_{el,y,t} = \frac{I_y}{z_{0,y}} = \frac{60,889 \cdot 10^7}{156,721} = 3,885 \cdot 10^6 \text{ mm}^3 \quad (2.56)$$

Skaičiuotiniai vietiniai išilginiai įtempiai:

$$\sigma_x = - \frac{2 \cdot q \cdot l^2}{8 W_{el,y,t}} = - \frac{2 \cdot 97,747 \cdot 6000^2}{8 \cdot 3,885 \cdot 10^6} = -226,429 \text{ MPa} \quad (2.57)$$

Skaičiuotiniai vietiniai skersiniai įtempiai vienam metrui sijos ilgio:

$$\sigma_y = \frac{q \cdot e}{W_{p,el}} = \frac{97,747 \cdot 80}{4,267 \cdot 10^4} = 183,276 \text{ MPa} \quad (2.58)$$

Čia: $W_{p,el}$ – tamprusis apatinės juostos atsparumo momentas vienam metrui sijos ilgio:

$$W_{p,el} = \frac{l \cdot t_{f2}^2}{6} = \frac{1000 \cdot 16^2}{6} = 4,267 \cdot 10^4 \text{ mm}^3 \quad (2.59)$$

τ – tangentiniai įtempiai sijos viduryje lygūs nuliui

Suminiai įtempiai sijos apačioje:

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau^3} \quad (2.60)$$

$$\sqrt{(-226,429)^2 + 183,276^2 - (-226,429) \cdot 183,276 + 3 \cdot 0^3} = 355 \text{ MPa} \leq f_y = 355 \text{ MPa}$$

Įtempiai tempiamoje zonoje neviršija takumo ribos. Toliau atliekamas **įtempių tikrinimas labiausiai gniuždomoje zonoje**. Tikrinama sijos viduryje. Atsparumo momentas gniuždomo krašto atžvilgiu ir įtempiai:

$$W_{el,y,t} = \frac{I_y}{h - z_{0,y}} = \frac{60,889 \cdot 10^7}{336 - 156,721} = 3,396 \cdot 10^6 \text{ mm}^3 \quad (2.61)$$

$$\sigma_x = -\frac{\frac{2 \cdot q \cdot l^2}{8}}{W_{el,y,t}} = -\frac{\frac{2 \cdot 97,747 \cdot 6000^2}{8}}{3,396 \cdot 10^6} = -259,091 \text{ MPa} \quad (2.62)$$

Skaič. vietiniai skersiniai įtempiai sijos viršuje lygūs nuliui: $\sigma_y = 0$. Suminiai įtempiai:

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau^3} = \sqrt{(-259,09)^2 + 0^2 - (-259,09) \cdot 0 + 3 \cdot 0^3} = 259,09 \text{ MPa} \leq f_y = 355 \text{ MPa} \quad (2.63)$$

Įtempiai gniuždomoje zonoje neviršija takumo ribos.

Indukuotas juostos klupumas sienutės plokštumoje. Kad klupimas neįvyktų, turi būti tenkinama sąlyga:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \cdot \frac{E}{f_{yf}} \cdot \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} \quad (2.64)$$

Čia: k – koeficientas, priklausantis nuo sijos klasės. Kai klasė trečia, jis lygus 0,55.

A_w – sienelių plotas; A_{fc} – gniuždomos juostos plotas; f_{yf} – gniuždomos juostos stipris.

$$\text{Klupimas neįvyks, nes: } \frac{300}{5} = 60 < 0,55 \cdot \frac{210000}{355} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot 300}{540 \cdot 20}} = 171,476$$

2.4. Skyriaus rezultatai ir išvados

Pagal pateiktas metodikas skaičiuojame likusių skerspjūvių atsparumą. Kiekvienam apkrovų variantui parenkame po keletą skerspjūvių. Iš pradžių projektuojame siauresnes sijas. Vėliau sijas parenkame platesnes, o jų juostas – plonesnes. Visi rezultatai pateikiami 2.5 lent., o sijų skerspjūvių matmenys – 1 priede. Mažiausi skerspjūviai paryškinti, o ribojanti sąlyga parašyta kursyvu.

2.5 lent. HSQ sijų parinkimo rezultatai

Sijos žymėjimas	Sijos skerspjūvio plotas, cm ²	Sienutės klasė	Viršutinės juostos	Tamprus (T) arba plastiškas (P) darbas	Apatinės juostos išnaudojimas lenkimui	Sienutės šlyjamosios galios išnaudojimas	Tangentiniai įtempiai sienutėje -	Šlyjamoji galia, vertinant klupumą	Sijos išnaudojimas lenkimui	Viršutinės juostos klupimo sąlyga	Įtempių tempiamoje zonoje sąlyga	Įtempių gniuždomoje zonoje sąlyga
M-1.1a	130,8	1	1	P	0,202	0,946	-	-	0,985	0,491	-	-
M-1.1b	128,0	1	1	P	0,275	0,903	-	-	0,991	0,493	-	-
M-1.1c	125,8	2	1	P	0,396	0,874	-	-	0,998	0,495	-	-
M-1.1d	131,3	2	1	P	0,396	0,869	-	-	0,955	0,505	-	-
M-1.2a	290,1	1	1	P	0,051	0,804	-	-	0,987	0,244	-	-
M-1.2b	283,0	1	1	P	0,082	0,754	-	-	0,991	0,256	-	-
M-1.2c	280,7	1	1	P	0,099	0,731	-	-	0,993	0,260	-	-
M-1.3a	511,0	1	1	P	0,033	0,919	-	-	0,995	0,237	-	-
M-2.1a	168,5	1	1	P	0,248	0,934	-	-	0,992	0,444	-	-
M-2.1b	163,8	1	1	P	0,440	0,893	-	-	0,999	0,453	-	-
M-2.1c	164,5	1	1	P	0,440	0,886	-	-	0,999	0,446	-	-
M-2.1d	183,4	1	2	P	0,633	0,732	-	-	0,995	0,280	-	-
M-2.2a	364,0	1	1	P	0,071	0,963	-	-	1,000	0,318	-	-
M-2.2b	358,4	1	1	P	0,131	0,876	-	-	0,992	0,327	-	-
M-2.3a	648,3	1	1	P	0,025	1,000	-	-	0,999	0,217	-	-
M-2.3b	631,6	1	1	P	0,039	0,901	-	-	0,999	0,227	-	-
M-3.1a	194,6	1	1	P	0,450	0,987	-	-	1,000	0,576	-	-
M-3.1b	187,9	1	1	P	0,450	0,970	-	0,981	0,997	0,548	-	-
M-3.1c	187,5	1	1	P	0,450	0,593	-	-	1,000	0,236	-	-
M-3.1d	262,8	3	1	T	0,517	-	0,988	-	0,790	0,642	1,000	0,730
M-3.2a	403,2	1	1	P	0,098	0,994	-	-	0,997	0,389	-	-
M-3.2b	394,4	1	1	P	0,221	0,925	-	-	1,000	0,403	-	-
M-3.2c	391,4	1	2	P	0,272	0,909	-	-	1,000	0,300	-	-

2.5 lent. pabaiga. HSQ sijų parinkimo rezultatai

M-3.3a	704,1	1	1	P	0,035	0,994	-	-	1,000	0,268	-	-
M-3.3b	686,0	1	1	P	0,072	0,867	-	-	0,997	0,276	-	-
M-4.1a	207	2	1	P	0,459	0,859	-	0,908	1,000	0,470	-	-
M-4.1b	219	2	1	P	0,522	0,847	-	0,908	0,999	0,488	-	-
M-4.1c	213,6	1	1	P	0,459	0,515	-	-	0,997	0,197	-	-
M-4.1d	276,0	1	2	P	0,815	0,836	-	-	1,000	0,445	-	-
M-4.1e	368,6	3	3	T	0,543	-	0,836	-	0,603	0,357	0,899	0,541
M-4.2a	439,4	1	1	P	0,188	0,993	-	-	1,000	0,471	-	-
M-4.2b	432,0	1	2	P	0,294	0,953	-	-	1,000	0,344	-	-
M-4.2c	432,2	1	2	P	0,363	0,953	-	-	1,000	0,354	-	-
M-4.3a	746,0	1	1	P	0,096	0,908	-	-	0,999	0,331	-	-
M-4.3b	732,4	1	1	P	0,131	0,883	-	-	1,000	0,329	-	-

Parinkus platesnes sijas, dauguma atvejų skerspjūvio plotas mažėja. Siauresnės sijos yra mažesnės klasės, todėl jų skerspjūvio elementai yra pastovūs ir gali pasiekti takumo ribą. Nors platesnės sijos turi mažesnį skerspjūvio plotą, jų elementai yra liaunesni. Iki tam tikros ribos platindami sijas pastebime, kad pagal Eurokodą [24] nebeleidžiama naudoti plastinio įtempių pasiskirstymo. Skaičiuojant pagal tamprųjų įtempių pasiskirstymą, skerspjūvio plotas padidėja daugiau nei 40 %. Taigi, norint, kad medžiagų sąnaudos būtų mažiausios, reikėtų sijas gaminti kuo platesnes, tačiau vengti jas platinti tiek, kad būtų nebegalima naudoti plastinio įtempių pasiskirstymo. Kita vertus, plastinis įtempių pasiskirstymas neleidžiamas retai. HSQ sijos tokiais atvejais yra bent 3–4 kartus platesnės nei sienutės aukštis. Prieš tyrimą buvo pasirinktas apribojimas, kad sijos bus iki 3,5 karto platesnės nei sienutės aukštis, todėl šiame tyrime dauguma atvejų sijų atsparumas pagal tamprųjų įtempių pasiskirstymą nebuvo tikrinamas.

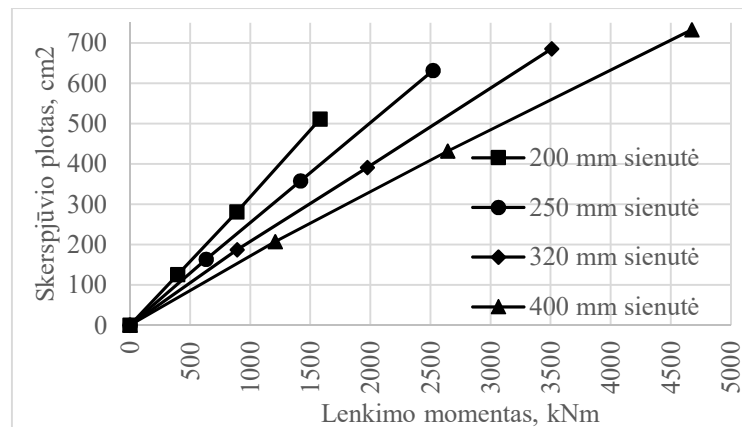
Net tais atvejais, kai plastinis įtempių pasiskirstymas leidžiamas, reikia atkreipti dėmesį į koeficientus, mažinančius lenkiamąją galią dėl didelio šlyjamosios galios išnaudojimo ir dėl didelio apatinės juostos lenkiamosios galios išnaudojimo. Koeficientas, kuris mažina lenkiamąją galią dėl šlyjamosios galios išnaudojimo, yra ne toks reikšmingas. Jis mažina tik sienutės stiprį. Šis sijos skerspjūvio elementas sudaro tik mažą dalį lenkiamosios galios, todėl bendram skerspjūvio ploto didėjimui turi mažą įtaką. Daug svarbesnis yra koeficientas, kuris mažina sijos lenkiamąją galią dėl didelio apatinės juostos išnaudojimo šoniam lenkimui. Šis koeficientas yra taikomas tik tuomet, kai apatinės juostos lenkiamoji galia išnaudojama daugiau nei 50 %. Dėl šio koeficiento

sijos skerspjūvio plotas didėjo iki 33 %. Taigi, norint, kad medžiagų sąnaudos būtų mažiausios, apatinės juostos lenkiamoji galia turėtų būti bent du kartus didesnė už šoninį lenkimo momentą.

Net tais atvejais, kai plastinis įtempių pasiskirstymas buvo leidžiamas, o apatinės juostos išnaudojimas neviršijo 50 %, pagal vienodą įrašą parinktų sijų skerspjūvio plotai buvo skirtingi. Siauresnėms sijoms medžiagų sąnaudos buvo 3–6 % didesnės.

Skaičiuojant pagal tamprųjų įtempių pasiskirstymą, ribojančios sąlygos buvo įtempiai labiausiai tempiamoje arba labiausiai gniuždomoje zonoje. Projektuojant pagal plastinį įtempių pasiskirstymą, dažniausiai ribojantis faktorius buvo plastinė lenkiamoji galia.

2.6 pav. pateikiamas grafikas, kuriame matoma priklausomybė tarp suprojektuoto skerspjūvio ploto ir siją veikiančio lenkimo momento. Skirtingomis spalvomis pažymėti atvejai, kuriuose buvo naudojami įvairūs sienutės aukščiai. Šiame grafike pateikiami tik tų sijų rezultatai (iš 2.5 lent.), kurių medžiagų sąnaudos kiekvienu apkrovimo atveju buvo mažiausios.



2.6 pav. Plieninių HSQ sijų skerspjūvio plotų-lenkimo momentų priklausomybės

Priklausomybės tarp siją veikiančio lenkimo momento ir skerspjūvio ploto visais atvejais buvo artimos tiesinėms. Efektyviausias būdas sijos atsparumo didinimui yra sijos aukščio didinimas. Palyginę kreives matome, kad veikiant 1500 kNm lenkimo momentui, 200 mm sienutės turi didžiausią skerspjūvio plotą. Jei šios sijos skerspjūvio plotą traktuotume kaip 100 %, tai 250 mm sienutės skerspjūvio plotas sudarytų 83 %, 320 mm – 66 %, o 400 mm sienutę turinčios sijos plotas tik 52 %. Taigi, padidinus sijos aukštį dvigubai, beveik tiek pat sumažėja ir skerspjūvio plotas. Kita vertus, tam tikras sienutės aukštis yra vienas dažniausiai pasitaikančių apribojimų, atsirandantis po perdangos plokščių projektavimo fazės. Taigi, tokiu būdu didinti sijos skerspjūvio efektyvumą dažniausiai nėra galimybės.

3. Teoriniai kompozitinių sijų skaičiavimai ir tyrimas baigtinių elementų metodu

3.1. Tyrimo baigtinių elementų metodu aprašymas

Norint modeliuoti būsimą eksperimentą ir ištirti kelis skirtingus teorinius variantus, buvo naudojamas trimatis baigtinių elementų modeliavimas. Naudojant baigtinių elementų metodą (toliau, BEM), tiriama konstrukcija sudalinama į mažas dalis – baigtinius elementus. Vėliau jie sujungiami mazguose. Sprendėjas („solver“) generuoja ir sprendžia tiesinių lygčių sistemą, priklausomai nuo modelio parametrų: $[K] \cdot \{u\} = \{F\}$ (3.1)

Čia: $[K]$ – globali standumo matrica; $\{u\}$ – globalus mazgo poslinkio vektorius; $\{F\}$ – ekvivalentinių mazginių jėgų globalus vektorius [30].

Pirmiausiai randami mazgų poslinkiai pagal lygtis $\{u\} = [K]^{-1} \cdot \{F\}$, o iš jų gaunami ir kiti kintamieji.

$$\text{Elemento standumo matricą galima užrašyti taip: } [K_e] = \int_{V_e} [B_e]^T \cdot [D_e] \cdot [B_e] \cdot dV \quad (3.2)$$

Čia: $[B_e]$ – elemento geometrinė matrica; $[D_e]$ – fizikinių konstantų modelio matrica; V_e – elemento tūris [33]

Sprendžiant netiesinius uždavinius, 3.1 lygtis įgyja tokią formą:

$$([\ ^tK_L] + [\ ^tK_{NL}]) \cdot \{u\} = \{F\} \quad (3.3)$$

Čia: $[\ ^tK_L]$ – globali tamprioji standumo matrica

$[\ ^tK_{NL}]$ – globali netamprioji standumo matrica

Užrašomos tampriosios ir netampriosios elemento standumo matricos:

$$[K_L^e] = \int_{V_e} [{}^tB_L^e]^T \cdot [{}^tD^{ep}] \cdot [{}^tB_L^e] \cdot dV \quad (3.4)$$

$$[{}^tK_{NL}^e] = \int_{V_e} [{}^tB_{NL}^e]^T \cdot [{}^t\sigma] \cdot [{}^tB_{NL}^e] \cdot dV \quad (3.5)$$

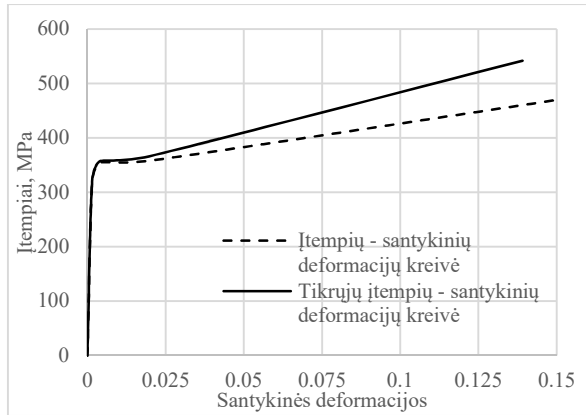
Čia: $[{}^tD^{ep}]$ – fizinių konstantų tamprumo matrica; $[{}^tB_L^e]$ – tamprioji deformacijų aproksimacinė matrica; $[{}^tB_{NL}^e]$ – netamprioji deformacijų aproksimacinė matrica; $[{}^t\sigma]$ – įtempių matrica [33].

Modeliavimui buvo naudota baigtinių elementų programa „ABAQUS/CAE“, kuri yra skirta įvairių inžinerinių modelių kūrimui ir analizei. Programa siūlo kelis uždavinių sprendimo būdus: „ABAQUS/Standard“ arba „ABAQUS/Explicit“. „ABAQUS/Standard“ yra įprastas sklandiems nelinijiniams uždaviniams. „ABAQUS/Explicit“ įprastai naudojamas įvairiems dinaminiam uždaviniams, smūgiams, bangų sklidimui nagrinėti. Magistro baigiamojo darbo modeliuose naudojamas „ABAQUS/Standard“. ABAQUS/Standard naudoja iteracijos procesą tam, kad būtų sprendžiami uždaviniai. Nelinijinės lygčių sistemos yra sprendžiamos iteracijos būdu kiekviename laiko žingsnyje [29].

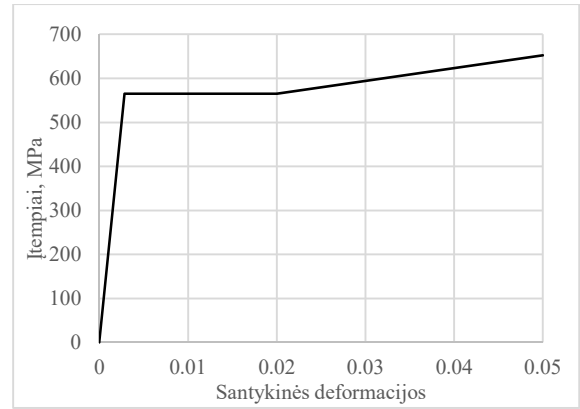
Kadangi modeliuojamos kompozitinės sijos, atsižvelgiama į plieno-betono sukibimą. Tiksliausias variantas būtų įvertinti sukibimą, naudojant dėsnį, vadinamą „traction-separation law“, tačiau, supaprastinant modeliavimą, pasirinkta naudoti skirtingas sukibimo prielaidas:

1. Standus sukibimas, naudojant „tie constraints“ komandą.
2. Modeliuojamas sukibimas, naudojant trintį tarp paviršių. Aprašoma, naudojant šias sąlygas:
 - Naudojamas trinties apibrėžimas – „penalty“.
 - Trinties koeficientas lygus 0,65.
3. Modeliuojamas sukibimas be trinties. Aprašoma, naudojant šias sąlygas:
 - Naudojamas trinties apibrėžimas – „frictionless“.

Plieno aprašymas programoje. Plieno tamprumo parametrai: tamprumo modulis $E=210000$ MPa, Puasono koeficientas $\nu=0,3$. Plastiškumo parametrai įvedami kaip tikrųjų deformacijų ir tikrųjų įtempių priklausomybė. Tikrosios deformacijos skiriasi nuo inžinerinių deformacijų, kurios dažnai naudojamos projektavime. Inžinerinių deformacijų skaičiavime vertinamas pradinis skerspjūvio plotas. Tikrosioms deformacijoms vertinamas skerspjūvio plotas, kuris yra tam tikru konstrukcijos apkrovimo momentu. Pavyzdžiui, tempiamo plieno skerspjūvis mažėja ir yra mažesnis nei neapkrautos sijos plotas. Taigi, tikrieji įtempiai yra didesni už inžinerinius. Atitinkamai skiriasi ir tikrosios deformacijos. Šiame darbe naudojamas konstrukcinis plienas S355 ir S500 klasės armatūra. Šių medžiagų įtempių-santykinų deformacijų kreivės pateikiamos 3.1 ir 3.2 pav.



3.1 pav. S355 klasės konstrukcinio plieno įtempių-santykinų deformacijų priklausomybė [31]



3.2 pav. S500 klasės armatūros plieno įtempių-santykinų inžinerinių deformacijų priklausomybė

Armatūros ir kitų medžiagų inžinerinės deformacijos ir įtempiai perskaičiuojami į tikruosius pagal šias formules:

$$\sigma_{tikrasis} = \sigma_{inžinerinis} \cdot (1 + \varepsilon_{inžinerinė}) \quad (3.6)$$

$$\varepsilon_{tikroji} = \ln(1 + \varepsilon_{inžinerinė}) \quad (3.7)$$

Iš bendrų tikrųjų deformacijų atimamos tampriosios deformacijos. Taip gauname plastines tikrąsias deformacijas, kurias ir reikia įvesti į „ABAQUS“ programą.

Betono aprašymas programoje. Betonas modeliuojamas, naudojant „concrete damaged plasticity“ (toliau, „CDP“) medžiagų modelį, pateiktą „ABAQUS“ programos aprašuose [30]. 3.3 pav. pateikiama schema, kuri apibūdina gniuždomo betono įtempių-santykinų deformacijų priklausomybę. Programoje pirmiausiai įvedami pagrindiniai parametrai: tamprumo modulis ir Puasono koeficientas. Vėliau įvedama priklausomybė tarp įtempių ir netamprių deformacijų. Netamprios deformacijos gaunamos iš bendros deformacijos atėmus įtempį, padalintą iš tamprumo modulio. Įtempiai pagal netiesinį betono modelį skaičiuojami pagal EC2 [27] formulę:

$$\sigma_c = \frac{f_{cm} \cdot k \cdot \eta - \eta^2}{1 + (k-2) \cdot \eta} \quad (3.8)$$

Čia:

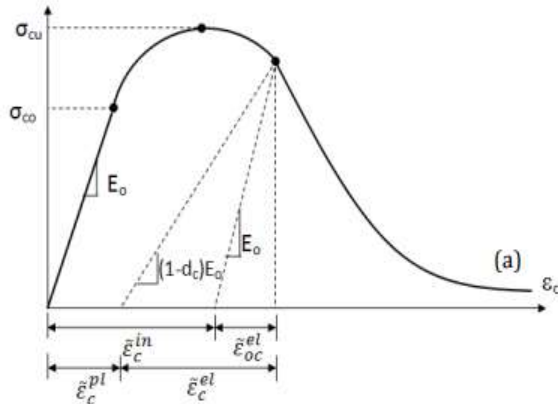
$$k = 1,05 \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}} \quad (3.9)$$

f_{cm} – betono vidutinis stipris

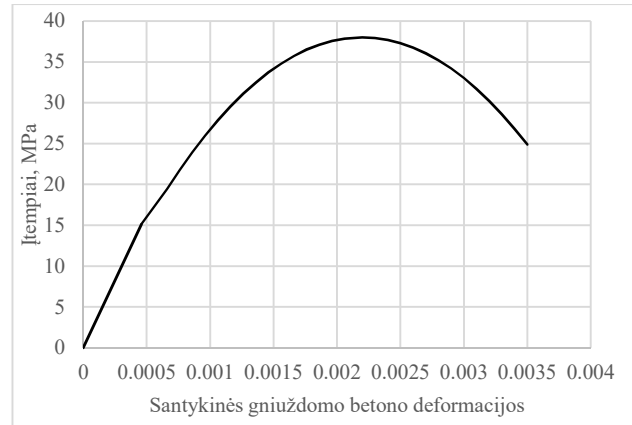
ε_{c1} – santykinė deformacija, kai yra didžiausias betono įtempis

$$\eta = 1,05 \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \quad (3.10)$$

Čia: ε_c – santykinė betono deformacija, skaičiuojant įtempį

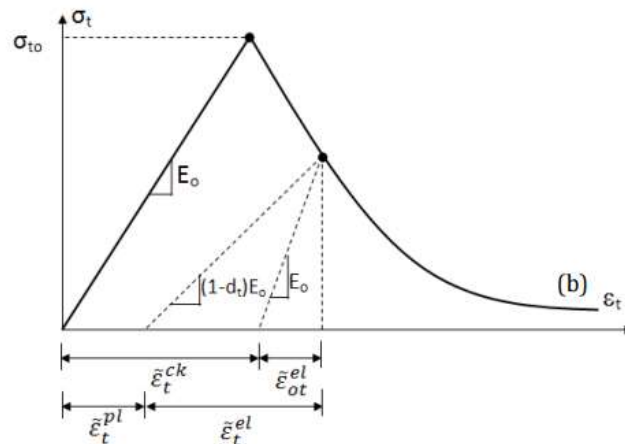


3.3 pav. „CDP“ betono modelis. Gniuždomo betono įtempių-santykinų deformacijų priklausomybė [30]



3.4 pav. Gniuždomo betono C30/37 netiesinė įtempių-santykinų deformacijų priklausomybė

Teoriškai nagrinėtuose 9 m ilgio sijų modeliuose naudojamos betono klasės C30/37 įtempių ir santykinų deformacijų kreivė pateikta 3.4 pav. 3.5 pav. pateikiama schema, kuri apibūdina tempiamo betono įtempių-santykinų deformacijų priklausomybę bendroju atveju.



3.5 pav. „CDP“ betono modelis. Tempiamo betono įtempių-santykinų deformacijų priklausomybė [30]

Mokslinėje literatūroje rekomenduojama vietoje to, kad betono darbas būtų aprašomas pagal įtempių-santykinų deformacijų kreivę, aprašyti jį pagal įtempių-plyšio pločio priklausomybę. Toks aprašymas yra nepriklausomas nuo baigtinių elementų tinkelio dydžio ir todėl yra tikslesnis. Taigi, būtent pastarasis variantas ir pasirinktas.

Plyšiai betone pradeda atsiverti, pasiekus tempiamąjį stiprį f_{ctm} . Veikiant šiam įtempiui, plyšio plotis lygus 0. Toliau plyšio plotis iki reikšmės w_1 didėja pagal vieną tiesę, o vėliau prasideda spartesnis plyšio augimas pagal kitą tiesę. Betonas turi irimo energiją, reikalingą atverti

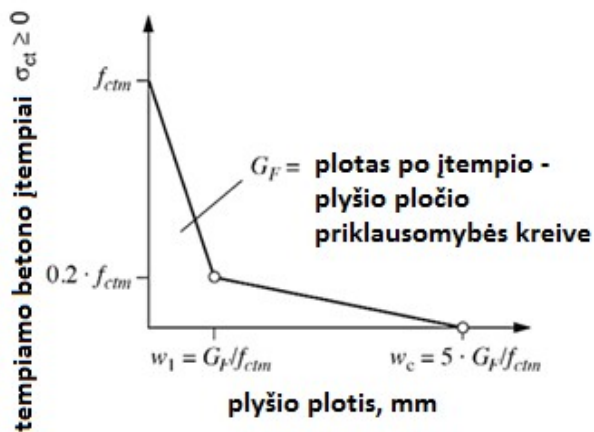
plyšiui vienetiniame plote. Irimo energija yra skirtinga kiekvienai betono klasei. Ji apskaičiuojama pagal formulę iš Fib Model Code [23] ir matuojama N/mm: $G_f = 73 \cdot f_{cm}^{0.18}$ (3.11)

Čia: f_{cm} – vidutinis betono stipris, MPa.

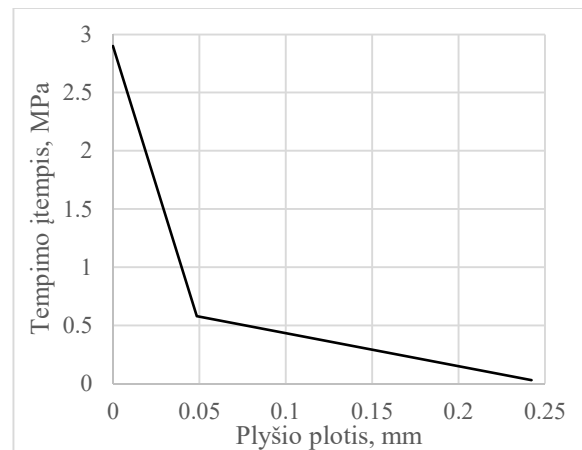
Plyšių pločiai milimetrais: $w_1 = \frac{G_f}{f_{ctm}}$ (3.12)

$$w_c = \frac{5 \cdot G_f}{f_{ctm}} \quad (3.13)$$

ABAQUS programoje įtempių reikšmės negali būti lygios nuliui, todėl esant plyšio pločiui w_c nulinė įtempio reikšmė keičiama į $\frac{f_{ctm}}{100}$.



3.6 pav. Tempiamo betono įtempių-plyšio pločio priklausomybė pagal CEB FIB [23]



3.7 pav. Tempiamo betono C30/37 įtempių-plyšio pločio priklausomybė

Betono C30/37 tamprumo parametrai: tamprumo modulis – $E_0 = 33000$ MPa, Puasono koeficientas – $\nu = 0,2$. Betono plastiškumo kriterijai (standartiniai, rekomenduojami „ABAQUS“ [30]): potencialaus plastiško paviršiaus ekscentriškumas – 0,1; dviašių ir vienašių įtempių santykis – 1,16; parametras K – 0,67; klampumo parametras – $1 \cdot 10^{-5}$; „dilation angle“ – 38° .

Skerspjūviai. Skirtingiems sijos elementams sukuriama skerspjūvių tipai: plieninis profilis, betonas, išilginė armatūra, plokštelės. Sukuriant skerspjūvį, jie iš karto yra susiejami su viena iš aprašytų medžiagų.

Baigtinių elementų tinkelio sudarymas. Plieniniam profiliui priskiriamas tinkelio tipas: C3D8R – 8 mazgų 3D linijinis elementas. Tinkelio elemento dydis – 20 mm eksperimentui ir 40–50 mm didžiosioms sijoms, kurias nagrinėjame tik teoriškai. Tinkelio tipas išilginei armatūrai:

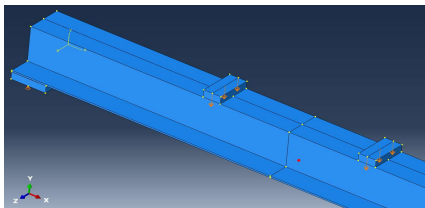
C3D8R – 8 mazgų 3D linijinis elementas. Tinklelio elemento dydis – 20 mm eksperimentui ir 50 mm didžiosioms sijoms, kurias nagrinėjame teoriškai. Tinklelio tipas betonui: C3D8R – 8 mazgų 3D linijinis elementas. Tinklelio elemento dydis betonui – 20 mm eksperimentui ir 50 mm didžiosioms sijoms, nagrinėjamos teoriškai.

Žingsniai. Kiekviename „ABAQUS“ modelyje yra pradinis žingsnis („initial“). Papildomai sukuriamas apkrovimo („load“) žingsnis. Pastarojo žingsnio metu atsiranda ribinės sąlygos, apkrovos, sąveikos. Apkrovimo žingsnio tipas – „static, general“.

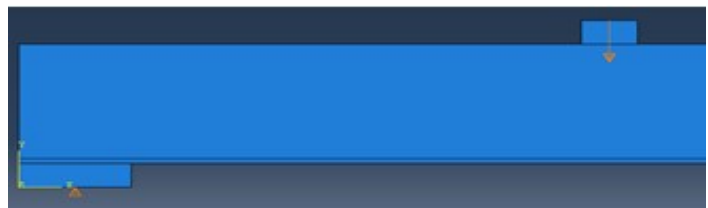
Ribinės sąlygos ir apkrovos. Eksperimento atveju sijos yra atremiamos ant dviejų plokštelių. Ant plokštelių apatinės plokštumos per vidurį brėžiama linija, naudojant „partition-face“ komandą. Šiai linijai priskiriame atramą. Ant vienos plokštelės yra šarnyrinė atrama, o ant kitos – paslanki šarnyrinė.

Realių sijų atveju plokštelės yra prijungiamos prie HSQ sijos galų, naudojant „tie constraints“ komandą. Ant vienos iš plokštelių vidinių plokštumų brėžiamos linijos, kurios jas sudalina į dvi dalis. Šioms linijoms priskiriamos atramos. Plokštelės yra su kiauryme, kadangi šioje vietoje sija užmaunama ant atramos.

Eksperimento atveju (3.9 pav.) sija apkraunama per viršutines plokšteles. Apkrovimo plokštelės yra pritvirtintos prie sijos viršaus. Apkrova formuluojama kaip poslinkis. Taigi, įvedame ne iš anksto nustatytą maksimalią apkrovą, o maksimalų poslinkį. Atlikus skaičiavimus, norint sužinoti kokia jėga veikė plokšteles, gaunamos atraminės reakcijos į apkrovos pridėjimo linijas. Kitas mums aktualus kintamasis yra vidurinio sijos taško poslinkis. Taigi, po skaičiavimų turime atraminės plokštelės reakcijos R priklausomybę nuo vidurinio taško poslinkio z kryptimi. Galiausiai perskaičiuojame reakciją į sijos viduryje veikiančią lenkimo momentą.



3.8 pav. Eksperimento sijų apkrovimas, atrama ir vidurinis sijos taškas



3.9 pav. Eksperimente naudojamų sijų apkrovimas, paslanki šarnyrinė atrama

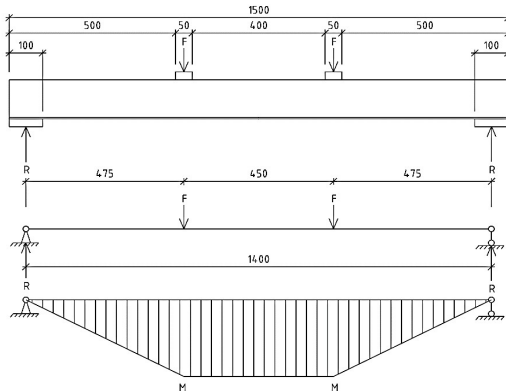
Teoriškai nagrinėjamos sijos atveju (3.11 pav.) apkraunamos sijų apatinės juostos. Tam naudojamos išskirstytos 1,5 MPa (1500 kN/m²) apkrovos. Tai reiškia, kad palaipsniui, kintant skaičiavimo žingsniui, apkrova didėja iki 1,5 MPa reikšmės. Kad būtų sužinota išskirstyta apkrova q tam tikrame žingsnyje, gaunamos atraminių sijos plokštelių reakcijos R ir perskaičiuojamos į q :

$$q = \frac{2 \cdot R}{L} \quad (3.14)$$

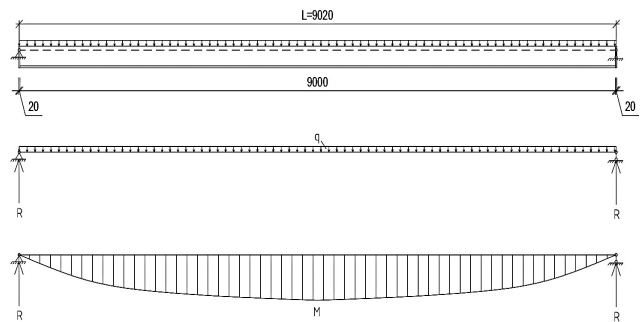
Čia: L – sijos ilgis

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8} \quad (3.15)$$

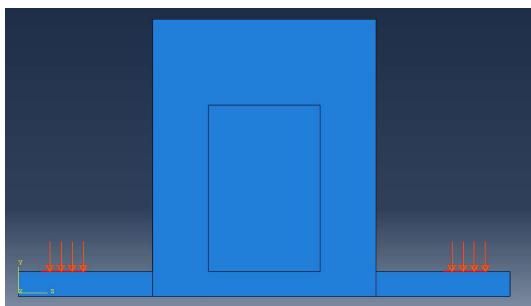
Galutinis teoriškai nagrinėjamų sijų rezultatas yra lenkimo momentų ir įlinkių priklausomybės. Toliau pateikiamos eksperimento sijų ir teoriškai nagrinėjamų sijų skaičiuojamosios schemas.



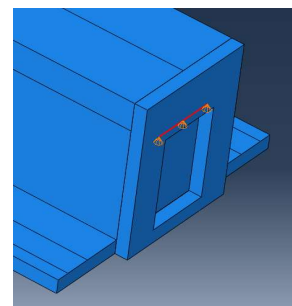
3.10 pav. Eksperimento sijų skaičiuojamoji schema ir lenkimo momentų diagrama



3.11 pav. Teoriškai nagrinėjamų sijų skaičiuojamoji schema ir lenkimo momentų diagrama



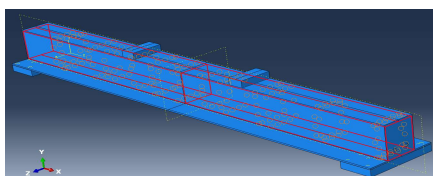
3.12 pav. Teoriškai nagrinėjamos sijų apkrovimas



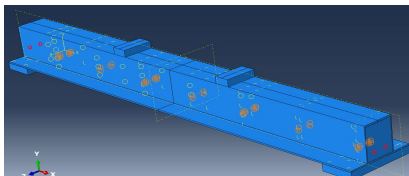
3.13 pav. Teoriškai nagrinėjamos sijos galinės plokštelės atrama

Suvaržymai. Kadangi modeliuojama konstrukcija, susidedanti iš keleto dalių (plieninis profilis, armatūra, betonas), reikia numatyti sąveiką tarp šių dalių. Pagrindiniai suvaržymai:

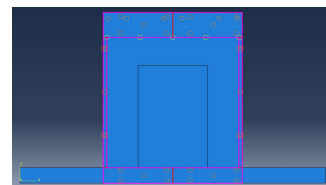
- Tarp plieninio profilio ir betono: standus sukibimas („tie“), trintis („friction“) arba be trinties („frictionless“).
- Išilginė armatūra ir betonas. Standus sukibimas („tie“).
- Plieninis profilis ir atraminės plokštelės. Standus sukibimas („tie“).



3.14 pav. Sukibimas tarp plieninio profilio ir betono



3.15 pav. Sukibimas tarp betono ir armatūros



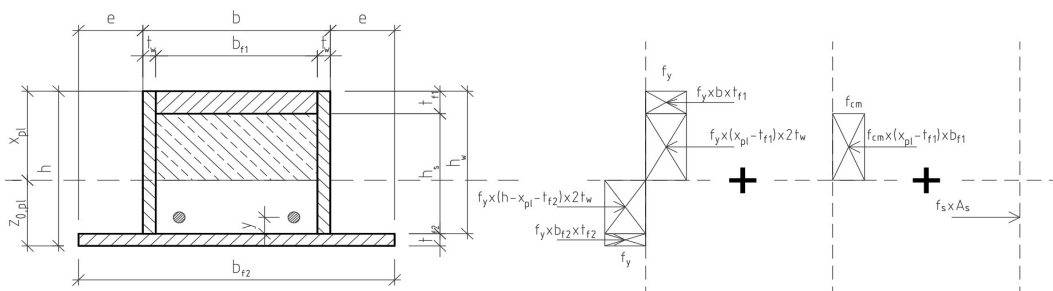
3.16 pav. Sukibimas tarp HSQ sijos ir atraminės plokštelės

3.2. Sijų parinkimas pagal vienodą skerspjūvio plotą ir jų tyrimas

3.2.1. Sijų parinkimas

Šiame skyriuje atliekamas kompozitinių HSQ ir trapecinių sijų tyrimas baigtinių elementų metodu. Kad būtų galima sijas modeliuoti baigtinių elementų programoje, jų skerspjūvius preliminariai reikia parinkti, atliekant teorinius skaičiavimus. Tyrimams pasirenkamas atvejis, kai sijos ilgis yra lygus 9 m. Perdangos plokštės ilgis (apkrovos skaičiavimui) laikomas lygus 6 m. Pagal tokį atvejį įvertinama apkrova. Konstrukcijų matmenys yra panašūs į antrame skyriuje nagrinėtą variantą M-1.2. Tuo atveju gautos apkrovos suapvalinamos. Taigi, pirmoji šio skyriaus sijas parenkama pagal įrašas: $V_{Ek}=400 \cdot 10^3$ N, $M_{Ek}=900 \cdot 10^3$ Nm

Likusios sijos parenkamos taip, kad jų plieninio profilio ir armatūros skerspjūvio plotas būtų vienodas. Ženkliai (iki 2 kartų) skiriasi tik betono kiekis. Kita vertus, betonas yra pigesnė medžiaga. Be to, įrengiant perdangas, galima teigti, jog jei sija bus platesnė ir joje bus daugiau betono, tai betono bus sutaupoma gaminant perdangas. Taigi, koncentruojamasi į tai, jog būtų vienodas tik plieninio profilio ir armatūros plotas. Toliau pateikiami neutraliosios ašies, plieninio profilio šlyjamosios galios ir plastinės lenkiamosios galios skaičiavimai sijai A.



3.17 pav. Kompozitinės HSQ sijos skerspjūvio skaičiuojamoji schema

$$\frac{V_{Ek}}{V_{Pl.Rk}} = \frac{V_{Ek}}{A_v \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)} = \frac{V_{Ek}}{\eta \cdot 2 \cdot h_s \cdot t_w \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)} = \frac{397 \cdot 10^3}{1 \cdot 2 \cdot 210 \cdot 3 \left(\frac{355}{\sqrt{3}}\right)} = 0,923 \quad (3.16)$$

Sijos A matmenys: $h_w=250$ mm, $h_s=200$ mm, $t_{f,1}=50$ mm, $t_{f,2}=25$ mm, $t_w=5$ mm,

$b_{f,1}=190$ mm, $b=200$ mm, $b_{f,2}=440$ mm, $e=120$ mm, $h=275$ mm, $A_s=628$ mm²

Neutraliosios ašies atstumo nuo sijos viršaus formulė yra analogiška kaip ir būsimo eksperimento atveju (žr. 4 skyrių). Skirtumas tik tas, kad čia apkrova yra išskirstyta, o eksperimento atveju – koncentruota. Taigi, šiuo atveju nėra koeficiento, kuris dėl šlyjamosios galios išnaudojimo mažina sijos lenkiamąją galią. Eksperimente naudojamos formulės išvedimas pateikiamas 2 priede. Šiuo atveju skaičiuojama neutrali ašis $x_{pl,mba}$:

$$x_{pl,mba} = \frac{2 \cdot f_y \cdot h \cdot t_w - 2 \cdot f_y \cdot t_{f,2} \cdot t_w + f_y \cdot b_{f,2} \cdot t_{f,2} + f_s \cdot A_s \cdot b \cdot t_{f,1} \cdot f_y + f_{cm} \cdot b_{f,1} \cdot t_{f,1} + f_y \cdot t_{f,1} \cdot t_w \cdot 2}{2 \cdot f_y \cdot t_w + f_{cm} \cdot b_{f,1} + 2 \cdot f_y \cdot t_w} \quad (3.17)$$

$$x_{pl,mba} = \frac{2 \cdot 355 \cdot 275 \cdot 5 - 2 \cdot 355 \cdot 25 \cdot 5 + 355 \cdot 440 \cdot 25 + 565 \cdot 628 \cdot 190 \cdot 40 \cdot 355 + 38 \cdot 190 \cdot 50 + 355 \cdot 40 \cdot 5 \cdot 2}{2 \cdot 355 \cdot 5 + 38 \cdot 190 + 2 \cdot 355 \cdot 5} = 191,209 \text{ mm}$$

$$z_{0,pl,mba} = h - x_{pl,mba} = 275 - 191,209 = 83,791 \text{ mm} \quad (3.18)$$

Plastinė lenkiamoji galia:

$$M_{pl,mba} = b_{f,1} \cdot t_{f,1} \cdot f_y \cdot \left(x_{pl,mba} - \frac{t_{f,1}}{2}\right) + 2 \cdot t_w \cdot x_{pl,mba} \cdot f_y \cdot \frac{x_{pl,mba}}{2} +$$

$$+ f_{cm} \cdot b_{f,1} \cdot (x_{pl,mba} - t_{f,1}) \cdot \frac{(x_{pl,mba} - t_{f,1})}{2} +$$

$$+ f_y \cdot b_{f,2} \cdot t_{f,2} \cdot \left(z_{0,pl,mba} - \frac{t_{f,2}}{2}\right) + 2 \cdot t_w \cdot (z_{0,pl,mba} - t_{f,2}) \cdot \frac{(z_{0,pl,mba} - t_{f,2})}{2} + f_s \cdot A_s \cdot (z_{0,pl,mba} - t_{f,2} - y) \quad (3.19)$$

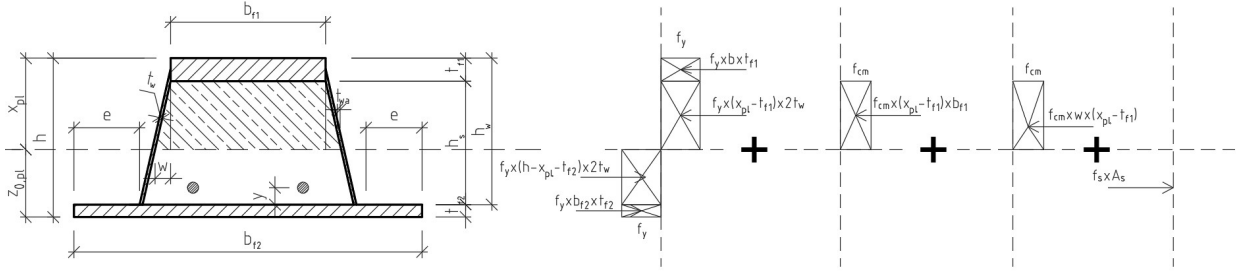
$$M_{pl,mba} = 190 \cdot 40 \cdot 355 \cdot \left(191,209 - \frac{40}{2}\right) + 2 \cdot 5 \cdot 126,038 \cdot 355 \cdot \frac{191,209}{2} +$$

$$+ 38 \cdot 190 \cdot (191,209 - 40) \cdot \frac{(191,209 - 50)}{2} +$$

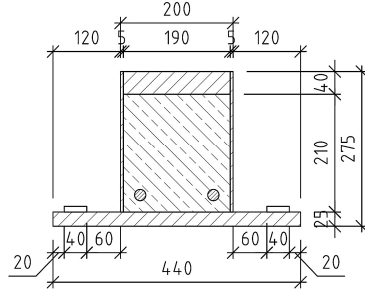
$$+ 355 \cdot 440 \cdot 25 \cdot \left(83,791 - \frac{25}{2}\right) + 2 \cdot 5 \cdot (83,791 - 25) \cdot \frac{(83,791 - 25)}{2} +$$

$$+ 565 \cdot 628 \cdot (83,791 - 25 - 30) = 971,55 \cdot 10^6 \text{ Nm} = 897,981 \text{ kNm}$$

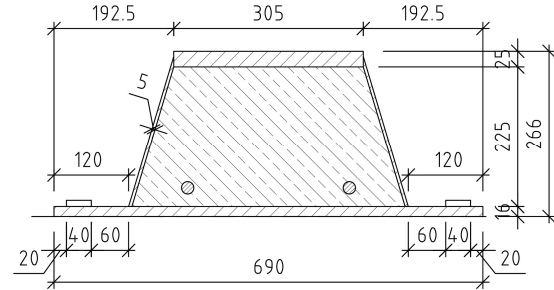
Toliau skaičiuojame trapecinio skerspjūvio kompozitinės sijos lenkiamąją galią. Visų pirma reikia išvesti neutraliosios ašies skaičiavimo formulę.



3.18 pav. Kompozitinės trapecinės sijos skerspjūvio skaičiuojamoji schema



3.19 pav. Kompozitinė HSQ sija A



3.20 pav. Kompozitinė trapecinė sija B

Sijos B matmenys: $h_w=250$ mm, $h_s=215$ mm, $t_{f,1}=25$ mm, $t_{f,2}=16$ mm, $t_w=5$ mm, $t_{wa}=5,1$ mm, $b_{f,1}=305$ mm, $b_{f,2}=690$ mm, $e=120$ mm, $h=266$ mm, $A_s=628$ mm² ($\varnothing 20$ mm)

Skaičiuojame neutraliosios ašies vietą. Kad ji būtų randama, iš trikampių panašumo sąlygos pirmiausiai apskaičiuojamas dydis w :

$$w = \frac{(x_{pl} - t_{f,1}) \cdot (b_{ab} - b_{f,1})}{2 \cdot h_s} \quad (3.20)$$

Čia: $b_{ab} = b_{f,2} - 2 \cdot e - 2 \cdot t_{wa} = 690 - 2 \cdot 120 - 2 \cdot 5,1 = 439,8$ mm (3.21)

Antrame priede išvedama trapecinės sijos neutraliosios ašies skaičiavimo lygtis:

$$x_{pl}^2 \left(\frac{b_{ab}}{2 \cdot h_s} - \frac{b_{f,1}}{2 \cdot h_s} \right) \cdot f_{cm} + x_{pl} \left(\frac{t_{f,1} \cdot b_{f,1}}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} - \frac{t_{f,1} \cdot b_{ab}}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} + \frac{b_{f,1} \cdot t_{f,1}}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} - \frac{b_{ab} \cdot t_{f,1}}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} + b_{f,1} \cdot f_{cm} + t_{wa} \cdot 2 \cdot f_{yk} + t_{wa} \cdot 2 \cdot f_{yk} \right) + \left(b_{f,1} \cdot t_{f,1} \cdot f_{yk} + \frac{t_{f,1}^2 \cdot (b_{ab} - b_{f,1})}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} - b_{f,1} \cdot t_{f,1} \cdot f_{cm} - t_{f,1} \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_{yk} - h \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_{yk} + t_{f,2} \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_{yk} - b_{f,2} \cdot t_{f,2} \cdot f_{yk} - A_s \cdot f_s \right) = 0 \quad (3.22)$$

Lygtis sprendžiama, skaičiuojant diskriminantą: $D = b^2 - 4 \cdot a \cdot c$ (3.23)

$$x_{pl} = \frac{-b + \sqrt{D}}{2 \cdot a} \quad (3.24)$$

$$a = \left(\frac{b_{ab}}{2 \cdot h_s} - \frac{b_{f,1}}{2 \cdot h_s} \right) \cdot f_{cm} \quad (3.25)$$

$$b = \left(\frac{t_{f,1} \cdot b_{f,1}}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} - \frac{t_{f,1} \cdot b_{ab}}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} + \frac{b_{f,1} \cdot t_{f,1}}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} - \frac{b_{ab} \cdot t_{f,1}}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} + b_{f,1} \cdot f_{cm} + t_{wa} \cdot 2 \cdot f_{yk} + t_{wa} \cdot 2 \cdot f_{yk} \right) \quad (3.26)$$

$$c = \left(b_{f,1} \cdot t_{f,1} \cdot f_{yk} + \frac{t_{f,1}^2 \cdot (b_{ab} - b_{f,1})}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} - b_{f,1} \cdot t_{f,1} \cdot f_{cm} - t_{f,1} \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_{yk} - h \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_{yk} + t_{f,2} \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_{yk} - b_{f,2} \cdot t_{f,2} \cdot f_{yk} - A_s \cdot f_s \right) \quad (3.27)$$

Atliekami skaičiavimai: $a = \left(\frac{439,8}{2 \cdot 225} - \frac{305}{2 \cdot 225} \right) \cdot 38 = 11,383$

$$b = \left(\frac{35 \cdot 305}{2 \cdot 225} - \frac{35 \cdot 439,8}{2 \cdot 225} + \frac{305 \cdot 25}{2 \cdot 225} - \frac{439,8 \cdot 25}{2 \cdot 225} + 305 + 5,1 \cdot 2 \cdot 355 + 5,1 \cdot 2 \cdot 355 \right) \cdot 38 = 18262,844$$

$$c = 305 \cdot 25 \cdot 355 + \frac{25^2 \cdot (439,8 - 305)}{2 \cdot 225} \cdot 38 - 305 \cdot 25 \cdot 355 - 25 \cdot 5,1 \cdot 2 \cdot 355 -$$

$$-266 \cdot 5,1 \cdot 2 \cdot 355 + 16 \cdot 5,1 \cdot 2 \cdot 355 - 690 \cdot 16 \cdot 355 - 628 \cdot 565 = -2813361,111$$

$$D = 18262,844^2 - 4 \cdot 11,383 \cdot (-2813361,111) = 461630695,696$$

$$x_{pl} = \frac{-18262,844 + \sqrt{461630695,696}}{2 \cdot 11,383} = 141,558 \text{ mm}$$

$$w = \frac{(141,558 - 25) \cdot (690 - 305)}{2 \cdot 225} = 34,916 \text{ mm}$$

Skaičiuojama plastinė lenkiamoji galia:

$$M_{Ed} = b_{f,1} \cdot t_{f,1} \cdot f_{yk} \cdot \left(x_{pl} - \frac{t_{f,1}}{2} \right) + b_{f,1} \cdot (x_{pl} - t_{f,1}) \cdot f_{cm} \cdot \left(\frac{x_{pl} - t_{f,1}}{2} \right) + w \cdot (x_{pl} - t_{f,1}) \cdot f_{cm} \cdot \left(\frac{x_{pl} - t_{f,1}}{3} \right) +$$

$$+ (x_{pl} - t_{f,1}) \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_{yk} \cdot \left(\frac{x_{pl} - t_{f,1}}{2} \right) + (h - x_{pl} - t_{f,2}) \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_{yk} \cdot \left(\frac{h - x_{pl} - t_{f,2}}{2} \right) +$$

$$+ b_{f,2} \cdot t_{f,2} \cdot f_{yk} \cdot \left(h - x_{pl} - \frac{t_{f,2}}{2} \right) + A_s \cdot f_s \cdot (h - x_{pl} - t_{f,2} - y) \quad (3.28)$$

$$M_{Ed} = 305 \cdot 25 \cdot 355 \cdot \left(141,558 - \frac{25}{2} \right) + 305 \cdot (141,558 - 25) \cdot 38 \cdot \left(\frac{141,558 - 25}{2} \right) +$$

$$+ 34,916 \cdot (141,558 - 25) \cdot 38 \cdot \left(\frac{141,558 - 25}{3} \right) + (141,558 - 25) \cdot 5,1 \cdot 2 \cdot 355 \cdot \left(\frac{141,558 - 25}{2} \right) +$$

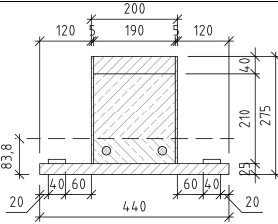
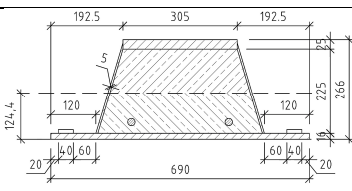
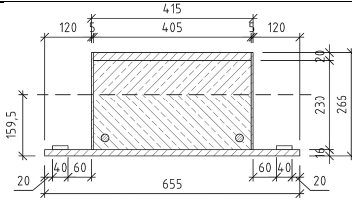
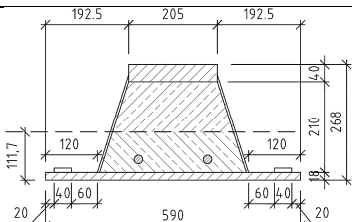
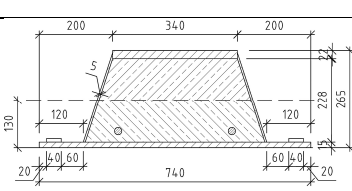
$$+ 628 \cdot 565 \cdot (141,558 - 25 - 30) + (266 - 141,558 - 16) \cdot 5,1 \cdot 2 \cdot 355 \cdot \left(\frac{266 - 141,558 - 16}{2} \right) +$$

$$+ 690 \cdot 16 \cdot 355 \cdot \left(266 - 141,558 - \frac{16}{2} \right) + 628 \cdot 565 \cdot (266 - 141,558 - 16 - 30) = 964,162 \text{ kNm}$$

Kitos sijos apskaičiuojamos analogiškai. Parenkama po vieną plačią ir vieną siaurą HSQ sija (A ir C), po vieną siaurą ir vieną plačią trapecinę sija (B ir D). Dar viena trapecinė sija (E) parinkta

tam, kad ne tik trapečinės sijos plieninio profilio skerspjūvio plotas būtų vienodas, tačiau kuo panašesnis į sijos C būtų ir betono plotas. Visų sijų skaičiavimo rezultatai pateikiami 3.1 lent.

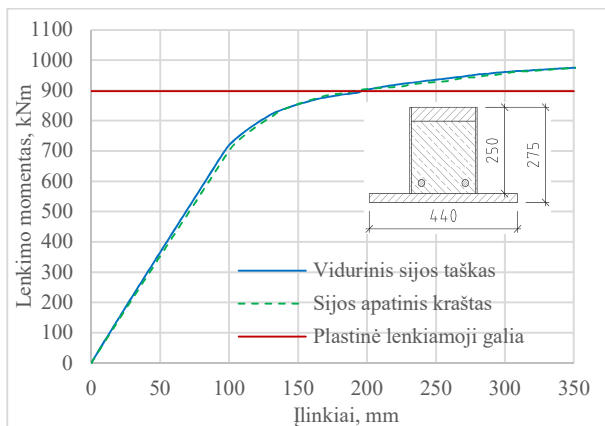
3.1 lent. Sijų parinkimas „analogiško skerspjūvio“ atžvilgiu

Skerspjūvio plotas	Sijų skerspjūviai	Neutraliosios ašies atstumas nuo apačios	Lenkiamoji galia pagal EC	Iškirstyta jėga, reikalinga pasiekti lenkiamajai galiai
Sija A Plienas: 211 cm ² Betonas: 392,71 cm ² Armatūra: 6,28 cm ²		83,8 mm	898,0 kNm (91,7 %)	88,3 kN/m
Sija B Plienas: 210,57 cm ² Betonas: 831,29 cm ² Armatūra: 6,28 cm ²		124,4 mm	964,2 kNm (98,5 %)	94,8 kN/m
Sija C Plienas: 210,8 cm ² Betonas: 925,21 cm ² Armatūra: 6,28 cm ²		159,5 mm	959,2 kNm (97,8%)	94,3 kN/m
Sija D Plienas: 211,1 cm ² Betonas: 565,38 cm ² Armatūra: 6,28 cm ²		111,7 mm	907,1 kNm (92,6 %)	89,2 kN/m
Sija E Plienas: 210,63 cm ² Betonas: 945,59 cm ² Armatūra: 6,28 cm ²		130 mm	979,2 kNm (100 %)	96,3 kN/m

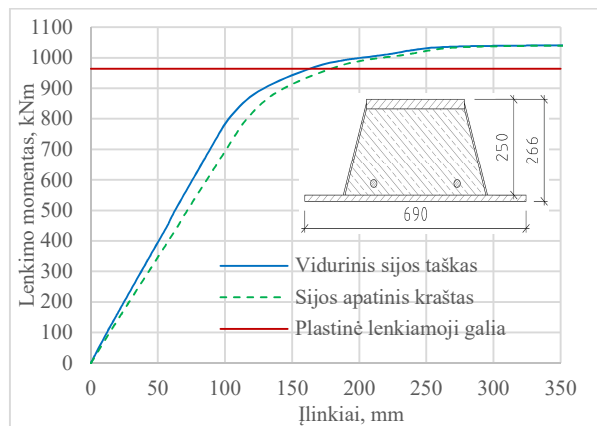
Apskaičiavus sijų lenkiamąsias galias matome, kad iki 8 % mažesnę lenkiamąją galią turi siauros sijos (A ir D). Didžiausia lenkiamąja galia pasižymi plačios sijos B, C ir E. Šiose sijose esančio betono skerspjūvio plotas taip pat yra santykinai didelis, lyginant su sijomis A ir D. Įdomu tai, kad nors HSQ sija C turi daugiau betono, jos stipris yra 0,7 % mažesnis nei trapečinės sijos B. Didžiausią lenkiamąją galią pagal skaičiavimus turi daugiausiai betono turinti sija E. Šio rezultato buvo galima tikėtis.

3.2.2. Sijų tyrimas baigtinių elementų metodu

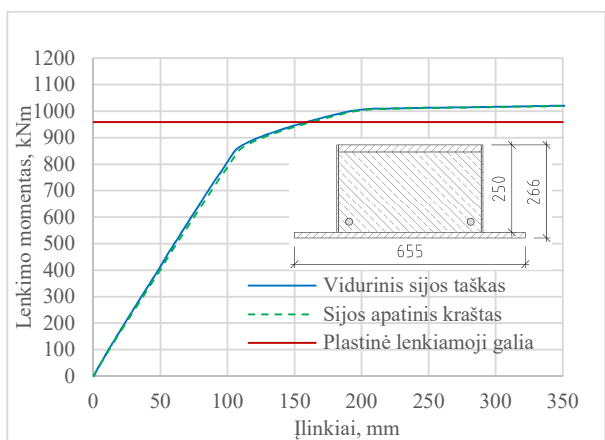
3.2.1. skyriuje parinktos sijos pagal aprašytas metodikas modeliuojamos programoje „ABAQUS“ baigtinių elementų metodu. 3.21–3.25 pav. pateikiamos kiekvienos sijos lenkimo momentų-įlinkių kreivės. Mėlyna ištisinė linija žymima sijos vidurinio taško kreivė, o žalia punktyrine – apatinės juostos kraštas. Raudona linija žymima apskaičiuota sijos lenkiamoji galia.



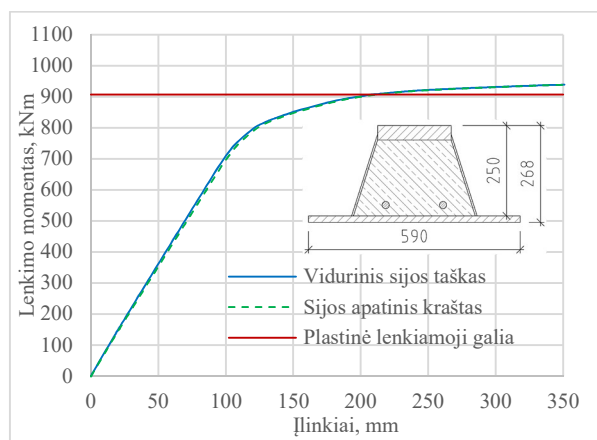
3.21 pav. Sijos A lenkimo momentų-įlinkių kreivė



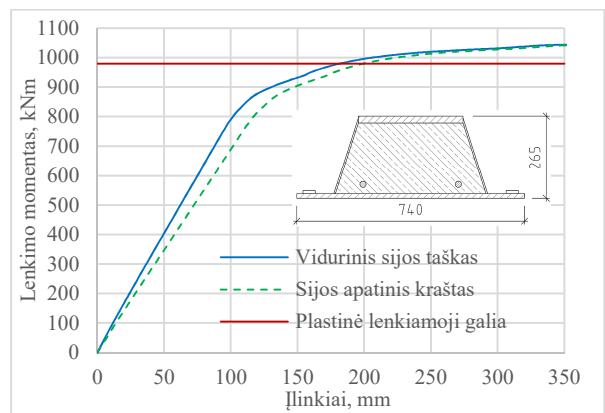
3.22 pav. Sijos B lenkimo momentų-įlinkių kreivė



3.23 pav. Sijos C lenkimo momentų-įlinkių kreivė



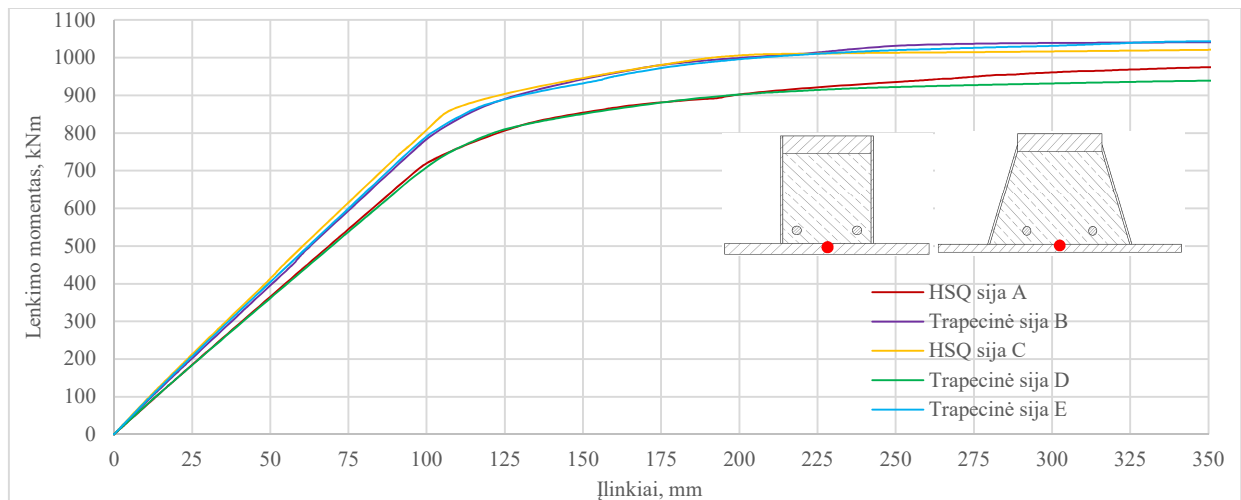
3.24 pav. Sijos D lenkimo momentų-įlinkių kreivė



3.25 pav. Sijos E lenkimo momentų-įlinkių kreivė

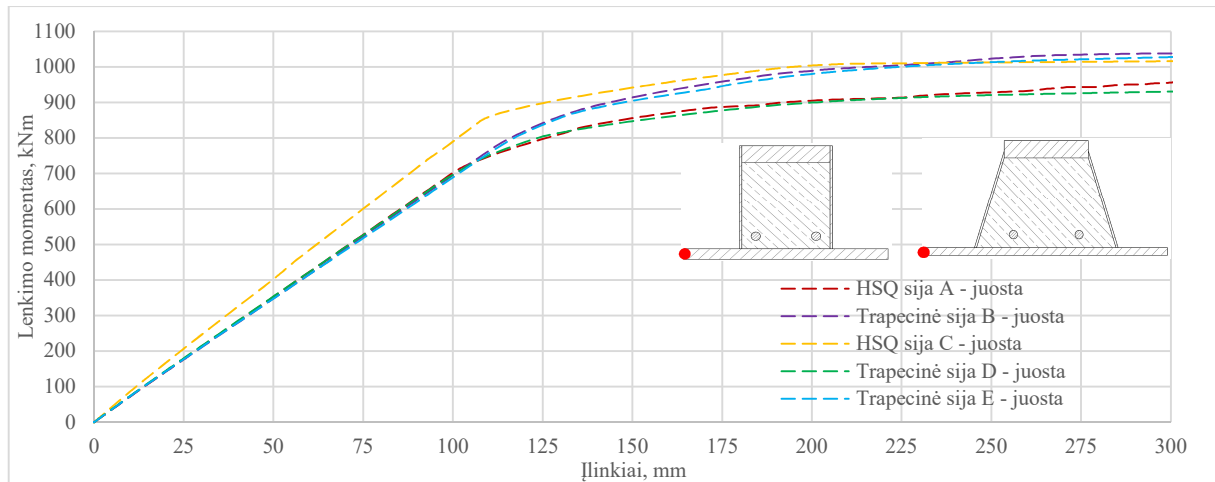
Visais atvejais apskaičiuota sijų plastinė lenkiamoji galia yra žemiau nei horizontali lenkimo momentų-įlinkių kreivių dalis. Kita vertus, veikiant apskaičiuotoms apkrovoms, sijose jau yra pasireiškusios žymios plastinės deformacijos. Galima teigti, kad skaičiavimas yra pakankamai tikslus. Toks skaičiavimas nebūtinai turi sutapti su horizontalia kreivės dalimi. Tai yra tik prielaida, kurią naudojant ir turėtų būti gaunamas šiek tiek mažesnis rezultatas. Svarbiausia, kad taip apskaičiuota lenkiamoji galia nebūtų aukščiau už horizontalią kreivės dalį.

Visais nagrinėtais atvejais sijų apatinės juostos įlinko daugiau nei viduriniai sijų taškai. HSQ sijose šis skirtumas buvo nežymus, įlinkiai juostos krašte ir sijos viduryje buvo artimi (skirtumas iki 2 %). Plačios trapecinės sijos (B ir D) išilginės ašies atžvilgiu išlinko labiau. Įlinkių skirtumai šiose sijose buvo žymūs (iki 10–15 %) zonoje, kurioje prasideda pirmosios plastinės deformacijos. 3.26 pav. pateiktos visų sijų vidurinio taško lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės.

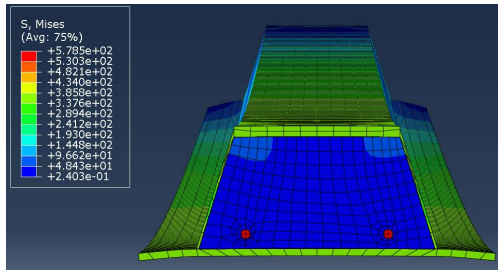


3.26 pav. HSQ sijų ir trapecinių sijų lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės, kai sijų plieninio skerspjūvio plotas vienodas

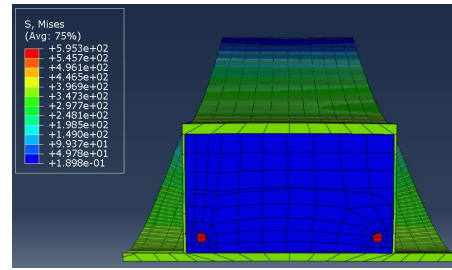
Kaip ir skaičiuojant teoriškai, matoma, kad didžiausią standumą turi plačios sijos, kurių skerspjūvyje yra daugiau betono nei siaurose sijose. Tokios sijos turi didesnę plastinę lenkiamąją galią. Vertinant sijų vidurinių taškų įlinkius, palankiausias skerspjūvis buvo HSQ sijos C. Jos pradinis standumas buvo didžiausias. Veikiant 700 kNm lenkimo momentui, visos sijos įlinko iki 12 % daugiau. Plačios trapecinės sijos B ir E yra kiek palankesnės toje zonoje, kurioje jau yra pasiekta plastinė lenkiamoji galia. Šioje zonoje tas pats įlinkis pasiekiamas, veikiant iki 3 proc. didesniai lenkimo momentui. Kita vertus, ši zona jau nėra labai aktuali, kadangi realioje situacijoje ji jokia būdu neturėtų būti pasiekiamas.



3.27 pav. HSQ sijų ir trapecinių sijų apatinių juostų kraštinių taškų lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės, kai sijų plieninio skerspjūvio plotas vienodas



3.28 pav. Sijos E skerspjūvis ties viduriu



3.29 pav. Sijos C skerspjūvis ties viduriu

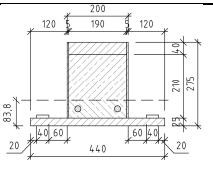
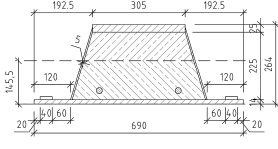
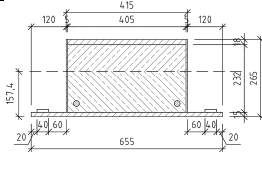
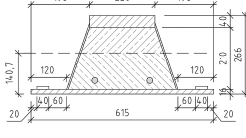
3.27 pav. pateiktos sijų apatinių juostų kraštinių taškų lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės. Matoma, kad šiuo atveju palankiausia yra HSQ sija C. Nuo pat lenkimo pradžios visų kitų sijų apatinės juostos nulinksta daugiau. Veikiant 700 kNm lenkimo momentui, visos sijos linksta iki 15 % daugiau nei plati HSQ sija C. Nors plačios trapecinės sijos pasiekia santykinai didelę plastinę lenkiamąją galią, tačiau iki pat šios ribos jų įlinkiai didėja sparčiau. Galima teigti, kad plačios trapecinės sijos yra linkusios išlinkti savo išilginės ašies atžvilgiu. Apibendrinant šio poskyrio rezultatus, plačias HSQ sijas galima vadinti palankiausiomis.

3.3. Sijų parinkimas pagal vienodą plastinę lenkiamąją galią ir jų tyrimas

3.3.1. Sijų parinkimas

Šiame skyriuje pirmoji nagrinėjama sija yra ta pati sija A, apskaičiuota praėjusiame skyriuje. Jos plastinė lenkiamoji galia yra 898 kNm. Kitos trys sijos parinktos, kad lenkiamoji galia taip pat būtų kuo artimesnė 900 kNm. Taigi, šiame skyriuje pastovi yra apkrova, o kinta skerspjūvio plotas. Rezultatų suvestinė pateikiama 3.2 lent.

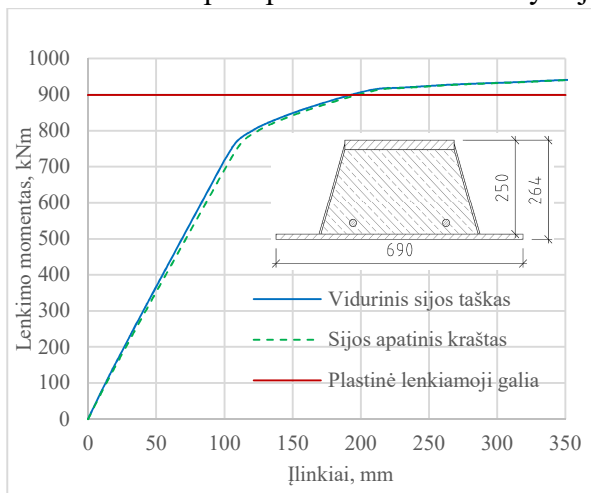
3.2 lent. Sijų parinkimas pagal vienodą lenkiamąją galią

Sijos tipas	Skerspjūvio plotas	Sijų skerspjūviai	Neutraliosios ašies atstumas	Lenkiamoji galia pagal EC
A	Plienas: 211 cm² (100 %) Betonas: 392,71 cm ² Armatūra: 6,28 cm ²		83,8 mm	898,0 kNm
B1	Plienas: 196,76 cm² (93,3 %) Betonas: 831,3 cm ² Armatūra: 12,56 cm ²		145,5 mm	898,8 kNm
C1	Plienas: 196,15 cm² (93 %) Betonas: 933,32 cm ² Armatūra: 6,28 cm ²		157,4 mm	900,3 kNm
D1	Plienas: 209,47 cm² (99,3 %) Betonas: 607,33 cm ² Armatūra: 6,28 cm ²		140,7 mm	902,2 kNm

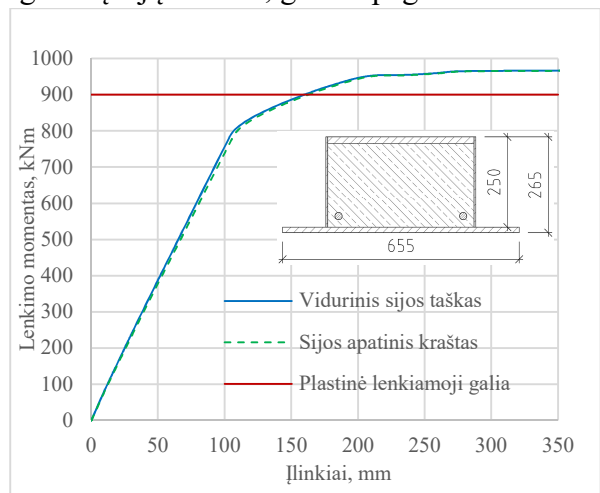
Akivaizdu, kad sijų skerspjūvio plotai skiriasi. Svarbiausias čia yra plieninio profilio skerspjūvio ploto kitimas, nes plienas yra brangesnė medžiaga už betoną. Be to, kai gaminame platesnę siją, sunaudojame daugiau betono sijai, bet sutaupome jo plokštėms, nes jos tampa trumpesnės. Matoma, kad parenkant plačias sijas, sunaudota iki 7 % mažiau plieno.

3.3.2. Sijų tyrimas baigtinių elementų metodu

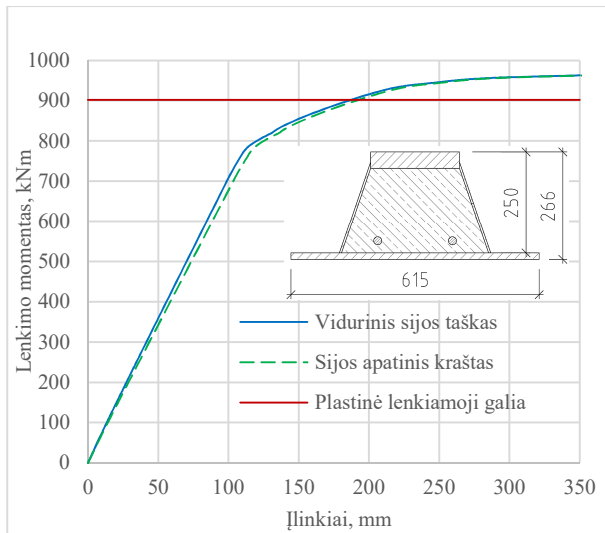
3.30–3.32 pav. pateikiamos 3.3.1 skyriuje nagrinėtų sijų kreivės, gautos pagal BEM.



3.30 pav. Sijos B1 lenkimo momentų-įlinkių kreivė

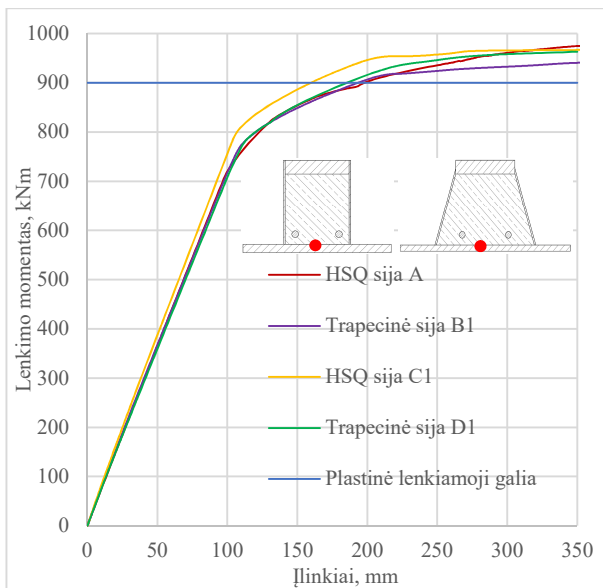


3.31 pav. Sijos C1 lenkimo momentų-įlinkių kreivė

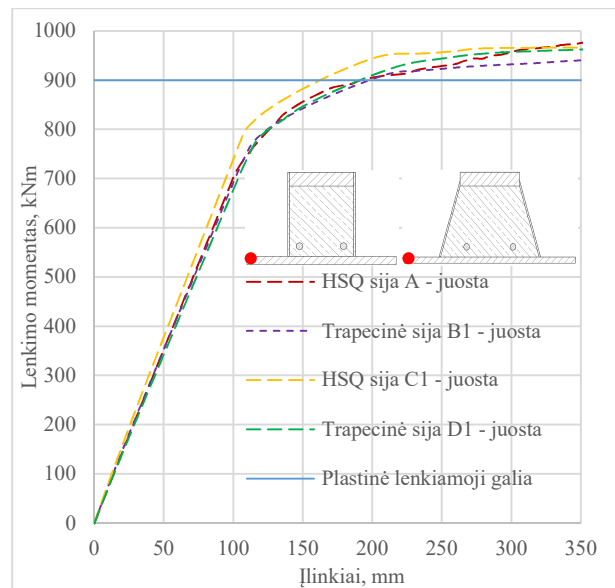


3.32 pav. Sijos D1 lenkimo momentų-įlinkių kreivė

Visais atvejais apskaičiuota sijų plastinė lenkiamoji galia yra žemiau nei horizontali lenkimo momentų-įlinkių kreivių dalis. Visais atvejais sijų apatinės juostos įlinko daugiau nei viduriniai sijų taškai. HSQ sijose šis skirtumas buvo mažesnis nei 1,5 %. Plačios trapecinės sijos (B1 ir D1) išilginės ašies atžvilgiu išlinko labiau. Apatinės juostos kraštas čia įlinko 5–6 % daugiau nei vidurinis. 3.33 ir 3.34 pav. pateikti bendri rezultatai visoms sijoms. 3.33 pav. pateiktos vidurinių sijų taškų kreivės, o 3.34 pav. – apatinių juostų kraštų.



3.33 pav. HSQ sijų ir trapecinių sijų lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės (parinkta pagal 900 kNm)



3.34 pav. HSQ sijų ir trapecinių sijų apatinių juostų kraštų lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės (parinkta pagal 900 kNm)

Šiame skyriuje apskaičiuotos sijos turėjo 900 +/-3 kNm lenkiamąją galią. Gavus rezultatus pagal BEM, matoma, kad sijų lenkimo momentų kreivės artimos. Skirtumai yra pastebimai mažesni nei praėjusiam skyriuje. To ir buvo galima tikėtis pagal apskaičiuotas plastines lenkiamąsias galias. Kita vertus, geriausias variantas ir vėl buvo plati HSQ sija C1. Matoma, kad šios sijos standumas pradinėje lenkimo stadijoje yra didžiausias. Veikiant tam pačiam lenkimo momentui ir prasidėjus pirmosioms plastinėms deformacijoms, įlinkiai yra ~15 proc. mažesni nei visų kitų sijų. Tik pasireiškus labai žymioms plastinėms deformacijoms, plačios trapecinės sijos D1 kreivė priartėjo, tačiau lenkimo momentas, esant tam pačiam įlinkiui vis tiek buvo ~1 % mažesnis.

3.4. Skyriaus išvados

Apibendrinant skyrių, galima teigti, kad plastinės lenkiamosios galios skaičiavimų rezultatai buvo priimtini. Apskaičiuotas lenkimo momentas nei vienu atveju nebuvo aukščiau už horizontalią lenkimo momentų-įlinkių kreivės dalį. Taigi, plastinė lenkiamoji galia nebuvo pervertinama.

Kai sijos buvo parenkamos pagal vienodą plieninio profilio skerspjūvio plotą, išryškėjo plastinės lenkiamosios galios skirtumai. Siauros sijos turėjo iki 8 proc. mažesnę plastinę lenkiamąją galią už plačias. Nors vertinant plačių kompozitinių ir HSQ sijų vidurinių taškų lenkimo momentų-įlinkių kreives, skirtumai buvo labai nežymūs, šie skirtumai išryškėjo, kai buvo nagrinėjamos sijų apatinių juostų kraštų kreivės. Pastebėta, kad plačios trapecinės sijos išlinko savo išilginių ašių atžvilgiu. Apatinės juostos kraštas įlinko 10–15 % daugiau. HSQ sijos juostos krašto ir vidurinio taško įlinkių skirtumai santykinai buvo mažesni nei <2 %.

Kai sijos buvo parinktos pagal vienodą plastinę lenkiamąją galią, užfiksuoti žymūs sijų skerspjūvio ploto skirtumai. Parenkant plačią trapecinę arba HSQ sija, buvo sutaupoma iki 7 proc. plieno, lyginant su siauromis sijomis. Pagal šį atvejį baigtinių elementų programoje sumodeliuotos sijos turėjo labai artimas lenkimo momentų-įlinkių priklausomybes. Kita vertus, ir vėl išsiskyrė plati HSQ sija. Jos pradinis standumas buvo didžiausias, o prasidėjus pirmosioms plastinėms deformacijoms ir veikiant tam pačiam lenkimo momentui, įlinkis buvo iki 15 proc. mažesnis. Apibendrinant šio skyriaus rezultatus, kompozitinių HSQ sijų skerspjūvius galima vertinti kaip palankesnius.

4. HSQ sijų praktinis eksperimentas ir teorinė analizė

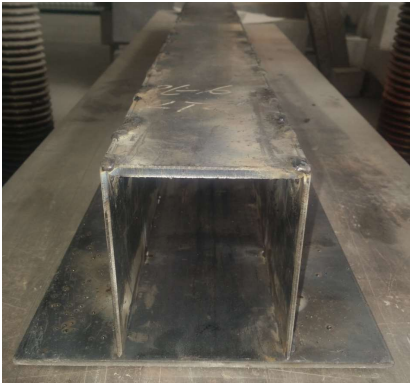
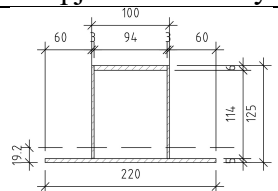
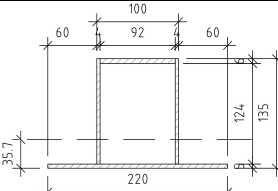

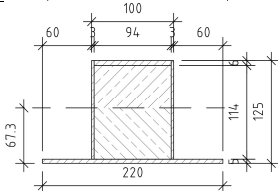
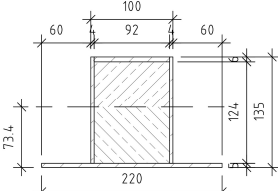
4.1. Praktinis eksperimentas

Šiame skyriuje eksperimentiškai tiriamos sijos. Atliekamas sijų lenkimo bandymas, veikiant dviem koncentruotoms apkrovoms. Sijos lenkiamos iki suirimo: išklupimo arba apkrovos, kuriai veikiant pasiekama plastinė lenkiamoji galia. Pastarasis atvejis fiksuojamas tuomet, kai įlinkis didėja, o apkrova jau nebeauga. Tokiu atveju eksperimentas nutraukiamas. Viena sijos atrama yra šarnyrinė, o kita – paslanki šarnyrinė. Sijos tarpatramis lygus 1,4 m. Bendras ilgis visais atvejais yra 1,5 m. Apkrova perduodama per dvi 50 mm pločio plokšteles. Schema pateikta 3.1. skyriuje. Prieš eksperimentą ištiriami suformuoti betono bandiniai.

4.1.1. Eksperimento bandiniai ir įranga

Eksperimente išbandomos keturios sijos: dvi plieninės ir dvi kompozitinės (plieninės, užpildytos betonu). Pagal plieninių profilių skerspjūvį yra du sijų tipai: NR1 ir NR2. Kadangi sijos yra kompozitinės arba metalinės, tai prie žymens pridedama raidė K arba M. 4.1 lent. pateikiami sijų skerspjūvių matmenys ir vaizdai.

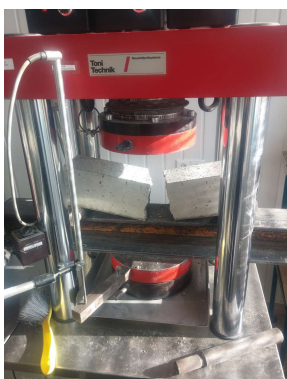
4.1 lent. Eksperimento sijos

Sijos vaizdas	Žymuo	Skerspjūvio matmenys
	NR1-M	
	NR2-M	
	NR1-K	
	NR2-K	

Eksperimento įranga:

- Presas “Toni Technik 2020” ir tamprumo modulio nustatymo rėmas
- “Zyklos” betono maišyklė
- Hidraulinis presas “GRM-1”. Galia – iki 40 t.
- Įtempių paskirstymo plokštelės, cilindrai ir traversa
- Šarnyrinės atramos: šarnyrinė ir paslanki - šarnyrinė
- Trys mechaniniai įlinkio matavimo prietaisai

4.1-4.7 pav. pateikiami eksperimento įrangos vaizdai.



4.1 pav. Toni Technik presas betono bandiniams



4.2 pav. Hidraulinis presas GRM-1



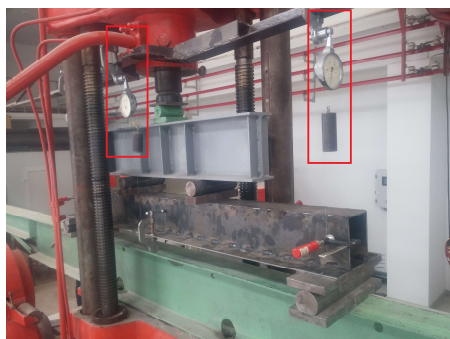
4.3 pav. Šarnyrinė atrama



4.4 pav. Paslanki šarnyrinė atrama



4.5 pav. Apkrovų perdavimo plokštelės, cilindrai ir traversa



4.6 pav. Sumontuoti įlinkio matavimo prietaisai



4.7 pav. Hidraulinis presas GRM-1 ir sija, paruošta lenkimo bandymui

4.1.2. Eksperimento eiga

Dar prieš eksperimentą sijos buvo suvirintos iš atskirų lakštų. Naudotos nutraukiamos siūlės. Apatinė juosta ir sienutės tarpusavyje suvirintos iš vienos pusės. Siūlės fragmento ilgis buvo 2–3 cm, o tarpas tarp fragmentų buvo apie 3–4 cm. Viršutinė juosta ir sienutės tarpusavyje suvirintos iš dviejų pusių. Čia taip pat panaudotos nutraukiamos siūlės. Tiek iš išorės, tiek iš vidaus siūlės fragmento ilgis buvo apie 2–3 cm, o tarpai tarp siūlių vienoje pusėje buvo 3–4 cm. Siūlės iš abiejų pusių virintos taip, kad suvirinti fragmentai išorėje persidengtų su nesuvirintais, esančiais sijos viduje. Taigi, sijos viršutinės juostos ir sienučių suvirinimas buvo artimesnis ištiesiniam nei sijos apatinės juostos ir sienučių suvirinimas. Dvi metalinės sijos buvo užbetonuotos. Jos betonuotos kaip kolonos, pilant betoną iš viršaus ir sutankinant strypu (žr. 4.8 ir 4.9 pav.). Betono sudėtis pateikiama 4.2 lent.

4.2 lent. Betono sudėtis

	Bendras kiekis, kg	1 betonavimas	2 betonavimas
Cementas	26.052	12.846	13.206
Žvyras	65.604	32.349	33.255
Smėlis	81.629	40.251	41.378
Superplastiklis	0.158	0.078	0.080



4.8 pav. Sijos prieš betonavimą



4.9 pav. Sijos po betonavimo



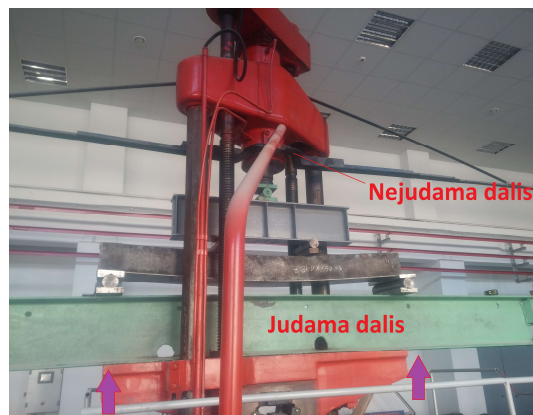
4.10 pav. Betono bandiniai

Betonuojamos sijos buvo atremtos ant tampraus pagrindo – guminių plokštelių. Kolonos stačioje padėtyje išbuvo 1 parą. Vėliau jos buvo paguldytos ir uždengtos plėvele tam, kad būtų išlaikyta drėgmė. Likusį laiką iki 28 parų sijos kietėjo natūraliai, betonas nebuvo laistomas.

Sijų betonavimo metu buvo paruošti atskiri betono bandiniai. Suformuoti 9 vnt. 100x100x100 mm betono kubelių gniuždymui, 4 vnt. 100x100x300 mm prizmių tamprumo modulio nustatymui ir 6 vnt. 100x100x400 mm prizmių lenkiamajam stipriui nustatyti. Visi šie bandiniai buvo išformuoti po 1 paros. Vėliau jie buvo uždenkti plėvele kartu su sijomis ir palikti kietėti natūraliai (nelaistant) 28 paras. Po 28 parų nustatytos betono mechaninės charakteristikos: gniuždomasis ir lenkiamasis stipris (iš jo apskaičiuotas tempiamasis stipris), tamprumo modulis. Šių charakteristikų nustatymui naudotas “Toni Technik” presas ir tamprumo modulio nustatymo rėmelis.

Galiausiai buvo išbandomos pačios sijos. Visų pirma buvo lenkiamos plieninės sijos, o vėliau ir kompozitinės. Abiejų sijų atveju pasiruošimas buvo analogiškas. Paruošiamos dvi atramos: šarnyrinė ir paslanki šarnyrinė. Ant jų užkeliama sija. Ant sijų viršaus dedamos apkrovos perdavimo plokštelės ir cilindrai, o ant jų užkeliama traversa. Ant traversos padedama įtempių paskirstymo plokštelė su cilindru. Prie sijos trijose vietose (kraštuose ir ties viduriu) tvirtinami įlinkio matavimo prietaisai. Kraštuose įlinkio matavimo prietaisai sumontuoti per tam tikrus prispaudėjus, o viduryje įlinkio matavimo prietaisas pritvirtintas prie sijos apatinės juostos.

Po sijos paruošimo buvo atliekamas pats lenkimo bandymas. Iš pradžių preso judamoji (apatinė) dalis kartu su sija buvo keliama į viršų kol viršutinė apkrovos perdavimo plokštelė atsiremdavo į nejudamą dalį (žr. 4.11 pav.). Tai buvo laikoma sijos lenkimo pradžia. Tuo metu buvo nustatomi pradiniai įlinkio matavimo prietaisų parodymai. Vėliau preso apkrova buvo didinama 10–15 kN ir nustatomi įlinkio matavimo prietaisų parodymai ties ta apkrova. Taip apkrova palaipsniui didinama iki sijos suirimo (išklupimo arba tekėjimo) ir gaunama apkrovos priklausomybė nuo įlinkio. Be to, užfiksuojamas sijos suirimo pobūdis.



4.11 pav. Sijos lenkimo eksperimentas

4.1.3. Eksperimento rezultatai

Lent. 4.3–4.5 pateikiamos nustatytos betono kubelių ir prizmių charakteristikos.

4.3 lent. Gniuždomo betono kubelių matmenys ir gniuždomasis stipris

Bandinio nr.	b , mm	h , mm	F , kN	f_{kub} , MPa	$f_{vid.kub}$, MPa	f_{cm} , MPa
1.1C	101.5	98.7	510.8	50.988	48.238	40.104
1.2C	100.6	99.5	498.6	49.812		
1.3C	98.2	99.8	433.5	44.233		
1.4C	98.6	101.2	466.9	46.791		
1.5C	96.7	100.8	481.2	49.367		
2.1C	100.5	100.5	525	51.979	50.643	41.638
2.2C	101.4	101.9	470.1	45.497		
2.3C	100.9	100.7	500	49.210		
2.4C	101.1	100.3	566.7	55.886		

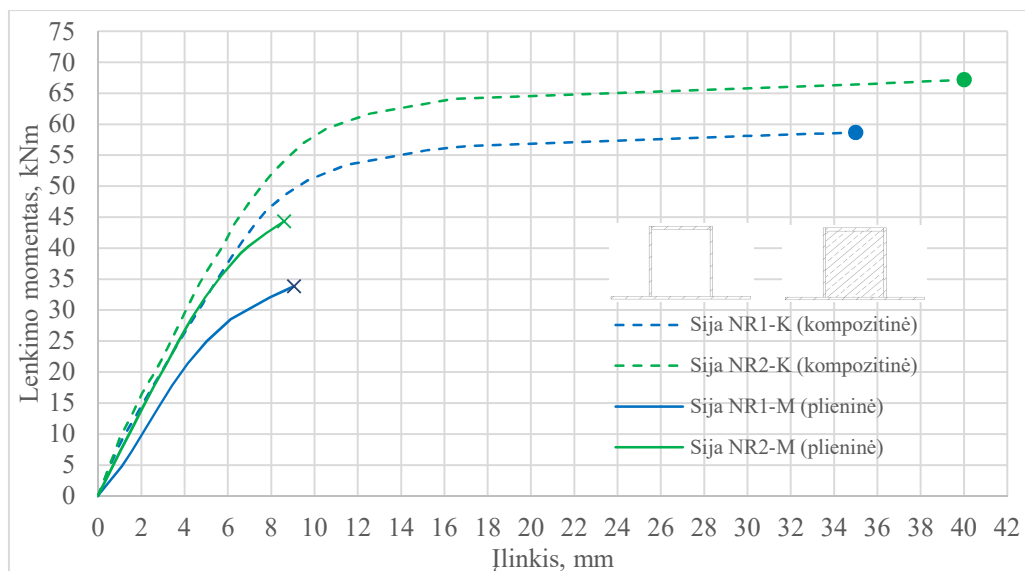
4.4 lent. Prizmelių 100x100x300 matmenys ir tamprumo modulis

Bandinio nr.	b , mm	h , mm	E , GPa	E_{vid} , GPa
1.1E	100.6	99.3	31.216	31.167
1.2E	101.5	100.4	31.117	
1.1E	102.1	100.6	31.246	31.281
1.2E	101.7	99.5	31.315	

4.5 lent. Prizmelių 100x100x400 matmenys, lenkiamasis stipris ir apskaičiuotas tempiamasis stipris

Bandinio nr.	b , mm	h , mm	F , kN	$f_{ctm,Fl}$, Mpa	f_{ct} , MPa	f_{ctm} , MPa
1.1T	99.1	99.5	10.85	5.640	3.759	3.767
1.2T	98.6	101.9	11.35	5.654	3.774	
1.3T	100.7	100.1	11.18	5.651	3.767	
2.1T	99.8	102.2	12.51	6.121	4.086	3.853
2.2T	99.2	100.8	11.15	5.642	3.763	
2.3T	98.8	101.1	11.01	5.560	3.710	

Sijų lenkimo rezultatai pateikiami kaip lenkimo momentų-įlinkių kreivės (žr. 4.12 pav.). Plieninių sijų atveju suirimas įvyko dėl sienutės išklupimo apkrovos pridėjimo vietoje, o kompozitinių sijų atveju – dėl takumo. Įvykus klupimui, preso apkrova pradėdavo mažėti, o prasidėjus takumui – įlinkis didėdavo nebedidinant apkrovos.



4.12 pav. Sijų lenkimo eksperimento rezultatai

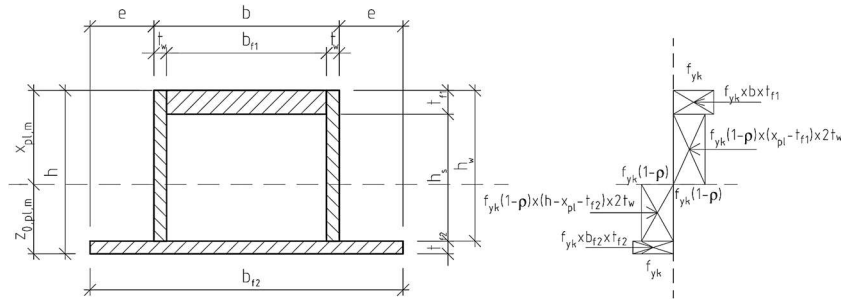
Kaip ir buvo tikėtasi, sijos užbetonavimas abiem atvejais ženkliai padidino sijos standumą. Užbetonavus sijas, pirmosios plieno plastinės deformacijos prasidėjo veikiant 35–50 % didesniai lenkimo momentui. Pasikeitė suirimo pobūdis. Paprastos sijos suiro dėl vietinio klupumo, o kompozitinės sijos pradėjo tekėti ir įlinkis didėjo, nebedidinant apkrovos. Taigi, kompozitinės sijos pasiekė savo plastinę laikomąją galią. Lenkimo momentas, kuriam veikiant įvyko suirimas, išaugo 52–74 %.

Plieninių profilių sienutės išklupo apkrovų pridėjimo vietose, prasidėjus nežymioms plastinėms deformacijoms, dar prieš pasiekiant plastinę laikomąją galią. Tai galėjo lemti tai, kad sijų suvirinimas nebuvo ištisinis (naudotos nutraukiamos siūlės). Suvirinimo kokybė nebuvo gera ir kai kuriose vietose sienutės šiek tiek išsikraipė dėl aukštos temperatūros. Tam tikrose suvirinimo vietose sijos elementai buvo pažeisti, dėl išdeginimo atsirado įdubos. Šie dalykai lėmė įtempių koncentracijų atsiradimą. Be to, viršutinės juostos viršutinė plokštuma ir sienučių viršus kai kuriose apkrovų pridėjimo vietose buvo nevienodame lygyje, todėl tokiose vietose apkrova buvo perduodama tiesiogiai sienutei, o tai galėjo nulėmti ankstesnį išklupimą. Galima tikėtis, kad, esant nepriekaištingoms sijų paruošimo sąlygoms, klupimas įvyktų vėliau (žr. 4 priedą). Kita vertus, sijų užbetonavimas lėmė, kad sijų sienutės nebeklupo, o stiprumas ženkliai išaugo. Taigi, eksperimentą galima vadinti pavykusiu, o užbetonavimą – tikslingu.

4.2. Eksperimento sijų teoriniai skaičiavimai

4.2.1. Skaičiavimai, taikant plastinį įtempių pasiskirstymą skerspjūvyje

Eksperimente nagrinėjamų sijų plienas yra S355 klasės, armatūra – S500: $f_y=355$ MPa, $f_s=565$ Mpa. Betono gniuždomasis stipris f_{cm} sijoms NR1 ir NR2 yra skirtingas (žr. 4.1.3. skyrių).



4.13 pav. Plieninio skerspjūvio skaičiuojamoji schema

Skaičiuojamas sijos NR1-M stiprumas. Jos matmenys: $h_w=120$ mm, $h_s=114$ mm, $t_{f,1}=6$ mm, $t_{f,2}=5$ mm, $t_w=3$ mm, $b_{f,1}=94$ mm, $b=100$ mm, $b_{f,2}=220$ mm, $e=60$ mm, $h=125$ mm

Atlikus skaičiavimus pagal EC [24], nustatytos sijos elementų klasės. Viršutinės juostos klasė – 1, sienutės klasė – 2. Taigi, skerspjūvio klasė yra antra. Daroma prielaida, kad sija gali pasiekti plastinę galią. Taigi, naudosime stačiakampes įtempių pasiskirstymo diagramas.

Skaičiuojame sijos atsparumą, veikiant 81,5 kN jėgomis dviuose taškuose. Tokiu atveju veikia 39 kNm lenkimo momentas. Įrašos: $V_{Ek}=81,5 \cdot 10^3$ N, $M_{Ek}=39 \cdot 10^3$ Nm

Maksimali skersinė jėga ir lenkimo momentas veikia vienoje vietoje, nes apkrovos yra koncentruotos. Taigi, jei skersinės jėgos išnaudojimas yra >0.5 , sumažinamas sienučių atsparumas, skaičiuojant sijos lenkiamąją galią.

$$\frac{V_{Ek}}{V_{Pl.Rk}} = \frac{V_{Ek}}{A_y \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)} = \frac{V_{Ek}}{\eta \cdot 2 \cdot h_s \cdot t_w \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)} = \frac{81,5 \cdot 10^3}{1 \cdot 2 \cdot 114 \cdot 3 \left(\frac{355}{\sqrt{3}}\right)} = 0,581 \quad (4.1)$$

Koeficientas, mažinantis sienutės lenkiamąjį stiprį dėl skersinės jėgos:

$$\rho = \left(2 \cdot \frac{V_{Ek}}{V_{Pl.Rk}} - 1\right)^2 = (2 \cdot 0,581 - 1)^2 = 0,026 \quad (4.2)$$

Išvesta neutraliosios ašies atstumo nuo viršaus $x_{pl,m}$ skaičiavimo formulė (žr. priedą nr. 2):

$$x_{pl,m} = \frac{b_{f2} \cdot t_{f2} \cdot f_y + h \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho) - t_{f2} \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho) - b \cdot t_{f1} \cdot f_y + t_{f1} \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho)}{t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho) + t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho)} \quad (4.3)$$

$$x_{pl,m} = \frac{220 \cdot 5 \cdot 355 + 125 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 355 \cdot (1-0,026) - 5 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 355 \cdot (1-0,026) - 100 \cdot 6 \cdot 355 + 6 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 355 \cdot (1-0,026)}{3 \cdot 2 \cdot 355 \cdot (1-0,026) + 3 \cdot 2 \cdot 355 \cdot (1-0,026)} = 106 \text{ mm}$$

$$z_{0,pl,m} = h - x_{pl,m} = 125 - 106 = 19 \text{ mm} \quad (4.4)$$

Lenkiamoji galia:

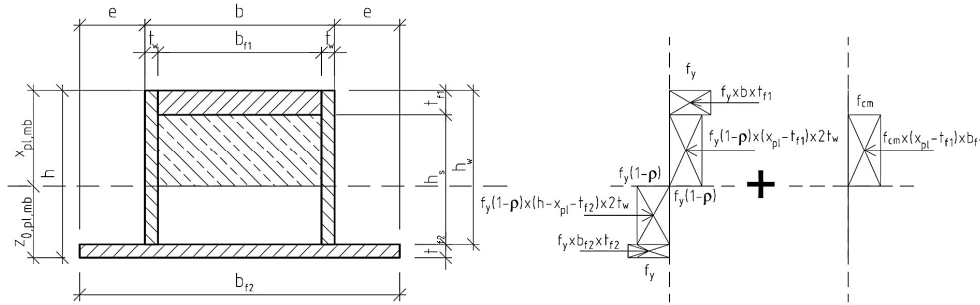
$$M_{Rk,m} = f_y \cdot (b \cdot t_{f1}) \cdot \left(x_{pl,m} - \frac{t_{f1}}{2} \right) + f_y \cdot (1-\rho) \cdot (x_{pl,m} - t_{f1}) \cdot 2 \cdot t_w \cdot \frac{(x_{pl,m} - t_{f1})}{2} +$$

$$+ f_y \cdot (1-\rho) \cdot (z_{0,pl,m} - t_{f2}) \cdot 2 \cdot t_w \cdot \frac{(z_{0,pl,m} - t_{f2})}{2} + f_y \cdot b_{f2} \cdot t_{f2} \cdot \left(z_{0,pl,m} - \frac{t_{f2}}{2} \right) \quad (4.5)$$

$$M_{Rk,m} = 355 \cdot (100 \cdot 6) \cdot \left(106 - \frac{6}{2} \right) + 355 \cdot (1-0,026) \cdot (106-6) \cdot 2 \cdot 3 \cdot \frac{(106-6)}{2} +$$

$$+ 355 \cdot (1-0,026) \cdot (19-5) \cdot 2 \cdot 3 \cdot \frac{(19-5)}{2} + 355 \cdot 220 \cdot 5 \cdot \left(19 - \frac{5}{2} \right) = 39 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 39 \text{ kNm}$$

Analogiškai apskaičiuojama ir sija NR2-M. Toliau skaičiuojama sija NR1-K.



4.14 pav. Kompozitinio skerspjūvio be armatūros skaičiuojamoji schema

Iražas: $V_{Ek} = 100,6 \cdot 10^3 \text{ N}$, $M_{Ek} = 47,7 \cdot 10^3 \text{ Nm}$

$$\frac{V_{Ek}}{V_{Pl.Rk}} = \frac{V_{Ek}}{A_v \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)} = \frac{V_{Ek}}{\eta \cdot 2 \cdot h_s \cdot t_w \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)} = \frac{100,6 \cdot 10^3}{1 \cdot 2 \cdot 114 \cdot 3 \cdot \left(\frac{355}{\sqrt{3}} \right)} = 0,718 \quad (4.6)$$

$$\rho = \left(2 \cdot \frac{V_{Ek}}{V_{Pl.Rk}} - 1 \right)^2 = (2 \cdot 0,718 - 1)^2 = 0,189 \quad (4.7)$$

Skaičiuojame neutraliąją ašį. Analogiškai išvesta formulė šiek tiek skiriasi nuo pirmojo atvejo (metalinės sijos), nes prisideda betonas:

$$x_{pl,mb} = \frac{b_{f2} \cdot t_{f2} \cdot f_y + h \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho) - t_{f2} \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho) - b \cdot t_{f1} \cdot f_y + t_{f1} \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho) + b_{f1} \cdot t_{f1} \cdot f_{cm}}{t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho) + b_{f1} \cdot f_{cm} + t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho)} \quad (4.8)$$

$$x_{pl,mb} = \frac{220 \cdot 5 \cdot 355 + 125 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 355 \cdot (1-0,189) - 5 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 355 \cdot (1-0,189) - 100 \cdot 6 \cdot 355 + 6 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 355 \cdot (1-0,189) + 94 \cdot 3 \cdot 40,104}{3 \cdot 2 \cdot 355 \cdot (1-0,189) + 94 \cdot 40,104 + 3 \cdot 2 \cdot 355 \cdot (1-0,189)} = 57,8 \text{ mm}$$

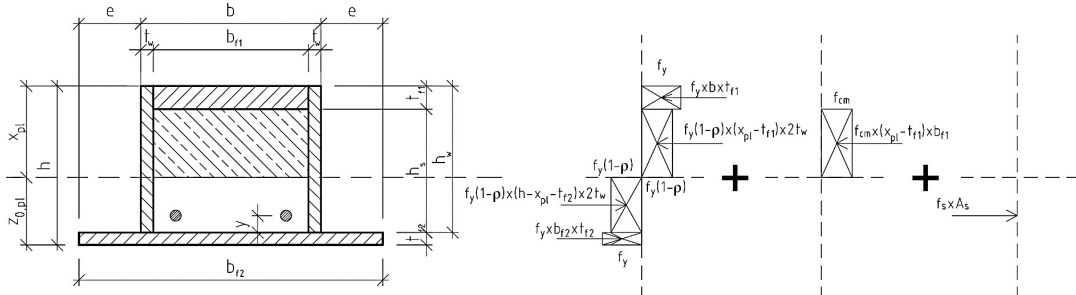
$$z_{0,pl,mb} = h - x_{pl,m} = 125 - 57,8 = 67,2 \text{ mm} \quad (4.9)$$

Lenkiamoji galia:

$$\begin{aligned} M_{Rk,mb} = & f_y \cdot (b \cdot t_{f1}) \cdot \left(x_{pl,mb} - \frac{t_{f1}}{2} \right) + f_{cm} \cdot (x_{pl,mb} - t_{f1}) \cdot b_{f1} \cdot \frac{(x_{pl,mb} - t_{f1})}{2} + \\ & + f_y \cdot (1-\rho) \cdot (x_{pl,mb} - t_{f1}) \cdot 2 \cdot t_w \cdot \frac{(x_{pl,mb} - t_{f1})}{2} + f_y \cdot (1-\rho) \cdot (z_{0,pl,mb} - t_{f2}) \cdot 2 \cdot t_w \cdot \frac{(z_{0,pl,mb} - t_{f2})}{2} + \\ & + f_y \cdot b_{f2} \cdot t_{f2} \cdot \left(z_{0,pl,mb} - \frac{t_{f2}}{2} \right) \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} M_{Rk,mb} = & 355 \cdot (100 \cdot 6) \cdot \left(57,8 - \frac{6}{2} \right) + 40,104 \cdot (57,8 - 6) \cdot 94 \cdot \frac{(57,8 - 6)}{2} + \\ & + 355 \cdot (1-0,158) \cdot (57,8 - 6) \cdot 2 \cdot 3 \cdot \frac{(57,8 - 6)}{2} + 355 \cdot (1-0,158) \cdot (67,2 - 5) \cdot 2 \cdot 3 \cdot \frac{(67,2 - 5)}{2} + \\ & + 355 \cdot 220 \cdot 5 \cdot \left(67,2 - \frac{5}{2} \right) = 46,4 \cdot 10^6 \text{ Nmm} = 47,7 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Analogiškai apskaičiuojama ir sija NR2-K. Toliau skaičiuojama sija NR1-KA.



4.15 pav. Kompozitinio skerspjūvio su armatūra skaičiuojamoji schema

Armatūra yra 12 mm skersmens. Veikiančios įrašos: $V_{Ek} = 104,4 \cdot 10^3 \text{ N}$, $M_{Ek} = 49,6 \cdot 10^3 \text{ Nm}$

$$\frac{V_{Ek}}{V_{PL,Rk}} = \frac{V_{Ek}}{A_v \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)} = \frac{V_{Ek}}{\eta \cdot 2 \cdot h_s \cdot t_w \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)} = \frac{104,4 \cdot 10^3}{1 \cdot 2 \cdot 114 \cdot 3 \cdot \left(\frac{355}{\sqrt{3}} \right)} = 0,745 \quad (4.11)$$

$$\rho = \left(2 \cdot \frac{V_{Ek}}{V_{PL,Rk}} - 1 \right)^2 = (2 \cdot 0,745 - 1)^2 = 0,239 \quad (4.12)$$

Neutralios ašies $x_{pl,mba}$ skaičiavimo formulė, išvesta antrame priede:

$$x_{pl,mba} = \frac{2 \cdot f_y \cdot h \cdot t_w \cdot (1-\rho) - 2 \cdot f_y \cdot t_{f2} \cdot t_w \cdot (1-\rho) + f_y \cdot b_{f2} \cdot t_{f2} + f_s \cdot A_s - b \cdot t_{f1} \cdot f_y + f_{cm} \cdot b_{f1} \cdot t_{f1} + f_y \cdot t_{f1} \cdot t_w \cdot 2 \cdot (1-\rho)}{2 \cdot f_y \cdot t_w \cdot (1-\rho) + f_{cm} \cdot b_{f1} + 2 \cdot f_y \cdot t_w \cdot (1-\rho)} \quad (4.13)$$

$$x_{pl,mba} = \frac{2 \cdot 355 \cdot 125 \cdot 3 \cdot (1-0,239) - 2 \cdot 355 \cdot 5 \cdot 3 \cdot (1-0,239) + 355 \cdot 220 \cdot 5 + 500 \cdot 226 \cdot 100 \cdot 6 \cdot 355 \cdot 40,104 \cdot 94 \cdot 6 + 355 \cdot 6 \cdot 3 \cdot 2 \cdot (1-0,239)}{2 \cdot 355 \cdot 3 \cdot (1-0,239) + 40,104 \cdot 94 + 2 \cdot 355 \cdot 3 \cdot (1-0,239)} = 75,9 \text{ mm} \quad (4.14)$$

$$z_{0,pl,mba} = h - x_{pl,mba} = 125 - 75,9 = 49,1 \text{ mm} \quad (4.15)$$

Čia: $A_s = 226 \text{ mm}^2$ – bendras armatūros plotas; y – armatūros centro atstumas nuo sijos juostos.

Plastinė lenkiamoji galia:

$$\begin{aligned} M_{pl,mba} = & b \cdot t_{f1} \cdot f_y \cdot \left(x_{pl,mba} - \frac{t_{f1}}{2} \right) + 2 \cdot t_w \cdot (x_{pl,mba} - t_{f1}) \cdot f_y \cdot \frac{x_{pl,mba}}{2} \cdot (1-\rho) + \\ & + f_{cm} \cdot b_{f1} \cdot (x_{pl,mba} - t_{f1}) \cdot \frac{(x_{pl,mba} - t_{f1})}{2} + f_y \cdot b_{f2} \cdot t_{f2} \cdot \left(z_{0,pl,mba} - \frac{t_{f2}}{2} \right) + \\ & + 2 \cdot t_w \cdot (z_{0,pl,mba} - t_{f2}) \cdot \frac{(z_{0,pl,mba} - t_{f2})}{2} \cdot (1-\rho) + f_s \cdot A_s \cdot (z_{0,pl,mba} - t_{f2} - y) \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} M_{pl,mba} = & 100 \cdot 6 \cdot 355 \cdot \left(75,9 - \frac{6}{2} \right) + 2 \cdot 3 \cdot (75,9 - 6) \cdot 355 \cdot \frac{75,9}{2} \cdot (1-0,277) + \\ & + 40,104 \cdot 94 \cdot (75,9 - 6) \cdot \frac{(75,9 - 6)}{2} + 355 \cdot 220 \cdot 5 \cdot \left(49,1 - \frac{5}{2} \right) + \end{aligned}$$

$$+ 2 \cdot 3 \cdot (49,1 - 5) \cdot \frac{(49,1 - 5)}{2} \cdot (1-0,277) + 500 \cdot 226 \cdot (49,1 - 5 - 26) = 49,6 \cdot 10^6 \text{ Nm} = 49,6 \text{ kNm}$$

Analogiškai apskaičiuojama ir sija NR2-KA. Sijų rezultatai pateikiami 4.6 lentelėje.

4.6 lent. Eksperimento sijų plastinės lenkiamosios galios, neutraliosios ašys

Sijos žymuo	Sijų skerspjūviai su matmenimis	Betono įtempių-deformacijų kreivė	Neutraliosios ašies atstumas	Lenkiamoji galia	Koncentruota apkrova
NR1-M			19,2 mm	39 kNm (100 %)	82 kN
NR1-K		Nesudaržyta	67,3 mm	47,7 kNm (122,3 %)	100,6 kN
		Sudaržyta K=2	85,6 mm	50,4 kNm (129,2 %)	106,2 kN
NR1-KA		Nesudaržyta	49,1 mm	49,6 kNm (127,2 %)	104,4 kN
		Sudaržyta K=2	79,7 mm	52,8 kNm (135,4 %)	111,1 kN

4.6 lent. pabaiga. Eksperimento sijų plastinės lenkiamosios galios, neutraliosios ašys

Sijos žymuo	Sijų skerspjūviai su matmenimis	Betono įtempių-deformacijų kreivė	Neutraliosios ašies atstumas	Lenkiamoji galia	Koncentruota apkrova
NR2-M			35,7 mm	47,2 kNm (100 %)	99,3 kN
NR2-K		Nesuaržyta	73,4 mm	56,8 kNm (120,3 %)	119,5 kN
		Suaržyta K=2	89,9 mm	60,6 kNm (128,4 %)	127,5 kN
NR2-KA		Nesuaržyta	59,7 mm	57,6 kNm (122 %)	121,2 kN
		Suaržyta K=2	80,1 mm	61,4 kNm (130,1 %)	129,3 kN

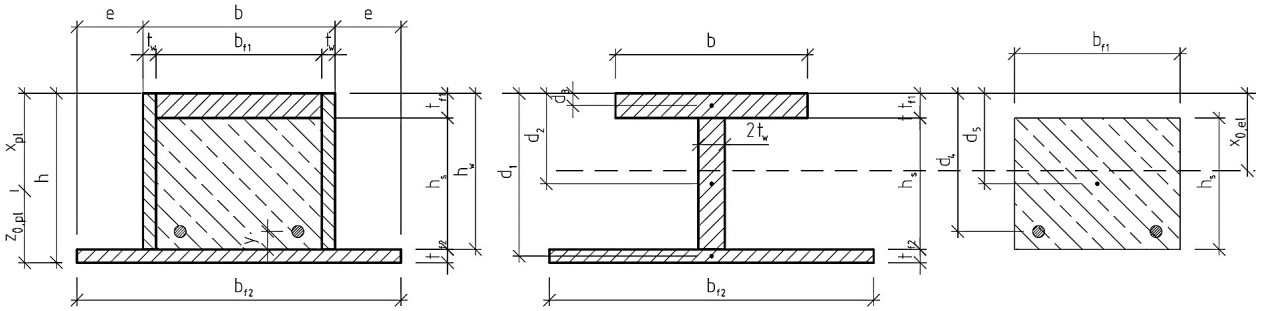
Matome, kad dėl užbetonavimo ženkliai išauga sijų plastinė lenkiamoji galia. Užbetonavus siją ir vertinant betoną kaip nesuaržytą, ji išauga iki 22 proc. Kai betonas vertinamas kaip suaržytas, tokių sijų plastinė lenkiamoji galia išauga iki 29 proc.

Suarmavus siją ir vertinant betoną kaip nesuaržytą, plastinė lenkiamoji galia išauga iki 27 proc., lyginant su plieninių sijų. Kai betonas vertinamas kaip suaržytas, plastinė lenkiamoji galia yra iki 35 proc. didesnė.

4.2.2. Skaičiavimai pagal klasikinę tamprumo teoriją

Norint įvertinti sijos pradinį standumą ir apskaičiuoti sijos įlinkius, atliekami skaičiavimai pagal klasikinę tamprumo teoriją. Randama apkrova, kuriai veikiant, prasideda pirmosios plieno plastinės deformacijos. Pagal EC4 [26] reikalavimus leidžiama sijos įlinkius supaprastintai įvertinti, naudojant vidurkį tarp supleišėjusio ir nesupleišėjusio sijos skerspjūvio standumo.

Kad suskaičiuotume skerspjūvio inercijos momentą, pirmiausiai redukuosime skerspjūvį. Skaičiavimus pradėsime nuo sijos NR1-KA su armatūra. Tokio tipo sija šiame darbe nagrinėjama tik teoriškai, tačiau tai yra sudėtingiausias atvejis.



4.16 pav. Papildomi matmenys sijos skerspjūvio redukavimui

Pradiniai rodikliai sijai NR1-KA: $E_c=31,167$ Gpa, $E_s=200$ Gpa, $E_y=210$ Gpa. Skerspjūvis redukuojamas betono atžvilgiu, todėl randami koeficientai:

$$n = \frac{E_y}{E_c} = \frac{210}{31,167} = 6,738 \quad (4.17)$$

$$m = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200}{31,167} = 6,417 \quad (4.18)$$

4.16 pav. pateiktų matmenų išraiškos:

$$d_1 = h - \frac{t_{f2}}{2} = 125 - \frac{5}{2} = 122,5 \text{ mm} \quad (4.19)$$

$$d_2 = t_{f1} + \frac{h_s}{2} = 6 + \frac{114}{2} = 63 \text{ mm} \quad (4.20)$$

$$d_3 = \frac{t_{f1}}{2} = \frac{6}{2} = 3 \text{ mm} \quad (4.21)$$

$$d_4 = h - t_{f2} - y = 125 - 5 - 26 = 94 \text{ mm} \quad (4.22)$$

$$d_5 = d_2 = 63 \text{ mm}$$

Skaičiuojame atskirų skerspjūvio dalių statinius momentus sijos viršaus atžvilgiu. Betonas vertinamas kaip nesupleišėjęs.

$$S_s = A_s \cdot d_4 \cdot (m-1) = 226,2 \cdot 104 \cdot (6,417-1) = 1,152 \cdot 10^5 \text{ mm}^3 \quad (4.23)$$

$$S_{c,uncr} = b_{f1} \cdot h_s \cdot d_5 = 92 \cdot 11 \cdot 63 = 6,751 \cdot 10^5 \text{ mm}^3 \quad (4.24)$$

$$S_y = (b \cdot t_{f1} \cdot d_3 + 2 \cdot t_w \cdot h_s \cdot d_2 + b_{f2} \cdot t_{f2} \cdot d_1) \cdot n =$$

$$= (100 \cdot 6 \cdot 3 + 2 \cdot 3 \cdot 114 \cdot 63 + 220 \cdot 5 \cdot 122,5) \cdot 6,738 = 12,104 \cdot 10^5 \text{ mm}^3 \quad (4.25)$$

$$S_{sum,uncr} = S_s + S_{c,uncr} + S_y = 1,152 \cdot 10^5 + 6,751 \cdot 10^5 + 12,104 \cdot 10^5 = 20,01 \cdot 10^5 \text{ mm}^3 \quad (4.26)$$

Skaičiuojamas redukuotas skerspjūvio plotas ir nesupleišėjusio skerspjūvio neutralioji ašis:

$$A_{red,uncr} = A_s \cdot (m-1) + b_{f1} \cdot h_s + (b \cdot t_{f1} + 2 \cdot t_w \cdot h_s + b_{f2} \cdot t_{f2}) \cdot n = \quad (4.27)$$

$$=226,2 \cdot (6,417-1)+94 \cdot 114+(100 \cdot 6+2 \cdot 3 \cdot 114+220 \cdot 5) \cdot 6,738=2,8 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$$

$$x_{el,uncr} = \frac{S_{sum,uncr}}{A_{red,uncr}} = \frac{20,01 \cdot 10^5}{2,8 \cdot 10^4} = 71,442 \text{ mm} \quad (4.28)$$

$$z_{el,uncr} = h - x_{el,uncr} = 125 - 76,417 = 53,558 \text{ mm} \quad (4.29)$$

$$I_{y,f,1} = \frac{b \cdot t_{f,1}^3 \cdot n}{12} + b \cdot t_{f,1} \cdot (x_{el,uncr} - d_3)^2 \cdot n =$$

$$= \frac{100 \cdot 6^3 \cdot 6,738}{12} + 100 \cdot 6 \cdot (71,442 - 3)^2 \cdot 6,738 = 18,95 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (4.30)$$

$$I_{y,f,2} = \frac{b_{f,2} \cdot t_{f,2}^3 \cdot n}{12} + b_{f,2} \cdot t_{f,2} \cdot (d_1 - x_{el,uncr})^2 \cdot n =$$

$$= \frac{220 \cdot 5^3 \cdot 6,738}{12} + 220 \cdot 5 \cdot (122,5 - 71,442)^2 \cdot 6,738 = 19,337 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (4.31)$$

$$I_{y,w} = \frac{2 \cdot t_w \cdot h_s^3 \cdot n}{12} + 2 \cdot t_w \cdot h_s \cdot (x_{el,uncr} - d_2)^2 \cdot n =$$

$$= \frac{2 \cdot 3 \cdot 114^3 \cdot 6,738}{12} + 2 \cdot 3 \cdot 114 \cdot (71,442 - 63)^2 \cdot 6,738 = 5,32 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (4.32)$$

$$I_y = I_{y,f,1} + I_{y,f,2} + I_{y,w} = 18,95 \cdot 10^6 + 19,337 \cdot 10^6 + 5,32 \cdot 10^6 = 43,606 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (4.33)$$

$$I_{c,uncr} = \frac{b_{f,1} \cdot h_s^3}{12} + b_{f,1} \cdot h_s \cdot (x_{el,uncr} - d_5)^2 =$$

$$= \frac{94 \cdot 114^3}{12} + 100 \cdot 114 \cdot (71,442 - 63)^2 = 12,369 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (4.34)$$

$$I_s = (m-1) \cdot A_s \cdot (d_4 - x_{el,uncr})^2 =$$

$$= (6,417 - 1) \cdot 226,2 \cdot (96 - 71,442)^2 = 0,624 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (4.35)$$

Apskaičiuojamas nesupleišėjusio skerspjūvio efektyvusis standumas. Naudojamas betono tamprumo modulis, kadangi skerspjūvis redukuotas betono atžvilgiu:

$$EI_{sum.cr,eff} = E_c \cdot (I_y + 0,6 \cdot I_{c.cr} + I_s) =$$

$$= 31,167 \cdot 10^9 \cdot (43,60 \cdot 10^6 + 0,6 \cdot 12,369 \cdot 10^6 + 0,624 \cdot 10^6) = 1,559 \cdot 10^6 \text{ Nm}^2 \quad (4.36)$$

Skaičiuojame supleišėjusio skerspjūvio neutraliosios ašies vietą. Ją skaičiuojame pagal 4.37 formulę, tačiau šį kartą skaičiuojama ne sijos krašto, o neutraliosios ašies atžvilgiu. Taigi, formulė įgyja formą:

$$0 = \frac{S_{sum,cr}}{A_{red,cr}} \quad (4.37)$$

$$\text{Lygtį dauginame iš } A_{red,cr}. \text{ Gauname: } S_{sum,cr}=0 \quad (4.38)$$

Rašome lygtį:

$$\begin{aligned} -b_{f,1} \cdot (x-t_{f,1}) \cdot \frac{(x-t_{f,1})}{2} - n \cdot b_{f,1} \cdot t_{f,1} \cdot \left(x - \frac{t_{f,1}}{2}\right) - 2 \cdot n \cdot t_w \cdot x \cdot \frac{x}{2} + n \cdot b_{f,2} \cdot t_{f,2} \cdot \left(h-x - \frac{t_{f,2}}{2}\right) + \\ + n \cdot t_w \cdot (h-x-t_{f,2}) \cdot \frac{(h-x-t_{f,2})}{2} + m \cdot A_s \cdot (h-x-t_{f,2}-y) = 0 \end{aligned} \quad (4.39)$$

Pertvarkome lygtį, kad ji turėtų kvadratinės lygties formą:

$$\begin{aligned} \left(\frac{-b_{f,1}}{2} - n \cdot t_w + \frac{n \cdot t_w}{2}\right) \cdot x^2 + (b_{f,1} \cdot t_{f,1} - n \cdot b_{f,1} \cdot t_{f,1} - n \cdot b_{f,2} \cdot t_{f,2} - n \cdot t_w \cdot h + n \cdot t_w \cdot t_{f,2} - m \cdot A_s) \cdot x + \\ + \left(\frac{-b_{f,1} \cdot t_{f,1}^2}{2} + \frac{n \cdot b_{f,1} \cdot t_{f,1}^2}{2} + n \cdot b_{f,2} \cdot t_{f,2} \cdot h - \frac{n \cdot b_{f,2} \cdot t_{f,2}^2}{2} + \frac{n \cdot t_w \cdot h^2}{2} + \frac{n \cdot t_w \cdot t_{f,2}^2}{2} - n \cdot t_w \cdot t_{f,2} + m \cdot A_s \cdot h - m \cdot A_s \cdot t_{f,2} - m \cdot A_s \cdot y\right) \end{aligned} \quad (4.40)$$

$$a = \left(\frac{-b_{f,1}}{2} - n \cdot t_w + \frac{n \cdot t_w}{2}\right) = \left(\frac{-94}{2} - 6,738 \cdot 3 + \frac{6,738 \cdot 3}{2}\right) = -57,107 \quad (4.41)$$

$$\begin{aligned} b = (b_{f,1} \cdot t_{f,1} - n \cdot b_{f,1} \cdot t_{f,1} - n \cdot b_{f,2} \cdot t_{f,2} - n \cdot t_w \cdot h + n \cdot t_w \cdot t_{f,2} - m \cdot A_s) = \\ = (94 \cdot 3 - 6,738 \cdot 94 \cdot 3 - 6,738 \cdot 220 \cdot 5 - 6,738 \cdot 3 \cdot 125 + 6,738 \cdot 3 \cdot 5 - 6,417 \cdot 226,2) = -14525,04 \end{aligned} \quad (4.42)$$

$$\begin{aligned} c = \frac{-b_{f,1} \cdot t_{f,1}^2}{2} + \frac{n \cdot b_{f,1} \cdot t_{f,1}^2}{2} + n \cdot b_{f,2} \cdot t_{f,2} \cdot h - \frac{n \cdot b_{f,2} \cdot t_{f,2}^2}{2} + \frac{n \cdot t_w \cdot h^2}{2} + \frac{n \cdot t_w \cdot t_{f,2}^2}{2} - n \cdot t_w \cdot t_{f,2} + m \cdot A_s \cdot h - m \cdot A_s \cdot t_{f,2} - m \cdot A_s \cdot y = \\ = \frac{-94 \cdot 3^2}{2} + \frac{6,738 \cdot 94 \cdot 6^2}{2} + 6,738 \cdot 220 \cdot 5 \cdot 125 - \frac{6,738 \cdot 220 \cdot 5^2}{2} + \frac{6,738 \cdot 3 \cdot 125^2}{2} + \frac{6,738 \cdot 3 \cdot 5^2}{2} - 6,738 \cdot 3 \cdot 5 + \\ + 6,417 \cdot 226,2 \cdot 125 - 6,417 \cdot 226,2 \cdot 5 - 6,417 \cdot 226,2 \cdot 26 = 1199421 \end{aligned} \quad (4.43)$$

$$D = b^2 - 4 \cdot a \cdot c = -14525,04^2 - 4 \cdot (-57,107) \cdot 1199421 = 4,85 \cdot 10^8 \quad (4.44)$$

$$x_{el,cr} = \frac{-b - \sqrt{D}}{2 \cdot a} = \frac{14525,04 - \sqrt{4,85 \cdot 10^8}}{2 \cdot (-57,107)} = 65,638 \text{ mm} \quad (4.45)$$

$$z_{el,cr} = h - x_{el,cr} = 125 - 65,638 = 59,362 \text{ mm} \quad (4.46)$$

Taip pat skaičiuojame ir supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentą.

$$\begin{aligned} I_{c,cr} = \frac{b_{f,1} \cdot (x_{el,cr} - t_{f,1})^3}{12} + b_{f,1} \cdot (x_{el,cr} - t_{f,1}) \cdot \frac{(x_{el,cr} - t_{f,1})^2}{2} = \\ = \frac{94 \cdot (65,638 - 5)^3}{12} + 94 \cdot (65,638 - 6) \cdot \frac{(65,638 - 6)^2}{2} = 6,646 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \end{aligned} \quad (4.47)$$

$$I_s = m \cdot A_s \cdot (d_4 - x_{el,cr})^2 = 6,417 \cdot 226,2 \cdot (96 - 65,638)^2 = 1,168 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad (4.48)$$

Plieninių sijos elementų inercijos momentas apskaičiuojamas analogiškai, tačiau naudojant $x_{el,cr}$ reikšmę vietoj $x_{el,umcr}$. Gaunama, kad $I_y = 44,877 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$.

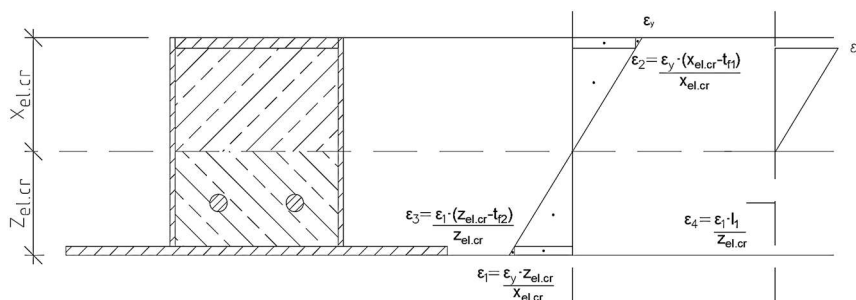
Skaičiuojant kompozitinės sijos įlinkius, Eurokodas [26] leidžia naudoti vidutinį inercijos momentą. Taigi, skaičiuojame supleišėjusio skerspjūvio ir vidutinį standumą:

$$EI_{sum.cr.eff} = E_c \cdot (I_y + 0,6 \cdot I_{c.cr} + I_s) =$$

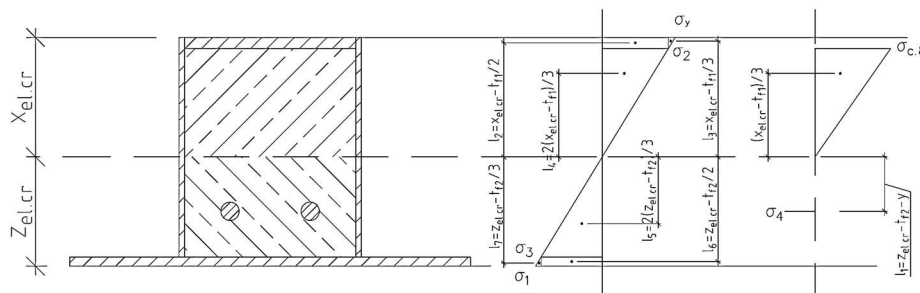
$$= 31,167 \cdot 10^9 \cdot (44,877 \cdot 10^{-6} + 0,6 \cdot 6,646 \cdot 10^{-6} + 1,168 \cdot 10^{-6}) = 1,61 \cdot 10^6 \text{ Nm}^2 \quad (4.49)$$

$$EI_{sum.eff.av} = \frac{EI_{sum.cr.eff} + EI_{sum.cr.eff}}{2} = \frac{1,61 \cdot 10^6 + 1,559 \cdot 10^6}{2} = 1,585 \cdot 10^6 \text{ Nm}^2 \quad (4.50)$$

Skaičiuojame lenkimo momentą, kuriam veikiant, prasideda pirmosios plieno plastinės deformacijos.



4.17 pav. Kompozitinis skerspjūvis su armatūra. Santykinės deformacijos



4.18 pav. Kompozitinis skerspjūvis su armatūra. Įtempiai

Pagalbiniai matmenys, nurodyti 4.18 pav.:

$$l_1 = z_{el,cr} - t_{f,2} - y = 59,362 - 5 - 26 = 28,362 \text{ mm} \quad (4.51)$$

$$l_2 = x_{el,cr} - \frac{t_{f,1}}{2} = 65,638 - \frac{6}{2} = 62,638 \text{ mm} \quad (4.52)$$

$$l_3 = x_{el,cr} - \frac{t_{f,1}}{3} = 65,638 - \frac{6}{3} = 63,638 \text{ mm} \quad (4.53)$$

$$l_4 = (x_{el,cr} - t_{f,1}) \cdot \frac{2}{3} = (65,638 - 6) \cdot \frac{2}{3} = 39,758 \text{ mm} \quad (4.54)$$

$$l_5 = (z_{el,cr} - t_{f,2}) \cdot \frac{2}{3} = (59,362 - 6) \cdot \frac{2}{3} = 36,242 \text{ mm} \quad (4.55)$$

$$l_6 = z_{el,cr} - \frac{t_{f2}}{2} = 59,362 - \frac{5}{2} = 56,862 \text{ mm} \quad (4.56)$$

$$l_7 = z_{el,cr} - \frac{t_{f2}}{3} = 59,362 - \frac{5}{3} = 57,696 \text{ mm} \quad (4.57)$$

Santykinės deformacijos, nurodytos 4.17 pav.:

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_y} = \frac{355}{210000} = 0,00169 \quad (4.58)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_y \cdot z_{el,cr}}{x_{el,cr}} = \frac{0,00169 \cdot 59,362}{65,638} = 0,001529 \quad (4.59)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{c,8} = \frac{\varepsilon_y \cdot (x_{el,cr} - t_{f1})}{x_{el,cr}} = \frac{0,00169 \cdot (65,638 - 6)}{65,638} = 0,001536 \quad (4.60)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_1 \cdot (z_{el,cr} - t_{f1})}{z_{el,cr}} = \frac{0,001529 \cdot (59,362 - 6)}{59,362} = 0,0014 \quad (4.61)$$

$$\varepsilon_4 = \frac{\varepsilon_1 \cdot l_1}{z_{el,cr}} = \frac{0,001529 \cdot 28,362}{59,362} = 0,00073 \quad (4.62)$$

Apskaičiuojami įtempiai, nurodyti 4.18 pav:

$$\sigma_y = 355 \text{ MPa}, \sigma_1 = 321,061 \text{ MPa}, \sigma_2 = 322,549 \text{ MPa}, \sigma_3 = 294,019 \text{ MPa}, \sigma_4 = 146,093 \text{ MPa},$$

$$\sigma_{c,8} = 36,438 \text{ MPa}$$

Skaičiuojama sijos lenkiamoji galia iki pirmųjų plieno plastinių deformacijų:

$$M_y = \sigma_2 \cdot b \cdot t_{f1} \cdot l_2 + \left(\frac{\sigma_y - \sigma_2}{2} \right) \cdot b \cdot t_{f1} \cdot l_3 + \left(\frac{\sigma_2}{2} \right) \cdot (x_{el,cr} - t_{f1}) \cdot t_w \cdot 2 \cdot l_4 +$$

$$+ \left(\frac{\sigma_3}{2} \right) \cdot (z_{el,cr} - 2) \cdot t_w \cdot 2 \cdot l_5 + \sigma_3 \cdot b_{f2} \cdot t_{f2} \cdot l_6 + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right) \cdot b_{f2} \cdot t_{f2} \cdot l_7 \quad (4.63)$$

$$M_y = 322,549 \cdot 100 \cdot 6 \cdot 62,638 + \left(\frac{355 - 322,549}{2} \right) \cdot 100 \cdot 6 \cdot 63,638 + \left(\frac{322,549}{2} \right) \cdot (65,638 - 6) \cdot 3 \cdot 2 \cdot 39,758 +$$

$$+ \left(\frac{294,019}{2} \right) \cdot (59,362 - 2) \cdot 3 \cdot 2 \cdot 36,242 + 294,019 \cdot 220 \cdot 5 \cdot 56,862 + \left(\frac{321,061 - 294,019}{2} \right) \cdot 220 \cdot 5 \cdot 57,696 = 36,022 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$M_c = \frac{\sigma_{c,8}}{2} \cdot (x_{el,cr} - t_{f1}) \cdot b_{f1} \cdot (x_{el,cr} - t_{f1}) \cdot \frac{2}{3} =$$

$$= \frac{36,438}{2} \cdot (65,638 - 6) \cdot 94 \cdot (65,638 - 6) \cdot \frac{2}{3} = 4,061 \cdot 10^3 \text{ Nmm} \quad (4.64)$$

$$M_s = A_s \cdot \sigma_4 \cdot l_1 = 226,2 \cdot 146,093 \cdot 28,362 = 0,937 \cdot 10^3 \text{ Nmm} \quad (4.65)$$

$$M_{el} = \frac{M_y + M_c + M_s}{10^6} = \frac{36,022 \cdot 10^6 + 4,061 \cdot 10^3 + 0,937 \cdot 10^3}{10^6} = 41,021 \text{ kNm} \quad (4.66)$$

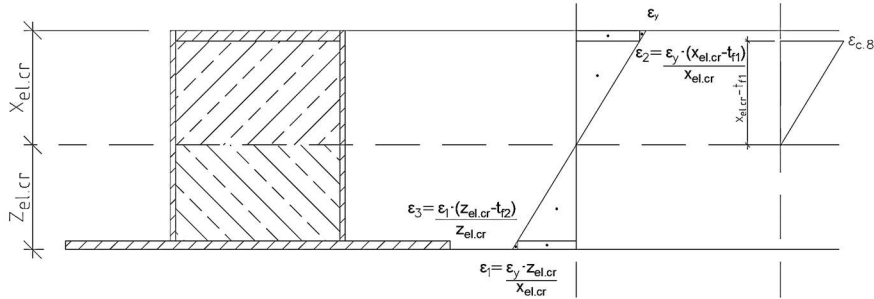
$$P_{konc} = \frac{M_{el}}{0,475} = \frac{41,021}{0,475} = 86,359 \text{ kN} \quad (4.67)$$

Skaičiuojami įlinkiai, veikiant tokio dydžio dviem koncentruotoms apkrovoms:

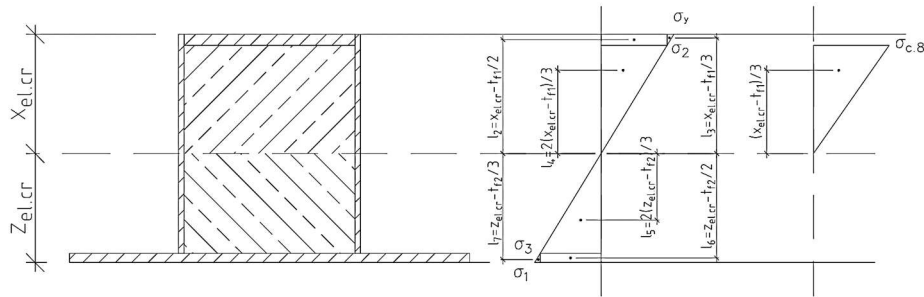
$$\Delta = \frac{P_{konc} \cdot a}{24 \cdot E_c \cdot I_{sum.av}} \cdot (3 \cdot l^2 - 4 \cdot a^2) = \frac{86359 \cdot 0,475}{24 \cdot 1,703 \cdot 10^6} \cdot (3 \cdot 1,4^2 - 4 \cdot 0,475^2) = 0,00461 \text{ m} = 4,995 \text{ mm} \quad (4.68)$$

Čia: a – atstumas tarp sijos atramos ir koncentruotos jėgos; l – atstumas tarp sijos atramų.

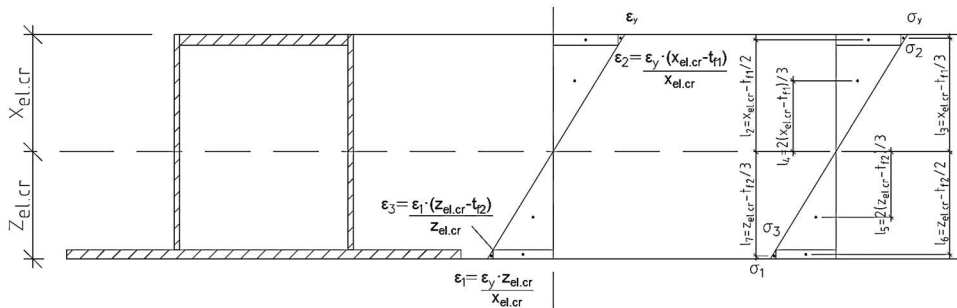
Taip pat apskaičiuojamos ir sijos NR2-KA mechaninės charakteristikos, lenkiamoji galia bei įlinkiai. Daunamos ir sijų NR1-K, NR2-K, NR1-M, NR2-M lygtys, o pagal jas – šių sijų rodikliai.



4.19 pav. Kompozitinis skerspjūvis be armatūros. Santykinės deformacijos



4.20 pav. Kompozitinis skerspjūvis be armatūros. Įtempiai



4.21 pav. Plieninis skerspjūvis be armatūros. Santykinės deformacijos ir įtempiai

4.7 ir 4.8 lent. pateikiami visų sijų rodikliai: standumas; neutraliųjų ašių vietos; lenkimo momentai, kuriems veikiant prasideda pirmosios plastinės deformacijos; įlinkiai, veikiant šiai apkrovai.

4.7 lent. Kompozitinių sijų mechaninės charakteristikos, lenkiamoji galia ir įlinkiai

Sijos žymuo	Apkrova, kuriai veikiant prasideda pirmosios plieno plastinės deformacijos, kN	Lenkimo momentas, kuriam veikiant prasideda pirmosios plieno plastinės deformacijos, kNm	Neutraliosios ašies atstumas nuo apačios, mm (skerspjūvis nesupleišėjęs)	Neutraliosios ašies atstumas nuo apačios, mm (skerspjūvis supleišėjęs)	Nesupleišėjusio skerspjūvio standumas EI, N·m ²	Supleišėjusio skerspjūvio standumas EI, N·m ²	Vidutinis skerspjūvio standumas EI, N·mm ²	Įlinkis, pagal vidutinį standumą, mm
NR1-K	79,652	37,835	54,6	61,4	1,592·10 ⁶	1,532·10 ⁶	1,562·10 ⁶	5,023
NR1-KA	86,359	41,021	53,6	59,4	1,61·10 ⁶	1,559·10 ⁶	1,585·10 ⁶	5,369
NR2-K	93,749	44,531	59,7	67,6	1,979·10 ⁶	1,903·10 ⁶	1,941·10 ⁶	4,758
NR2-KA	101,704	48,309	58,6	65,4	2,007·10 ⁶	1,943·10 ⁶	1,975·10 ⁶	5,074

Kompozitinių sijų be armatūros nesupleišėjusio skerspjūvio standumas yra iki 4 proc. didesnis nei supleišėjusio skerspjūvio. Atitinkamai, kompozitinės sijos su armatūra nesupleišėjusio skerspjūvio standumas didesnis 3,3 proc. Dėl sijos suarmavimo lenkimo momentas, kuriam veikiant prasideda pirmosios plieno plastinės deformacijos, išauga iki 8,5 proc.

4.8 lent. Plieninių sijų mechaninės charakteristikos, lenkiamoji galia ir įlinkiai

Sijos žymuo	Apkrova, kuriai veikiant prasideda pirmosios plieno plastinės deformacijos, kN	Lenkimo momentas, kuriam veikiant prasideda pirmosios plieno plastinės deformacijos, kNm	Neutraliosios ašies atstumas nuo apačios, mm	Sijos standumas EI, N·m ²	Įlinkis, vertinant vidutinį standumą, mm
NR1-M	64,405	30,592	49,6	1,364·10 ⁶	4,653
NR2-M	75,459	35,843	55,1	1,693·10 ⁶	4,39

Užbetonavus sijas, pirmosios plastinės plieno deformacijos prasideda, veikiant iki 24 % didesniai lenkimo momentui. Kai sijos yra užbetonuotos ir suarmuotos, pirmosios plastinės deformacijos prasideda, veikiant iki 35 % didesnei apkrovai. Kompozitinių sijų be armatūros standumas yra 14,5 % didesnis, o kompozitinių sijų su armatūra – 16,7 % didesnis nei plieninių sijų.

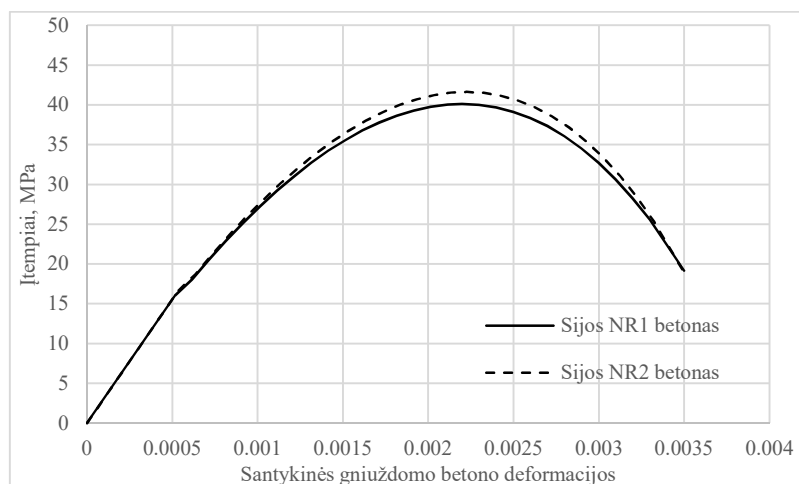
4.3. Eksperimento sijų analizė baigtinių elementų metodu ir visų eksperimento rezultatų palyginimas

Pagal 3.1. skyriuje aprašytą metodiką eksperimento sijos modeliuojamos „ABAQUS“ programa. Pateikiamos gautos lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės. Kompozitinėse sijose nagrinėjami trys plieno-betono sukibimo variantai:

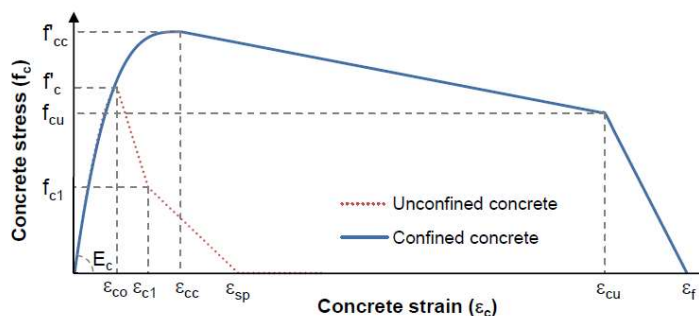
1. Sukibimas standus.
2. Kontaktas vertinamas kaip trintis, kurios koeficientas lygus 0,65.
3. Sukibimo nėra. Paviršiai gali persislinkti vienas kito atžvilgiu be pasipriešinimo.

Be to, nagrinėjami du gniuždomo betono variantai:

1. Įprasta betono įtempių-deformacijų priklausomybė pagal EC2 [27].
2. Suvaržyto betono įtempių-deformacijų priklausomybė pagal Murugesan Reddiar, M. K. [11]. Naudojami skirtingi betono suvaržymo laipsniai (koeficientas $K=1...2$).



4.22 pav. Eksperimente naudoto betono įtempių-santykinių deformacijų priklausomybės



4.23 pav. Murugesan Reddiar, M. K. [11] modelis suvaržytam ir nesuvaržytam betonui

Pateikiamos formulės, kurias naudojant gaunama įtempių-deformacijų kreivė suvaržytam betonui [11]. Kai $x < 1$:

$$f_c = K \cdot f'_c (1 - |1 - x|^n) \quad (4.69)$$

Čia:

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (4.70)$$

$$n = \frac{E_c \cdot \varepsilon_{cc}}{f'_c} \quad (4.71)$$

f'_c – vidutinis betono stiprumas, MPa

Čia:
$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0} \cdot (1 + 5 \cdot (K - 1)) \quad (4.72)$$

ε_{c0} – nesuvaržyto betono deformacija, esant didžiausiam įtempiui, apskaičiuojama pagal formulę:

$$\varepsilon_{c0} = 0.0015 + \frac{f'_c}{70000} \quad (4.73)$$

f'_{cc} – didžiausias suvaržyto betono įtempis, apskaičiuojamas pagal 4.74 formulę.

K – suvaržymo koeficientas. Kai betonas suvaržytas, $K > 1$. Kitu atveju – $K = 1$.

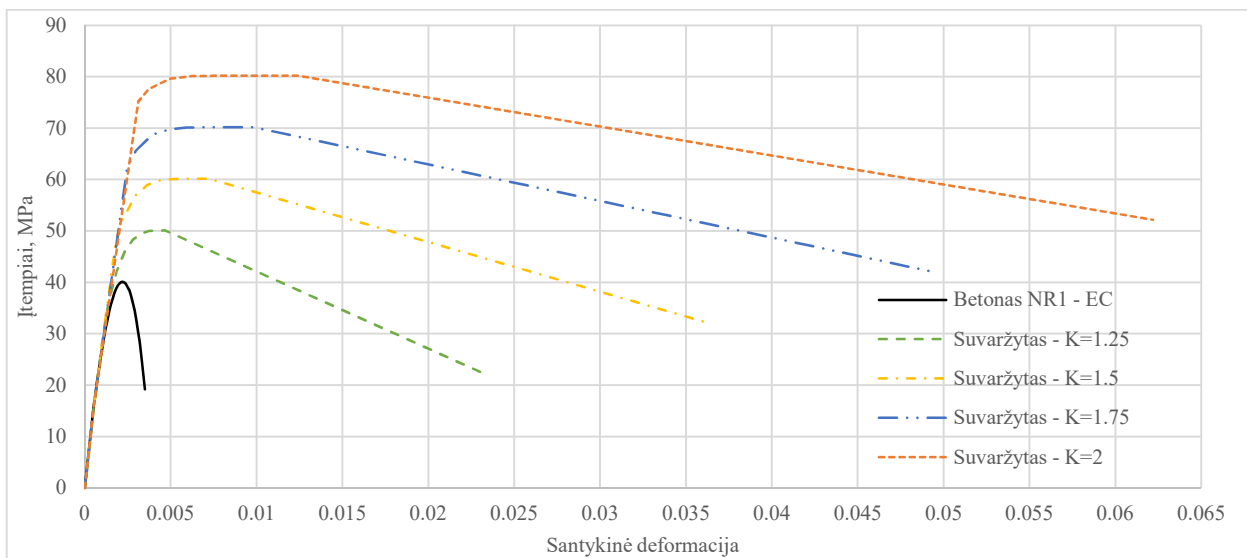
Kai $1 \leq x \leq x_u$:
$$f_c = K \cdot f'_c - (f'_c - 12) \cdot \left(\frac{x-1}{x_u-1}\right) \quad (4.74)$$

Čia:

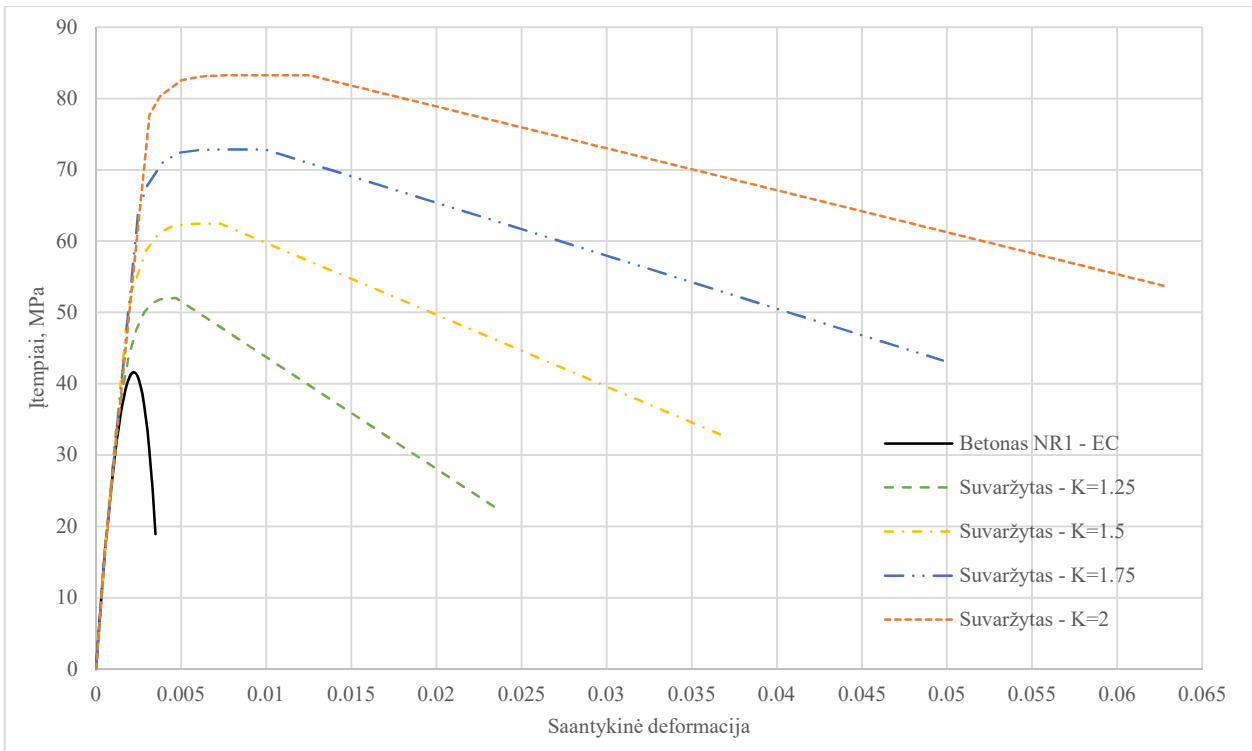
$$x_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cc}} = 5 \quad (4.75)$$

$$f'_{cu} = 12 + f'_c \cdot (K - 1) \quad (4.76)$$

Pagal aprašytas formules gaunamos kreivės suvaržytam betonui. Formulės nesuvaržyto betono kreivėms gauti aprašytos 3.1. skyriuje.



4.24 pav. Sijai NR1 eksperimente naudoto betono įtempių-santykinių deformacijų priklausomybės. Suvaržytas ir nesuvaržytas betonas



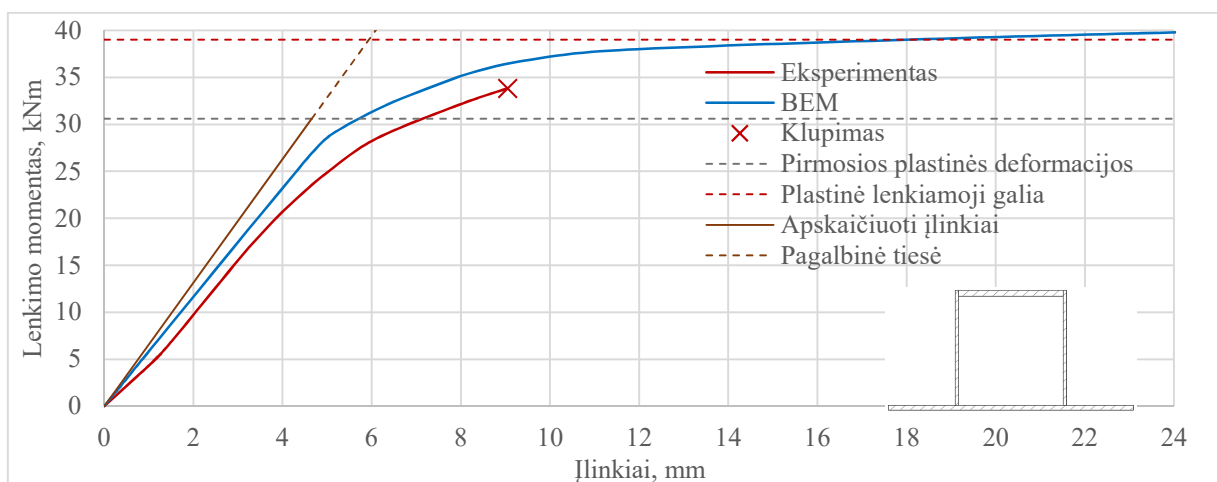
4.25 pav. Sijai NR2 eksperimente naudoto betono įtempių-santykinų deformacijų priklausomybės. Suvaržytas ir nesuvaržytas betonas

Abiem plieninėms (NR1-M, NR2-M) sijoms pateikiama po vieną grafiką (pav. 4.26 ir 4.27). Jame yra dvi kreivės: eksperimentiškai gauta ir teorinė (pagal BEM). Brėžiamos trys tiesės. Dvi iš jų rodo apskaičiuotas pirmąsias plieno plastines deformacijas ir apskaičiuotą plastinę lenkiamąją galią. Trečioji tiesė rodo teoriškai apskaičiuotą įlinkį, priklausomai nuo lenkimo momento.

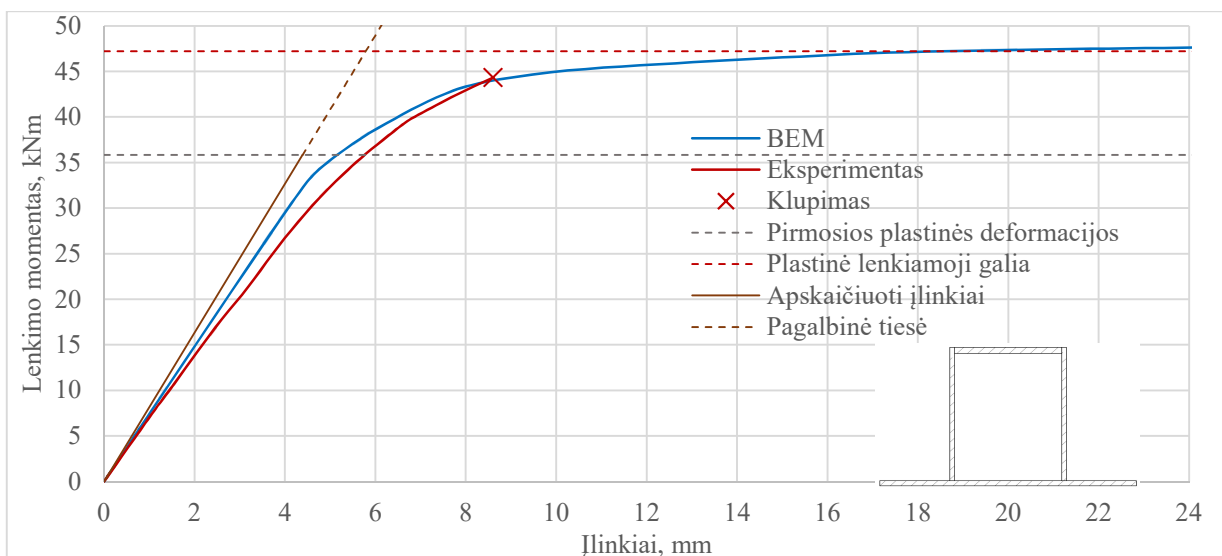
Abiem kompozitinėms sijoms be armatūros (NR1-K, NR2-K) pateikiami trys grafikai. Pirmiausiai palyginamos teorinės sijos lenkimo momentų-įlinkių kreivės, naudojant įvairaus suvaržymo laipsnio ir nesuvaržytą betoną. Toliau esančiame grafike palyginama eksperimentiškai gauta kreivė su trimis (skirtingi sukibimo variantai) suvaržytą betoną ($K=2$) naudojant gautomis kreivėmis ir trimis nesuvaržytą betoną naudojant gautomis kreivėmis. Trečiajame grafike visuomet yra trys kreivės: eksperimentinė ir dvi teorinės (nesuvaržytas betonas ir suvaržytas ($K=2$)). Kaip ir nagrinėjant plienines sijas, brėžiamos trys tiesės, kurios čia turi tokią pačią prasmę.

Abiem kompozitinėms sijoms (NR1-KA, NR2-KA) analogiškai pateikiama po tris grafikus. Skirtumas čia tik tas, kad šios sijos praktiniame eksperimente nebuvo tirtos, todėl nėra eksperimentiškai gautos kreivės ir nagrinėjami tik teoriniai rezultatai.

4.3.1. Plieninės sijos



4.26 pav. Plieninės sijos NR1-M baigtinių elementų modelio ir eksperimento lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės, teorinių skaičiavimų rezultatai



4.27 pav. Plieninės sijos NR2 baigtinių elementų modelio ir eksperimento lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės, teorinių skaičiavimų rezultatai

Palyginus plieninių sijų grafikus, matoma, kad teoriniuose grafikuose visuomet gaunamas didesnis sijų standumas. Kol sijos dirba tampriai, eksperimentiškai gautas įlinkis yra 10–12 proc. didesnis nei gautas pagal BEM. Kita vertus, pats kreivės pobūdis išlieka toks pats. Jos išlieka lygiagrečios. Toks rezultatas yra paaiškinamas ir suprantamas, nes baigtinių elementų metodu nagrinėtas idealus variantas. Sijos sumodeliuotos kaip ištisinis skerspjūvis. Sukibimas tarp plieninių sijos elementų yra standus, o įtempių koncentracijos nėra gaunamos. Eksperimente nagrinėtos sijos yra sudėtinio skerspjūvio ir yra suvirintos iš atskirų lakštų. Suvirinimas čia nutraukiamas, dėl to gaunamos įtempių koncentracijos ir tas pats įlinkis pasiekiamas, veikiant

mažesnei apkrovai. Be to, eksperimentiškai nagrinėtų sijų kampai buvo nusklembti. Tai taip pat lėmė mažesnę lenkiamąją galią.

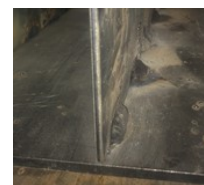
Klupimas eksperimento metu įvyko, veikiant 142,5 kN (sija NR1-M) ir 188 kN (sija NR2-M) apkrovoms. Teoriškai skaičiuojant, sijų sienutės turėjo išklupti, veikiant 156,25 kN ir 216,825 kN apkrovoms atitinkamai (žr. 4 priedą). Taigi, teoriškai apskaičiuotos apkrovos buvo iki 15 % didesnės. Skirtumą taip pat galėjo nulemti prasta suvirinimo kokybė (4.28–4.30 pav.).



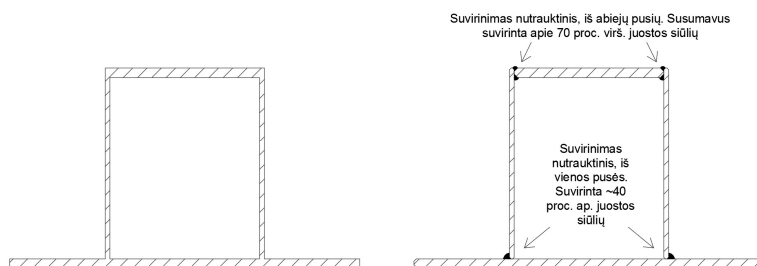
4.28 pav. Sijos viršutinės juostos suvirinimas



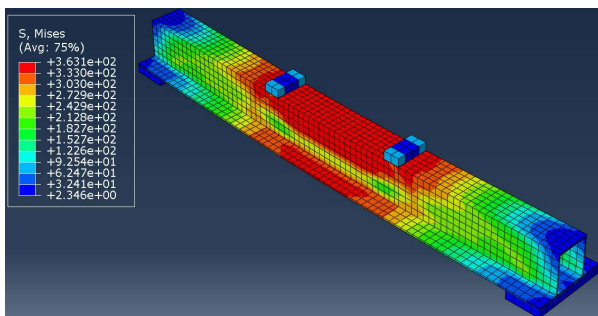
4.29 pav. Sijos viršutinės juostos suvirinimas iš vidaus



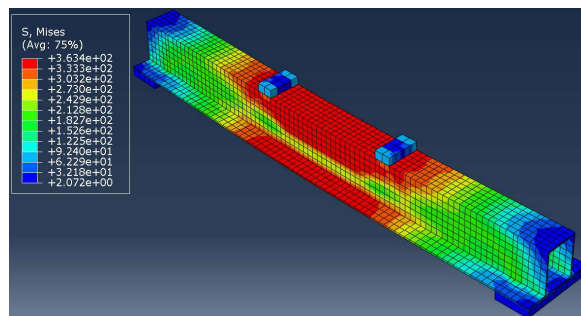
4.30 pav. Sijos apatinės juostos suvirinimas tik iš išorės



4.31 pav. Teoriškai nagrinėtas idealizuotas skerspjūvis (kairėje) ir eksperimente tirtos sijos principinis skerspjūvis



4.32 pav. Plieninės sijos NR1-M Von Miseso įtempiai ties teorine skerspjūvio takumo riba

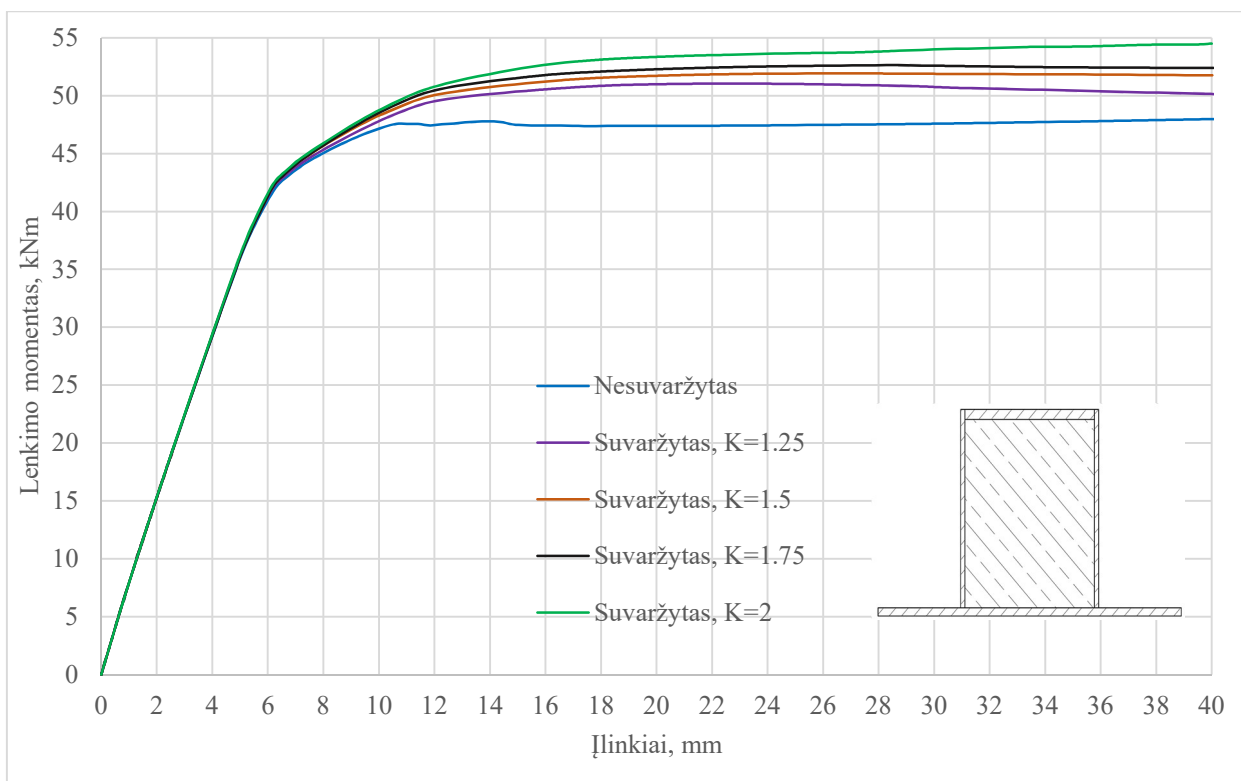


4.33 pav. Plieninės sijos NR2-M Von Miseso įtempiai ties teorine skerspjūvio takumo riba

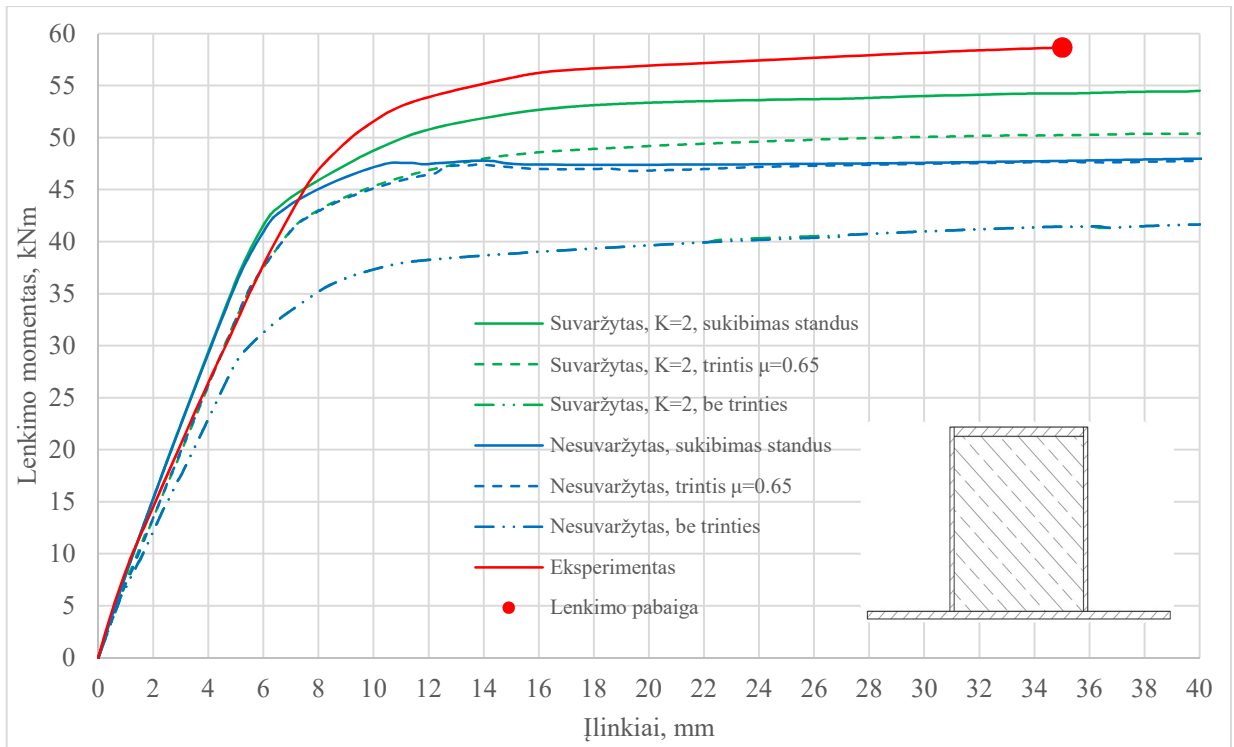
4.32–4.33 pav. pateikti plieninių sijų Von Miseso įtempiai, veikiant apkrovai, kuri yra lygi teoriškai apskaičiuotai plastinei lenkiamajai galiai. Teoriškai skaičiuojant, naudojami stačiakampiai įtempių pasiskirstymo blokai ir visas skerspjūvis pasiekia lygiai 355 MPa įtempius. Nagrinėjant sijas ir veikiant šiai apkrovai, plieninio profilio viršutinė ir apatinė dalys viršija 355 MPa ir siekia 363 MPa. Ties skerspjūvių viduriu sienutėse įtempiai yra iki 300 MPa.

Baigtinių elementų metodu gauti rezultatai yra panašūs į rodiklius, apskaičiuotus teoriškai. Pirmosios plieno plastinės deformacijos pasireiškia, veikiant ~6 proc. didesniai lenkimo momentui už kreivės zoną, kurioje matomas užlinkimas. Teoriškai apskaičiuota plastinė lenkiamoji galia yra 27–32 proc. didesnė nei lenkimo momentas, kuriam veikiant prasideda pirmosios plastinės deformacijos. Plastinė lenkiamoji galia, lyginant su horizontalia kreivės dalimi, apskaičiuota labai tiksliai. Kita vertus, matoma, kad ties šia apskaičiuota riba dar yra nežymus lenkimo momento augimas. Taip yra todėl, kad tokio tipo skaičiavimas yra tik prielaida, skirta skaičiavimui supaprastinti. Čia skaičiuojama, jog visas skerspjūvis pasiekia lygiai 355 MPa įtempis. Iš tikrųjų, kai kurios plieninio skerspjūvio vietos šio įtempio dar gali būti nepasiekusios, o kituose taškuose įtempis jau gali būti ženkliai didesnis. Matoma, kad teoriškai apskaičiuotas standumas yra pats didžiausias.

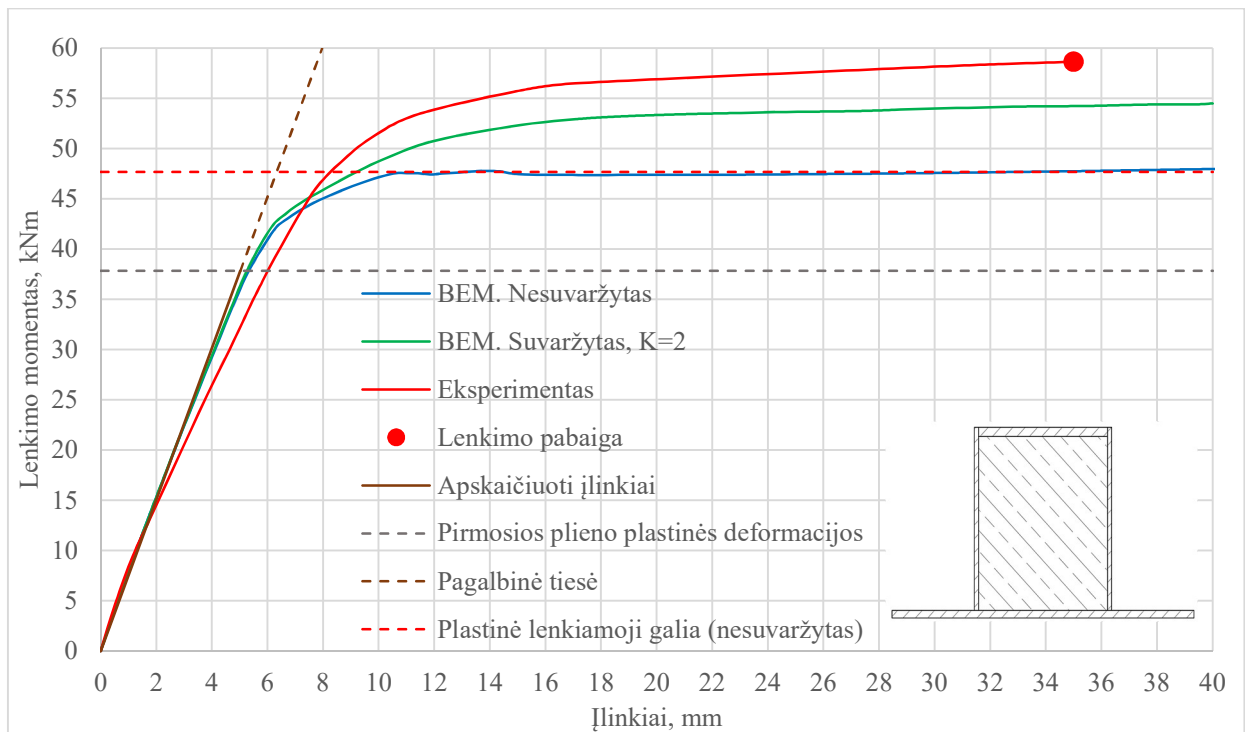
4.3.2. Kompozitinės sijos be armatūros



4.34 pav. Kompozitinės sijos (be armatūros) NR1-K baigtinių elementų modelių lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės. Sukibimas standus. Suvaržytas ir nesuvaržytas betonas

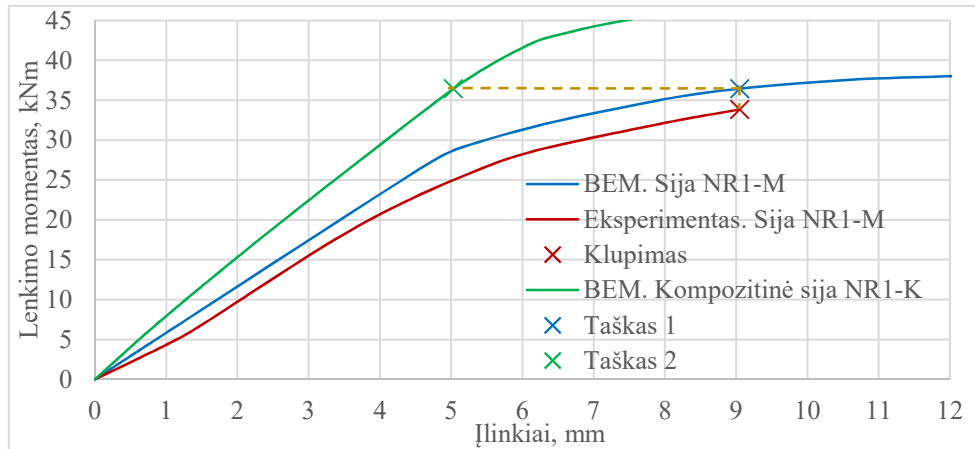


4.35 pav. Kompozitinės sijos (be armatūros) NR1-K baigtinių elementų modelių ir eksperimento lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės. Įvairūs sukibimo variantai. Suvaržytas ir nesuvaržytas betonas



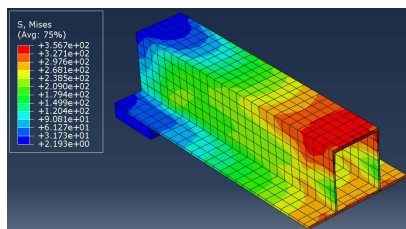
4.36 pav. Kompozitinės sijos (be armatūros) NR1-K baigtinių elementų modelių ir eksperimento lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės, teorinių skaičiavimų rezultatai

4.37 pav. pateikiamos plieninės (NR1-M) ir kompozitinės (NR1-K) HSQ sijų lenkimo momentų-įlinkių kreivės. Tiriama zona, kurioje sija išklupo eksperimento metu. Nuo eksperimentinės kreivės brėžiamas statmuo į plieninės sijos teorinę kreivę. Gaunamas charakteringas taškas 1. Toliau statmuo brėžiamas į kompozitinės sijos kreivę. Čia gaunamas 2 taškas.

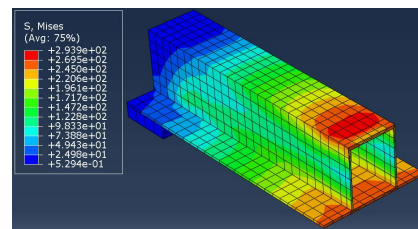


4.37 pav. Eksperimentinė ir teorinė sijos NR1-M lenkimo momentų-įlinkių kreivės, teorinė sijos NR1-K kreivė ir tiriamų taškų žymėjimas

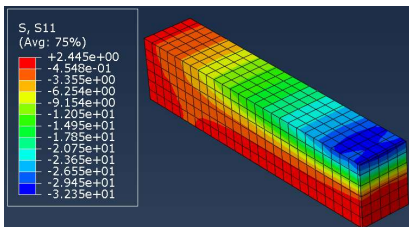
4.38 pav. pateikti plieninės sijos NR1-M įtempiai tuo metu, kai eksperimentinė sija išklupo. Matome, kad viršutinė sienutės dalis ir viršutinė juosta jau yra pasiekusi takumo įtempius. Siją užbetonavus ir veikiant tai pačiai apkrovai, sijos viršutinės juostos įtempiai yra iki 300 MPa (žr. 4.39 pav.). Viršutinėje sienutės dalyje įtempiai nesiekia 270 MPa.



4.38 pav. Plieninės sijos NR1-M Von Miseso įtempiai kreivės 1 taške. Pjūvis ties konc. apkrova

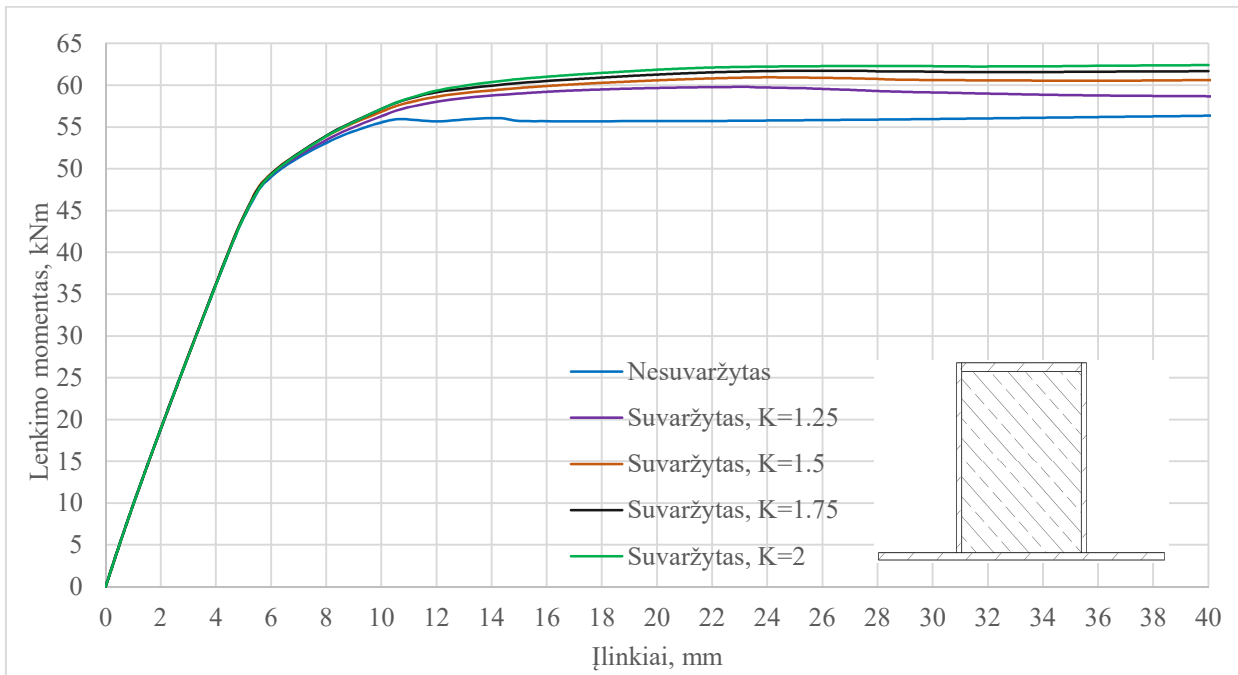


4.39 pav. Kompozitinės sijos NR1-K plieninio profilio Von Miseso įtempiai kreivės 2 taške

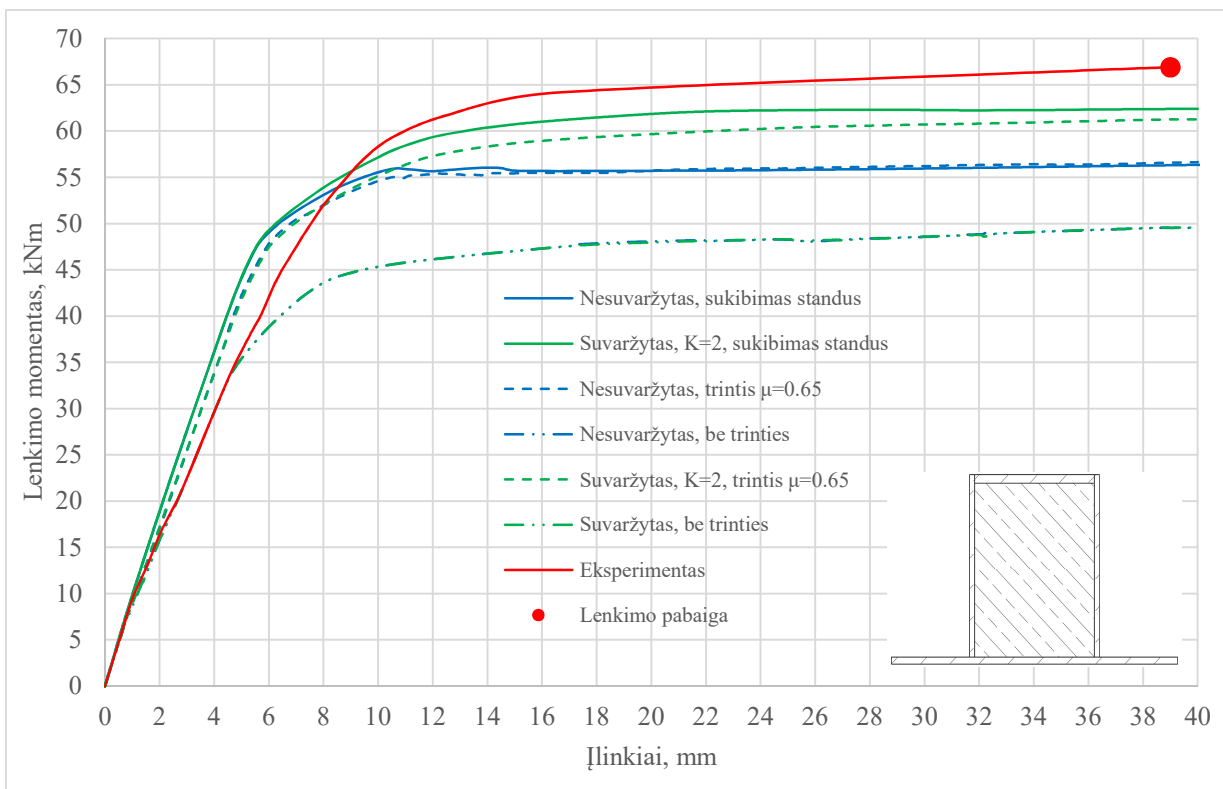


4.40 pav. Kompozitinės sijos NR1-K betono normaliniai įtempiai kreivės 2 taške

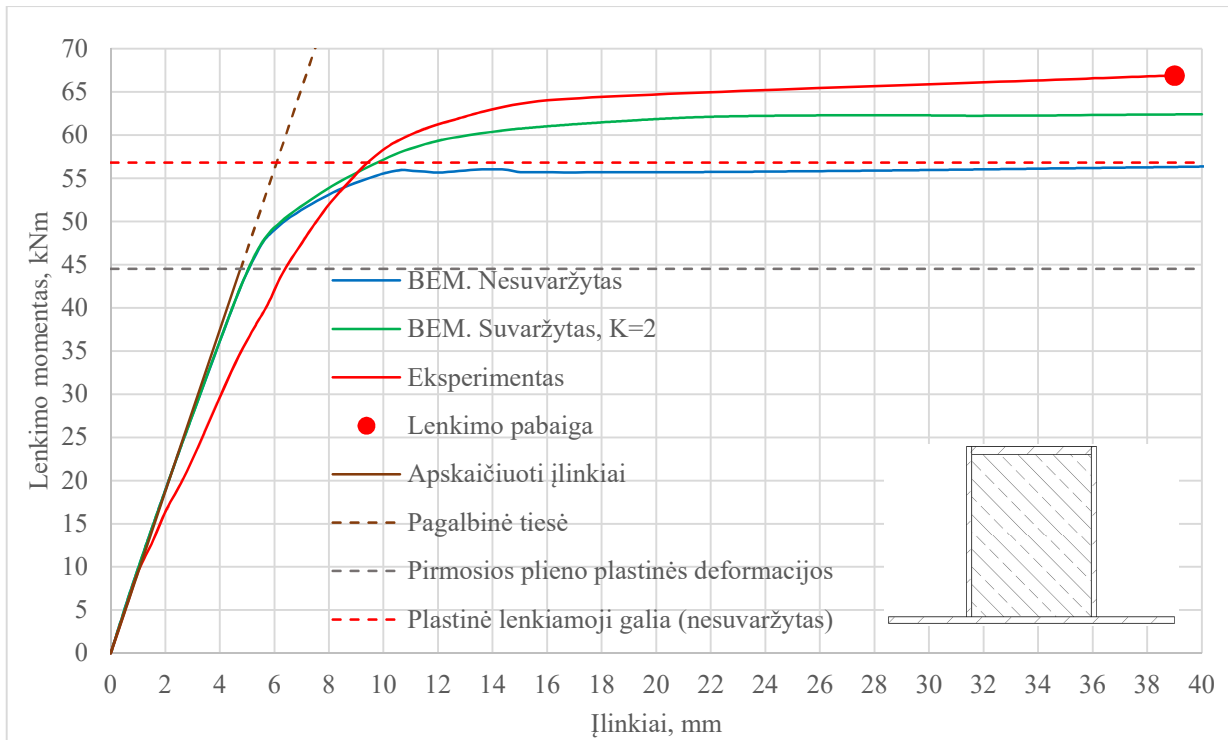
Analogiškai pateikiamos sijos NR2-K kreivės.



4.41 pav. Kompozitinės sijos (be armatūros) NR2-K baigtinių elementų modelių lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės. Sukibimas standus. Suvaržytas ir nesuvaržytas betonas

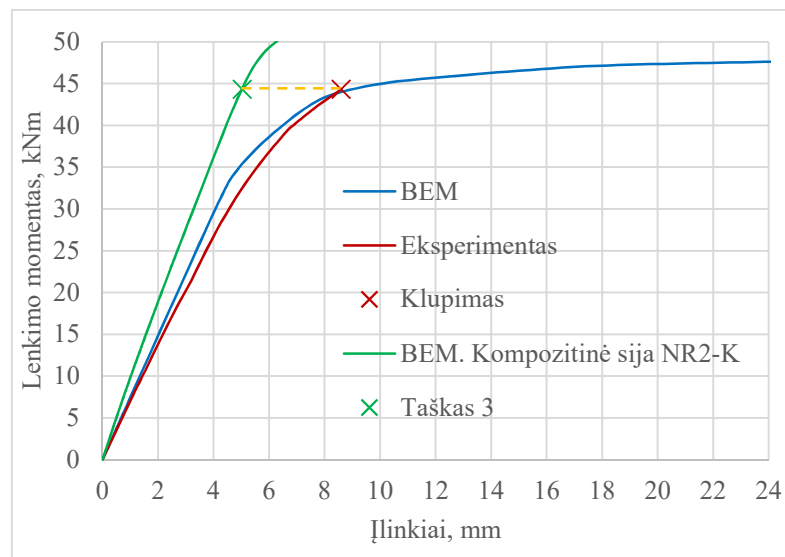


4.42 pav. Kompozitinės sijos (be armatūros) NR2-K baigtinių elementų modelių ir eksperimento lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės. Įvairūs sukibimo variantai. Suvaržytas ir nesuvaržytas betonas



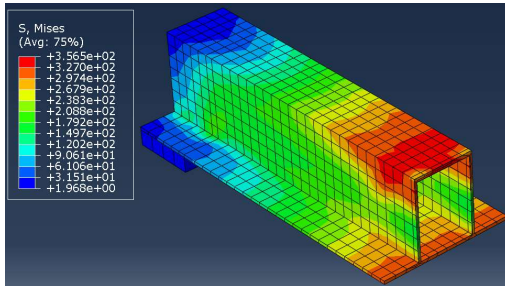
4.43 pav. Kompozitinės sijos (be armatūros) NR1-K baigtinių elementų modelių ir eksperimento lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės, teorinių skaičiavimų rezultatai

4.44 pav. pateikiamos plieninės (NR2-M) ir kompozitinės (NR2-K) HSQ sijų lenkimo momentų-įlinkių kreivės. Tiriama zona, kurioje sija išklupo eksperimento metu. Nuo eksperimentinės kreivės brėžiamas statmuo į kompozitinės sijos teorinę kreivę. Gaunamas charakteringas taškas 3.

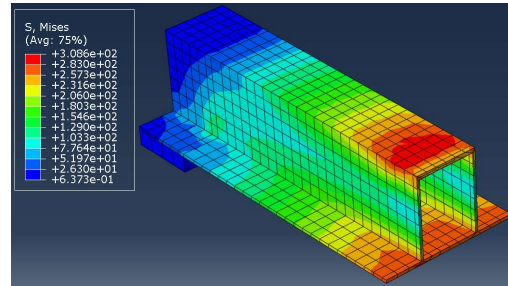


4.44 pav. Eksperimentinė ir teorinė sijos NR2-M lenkimo momentų-įlinkių kreivės, teorinė sijos NR2-K kreivė ir tiriamų taškų žymėjimas

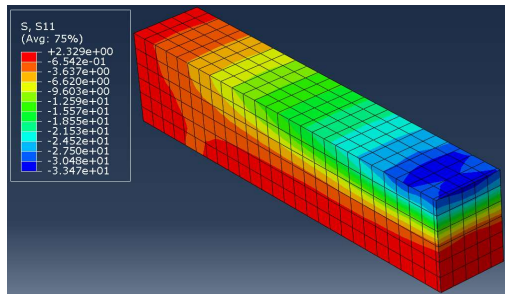
4.45 pav. pateikti plieninės sijos NR2-M įtempiai tuo metu, kai sija išklupo. Matome, kad viršutinė sienutės dalis ir gniuždoma juosta yra pasiekusi takumo įtempius. Siją užbetonavus ir veikiant tai pačiai apkrovai, sijos sienutės įtempiai yra iki 285 MPa (žr. 4.46 pav.). Viršutinė sijos juosta čia taip pat dar nėra pradėjusi tekėti.



4.45 pav. Plieninės sijos NR2-M Von Miseso įtempiai kreivės 1 taške. Pjūvis ties konc. apkrova



4.46 pav. Kompozitinės sijos NR2-K plieninio profilio Von Miseso įtempiai kreivės 2 taške



4.47 pav. Kompozitinės sijos NR2-K betono normaliniai įtempiai kreivės 2 taške

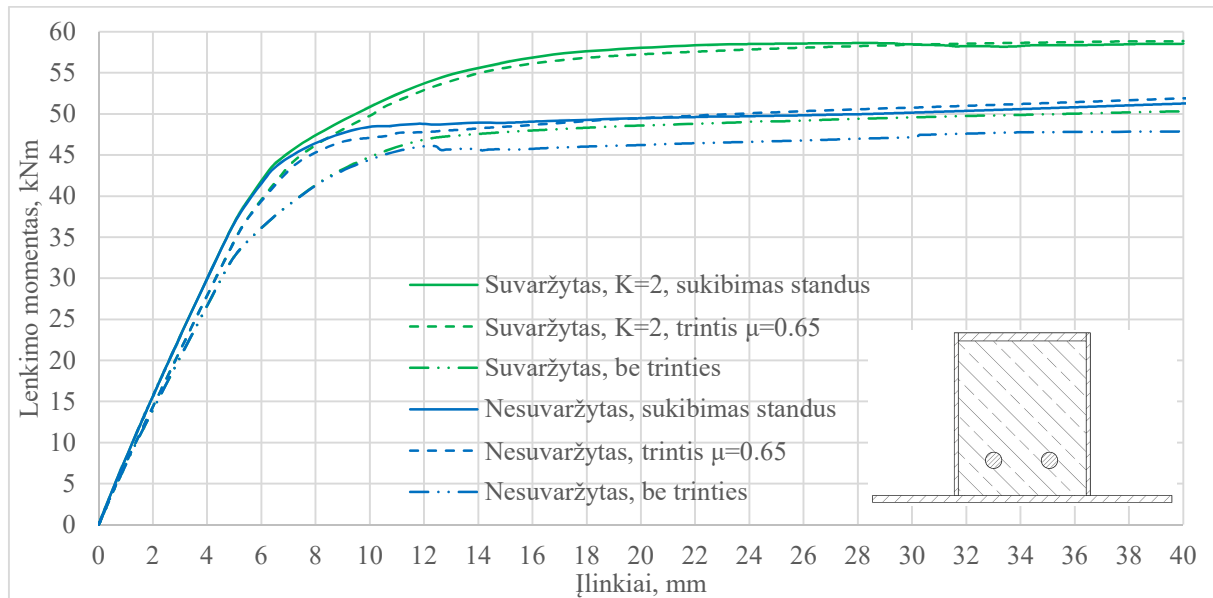
Palyginus kompozitinių sijų be armatūros lenkimo momentų-įlinkių kreives matoma, kad didelę įtaką turi tai, kurią betono įtempių-deformacijų priklausomybę naudojame. Be to, labai svarbus ir sukibimas tarp plieno ir betono. Kai sukibimas vertinamas kaip standus, sija su suvaržytu betonu pasiekia 10–15 proc. didesnę plastinę lenkiamąją galią nei sijos su nesuvaržyto betono modeliu. Tiek suvaržyto, tiek nesuvaržyto betono atveju, kai sukibimas vertinamas kaip trintis (su koeficientu 0,65), gaunamos artimos kreivės tiems atvejams, kai naudojamas standus sukibimas. Standaus sukibimo atveju plastinė lenkiamoji galia yra iki 4–8 proc. didesnė. Nesuvaržyto betono atveju, šis skirtumas yra dar mažesnis ir plastinė galia skiriasi tik iki 1 %. Matoma, kad priklausomai nuo betono darbo įvertinimo, skiriasi ir pradinis sijos standumas. Kai betonas suvaržytas, sijos, kuriose plieno ir betono kontaktas modeliuojamas kaip trintis, įlinkis yra 5–12 proc. didesnis nei sijos, kuriose plieno ir betono sukibimas standus. Tiek suvaržyto, tiek nesuvaržyto betono kreivės, esant vienodam sukibimui, yra vienodos, kol neprasideda žymios plastinės deformacijos. Pagal nustatytą betono įtempių-deformacijų priklausomybę taip ir turėtų

būti. Išskirtinis atvejis yra tuomet, kai tarp plieno ir betono nėra jokio sukibimo. Tokiu atveju betono suvaržymas įtakos neturėjo. Sijos, kuriose betono darbas įvertintas kaip suvaržytas, o sukibimas kaip standus, turėjo 30–32 proc. didesnę plastinę lenkiamąją galią nei sijos, kuriose sukibimo tarp plieno ir betono nėra. Analogiškos sijos, kuriose betonas vertinamas kaip nesuvaržytas, turi 15–18 proc. didesnę plastinę lenkiamąją galią. Kita vertus, toks atvejis, kai nėra pasipriešinimo, yra galimas tik teoriškai.

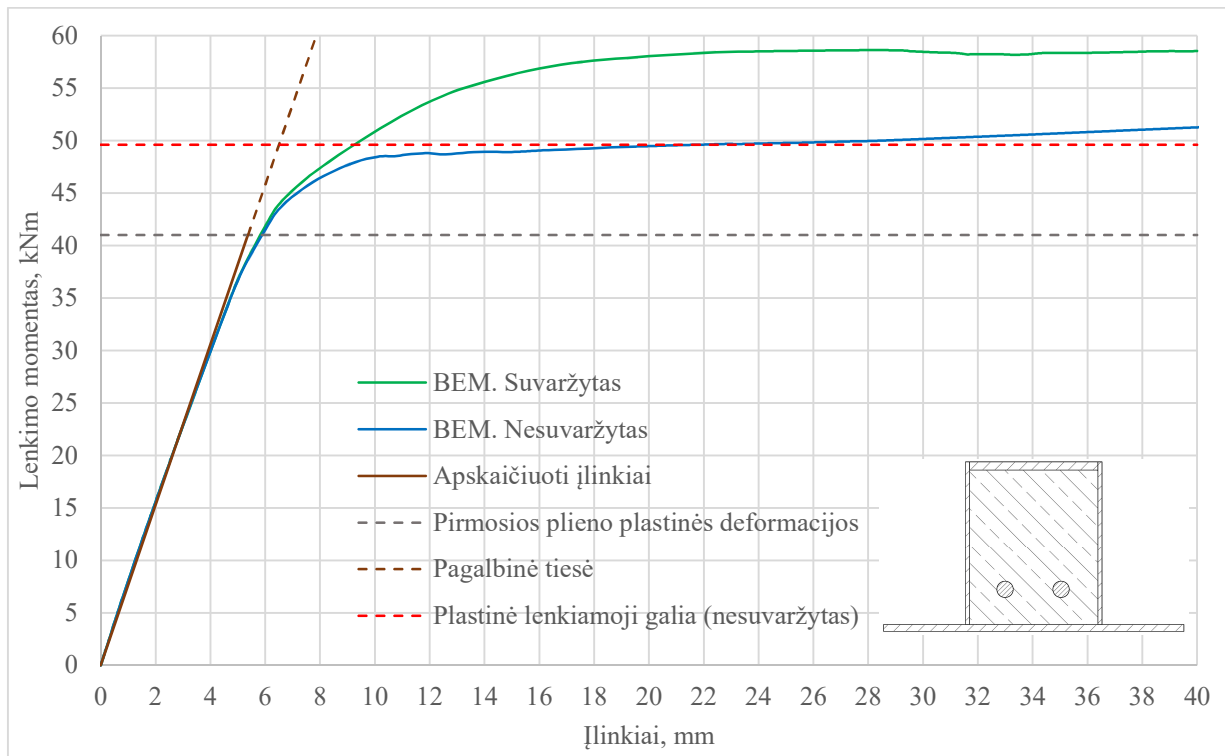
Teoriškai apskaičiuota plastinė lenkiamoji galia yra 23–28 proc. didesnė nei lenkimo momentas, kuriam veikiant prasideda pirmosios plieno plastinės deformacijos. Lenkimo momentas, kuriam veikiant prasideda pirmosios plieno plastinės deformacijos, yra artimas tam, kuris gautas pagal baigtinių elementų metodą (toliau, BEM). Pastebima, kad žymesnis kreivės užlinkimas matomas būtent ties šiuo apskaičiuotu lenkimo momentu. Plastinė lenkiamoji galia, apskaičiuota teoriškai, atitinką tą sijos momentų-įlinkių priklausomybę, kur betonas įvertintas kaip nesuvaržytas. Teoriškai apskaičiuotas pradinis standumas gaunamas artimas tam, kuris gautas pagal BEM. Prasidėjus pirmosioms plastinėms plieno deformacijoms, pagal BEM gautas įlinkis yra iki 3–5 proc. didesnis. Nežymaus nukrypimo ties šia riba jau galima tikėtis, kadangi anksčiau už pirmąsias plieno plastines deformacijas jau yra prasidėjusios ir gniuždomo betono netamprios deformacijos.

Pastebima, kad lyginant visas teorines kreives su eksperimentine, artimiausi rezultatai eksperimentinei kreivei gaunami modelyje, kuriame betonas vertinamas kaip suvaržytas, o sukibimas tarp plieno ir betono kaip standus. Kaip ir paprastos sijos atveju, pradinis standumas yra didesnis (10–18 %) teoriniame modelyje. To priežastys yra paaiškintos praėjusiame skyriuje. Esant dideliems įlinkiams, praktinio eksperimento lenkimo momentai, esant tam pačiam įlinkiui, jau yra didesni nei teoriniame modelyje. Akivaizdu, kad betonas dirba kaip suvaržytas, kadangi prasidėjus žymioms plieno plastinėms deformacijoms, nėra matomas sijos stiprio mažėjimas. Taigi, betono stipris tikrai nemažėja taip ženkliai kaip nesuvaržyto betono modelyje. Kita vertus, yra labai daug įvairių skirtingų modelių suvaržyto betono darbui aprašyti. Kai kurie iš tų modelių yra labai skirtingi, todėl, gali būti, jog naudojant kitą modelį, kreivė būtų dar artimesnė tai, kuri gauta eksperimentų metu.

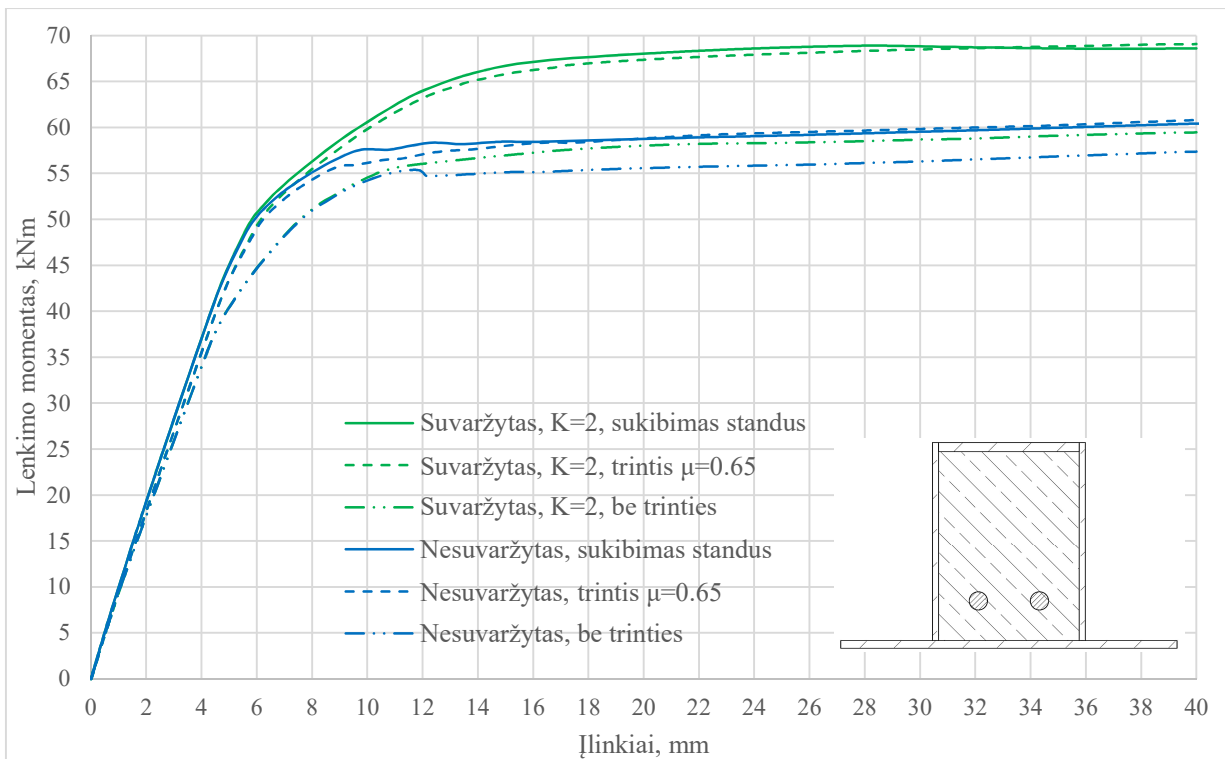
4.3.3. Kompozitinės sijos su armatūra



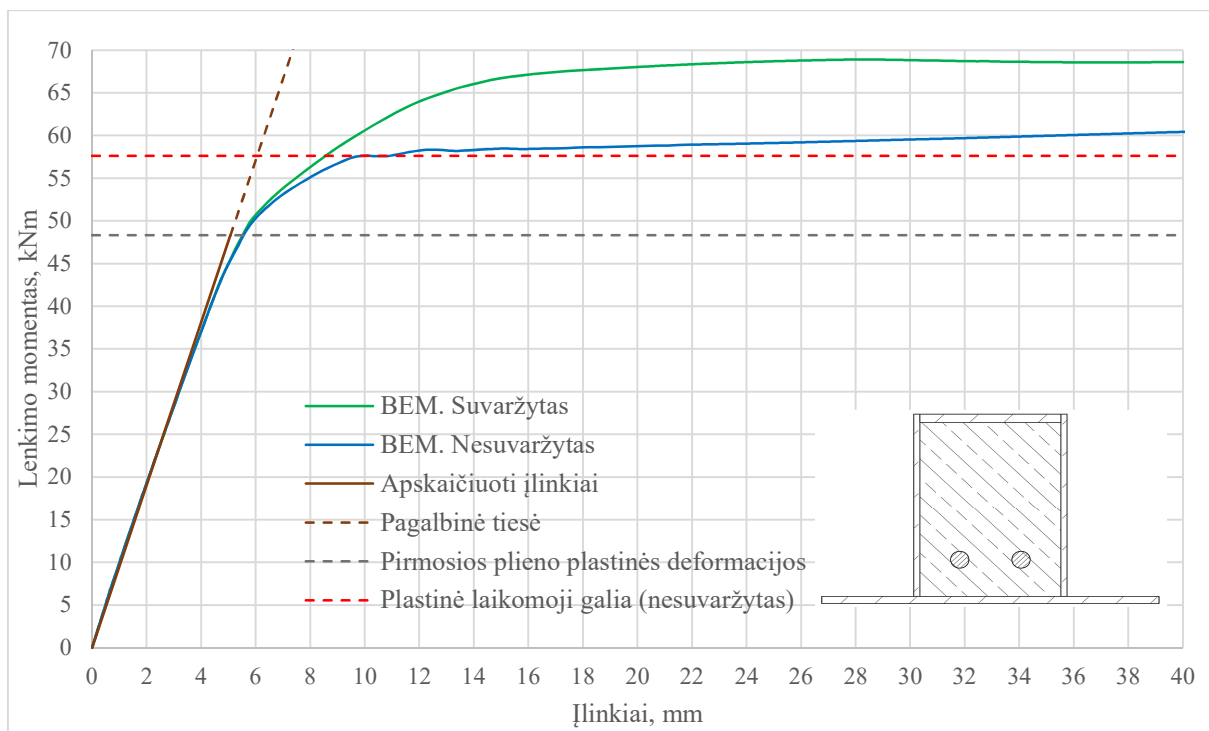
4.48 pav. Kompozitinės sijos (su armatūra) NR1-KA baigtinių elementų modelių lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės. Įvairūs sukibimo variantai. Suvaržytas ir nesuvaržytas betonas



4.49 pav. Kompozitinės sijos (su armatūra) NR1-KA baigtinių elementų modelių lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės, teorinių skaičiavimų rezultatai



4.50 pav. Kompozitinės sijos (su armatūra) NR2-KA baigtinių elementų modelių lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės. Įvairūs sukibimo variantai. Suvaržytas ir nesuvaržytas betonas

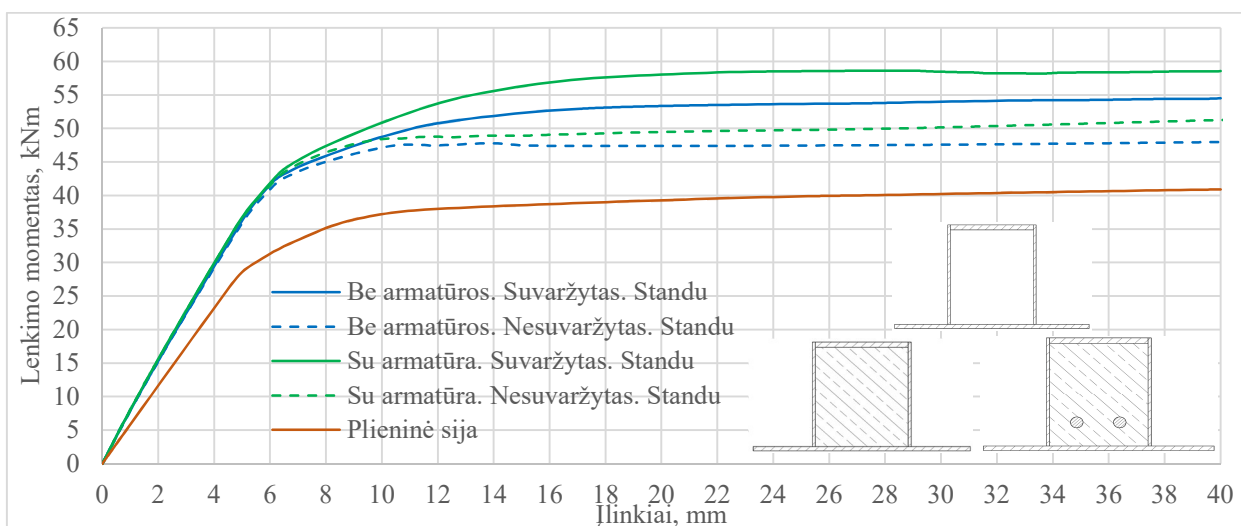


4.51 pav. Kompozitinės sijos (su armatūra) NR2-KA baigtinių elementų modelių lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės, teorinių skaičiavimų rezultatai

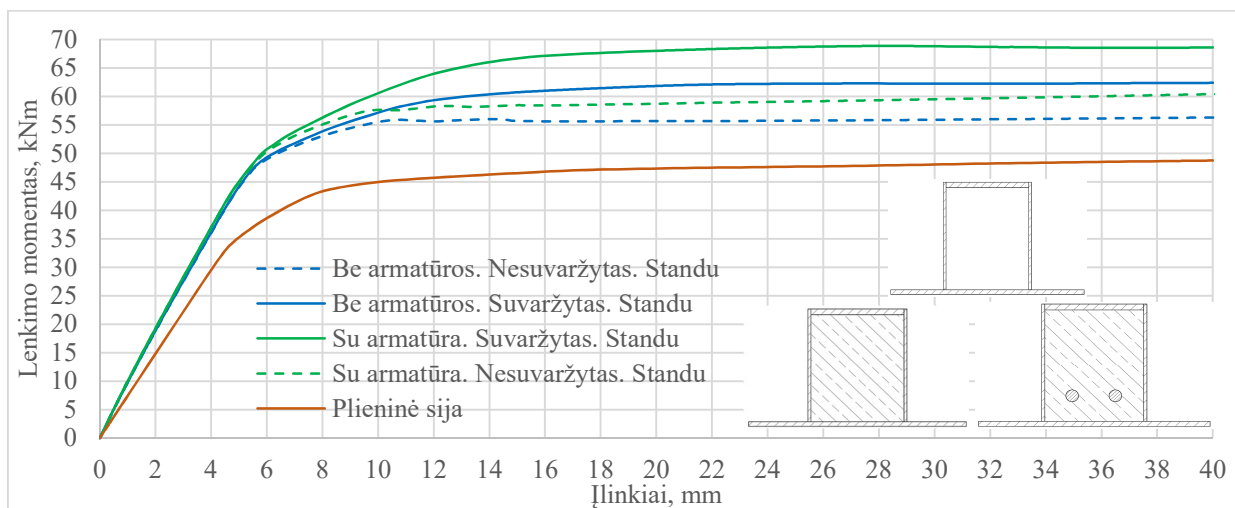
Nagrinėdami kompozitines sijas su armatūra, matome, kad čia taip pat gaunami skirtingi rezultatai, priklausomai nuo to, kaip vertinamas betonas ir koks yra plieno-betono sukibimas. Kai sukibimas vertinamas kaip standus, sija su suvaržytu betonu pasiekia ~13,5 proc. didesnę plastinę lenkiamąją galią. Tiek suvaržyto, tiek nesuvaržyto betono atveju, kai sukibimas vertinamas kaip trintis (su koeficientu 0,65), gaunamos analogiškos kreivės kaip ir tais atvejais, kai naudojamas standus sukibimas. Esant tam pačiam įlinkiui, lenkimo momentas standaus sukibimo atveju yra iki 0,5 proc. didesnis. Be to, skiriasi ir pradinis sijos standumas. Kai betonas suvaržytas, sijos, kuriose plieno-betono kontaktas įvertintas kaip trintis, įlinkis yra 3–5 proc. didesnis nei sijos, kuriose sukibimas laikomas standžiu. Tiek suvaržyto, tiek nesuvaržyto betono kreivės, esant vienodam sukibimui, yra vienodos, kol neprasideda žymios plastinės deformacijos. Išskirtinis atvejis ir vėl yra tuomet, kai tarp plieno ir betono nėra jokio sukibimo. Tuo atveju, kai betonas vertinamas kaip suvaržytas, nei viename kreivės taške nėra matomas sijos stiprumo mažėjimas. Priešingas atvejis matomas toje kreivėje, kur sukibimo nėra, o betonas nesuvaržytas. Sijos, kuriose betono darbas įvertintas kaip suvaržytas, o sukibimas kaip standus, turėjo 15–16 proc. didesnę plastinę lenkiamąją galią nei tos sijos, kuriose tarp plieno ir betono nėra jokio sukibimo. Analogiškos sijos, kuriose betonas vertinamas kaip nesuvaržytas, turi 5–7 proc. didesnę plastinę lenkiamąją galią.

Teoriškai apskaičiuota plastinė lenkiamoji galia yra 19–21 proc. didesnė nei lenkimo momentas, kuriam veikiant prasideda pirmosios plieno plastinės deformacijos. Lenkimo momentas, kuriam veikiant prasideda pirmosios plieno plastinės deformacijos yra artimas tam, kuris gautas pagal BEM. Pastebima, kad žymesnis kreivės užlinkimas matomas būtent ties šiuo apskaičiuotu lenkimo momentu. Plastinė lenkiamoji galia, apskaičiuota teoriškai, atitinka tą sijos momentų-įlinkių priklausomybę, kuri gauta betoną laikant nesuvaržytu. Teoriškai apskaičiuotas pradinis standumas gaunamas artimas tam, kuris gautas pagal BEM. Prasidėjus pirmosioms plastinėms plieno deformacijoms, pagal BEM gautas įlinkis yra iki 10 proc. didesnis. Nežymaus nukrypimo ties šia riba jau galima tikėtis, kadangi anksčiau už pirmąsias plieno plastines deformacijas jau yra prasidėjusios ir gniuždomo betono netamprios deformacijos.

4.3.4. Skirtingų tipų sijų palyginimas



4.52 pav. Skirtingų sijos NR1 variantų (NR1-M, NR1-K, NR1-KA) lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės



4.53 pav. Skirtingų sijos NR2 variantų (NR2-M, NR2-K, NR2-KA) lenkimo momentų-įlinkių priklausomybės

Lyginant skirtingų tipų sijas, matome, kad sijų užbetonavimas ir suarmavimas turi didelę įtaką sijos lenkiamajai galiai. Laikant betoną suvaržytu, matome, kad kompozitinė sija su armatūra turi 15–18 proc. didesnę plastinę lenkiamąją galią nei kompozitinė sija be armatūros. Kompozitinė sija be armatūros yra 25–28 proc. stipresnė nei paprasta plieninė HSQ sija. Be to, kompozitinė sija su armatūra turi 43–47 proc. didesnę plastinę lenkiamąją galią nei plieninė sija.

Kai betoną vertiname kaip nesuvaržytą, šie skirtumai yra mažesni. Kompozitinė sija su armatūra turi 11–14 proc. didesnę plastinę lenkiamąją galią už siją be armatūros. Kompozitinė sija be armatūros yra 20–22 proc. stipresnė nei paprasta plieninė sija. Be to, kompozitinė sija su armatūra turi 30–35 proc. didesnę plastinę lenkiamąją galią nei plieninė sija.

4.4. Skyriaus išvados

Atlikus praktinį eksperimentą, galima daryti išvadą, kad HSQ sijos užbetonavimas yra tikslingas. Priešingai nei paprastos plieninės sijos, kompozitinių sijų sienutės nebeklupo. Sijos suiro plastiškai ir sklandžiai. Plieniniai kompozitinės sijos elementai išliko pastovūs. Pirmosios plastinės plieno deformacijos prasidėjo veikiant 35–50 proc. didesniai lenkimo momentui. Suirimas įvyko, veikiant 52–74 proc. didesniai lenkimo momentui.

Sijų užbetonavimo tikslingumą patvirtino ir baigtinių elementų metodu atlikta analizė. Čia gauta, kad kompozitinė sija su armatūra yra iki 18 proc. stipresnė už siją be armatūros. Kompozitinė sija be armatūros yra iki 28 proc. stipresnė už plieninę. Kompozitinė sija su armatūra turi iki 47 proc. didesnę plastinę lenkiamąją galią. Baigtinių elementų programoje klupumas nevertintas, todėl plieninių sijų kreivės nenutrūksta, kai prasideda žymios plastinės deformacijos.

Atlikus sijų baigtinių elementų analizę buvo nustatyta, kad didelę įtaką sijos lenkiamajai galiai turi betono darbo įvertinimas (suaržytas arba nesuaržytas) ir sukibimas tarp plieno ir betono. Eksperimentiniams rezultatams artimiausia kreivė, gauta baigtinių elementų metodu, buvo ta, kurioje sukibimas buvo modeliuotas kaip standus, o betono darbas įvertintas kaip suvaržytas.

Išanalizavus sijas baigtinių elementų metodu matoma, kad pradinis sijos standumas yra didesnis nei gautas eksperimentiškai. Taip yra dėl to, kad šioje programoje nagrinėjamas idealus atvejis, sijos skerspjuvis yra vientisas. Praktiniame eksperimente sija buvo sudėtinio skerspjuvio. Siūlės buvo nutraukiamos, o plieninio profilio elementų kampai nusklembti. Eksperimentiškai gauti plieninės sijos įlinkiai iki pirmųjų plastinių deformacijų yra 11–12 proc. didesni nei gauti pagal BEM. Kreivių pobūdis ir charakteringi taškai yra analogiški tiems, kurie gauti baigtinių elementų metodu.

Apskaičiavus lenkimo momentą, kuriam veikiant prasideda pirmosios plastinės plieno deformacijos ir plastinę lenkiamąją galią ir lyginant šiuos skaičiavimus su baigtinių elementų metodu gautos kreivės charakteringais taškais, matoma, jog skaičiavimai yra tikslūs. Apskaičiuoti įlinkiai, vertinant vidutinį supleišėjusio ir nesupleišėjusio skerspjuvio standumą, pakankamai tiksliai atspindi tampriąją kreivės dalį, gautą pagal BEM. Kreivė pradžioje persidengia su šia apskaičiuota tiese. Prasidėjus pirmosioms plieno plastinėms deformacijoms ir veikiant tai pačiai apkrovai, baigtinių elementų metodu gautas iki 10 proc. didesnis įlinkis.

5. Išvados

1. Atlikus plieninių HSQ sijų tyrimą, nustatyta, kad efektyviausias būdas didinti sijos skerspjūvio efektyvumą, yra sijos aukščio didinimas. 400 mm sienutės aukščio sija turi 48 % mažesnę skerspjūvį nei sija su 200 mm sienute. 320 mm ir 250 mm sienutės aukščio sijos turi 34 % ir 17 % mažesnius skerspjūvius atitinkamai. Kai aukštis yra ribojamas, rekomenduojama parinkti kuo platesnes sijas. Taip sutaupoma iki 6 % plieno. Parinktą plačią siją dar turėtų būti leidžiama skaičiuoti pagal plastinį įtempių pasiskirstymą, o apatinės juostos išnaudojimas šoniniam lenkimui neturėtų viršyti 50 %.
2. Atlikus kompozitinių HSQ ir trapecinių sijų tyrimą ir parinkus sijas su vienodu plieno skerspjūvio plotu, nustatyta, kad siauros sijos turi iki 8 % mažesnę plastinę lenkiamąją galią nei plačios. HSQ sijų vidurinių ir kraštinių taškų įlinkio skirtumai buvo nežymūs, o trapecinės sijos reikšmingai išlanko savo išilginės ašies atžvilgiu. Zonoje, kurioje prasidėjo pirmosios plastinės deformacijos, trapecinių sijų apatinės juostos kraštinio taško įlinkis buvo 10–15 % didesnis nei vidurinio. Lyginant HSQ ir trapecines sijas su vienoda teoriškai apskaičiuota plastine lenkiamąją galią, nustatyta, kad plačios sijos turi iki 7 % mažesnę plieninio profilio skerspjūvio plotą. Plačios HSQ sijos standumas ir čia buvo didžiausias. Veikiant tai pačiai apkrovai, prieš pasireiškiant pirmosioms plastinėms deformacijoms, visų sijų įlinkiai buvo iki 8,5 % didesni nei plačios kompozitinės HSQ sijos.
3. Eksperimento metu lenkiamų plieninių sijų sienutės prarado pastovumą, o sijos nepasiekė plastinės lenkiamosios galios. Užbetonuotų sijų skerspjūvio elementai pastovumą išlaikė. Šios sijos pasiekė plastinę lenkiamąją galią. Pirmosios plastinės deformacijos pasireiškė, veikiant 35–50 % didesniai lenkimo momentui. Suirimas įvyko, veikiant 52–74 % didesniai lenkimo momentui.
4. Atlikus eksperimento sijų baigtinių elementų analizę buvo nustatyta, kad kompozitinės sijos su armatūra turi iki 47 % didesnę plastinę lenkiamąją galią nei paprasta plieninė sija. Kompozitinių sijų be armatūros plastinė lenkiamoji galia buvo iki 28 % didesnė nei plieninių sijų. Pastebėta, kad gautos kompozitinės sijos lenkimo momentų-įlinkių kreivės pobūdis priklauso nuo plieno-betono sukibimo ir betono darbo įvertinimo (sugaržytas arba nesugaržytas). Kai sukibimas vertinamas kaip standus, plastinė lenkiamoji galia, laikant betoną sugaržytu, yra iki 15 % didesnė nei tuo atveju, kai naudojama nesugaržyto betono kreivė. Standaus sukibimo atveju plastinė lenkiamoji galia yra iki 8 % didesnė nei tuo atveju, kai sukibimas įvertinamas kaip

trintis. Standaus sukibimo atveju sijos plastinė lenkiamoji galia yra iki 32 % didesnė nei tuo atveju, kai pasipriešinimo praslydimui nėra. Eksperimentiškai tirtų plieninių sijų įlinkiai tampriojoje stadijoje buvo iki 10–12 % didesni nei gauti baigtinių elementų metodu, o kompozitinių – nuo 10 iki 18 % didesni nei tuo atveju, kai sukibimas tarp plieno ir betono vertinamas kaip standus.

5. Atlikus tyrimus buvo nustatyta, kad HSQ sijos užbetonavimas yra tikslingas, o kompozitinę HSQ siją būtų galima naudoti kaip alternatyvą kompozitinei trapecinei sijai.

6. Literatūros šaltiniai

1. BZDAWKA, K. *Optimization of office building frame with semi-rigid joints in normal and fire conditions*: disertacija [interaktyvus]. Tampere: Tampere University of Technology, 2012 [žiūrėta 2015-11-01]. Prieiga per: [https://tutcris.tut.fi/portal/en/publications/optimization-of-office-building-frame-with-semirigid-joints-in-normal-and-fire-conditions\(a0c201da-1b2e-4da5-8195-d04642bd8b91\).html](https://tutcris.tut.fi/portal/en/publications/optimization-of-office-building-frame-with-semirigid-joints-in-normal-and-fire-conditions(a0c201da-1b2e-4da5-8195-d04642bd8b91).html)
2. BUDDENBAUM GLANS, S. ir ARBMAN KARLSSON, K. *Momentbärförmåga för semikompakta ståltvårsnitt av HSQ-balkar : En modell för interpolering mellan eurokodens klass 2 och 3*: disertacija [interaktyvus]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2014 [žiūrėta 2015-11-01]. Prieiga per: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-156081>
3. ZHAN, Y., ZHAO, R., JOHN MA, Z., XU, T. ir SONG, R. Behavior of Prestressed Concrete-Filled Steel Tube (CFST) Beam. *Engineering Structures*, 2016, vol. 122, pp. 144-155. ISSN 0141-0296.
4. LU, F., LI, S., LI, D. ir SUN, G. Flexural Behavior of Concrete Filled Non-Uni-Thickness Walled Rectangular Steel Tube [interaktyvus]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2007, vol. 63(8), pp. 1051-1057 [žiūrėta 2017-02-01]. Prieiga per: doi: 10.1016/j.jcsr.2006.09.006.
5. SOUNDARARAJAN, A. ir SHANMUGASUNDARAM, K. Flexural Behaviour of concrete-filled Steel Hollow Sections Beams. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2008, vol. 14(2), pp. 107-114. ISSN 1392-3730.
6. HAN, L. Flexural Behaviour of Concrete-Filled Steel Tubes [interaktyvus]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, vol. 60(2), pp. 313-337 [žiūrėta 2017-02-01]. Prieiga per: doi: 10.1016/j.jcsr.2003.08.009.
7. ARVIND, M., KRISHNA, B.N., KUMAR, B.S. ir PRIYA, K.S. Experimental Studies on Confined Steel Concrete Composite Beams Under Pure Bending. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2015, vol. 4(2), pp. 319-324. ISSN 2319-1163.
8. PREETHI, G. ir ELANGO VAN, R. A Numerical, Experimental and Analytical Study on Confined Steel Concrete Composite Beam. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, 2016, vol 5(5), pp. 1804-1810. ISSN 2278-7798.
9. PEREA, T. ir LEON, R. Behavior of Composite CFT Beam-Columns Based on Nonlinear Fiber Element Analysis [interaktyvus]. *Composite Construction in Steel and Concrete VI*, 2011, pp. 237-251 [žiūrėta 2017-02-01]. Prieiga per: doi: 10.1061/41142(396)20.
10. JOHANSSON, M. ir AKESSON, M. Finite Element Study of Concrete-Filled Steel Tubes using a New Confinement-Sensitive Concrete Compression Model. *Nordic Concrete Research*, 2001, vol. 27. pp. 43-62. ISSN 0800-6377.

11. MURUGESAN REDDIAR, M. K. *Stress-Strain Model of Unconfined and Confined Concrete and Stress-Block Parameters*: magistro tezès [interaktyvus]. Texas: Texas A&M University, 2010 [žiūrėta 2016-12-01]. Prieiga per:
<http://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/ETD-TAMU-2009-12-7545/MURUGESAN-REDDIAR-THESIS.pdf?sequence=2>
12. MANDER, J. B., PRIESTLEY, M.J. ir PARK, R. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*, 1988, vol. 114(8), pp. 1804-1826. ISSN 0733-9445.
13. HUANG, C., YEH, Y., LIU, G. ir HU, H. Axial Load Behavior of Stiffened Concrete-Filled Steel Columns. *Journal of Structural Engineering*, 2002, vol. 128(9) pp. 1222-1230. ISSN 1222-1230.
14. KHALEEK, A., YADAV, R. ir CHANDAK, R. Effect of Lateral Confinement on Strength of Concrete. *ISCA Journal of Engineering Sciences*, 2012, vol 1(1), pp. 40-44. ISSN 2278-9472.
15. MARAVEAS, C. Numerical Analysis of DELTA Composite Beams in Fire. Iš: *EUROSTEEL 2014. Seventh European Conference on Steel and Composite Structures*, Napoli, rugsėjis 2014. Napoli: University of Naples Federico II, 2014.
16. KENT, D. C., ir PARK, R. Flexural members with confined concrete. *Journal of the Structural Division*, 1971, vol 97(7), pp. 1969-1990.
17. LI, B., PARK, R. ir TANAKA, H. Stress-strain behavior of high-strength concrete confined by ultra-high and normal-strength transverse reinforcements [interaktyvus]. *ACI Structural Journal*, 2001, vol 98(3), pp. 395-406 [žiūrėta 2017-02-01]. Prieiga per: doi: 10.14359/10228.
18. SAKINO, K. ir SUN, Y. P. Stress-strain curve of concrete confined by rectilinear hoops. *Structural and Construction Engineering AIJ*, 1994, vol 461, pp. 95-104.
19. MONFORTON, G. R. ir WU, T.S. Matrix analysis of semi – rigidly connected frames. *Journal of Structural Division*, 1963, vol 89(6), pp. 13-24.
20. SCHNEIDER, S. P. Axially loaded concrete-filled steel tubes. *Journal of Structural Engineering*, 1998, vol 124(10), pp. 1125-1138. ISSN 0733-9445.
21. PEREA, T. ir LEON, R. T. Composite Beam – Columns Performance Based on Nonlinear Fiber and Finite Element Analysis. Iš: *World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, spalio 2008. Beijing, 2008.
22. HAN, L., ZHAO, X. ir TAO, Z. Tests and Mechanics Model for Concrete-Filled SHS Stub Columns, Columns and Beam-Columns [interaktyvus]. *Steel and Composite Structures*, 2001, vol. 1(1), pp. 51-74 [žiūrėta 2017-02-01]. Prieiga per: doi: 10.1296/SCS2001.01.01.04.

23. *Fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Berlin: Ernst & Sohn, 2013. ISBN 9783433604090.
24. *Eurokodas 3. Plieninių Konstruktijų Projektavimas. 1-1 Dalis. Bendrosios Ir Pastatų Taisyklės (Elektroninis Išteklius)*. 2011-09-29 leid. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2011.
25. *Eurokodas 3. Plieninių Konstruktijų Projektavimas. 1-5 Dalis. Lakštinių Konstruktijų Elementai (Interaktyvus)*. 2008-03-31 leid. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2008.
26. *Eurokodas 4. Kompozitinių Plieninių-Betoninių Konstruktijų Projektavimas. 1-1 Dalis. Bendrosios Ir Pastatų Taisyklės (Interaktyvus)*. 2005-04-15.; Lietuviška versija: 2007-10-29 leid. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005.
27. *Eurokodas 2. Gelžbetoninių Konstruktijų Projektavimas. 1-1 Dalis. Bendrosios Ir Pastatų Taisyklės (Interaktyvus)*. 2005-04-15.; Lietuviška versija: 2007-09-29 leid. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005.
28. ONGELIN, P., VALKONEN, I. *Hitsatut profiliten 1993 – käsikirja*. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy, 2010.
29. Dassault Systemes. *Getting Started with Abaqus: Interactive Edition (Interaktyvus)*. [Žiūrėta 2016-09-01]. Prieiga per: <http://abaqus.software.polimi.it/v6.14/books/gsa/default.htm>
30. Dassault Systemes. *ABAQUS Analysis User's Guide (Interaktyvus)*. [Žiūrėta 2016-09-01]. Prieiga per: <http://abaqus.software.polimi.it/v6.14/books/usb/default.htm?startat=pt06ch29s04alm13.html>
31. Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd (2013). *Determination of Structural Capacity by Non-linear FE analysis Methods: rekomendacijos (Interaktyvus)*. [Žiūrėta 2016-11-16]. Prieiga per: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNV/codes/docs/2013-06/RP-C208.pdf>
32. UAB „Betonika“. *Perdangos plokštės (Interaktyvus)*. [Žiūrėta 2017-01-01]. Prieiga per: <https://www.betonika.lt/lt/gaminiai-ir-paslaugos/gaminiai/perdangos-plokstes>
33. Kimbirauskas, M. *Objektų fizikinių poveikių modeliavimo naudojant baigtinių elementų metodą tyrimas ir pritaikymas mobiliems įrenginiams: magistro tezės [interaktyvus]*. Kaunas: Kauno Technologijos Universitetas, 2015 [žiūrėta 2017-04-01]. Prieiga per: <http://talpykla.elaba.lt/elaba-fedora/objects/elaba:8625827/datastreams/MAIN/content>

7. Asmeninių mokslinių publikacijų sąrašas

Magistro studijų metu publikuoti straipsniai ir konferencijų medžiaga

1. VILLALON-FORNES, I., MARTINAVIČIUS, D., GRICIUS, M., KELPŠA, Š. ir KASIULEVIČIUS, M. Evaluation of Base Ground Stiffness on Statically Indeterminate Framed Building Structures. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 2016, vol. 1(14), pp. 60-72, prieiga per: doi: 10.5755/j01.sace.14.1.15821.
2. ZINGAILA, T., AUGONIS, M., ŠERELIS, E., KELPŠA, Š. ir MARTINAVIČIUS, D. Influence of Heat Treatment Regimes on Mechanical Properties of NSC-UHPC Composite Members. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 2016, vol. 1(14), pp. 51-59, prieiga per: doi: 10.5755/j01.sace.14.1.15820.
3. GRICIUS, M., MARTINAVIČIUS, D., VILLALON-FORNES, I., KELPŠA, Š. ir KASIULEVIČIUS, M. Evaluation of Base Ground Stiffness on Statically Indeterminate Framed Building Structures. Iš: *Proceedings of the 5th International Conference Advanced Construction*, Kaunas, spalio 2016. Kaunas: Kauno Technologijos Universitetas, 2016. Pp. 62. ISSN 2029-1213.
4. ZINGAILA, T., AUGONIS, M., ŠERELIS, E., KELPŠA, Š. ir MARTINAVIČIUS, D. Influence of Heat Treatment Regimes on Mechanical Properties of NSC-UHPC Composite Members. *Proceedings of the 5th International Conference Advanced Construction*, Kaunas, spalio 2016. Kaunas: Kauno Technologijos Universitetas, 2016. Pp. 89. ISSN 2029-1213.
5. BISTRICKAITĖ, R., VAIČIUKYNIENĖ, D., AUGONIS, A., MARTINAVIČIUS, D. ir RINKEVIČIUS, G. The Influence of Stiffness on Layered Floor Plates Structural Behaviour Using Industrial Waste in the Middle layer. Iš: plakatų sesija konferencijoje *CRETE 2016, the 5th International Conference on Industrial and Hazardous Waste Management*. Kreta, 2016.

Bakalauro studijų metu publikuoti straipsniai ir konferencijų medžiaga

1. SASNAUSKAS, V., RINKEVIČIUS, G., MARTINAVIČIUS, D., VAIČIUKYNIENĖ, D. ir IVANAUSKAS, E. Cement Hydration with Ultrasound Treated Clinoptilolite. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 2015, vol. 2(11), pp. 52-58. Prieiga per: doi: 10.5755/j01.sace.11.2.12430.
2. RINKEVIČIUS, G., MARTINAVIČIUS, D., SASNAUSKAS, V., VAIČIUKYNIENĖ, D. ir AUGONIS, A. Aplinkai Pavojingų Metalų Atliekų Panaudojimo Galimybės Betono Sistemose. Iš: paroda *Technorama 2015*, Kaunas, gegužė 2015. Kaunas: Kauno Technologijos Universitetas, 2015.
3. RINKEVIČIUS, G., MARTINAVIČIUS, D., SASNAUSKAS, V. ir VAIČIUKYNIENĖ, D. The Influence of Clinoptilolite Additive on Portland Cement Hydration Processes. Iš: *proceedings of conference Construction and Architecture*, Kaunas, Lapkritis 2014. Kaunas: Kauno Technologijos Universitetas, 2014. Pp. 79-83. ISSN 2345-0959.

Priedai

1 Priedas

Pirmoje tyrimo daļyje parinkti HSQ siju skerspjūviai

P.1 lent. Pirmoje tyrimo daļyje parinkti HSQ siju skerspjūviai

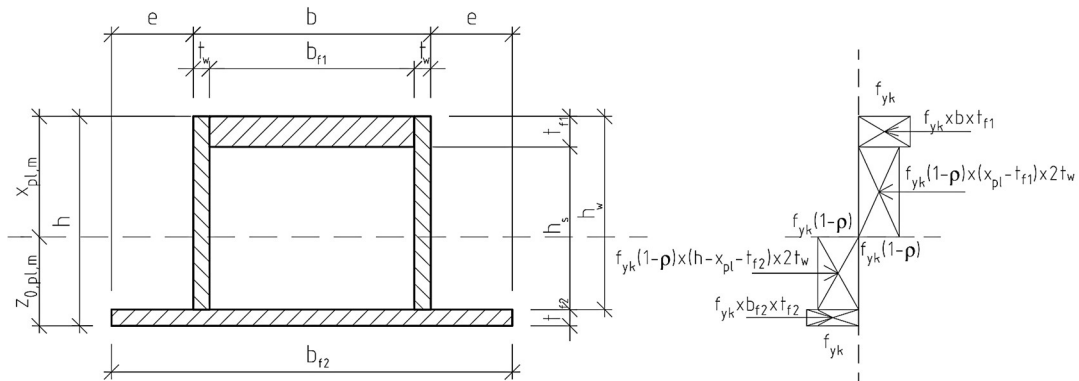
<p>M-1.1a</p>	<p>M-1.1b</p>	<p>M-1.1c</p>	<p>M-1.1d</p>
<p>M-1.2a</p>	<p>M-1.2b</p>	<p>M-1.2c</p>	<p>M-1.3a</p>
<p>M-2.1a</p>	<p>M-2.1b</p>	<p>M-2.1c</p>	<p>M-2.1d</p>
<p>M-2.2a</p>	<p>M-2.2b</p>	<p>M-2.3a</p>	<p>M-2.3b</p>
<p>M-3.1a</p>	<p>M-3.1b</p>	<p>M-3.1c</p>	<p>M-3.1d</p>
<p>M-3.2a</p>	<p>M-3.2b</p>		<p>M-3.2c</p>

P.1 lent. pabaiga. Pirmoje tyrimo dalyje parinkti HSQ sijų skerspjūviai

M-3.3a		M-3.3b	
M-4.1a	M-4.1b	M-4.1c	M-4.1d
M-4.2e			
M-4.2a	M-4.2b	M-4.2c	
M-4.3a		M-4.3b	

Sijų lenkiamosios galios ir neutraliosios ašies formulių išvedimas

Plieninė HSQ sija. Koncentruotos apkrovos



P.1 pav. Plieninio skerspjūvio skaičiuojamoji schema

Toliau aprašomos formulės tinkamos, kai sijos skerspjūvis priskiriamas 1 arba 2 klasei ir gali pasiekti plastinę lenkiamąją galią. Eksperimente nagrinėjamas atvejis, kai sija apkrauta dviem koncentruotomis jėgomis. Tai reiškia, kad maksimali skersinė jėga ir lenkimo momentas veikia vienoje vietoje. Taigi, jei skersinės jėgos išnaudojimas yra virš 0,5, turi būti sumažinamas sienelių atsparumas, skaičiuojant sijos lenkiamąją galią.

$$\frac{V_{Ek}}{V_{PL.Rk}} = \frac{V_{Ek}}{A_v \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}}\right)} \quad (1)$$

Koeficientas, mažinantis sienutės lenkiamąją stiprį dėl skersinės jėgos (naudojamas, kai išnaudojamas skersinei jėgai didesnis nei 0,5):

$$\rho = \left(2 \cdot \frac{V_{Ek}}{V_{PL.Rk}} - 1\right)^2 \quad (2)$$

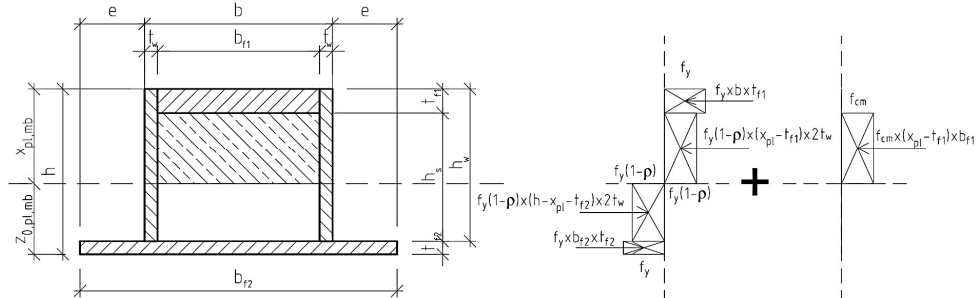
Neutralios ašies skaičiavimas. Rašoma projekcijų lygtis x ašyje:

- 1) $b \cdot t_{f1} \cdot f_y + (x_{pl,m} - t_{f1}) \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1 - \rho) = b_{f2} \cdot t_{f2} \cdot f_y + (h - x_{pl,m} - t_{f2}) \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1 - \rho)$
- 2) $b \cdot t_{f1} \cdot f_y + x_{pl,m} \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1 - \rho) - t_{f1} \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1 - \rho) = b_{f2} \cdot t_{f2} \cdot f_y + h \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1 - \rho) - x_{pl,m} \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1 - \rho) - t_{f2} \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1 - \rho)$
- 3) $x_{pl,m} \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1 - \rho) + x_{pl,m} \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1 - \rho) = b_{f2} \cdot t_{f2} \cdot f_y + h \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1 - \rho) - t_{f2} \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1 - \rho) - b \cdot t_{f1} \cdot f_y + t_{f1} \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1 - \rho)$

Išsireiškiamo neutralios ašies atstumą nuo viršaus $x_{pl,m}$:

$$x_{pl,m} = \frac{b_{f2} \cdot t_{f2} \cdot f_y + h \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho) - t_{f2} \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho) - b \cdot t_{f1} \cdot f_y + t_{f1} \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho)}{t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho) + t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho)} \quad (3)$$

Kompozitinė HSQ sija be armatūros. Koncentruotos apkrovos

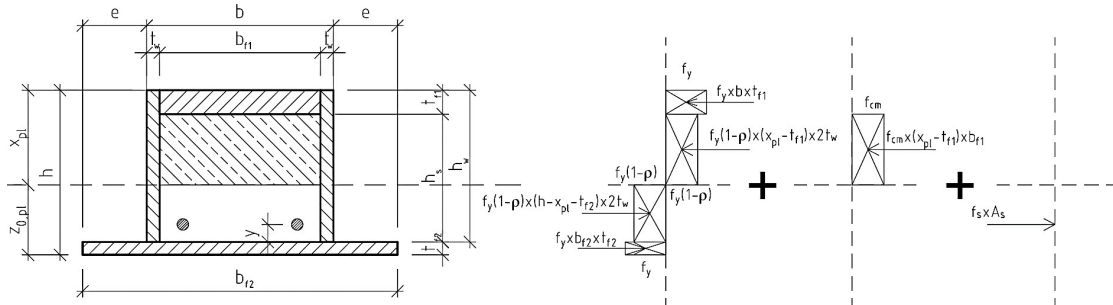


P.2 pav. Kompozitinio skerspjūvio be armatūros skaičiuojamoji schema

Skaičiuojame neutraliąją ašį. Analogiškai išvesta formulė šiek tiek skiriasi nuo pirmojo atvejo (metalinės sijos), nes prisideda betonas:

$$x_{pl,mb} = \frac{b_{f2} \cdot t_{f2} \cdot f_y + h \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho) - t_{f2} \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho) - b \cdot t_{f1} \cdot f_y + t_{f1} \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho) + b_{f1} \cdot t_{f1} \cdot f_{cm}}{t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho) + b_{f1} \cdot f_{cm} + t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho)} \quad (4)$$

Kompozitinė HSQ sija su armatūra. Koncentruotos apkrovos



P.3 pav. Kompozitinio skerspjūvio su armatūra skaičiuojamoji schema

Neutraliosios ašies skaičiavimas. Rašoma projekcijų lygtis x ašyje:

- 1)
$$b \cdot t_{f1} \cdot f_y + f_y \cdot (x_{pl,mba} - t_{f1}) \cdot t_w \cdot 2 \cdot (1-\rho) + f_{cm} \cdot b_{f1} \cdot (x_{pl,mba} - t_{f1}) =$$

$$= f_y \cdot (h - x_{pl,mba} - t_{f2}) \cdot (1-\rho) \cdot t_w \cdot 2 + f_y \cdot b_{f2} \cdot t_{f2} + f_s \cdot A_s$$
- 2)
$$b \cdot t_{f1} \cdot f_y + f_y \cdot x_{pl,mba} \cdot t_w \cdot 2 \cdot (1-\rho) - f_y \cdot t_{f1} \cdot t_w \cdot 2 \cdot (1-\rho) + f_{cm} \cdot b_{f1} \cdot x_{pl,mba} \cdot f_{cm} \cdot b_{f1} \cdot t_{f1} =$$

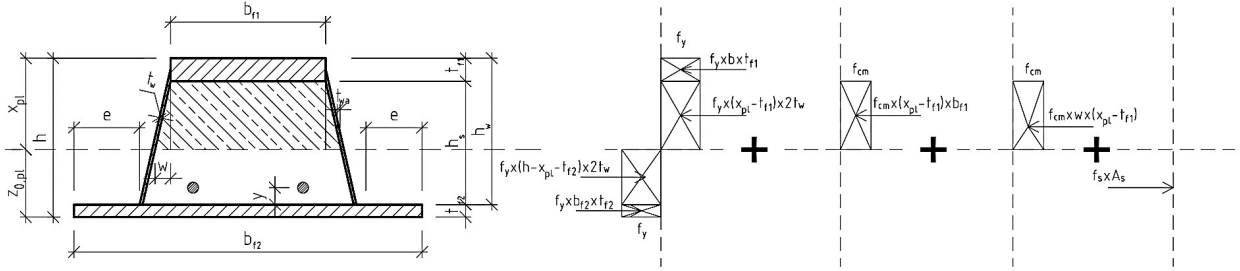
$$= 2 \cdot f_y \cdot h \cdot t_w \cdot (1-\rho) - 2 \cdot f_y \cdot x_{pl,mba} \cdot t_w \cdot (1-\rho) - 2 \cdot f_y \cdot t_{f2} \cdot t_w \cdot (1-\rho) + f_y \cdot b_{f2} \cdot t_{f2} + f_s \cdot A_s$$
- 3)
$$x_{pl,mba} \cdot t_w \cdot 2 \cdot f_y \cdot (1-\rho) + f_{cm} \cdot b_{f1} \cdot x_{pl,mba} + 2 \cdot f_y \cdot x_{pl,mba} \cdot t_w \cdot (1-\rho) = 2 \cdot f_y \cdot h \cdot t_w \cdot (1-\rho) -$$

$$- 2 \cdot f_y \cdot t_{f2} \cdot t_w \cdot (1-\rho) + f_y \cdot b_{f2} \cdot t_{f2} + f_s \cdot A_s - b \cdot t_{f1} \cdot f_y + f_{cm} \cdot b_{f1} \cdot t_{f1} + f_y \cdot t_{f1} \cdot t_w \cdot 2 \cdot (1-\rho)$$

Išsireiškiame neutraliosios ašies atstumą nuo viršaus $x_{pl,mba}$:

$$x_{pl,mba} = \frac{2 \cdot f_y \cdot h \cdot t_w \cdot (1-\rho) - 2 \cdot f_y \cdot t_{f2} \cdot t_w \cdot (1-\rho) + f_y \cdot b_{f2} \cdot t_{f2} + f_s \cdot A_s - b \cdot t_{f1} \cdot f_y + f_{cm} \cdot b_{f1} \cdot t_{f1} + f_y \cdot t_{f1} \cdot t_w \cdot 2 \cdot (1-\rho)}{2 \cdot f_y \cdot t_w \cdot (1-\rho) + f_{cm} \cdot b_{f1} + 2 \cdot f_y \cdot t_w \cdot (1-\rho)} \quad (5)$$

Kompozitinė trapecinė sija su armatūra. Išskirstyta apkrova



P.4 pav. Užbetonuoto ir suarmuoto trapecinės sijos skerspjūvio skaičiuojamoji schema

Skaičiuojama neutraliosios ašies vieta. Pirmiausiai apskaičiuojamas nežinomasis w iš trikampių panašumo sąlygos:

$$w = \frac{(x_{pl} - t_{f1}) \cdot (b_{ab} - b_{f1})}{2 \cdot h_s} \quad (6)$$

Čia:

$$b_{ab} = b_{f2} - 2 \cdot e - 2 \cdot t_{wa} \quad (7)$$

Skaičiuojame betono dedamąją, ieškant neutralios ašies vietos. Gniuždomo betono plotas bendruoju atveju:

$$\begin{aligned} (w + b_{f1}) \cdot (x_{pl} - t_{f1}) &= \left(\frac{(x_{pl} - t_{f1}) \cdot (b_{ab} - b_{f1})}{2 \cdot h_s} + b_{f1} \right) \cdot (x_{pl} - t_{f1}) = \\ &= \left(\frac{x_{pl} \cdot b_{ab}}{2 \cdot h_s} - \frac{x_{pl} \cdot b_{f1}}{2 \cdot h_s} - \frac{t_{f1} \cdot b_{ab}}{2 \cdot h_s} + \frac{t_{f1} \cdot b_{f1}}{2 \cdot h_s} \right) \cdot (x_{pl} - t_{f1}) = \\ &= \frac{x_{pl}^2 \cdot b_{ab}}{2 \cdot h_s} - \frac{x_{pl} \cdot b_{ab} \cdot t_{f1}}{2 \cdot h_s} - \frac{x_{pl}^2 \cdot b_{f1}}{2 \cdot h_s} + \frac{x_{pl} \cdot b_{f1} \cdot t_{f1}}{2 \cdot h_s} - \frac{x_{pl} \cdot t_{f1} \cdot b_{ab}}{2 \cdot h_s} + \frac{t_{f1}^2 \cdot b_{ab}}{2 \cdot h_s} + \frac{x_{pl} \cdot t_{f1} \cdot b_{f1}}{2 \cdot h_s} - \frac{t_{f1}^2 \cdot b_{f1}}{2 \cdot h_s} + \\ &\quad + b_{f1} \cdot x_{pl} - b_{f1} \cdot t_{f1} \end{aligned}$$

Pertvarkome lygtį:

$$x_{pl}^2 \cdot \left(\frac{b_{ab}}{2 \cdot h_s} - \frac{b_{f1}}{2 \cdot h_s} \right) + x_{pl} \cdot \left(\frac{t_{f1} \cdot b_{f1}}{2 \cdot h_s} - \frac{t_{f1} \cdot b_{ab}}{2 \cdot h_s} + \frac{b_{f1} \cdot t_{f1}}{2 \cdot h_s} - \frac{b_{ab} \cdot t_{f1}}{2 \cdot h_s} + b_{f1} \right) + \frac{t_{f1}^2 \cdot (b_{ab} - b_{f1})}{2 \cdot h_s} - b_{f1} \cdot t_{f1}$$

Betono dedamoji gaunama padauginus šį plotą iš betono stiprio f_{cm} :

$$x_{pl}^2 \cdot f_{cm} \left(\frac{b_{ab}}{2 \cdot h_s} - \frac{b_{f,1}}{2 \cdot h_s} \right) + x_{pl} \cdot f_{cm} \left(\frac{t_{f,1} \cdot b_{f,1}}{2 \cdot h_s} - \frac{t_{f,1} \cdot b_{ab}}{2 \cdot h_s} + \frac{b_{f,1} \cdot t_{f,1}}{2 \cdot h_s} - \frac{b_{ab} \cdot t_{f,1}}{2 \cdot h_s} + b_{f,1} \right) + \frac{t_{f,1}^2 \cdot (b_{ab} - b_{f,1})}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} - b_{f,1} \cdot t_{f,1} \cdot f_{cm}$$

Plieninio skerspjūvio sienutės gniuždomos dalies dedamoji:

$$(x_{pl} - t_{f,1}) \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y = x_{pl} \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y - t_{f,1} \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y$$

Plieninio skerspjūvio sienutės tempiamos dalies dedamoji:

$$(h - x_{pl} - t_{f,2}) \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y = h \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y - x_{pl} \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y - t_{f,2} \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y$$

Apatinės juostos dedamoji: $b_{f,2} \cdot t_{f,2} \cdot f_y$. Viršutinės juostos dedamoji: $b_{f,1} \cdot t_{f,1} \cdot f_y$. Armatūros dedamoji: $A_s \cdot f_s$.

Rašoma bendra lygtis neutraliosios ašies skaičiavimui:

$$\begin{aligned} & b_{f,1} \cdot t_{f,1} \cdot f_y + x_{pl}^2 \cdot f_{cm} \left(\frac{b_{ab}}{2 \cdot h_s} - \frac{b_{f,1}}{2 \cdot h_s} \right) + x_{pl} \cdot f_{cm} \left(\frac{t_{f,1} \cdot b_{f,1}}{2 \cdot h_s} - \frac{t_{f,1} \cdot b_{ab}}{2 \cdot h_s} + \frac{b_{f,1} \cdot t_{f,1}}{2 \cdot h_s} - \frac{b_{ab} \cdot t_{f,1}}{2 \cdot h_s} + b_{f,1} \right) + \\ & + \frac{t_{f,1}^2 \cdot (b_{ab} - b_{f,1})}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} - b_{f,1} \cdot t_{f,1} \cdot f_{cm} + x_{pl} \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y - t_{f,1} \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y = \\ & = h \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y - x_{pl} \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y - t_{f,2} \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y + b_{f,2} \cdot t_{f,2} \cdot f_y + A_s \cdot f_s \end{aligned}$$

Pertvarkome lygtį taip, kad ji turėtų kvadratinės lygties formą:

$$\begin{aligned} & x_{pl}^2 \left(\frac{b_{ab}}{2 \cdot h_s} - \frac{b_{f,1}}{2 \cdot h_s} \right) \cdot f_{cm} + x_{pl} \left(\frac{t_{f,1} \cdot b_{f,1}}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} - \frac{t_{f,1} \cdot b_{ab}}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} + \frac{b_{f,1} \cdot t_{f,1}}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} - \frac{b_{ab} \cdot t_{f,1}}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} + b_{f,1} \cdot f_{cm} + t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y + t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y \right) + \\ & + \left(b_{f,1} \cdot t_{f,1} \cdot f_y + \frac{t_{f,1}^2 \cdot (b_{ab} - b_{f,1})}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} - b_{f,1} \cdot t_{f,1} \cdot f_{cm} - t_{f,1} \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y - h \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y + t_{f,2} \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y - b_{f,2} \cdot t_{f,2} \cdot f_y - A_s \cdot f_s \right) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Tokią kvadratinę lygtį galima išspręsti, skaičiuojant determinantą:

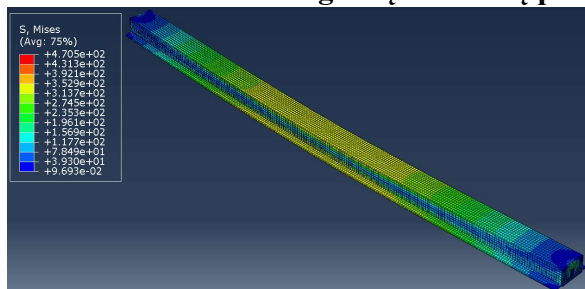
$$D = b^2 - 4 \cdot a \cdot c \quad (9)$$

$$a = \left(\frac{b_{ab}}{2 \cdot h_s} - \frac{b_{f,1}}{2 \cdot h_s} \right) \cdot f_{cm} \quad (10)$$

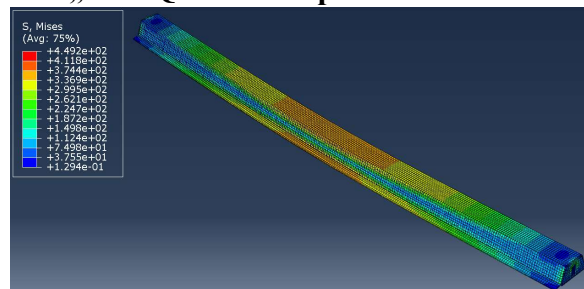
$$b = \left(\frac{t_{f,1} \cdot b_{f,1}}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} - \frac{t_{f,1} \cdot b_{ab}}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} + \frac{b_{f,1} \cdot t_{f,1}}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} - \frac{b_{ab} \cdot t_{f,1}}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} + b_{f,1} \cdot f_{cm} + t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y + t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y \right) \quad (11)$$

$$c = \left(b_{f,1} \cdot t_{f,1} \cdot f_y + \frac{t_{f,1}^2 \cdot (b_{ab} - b_{f,1})}{2 \cdot h_s} \cdot f_{cm} - b_{f,1} \cdot t_{f,1} \cdot f_{cm} - t_{f,1} \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y - h \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y + t_{f,2} \cdot t_{wa} \cdot 2 \cdot f_y - b_{f,2} \cdot t_{f,2} \cdot f_y - A_s \cdot f_s \right) \quad (12)$$

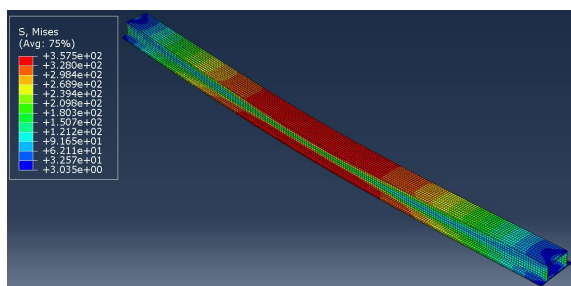
Vaizdai iš baigtinių elementų programos „ABAQUS“ ir eksperimento.



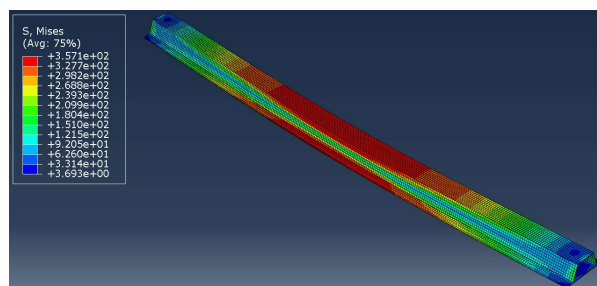
P.5 pav. Kompozitinės HSQ sijos C Von Miseso įtempiai ties teorine skerspjūvio takumo riba



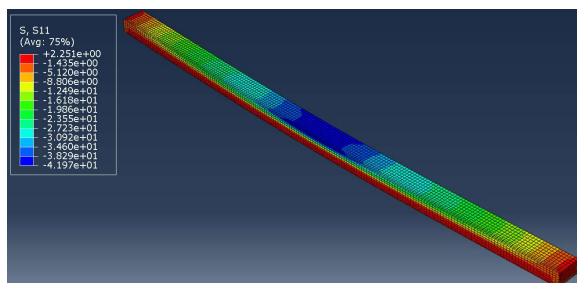
P.6 pav. Kompozitinės trapecinės sijos E Von Miseso įtempiai ties teorine skerspjūvio takumo riba



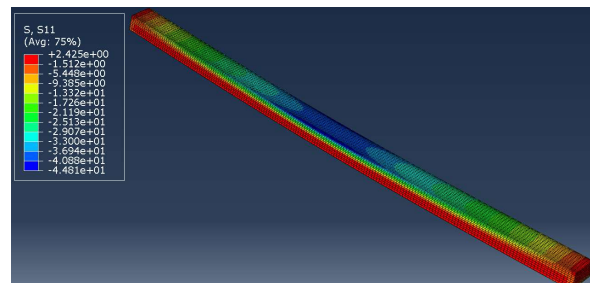
P.7 pav. Kompozitinės HSQ sijos C plieninio profilio Von Miseso įtempiai ties skerspjūvio takumo riba



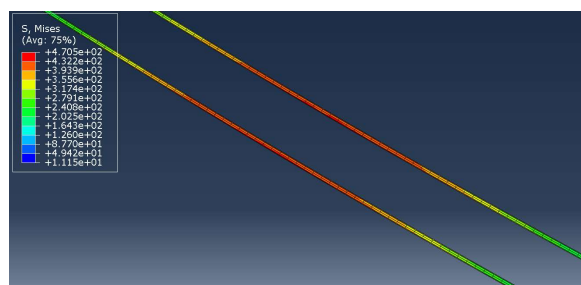
P.8 pav. Kompozitinės sijos E plieninio profilio Von Miseso įtempiai ties skerspjūvio takumo riba



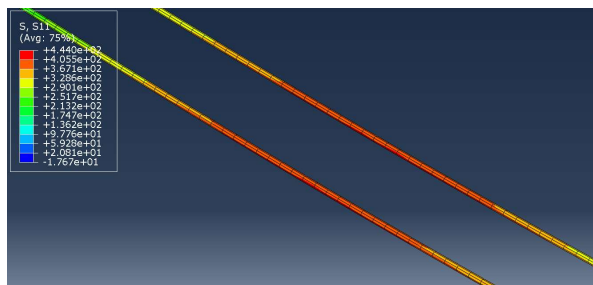
P.9 pav. Kompozitinės HSQ sijos C betono normaliniai įtempiai ties skerspjūvio takumo riba



P.10 pav. Kompozitinės sijos E betono normaliniai įtempiai ties skerspjūvio takumo riba



P.11 pav. Kompozitinės HSQ sijos C armatūros Von Miseso įtempiai (viduryje) ties skerspjūvio takumo riba



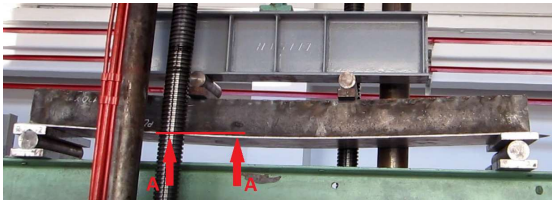
P.12 pav. Kompozitinės sijos E armatūros Von Miseso įtempiai (viduryje) ties skerspjūvio takumo riba



P.13 pav. Išklupusi HSQ sijos sienutė



P.14 pav. Nutraukiamas suvirinimas



P.15 pav. Kompozitinė HSQ sija



P.16 pav. Betono pjūvis A-A



P.17 pav. Kompozitinė HSQ su pažymėtais pjūviais



P.18 pav. Pjūvio B-B fragmentas

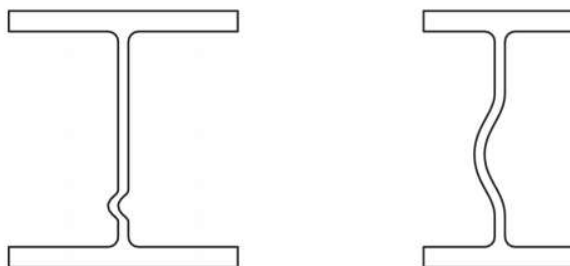


P.19 pav. Pjūvio C-C fragmentas



P.20 pav. Sijos betonas

Eksperimento sijų sienutėjų klupumo skaičiavimas



P.21 pav. Sijos sienutės klupumas pagal EC [25]

Koncentruota apkrova veikia $s_s=50$ mm pločio plokštelę. Per ją apkraunama sija NR1-M:

Skaičiuojami koeficientai m_1 , m_2 ir k_F :

$$m_1 = \frac{f_{yf} \cdot b_{f,1}}{f_{yw} \cdot 2 \cdot t_w} = \frac{355 \cdot 94}{355 \cdot 2 \cdot 3} = 15,7 \quad (13)$$

Čia: f_{yf} – juostos plieno takumo riba, f_{yw} – sienutės plieno takumo riba

Kai sąlyginis sienutės liaunamas mažesnis už 0.5, $m_2=0$. Kitu atveju naudojama formulė:

$$m_2 = 0,02 \cdot \left(\frac{h_w}{t_{f,1}} \right)^2 = 0,02 \cdot \left(\frac{120}{6} \right)^2 = 8 \quad (13)$$

$$k_F = 6 + 2 \cdot \left(\frac{h_s}{a} \right)^2 = 6 + 2 \cdot \left(\frac{114}{1500} \right)^2 = 6,013 \quad (14)$$

Čia: h_s – sijos sienutės aukštis; a – sijos ilgis (15)

$$l_e = \frac{k_F \cdot E_y \cdot t_w^2}{2 \cdot f_{yw} \cdot h_s} = \frac{6,013 \cdot 210000 \cdot 3^2}{2 \cdot 355 \cdot 114} = 140,4 \text{ mm} \quad (16)$$

Skaičiuojami ilgiai $l_{y,1}$, $l_{y,2}$, $l_{y,3}$ ir randamas mažiausias:

$$l_{y,1} = s_s + t_w \cdot (1 + \sqrt{m_1 + m_2}) = 50 + 3 \cdot (1 + \sqrt{15,7 + 8}) = 85,2 \text{ mm} \quad (17)$$

$$l_{y,2} = l_e + t_{f,1} \cdot \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_e}{t_{f,1}} \right)^2 + m_2} = 561,5 + 6 \cdot \sqrt{\frac{15,7}{2} + \left(\frac{140,4}{6} \right)^2 + 8} = 562,5 \text{ mm} \quad (18)$$

$$l_{y,3} = l_e + t_{f,1} \cdot \sqrt{m_1 + m_2} = 140,4 + 6 \cdot \sqrt{15,7 + 8} = 309,9 \text{ mm} \quad (19)$$

$$l_y = \min\{l_{y,1}, l_{y,2}, l_{y,3}\} = 85,2 \text{ mm}$$

Kritinė tamprioji klupumo apkrova skaičiuojama pagal formulę:

$$F_{cr} = 0,9 \cdot k_F \cdot E_y \cdot \frac{t_w^3}{h_s} = 0,9 \cdot 6,013 \cdot 210000 \cdot \frac{3^3}{114} = 269,096 \cdot 10^3 \text{ N} \quad (20)$$

Sąlyginis sienūčių liaunumas ir klupumo koeficientas:

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y \cdot t_w \cdot f_{yw}}{F_{cr}}} = \sqrt{\frac{109,5 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 355}{269,096 \cdot 10^3}} = 0,581 > 0,5 \quad (21)$$

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} = \frac{0,5}{0,581} = 0,861 < 1 \quad (22)$$

Efektyvusis sienutės ilgis klupumo skaičiavimui:

$$L_{eff} = \chi_F \cdot l_y = 0,861 \cdot 85,2 = 73,4 \text{ mm} \quad (23)$$

Atsparumas vietiniam klupimui:

$$f_{w,Rd} = \frac{f_{yw} \cdot L_{eff}^2 \cdot t_w}{\gamma_{MI}} = \frac{355 \cdot 73,4^2 \cdot 3}{1} = 156,25 \cdot 10^3 \text{ N} \quad (24)$$

Analogiškai apskaičiuojamas sijos NR2-M atsparumas klupimui. Sijos NR1-M atsparumas klupimui yra 156,25 kN, o sijos NR2-M – 216,825 kN. Eksperimento metu sijos išklupo, veikiant 142,5 kNm ir 188 kN apkrovoms atitinkamai. Teoriškai gautas atsparumas klupimui yra iki 15 proc. didesnis. Tai galėjo nulemti prastas ir nutraukiamas sijos suvirinimas. Dėl to buvo gautos įtempių koncentracijos. Be to, suvirinimo metu sienutės išsikraipė ir buvo išdegintas suvirinamas plienas. Sijas užbetonavus, jos nebeklupo.