



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Ovidijus Steigvilas

GELŽBETONINIŲ TILTŲ DINAMINIO ĮLINKIO ANALIZĖ

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Lekt. dr. Saulius Zadlauskas

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

Doc. dr. Mindaugas Augonis

GELŽBETONINIŲ TILTŲ DINAMINIO ĮLINKIO ANALIZĖ

Baigiamasis magistro projektas

Statybos inžinerija (621H20001)

Vadovas

Lekt. dr. Saulius Zadlauskas

Recenzentas

Ekspertas Mečislovas Jocius

Projektą atliko

Ovidijus Steigvilas

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

(Fakultetas)

(Studento vardas, pavardė)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Gelžbetoninių tiltų dinaminio įlinkio analizė“

AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.
Kaunas

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

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS
STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Magistro baigiamasis projektas

„Gelžbetoninių tiltų dinaminio įlinkio analizė“

Ovidijus Steigvilas

Anotacija

Pastaruoju metu išaugo susidomėjimas tiltų dinamine elgsena dėl padidėjusių eismo apkrovų. Dinaminės apkrovos turi didelę įtaką atsirandantiems pažeidimams gelžbetoninių tiltų perdangose. Jų poveikis priklauso nuo transporto judėjimo greičio, kelio paviršiaus nelygumų ir kitų parametų.

Magistro baigiamajame projekte atlikta dinaminio įlinkio analizė gelžbetoniniam tiltui per Šušvės upę. Tiltui pritaikytas matematinis modelis dinaminiam įlinkiui skaičiuoti, vertinant skirtingus transporto priemonės judėjimo greičius ir vienodą kelio dangos nelygumą.

Apžvelgti literatūroje esantys matematiniai modeliai, kurie skirti dinaminei analizei. Taip pat aprašyti metodai, kuriais galima nustatyti judančias dinamines apkrovas ir pateikiamos įvairių tiltų projektavimo normų dinamiškumo koeficiento formulės.

Atliktas įrašų skaičiavimas pagal rusiškas ir europines projektavimo normas. Suprojektuota tilto perdangos įtemptojo gelžbetonio sija ir parengtas šios konstrukcijos brėžinys.

Atlikti statiniai ir dinaminiai bandymai tyrimo objektui – tiltui per upę Šušvę. Gauti eksperimentiniai rezultatai palyginti su teoriniais.

Projekto pabaigoje pateikiamos išvados.

Projekto apimtis: 145 puslapiai, 119 paveikslų, 15 lentelių, 463 formulės, 44 literatūros šaltiniai ir 1 (A1 formato) brėžinys.

Reikšminiai žodžiai:

dinaminės apkrovos, gelžbetoninis tiltas, matematinis modelis, dinaminis įlinkis, dinamiškumo koeficientas, įtemptojo gelžbetonio sija.

KAUNAS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE
DEPARTMENT OF BUILDING STRUCTURES

Master's final project

“The Analysis of the Dynamic Deflection of the Reinforced Concrete Bridges”

Ovidijus Steigvilas

Annotation

Recently has increased an interest in the dynamic behaviour of bridges due to the enlarged traffic loads. Dynamic loads have a great influence on the resulting damage in slabs of the reinforced concrete bridges. Their impact depends on the speed of the transport flow, bridge's pavement roughness and other parameters.

A dynamic deflection analysis of the reinforced concrete bridge over the river Šušvė was done in the master's final project. There was used a mathematical model for the calculation of bridge dynamic deflection with the evaluation of the different speed of a vehicle and the uniform obstacle of the road surface.

Mathematical models for the dynamic analysis were reviewed in the literature. There were also described methods that can identify moving dynamic loads. In addition, the formulas of a dynamic factor by different bridge design codes were given.

The calculation of forces was carried out by Russian and European design codes. The prestressed concrete beam of the slab bridge was designed and the drawing of this construction was prepared.

The static and dynamic experiments were conducted for the research object – for the bridge over the river Šušvė. The experimental results were compared with the theoretical results.

The conclusions are given at the end of the project.

The project size: 145 pages, 119 pictures, 15 tables, 463 formulas, 44 literature sources, 1 drawing in A1 size.

Keywords:

dynamic loads, reinforced concrete bridge, mathematical model, dynamic deflection, dynamic factor, prestressed concrete beam.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	12
SANTRUMPOS	13
SIMBOLIAI	14
DARBO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI	15
ĮVADAS	16
1. LITERATŪROS APŽVALGA	17
1.1. Dinaminiai poveikiai.....	17
1.2. Dinamiškumo koeficientai	17
1.3. Tiltų dinamiką aprašantys matematiniai modeliai	21
1.4. Tiltų dinamiką aprašantys metodai	32
1.5. Pirmo skyriaus išvados	41
2. TYRIMO OBJEKTO PARINKIMAS.....	42
2.1. Tilto konstrukcijų bendri duomenys	42
2.2. Tilto bendri vaizdai	43
3. TILTO PER UPEĮ ŠUŠVĘ EKSPERIMENTINIAI BANDYMAI.....	44
3.1. Statinis bandymas	44
3.2. Dinaminis bandymas.....	46
3.3. Trečio skyriaus išvados.....	49
4. APKROVŲ SKAIČIAVIMAS.....	50
4.1. Influenčių sudarymas apkrovų skaičiavimui	50
4.2. Nuolatinės apkrovos	52
4.3. Kintamos apkrovos pagal rusiškas ir europines normas	53
4.4. Ketvirto skyriaus išvados.....	60
5. TILTO PERDANGOS SIJOS PROJEKTAVIMAS	61
5.1. Bendri duomenys	61
5.2. Pagrindinės sijos įrašų skaičiavimas.....	62
5.3. Apkrovų deriniai	66
5.3. Ekvivalentinio sijos skerspjūvio nustatymas	67
5.4. Sijos medžiagų skaičiuojamosios charakteristikos ir kiti duomenys.....	69
5.5. Išankstinis armatūros parinkimas.....	70
5.6. Skerspjūvio geometrinės charakteristikos.....	73

5.7. Armatūros išankstinių įtempių nuostoliai	74
5.8. Viršutinės zonos atsparumas pleišėjimui	76
5.9. Atsparumas normaliniams plyšiams	78
5.10. Stiprumas normaliniame pjūvyje	84
5.11. Stiprumas įstrižuose pjūviuose	85
5.12. Atsparumas įstrižiams plyšiams.....	88
5.13. Sijos viršutinės lentynos skaičiavimas.....	92
5.14. Sijos įlinkio skaičiavimas nuo projektinių apkrovų.....	94
5.15. Penkto skyriaus išvados	97
6. TEORINIŲ IR STATINIO BANDYMO METU GAUTŲ PERDANGOS SIJŲ ĮLINKIŲ PALYGINIMAS.....	98
6.1. Betono parametrų kitimo įvertinimas tyrimo objektui	98
6.2. Teorinis sijų įlinkių skaičiavimas	99
6.3. Teorinis sijų įlinkių skaičiavimas programa „Scia Engineer“	113
6.4. Rezultatų palyginimas.....	114
6.5. Šešto skyriaus išvados	115
7. TILTO DINAMINIO ĮLINKIO SKAIČIAVIMO MODELIS	116
7.1. Krovinio ir tilto sijos judesio lygtys	116
7.2. Priverstiniai virpesiai	118
7.3. Nehomogeninės diferencialinių lygčių sistemos bendrasis sprendinys	121
7.4. Tilto perdangos dinaminis įlinkis dėl duobės važiuojamojoje kelio dangoje	125
7.5. Matematinio modelio taikymas tilto perdangos sijos dinaminiam įlinkiui skaičiuoti	126
7.6. Teorinių ir dinaminio bandymo metu gautų sijų įlinkių palyginimas	138
7.7. Dinamiškumo koeficiento skaičiavimas ir jo palyginimas su įvairių šalių normomis	139
7.8. Septinto skyriaus išvados.....	141
BENDROSIOS IŠVADOS.....	142
NAUDOTA LITERATŪRA	143
PRIEDAS	146

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.	1.1 pav. Dinamiškumo koeficiento Φ taikymo zona (tarp pasvirusių tiesių)	19
2.	1.2 pav. Dinamiškumo koeficientai pagal skirtingas normas	20
3.	1.3 pav. Transporto priemonė, judanti deformuojamu tiltu.....	21
4.	1.4 pav. Lenkiamojo tilto aproksimacija viena mase	23
5.	1.5 pav. Lenkiamas tiltas ir spyruokle atremta transporto priemonė.....	24
6.	1.6 pav. Judanti transporto priemonė ant šarnyriškai atremtos tilto sijos.....	25
7.	1.7 pav. Judanti jėga ant dviatramės sijos	28
8.	1.8 pav. Judanti masė ant dviatramės sijos.....	30
9.	1.9 pav. „Sija-elementas“ modelis.....	33
10.	1.10 pav. Šarnyriškai atremta sija apkrauta judančia apkrova	33
11.	1.11 pav. Šarnyriškai atremta sija apkrauta judančia apkrova	34
12.	1.12 pav. Judanti jėga ant dviatramės sijos	39
13.	2.1 pav. Tilto fasado vaizdas	42
14.	2.2 pav. Tilto skersinis pjūvis „A-A“	43
15.	2.3 pav. Tilto bendras vaizdas nuo aukščiau pusės.....	43
16.	2.4 pav. Tilto bendras vaizdas nuo žemiau pusės.....	43
17.	2.5 pav. Antrojo tarpatramio perdangos bendras vaizdas.....	43
18.	2.6 pav. Paslankių/nepaslankių atraminių guolių bendras vaizdas.....	43
19.	3.1 pav. Simetrinio apkrovimo vaizdas iš viršaus ir iš šono.....	44
20.	3.2 pav. Asimetrinio apkrovimo vaizdas iš viršaus ir iš šono	45
21.	3.3 pav. Pirmojo tarpatramio sijų įlinkių pasiskirstymas simetrinio apkrovimo atveju	45
22.	3.4 pav. Trečiojo tarpatramio sijų įlinkių pasiskirstymas asimetrinio apkrovimo atveju.....	45
23.	3.5 pav. Dinamiškumo koeficiento kitimo kreivė sunkiasvorei transporto priemonei judant lygia kelio danga	47
24.	3.6 pav. Dinamiškumo koeficiento kitimo kreivė sunkiasvorei transporto priemonei judant nelygia kelio danga	47
25.	3.7 pav. Poslinkių jutikliu, pirmojo tarpatramio perdangos viduriniame pjūvyje, užregistruotas dinaminio įlinkio grafikas	48
26.	3.8 pav. Pagreičių jutikliu, pirmojo tarpatramio perdangos viduriniame pjūvyje, užregistruotas perdangos virpesių grafikas	48
27.	3.9 pav. Pagreičių jutikliu, pirmojo tarpatramio perdangos viduriniame pjūvyje, užregistruotų pagreičių grafikas.....	49

28.	3.10 pav. Pagreičių jutikliu, pirmojo tarpatramio perdangos viduriniame pjūvyje, užregistruotų laisvųjų slopinamųjų virpesių nufiltruotas grafikas	49
29.	4.1 pav. Tilto sijos skaičiuojamoji schema.....	50
30.	4.2 pav. Tilto sijos R_{1V} ir R_2 influentės	51
31.	4.3 pav. Tilto sijos skaičiuojamoji schema su fiksuotu pjūviu „ T^c “	51
32.	4.4 pav. Tilto sijos V_T ir M_T influentės.....	51
33.	4.5 pav. Tilto pakloto konstrukcija.....	52
34.	4.6 pav. Nuolatinės apkrovos skaičiavimas.....	53
35.	4.7 pav. Automobilinės ratinės H-30 apkrovos schema	53
36.	4.8 pav. M_T influentė H-30 apkrovai	54
37.	4.9 pav. V_T influentė H-30 apkrovai	54
38.	4.10 pav. Automobilinės ratinės HK-80 apkrovos schema	55
39.	4.11 pav. M_T influentė HK-80 apkrovai	55
40.	4.12 pav. V_T influentė HK-80 apkrovai	56
41.	4.13 pav. Pirmojo apkrovų modelio schema nagrinėjamam tiltui	57
42.	4.14 pav. Pirmojo apkrovų modelio schemas planas ir išilginis vaizdas	57
43.	4.15 pav. M_T influentė 1-ajam apkrovų modeliui (magistraliniams keliams)	58
44.	4.16 pav. V_T influentė 1-ajam apkrovų modeliui (magistraliniams keliams)	58
45.	4.17 pav. M_T influentė 1-ajam apkrovų modeliui (krašto ir vietinės reikšmės keliams)	59
46.	4.18 pav. V_T influentė 1-ajam apkrovų modeliui (krašto ir vietinės reikšmės keliams)	59
47.	4.19 pav. Lenkimo momentų gaubtinės pagal rusiškas ir europines projektavimo normas	60
48.	4.20 pav. Skersinės jėgos pagal rusiškas ir europines projektavimo normas	60
49.	5.1 pav. Tilto sijos skerspjūviai ties sijos viduriu ir ties atrama.....	61
50.	5.2 pav. Siją sudarantys blokai	61
51.	5.3 pav. Sijinės karpytos su nepertraukta pakloto danga perdangos schema	62
52.	5.4 pav. Automobilinės ratinės H-30 apkrovos išdėstymas viena eile	63
53.	5.5 pav. Automobilinės ratinės H-30 apkrovos išdėstymas dvejomis eilėmis	63
54.	5.6 pav. Automobilinės ratinės HK-80 apkrovos išdėstymas tilto viduryje	64
55.	5.7 pav. Sijos apatinės dalies skerspjūvis	67
56.	5.8 pav. Sijos viršutinės dalies skerspjūvis.....	67
57.	5.9 pav. Sijos apatinės dalies skerspjūvis	6
58.	5.10 pav. Sijos viršutinės dalies skerspjūvis.....	69
59.	5.11 pav. Ekvivalentiniai sijos skerspjūviai ties viduriu ir atrama	69
60.	5.12 pav. Ekvivalentinis skerspjūvis ir pjūvio įtempimų būvio schema	71

61.	5.13 pav. Armatūros išdėstymas skerspjūvyje.....	72
62.	5.14 pav. Ekvivalentinių skerspjūvių schemos.....	73
63.	5.15 pav. Įtemptosios armatūros išdėstymas sijos gale	78
64.	5.16 pav. Ekvivalentinių skerspjūvių schemos.....	79
65.	5.17 pav. Skersinių jėgų diagrama nuo sijos krašto iki vidurio.....	86
66.	5.18 pav. Skersinių jėgų diagrama nuo sijos krašto iki vidurio.....	87
67.	5.19 pav. Įstrižų pjūvių vietos tikrinant pleišetumą.....	88
68.	5.20 pav. Pjūvio 1-1 ekvivalentinis skerspjūvis	88
69.	5.21 pav. Skersinių jėgų diagrama	90
70.	5.22 pav. Tilto lentynos skaičiuojamoji schema.....	92
71.	5.23 pav. Nuolatinė apkrova tenkanti sijos lentynoms	93
72.	5.24 pav. Kintamoji apkrova tenkanti sijos lentynoms	93
73.	5.25 pav. Lenkimo momentų diagrama	93
74.	5.26 pav. Kintamų poveikių įlinkio skaičiavimo schema.....	95
75.	5.27 pav. Nuolatinių ir tariamai nuolatinių poveikių įlinkio skaičiavimo schema	96
76.	6.1 pav. Skersai tilto išdėstytų apkrovų 1 variantas	99
77.	6.2 pav. Pirmo varianto 1 ir 4 sijos skersinio pasiskirstymo influentes	99
78.	6.3 pav. Pirmo varianto 2 ir 3 sijos skersinio pasiskirstymo influentes	100
79.	6.4 pav. Išilgai tilto išdėstytų apkrovų 1 variantas	100
80.	6.5 pav. Pirmą siją veikiančios apkrovos, esant pirmam apkrovų išdėstymo variantui	101
81.	6.6 pav. Ketvirtą siją veikiančios apkrovos, esant pirmam apkrovų išdėstymo variantui.....	102
82.	6.7 pav. Antrą siją veikiančios apkrovos, esant pirmam apkrovų išdėstymo variantui.....	103
83.	6.8 pav. Trečią siją veikiančios apkrovos, esant pirmam apkrovų išdėstymo variantui.....	103
84.	6.9 pav. Skersai tilto išdėstytų apkrovų 2 variantas	104
85.	6.10 pav. Antro varianto 1 ir 4 sijos skersinio pasiskirstymo influentes.....	104
86.	6.11 pav. Antro varianto 2 ir 3 sijos skersinio pasiskirstymo influentes.....	105
87.	6.12 pav. Išilgai tilto išdėstytų apkrovų 2 variantas	105
88.	6.13 pav. Pirmą siją veikiančios apkrovos, esant antram apkrovų išdėstymo variantui.....	105
89.	6.14 pav. Antrą siją veikiančios apkrovos, esant antram apkrovų išdėstymo variantui	106
90.	6.15 pav. Trečią siją veikiančios apkrovos, esant antram apkrovų išdėstymo variantui	107
91.	6.16 pav. Ketvirtą siją veikiančios apkrovos, esant antram apkrovų išdėstymo variantui	108
92.	6.17 pav. 1 ir 4 sijos skersinio pasiskirstymo influentes įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį...109	
93.	6.18 pav. 2 ir 3 sijos skersinio pasiskirstymo influentes įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį...109	
94.	6.19 pav. Pirmą siją veikiančios apkrovos įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį	110

95. 6.20 pav. Ketvirtą siją veikiančios apkrovos įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį.....	111
96. 6.21 pav. Antrą siją veikiančios apkrovos įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį.....	111
97. 6.22 pav. Trečią siją veikiančios apkrovos įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį	112
98. 6.23 pav. Tilto perdangos modelis su simetriniu ir asimetriniu apkrovimo variantais.....	113
99. 6.24 pav. Tilto perdangos įlinkiai simetrinio apkrovimo atveju.....	113
100. 6.25 pav. Tilto perdangos įlinkiai asimetrinio apkrovimo atveju.....	114
101. 6.26 pav. Tilto perdangos įlinkiai įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį.....	114
102. 6.27 pav. Eksperimentinių ir teorinių skaičiavimų palyginimas simetrinio apkrovimo atveju .	114
103. 6.28 pav. Eksperimentinių ir teorinių skaičiavimų palyginimas asimetrinio apkrovimo atveju	115
104. 7.1 pav. Lenkiamas tiltas ir spyruokle atremta transporto priemonė	116
105. 7.2 pav. Tilto perdangos dinaminio įlinkio skaičiuojamoji schema, įvertinant duobę važiuojamoje kelio dangoje	125
106. 7.3 pav. Infiuentė K_{aQi} skaičiavimui.....	127
107. 7.4 pav. Sijos įlinkis nuo priverstinių virpesių	129
108. 7.5 pav. Vidurinės sijos dinaminiai įlinkiai skirtingiems transporto priemonės greičiams.....	131
109. 7.6 pav. Vidurinės sijos statinio ir dinaminių įlinkių grafikai, esant 5 km/h transporto priemonės greičiui	133
110. 7.7 pav. Vidurinės sijos statinio ir dinaminių įlinkių grafikai, esant 10 km/h transporto priemonės greičiui	134
111. 7.8 pav. Vidurinės sijos statinio ir dinaminių įlinkių grafikai, esant 20 km/h transporto priemonės greičiui	134
112. 7.9 pav. Infiuentė K_{aQi} skaičiavimui.....	135
113. 7.10 pav. Vidurinės sijos dinaminiai įlinkiai skirtingiems transporto greičiams (įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį).....	136
114. 7.11 pav. Vidurinės sijos statinio ir dinaminių įlinkių grafikai, esant 5 km/h transporto priemonės greičiui (įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį)	134
115. 7.12 pav. Vidurinės sijos statinio ir dinaminių įlinkių grafikai, esant 10 km/h transporto priemonės greičiui (įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį)	138
116. 7.13 pav. Vidurinės sijos statinio ir dinaminių įlinkių grafikai, esant 20 km/h transporto priemonės greičiui (įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį)	138
117. 7.14 pav. Dinamiškumo koeficientų palyginimas skirtingiems transporto judėjimo greičiams	140
118. 7.15 pav. Dinamiškumo koeficientų palyginimas, esant skirtingiems transporto judėjimo greičiams, įvertinus duobę kelio dangoje.....	141
119. 7.16 pav. Įvairių šalių dinamiškumo koeficientų palyginimas su teoriniu ir dinaminių bandymu metu apskaičiuotu	141

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.	3.1 lentelė. Bandymui naudotų automobilių suvestinė.....	44
2.	3.2 lentelė. Pirmojo tarpatramio perdangos dinaminio bandymo variantai	46
3.	3.3 lentelė. Tilto pirmojo tarpatramio perdangos dinaminiai rodikliai	47
4.	4.1 lentelė. Tilto konstrukcijų savojo svorio apkrovos	52
5.	4.2 lentelė. Konstrukcijų savojo svorio apkrova į tiesinį metrą	52
6.	4.3 lentelė. 1-ojo apkrovų modelio apkrovos	56
7.	4.4 lentelė. Kintamų apkrovų įrašos pagal rusiškas ir europines normas	59
8.	5.1 lentelė. Derinių suvestinė	66
9.	5.2 lentelė. Sijos skerspjūvių geometrinės charakteristikos	73
10.	5.3 lentelė. Sijos skerspjūvių geometrinės charakteristikos	79
11.	5.4 lentelė. Skersinės armatūros išdėstymas	88
12.	5.5 lentelė. Sijos pjūvių geometrinės charakteristikos	89
13.	5.6 lentelė. Apkrovos veikiančios tilto sijų lentynas.....	92
14.	6.1 lentelė. Sijos pjūvių geometrinės charakteristikos	108
15.	6.2 lentelė. Rezultatų palyginimas simetrinio apkrovimo atveju	115
16.	6.3 lentelė. Rezultatų palyginimas asimetrinio apkrovimo atveju	115
17.	7.1 lentelė. Skaičiavimo variantai	126
18.	7.2 lentelė. Pradiniai duomenys	127
19.	7.3 lentelė. Apskaičiuoti parametrai programa	128
20.	7.4 lentelė. Nedimensiniai parametrai skirtingiems greičiams.....	131
21.	7.5 lentelė. Apskaičiuoti koeficientai skirtingiems greičiams.....	131
22.	7.6 lentelė. Pradiniai parametrai ir greičiai po jėgos impulso	132
23.	7.7 lentelė. Apskaičiuoti koeficientai skirtingiems greičiams.....	133
24.	7.8 lentelė. Sijos pjūvių geometrinės charakteristikos	135
25.	7.9 lentelė. Nedimensiniai parametrai skirtingiems greičiams (įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį).....	136
26.	7.10 lentelė. Apskaičiuoti koeficientai skirtingiems greičiams (įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį).....	136
27.	7.11 lentelė. Pradiniai parametrai ir greičiai po jėgos impulso (įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį).....	137
28.	7.12 lentelė. Apskaičiuoti koeficientai skirtingiems greičiams (įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį).....	137
29.	7.13 lentelė. Rezultatai ir dinaminio bandymo duomenys	138
30.	7.14 lentelė. Rezultatų santykinės paklaidos.....	139
31.	7.15 lentelė. Dinamiškumo koeficientai gauti bandymu metu ir teoriškai apskaičiuoti ...	139

SANTRUMPOS

<i>STR</i>	-	Statybos Techninis Reglamentas;
<i>m</i>	-	metrai;
<i>%</i>	-	procentai;
<i>kt</i>	-	kita;
<i>kg</i>	-	kilogramai;
<i>t</i>	-	tona;
<i>Hz</i>	-	hercas;
<i>pav.</i>	-	paveikslas;
<i>g/b</i>	-	gelžbetonis;
<i>kN</i>	-	kiloniutonas;
<i>MPa</i>	-	megapaskalis;
<i>mm</i>	-	milimetrai;
<i>ft</i>	-	pėdos;
<i>VšĮ</i>	-	Viešoji įstaiga;

Kitos santrumpos paaiškinamos tekstinėje darbo dalyje.

SIMBOLIAI

DLA	- dinamiškumo koeficientas (atitinkamai pagal normas);	M_{crc}	- pleišėjimo momentas;
Φ	- dinamiškumo koeficientas (pagal europines projektavimo normas);	σ_{mt}	- betono svarbiausieji tempimo įtempiai;
μ_{din}	- dinamiškumo koeficientas (pagal rusiškas projektavimo normas);	σ_{mc}	- betono svarbiausieji gniuždymo įtempiai;
D_{dyn}	- dinaminis įlinkis;	σ_x	- normaliniai įtempiai;
D_{sta}	- statinis įlinkis;	τ_{xy}	- tangentiniai įtempimai;
n_0	- dažnis;	$k_{\alpha Q}$	- skersinio pasiskirstymo koeficientas;
E	- tamprumo modulis;	F_B	- spyruoklės jėga;
I	- inercijos momentas;	w_v	- vertikalus judančios masės poslinkis;
g	- laisvojo kritimo pagreitis;	u''_c	- sijos taško pagreitis;
Φ	- inercijos jėga;	m_v	- krovinio masė;
g	- laisvojo kritimo pagreitis;	w''_v	- krovinio pagreitis;
Φ	- inercijos jėga;	μ_j	- nedimensiniai parametras;
g	- laisvojo kritimo pagreitis;	A_i, B_i	- konstantos;
W_v	- krovinio svorio jėga;	C_i, D_i	- konstantos;
E	- tamprumo modulis;	h_s	- duobės gylis;
I	- inercijos momentas;	Δ_s	- duobės plotis;
n_0	- savųjų svyravimų dažnis;	S_s	- duobės poveikio impulsas;
u	poslinkis;	\dot{w}_g	- transporto vertikalus greitis;
\dot{u}	- greitis;	\dot{u}_g	- sijos vertikalus greitis;
\ddot{u}	- pagreitis;	Δx	- absoliučioji paklaida;
ω_{bn}	- n -osios modos svyravimų dažnis;	$\Delta x / x$	- santykinė paklaida;
ω_b	- slopinimo dažnis;	δ	- virpesių slopinimo koeficientas;
C	- slopinimo santykis;	W_{red}	- redukuotas skerspjūvio atsparumo momentas;
$q(t)$	- n -osios modos amplitudė;	W_{pl}	- plastinis atsparumo momenai;
ξ_n	- slopinimo santykis;	A_{max}	- didžiausia virpesių amplitudė.

Kiti simboliai paaiškinami tekstinėje darbo dalyje.

DARBO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI

Darbo tikslas: atlikti gelžbetoninių tiltų dinaminio įlinkio analizę, esant vienodam kelio dangos nelygumui ir skirtingiems transporto priemonės greičiams.

Darbo uždaviniai:

1. Išanalizuoti matematinius modelius skirtus, gelžbetoninių tiltų perdangų dinaminiam įlinkiui aprašyti.
2. Suprojektuoti įtemptojo gelžbetonio sijinę karpytą perdangą (atlikti įrašų skaičiavimą pagal rusiškas ir europines tiltų projektavimo normas).
3. Atlikti įtemptojo gelžbetonio tiltų perdangų eksperimentinius dinaminį rodiklių tyrimus, judant sunkiasvorėms transporto priemonėms.
4. Patikrinti ir palyginti eksperimentų metu gautus rezultatus su teoriniais rezultatais.

Darbo naujumas: pritaikytas matematinis modelis tiltų perdangos sijų dinaminiam įlinkiui apskaičiuoti, įvertinant tilto ir judančios transporto priemonės pagrindinius parametrus: standumą ir masę. Modelyje atsižvelgiama į pradines sąlygas: pradinį tilto perdangos ir transporto priemonės judėjimo vertikalųjį poslinkį ir vertikalųjį greitį.

Darbo praktinė vertė: darbe pateikiamas matematinis modelis tiltų perdangos sijų dinaminiam įlinkiui apskaičiuoti gali būti taikomas įvairių tipų dviatramių tiltų perdangų dinaminei analizei.

IVADAS

Tiltai yra svarbus susisiekimo sistemos statinys, be kurių neįsivaizduojamas transporto eismas. Jų projektavimas ir statyba yra sudėtingas procesas, kadangi tilto konstrukcijas veikia dinaminės apkrovos. Tyrejai šias apkrovas tiria jau daugiau nei 100 metų, tačiau iki dabar jos nėra iki galo ištytos. Šiomis dienomis kuriami įvairūs dinaminiai modeliai ir metodai skirti atlikti tiltų dinaminei analizei. Dinaminiai tyrimai ypač aktualūs gelžbetoniniams tiltams dėl jų perdangose atsirandančių pažaidų [34].

Įtemptojo gelžbetonio tiltai plačiai paplitę ne tik Lietuvoje, bet ir pasaulyje. Pirmas įtemptojo gelžbetonio tiltas pastatytas Lietuvoje 1960 m. per Spenglos upę kelyje Pirčiupiai – Babriškės. Po kelių metų 1964 m. pirmą kartą pusiausviriniu gembiniu būdu sumontuotas Klebonišio tiltas per Nerį šiaurinėje Kauno apskrityje [15]. Po šių pastatytų tiltų įtemptojo gelžbetonio tiltai ypač išpopuliarėjo dėl savo ilgaamžiškumo ir atsparumo atmosferiniams poveikiams. Sovietmečiu Lietuvoje daug suprojektuota ir pastatyta šio tipo tiltų, kurie naudojami iki šiol. Vienas iš jų – tiltas per Šušvės upę, kuris pasirinktas kaip tyrimo objektas.

Daugumos seniau pastatytų tiltų projektavimas buvo atliktas pagal rusiškas projektavimo normas (CH-200-62, 1962, CH-365-67, 1967) HK-80 apkrovai [6, 7]. Šios apkrovos modelis buvo taikomas naudojant dinamiškumo koeficientą, lygų vienetui. Modelyje neatsižvelgiama į galimus dinaminis poveikius, todėl atliekant tyrimus tapo svarbu sužinoti, kiek šiuolaikinių projektavimo normų apkrovos skiriasi nuo seniau taikytų.

Didėjant transporto srautams ir kartu jų masėms, tiltų perdangos veikiamos vis didesnėmis dinaminėmis apkrovomis [35]. Didelę įtaką taip pat turi nelygi kelio danga ir transporto priemonės judėjimo greitis [23, 27]. Įvairių normų dinamiškumo koeficientai šių parametru neįvertina. Dėl šios priežasties mokslininkai T. H. T. Chan, S. S. Law, L. Fryba ir kt. pateikė keletą matematinių modelių tilto perdangos dinaminiam įlinkiui skaičiuoti, tačiau modeliai sunkiai pritaikomi praktikoje dėl sudėtingų empirinių išraiškų.

Atliekant gelžbetoninių tiltų dinaminę analizę, svarbu tinkamai įvertinti kaip nuo veikiančių apkrovų tilto perdangoje pasiskirsto įrašos. Tai galima įvykdyti atlikus statinius skaičiavimus, naudojant tikslius metodus, kuriais būtų galima nustatyti kaip perdangos sijos dirba kartu. Tinkamam skaičiavimo tikslumui pasiekti reikia įvertinti per laiką pasikeitusias medžiagų savybes ir įvairius konstrukcinius elementus.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Dinaminiai poveikiai

Konstrukcijų projektavimas ir įvairūs konstrukcijų tyrimai atliekami dviem apkrovų tipams. Viena iš jų yra statinė apkrova, kuri nekinta arba kinta labai lėtai, nesuteikdama konstrukcijai žymesnių pagraičių. Kitas apkrovos tipas – dinaminė, tai apkrova, kurios didumas, kryptis arba pridėties taškas sparčiai kinta ir dėl to jos veikiama konstrukcija juda su pagraičiu. Toks pagraitis pastebimas, kai konstrukcijos elementas juda netolygiu greičiu. Kūnas gali būti greitinamas arba lėtinamas, todėl šias apkrovas galima suskirstyti į staigiasias ir smūgines.

Konstrukcijas, kurias nuolat veikia dinaminės apkrovos, verčia deformuotis tam tikrais laiko intervalais. Konstrukcijos elementai svyruoja, virpa – trumpą poveikį lydi vadinamieji tamprieji virpesiai. Yra sudėtinga įvertinti konstrukcijų virpesius, tačiau būtina, norint išvengti konstrukcijų savųjų virpesių rezonanso, kuris išveda konstrukciją iš pusiausvyros padėties ir dėl to dažniausiai konstrukcijoje esančias medžiagas paveikia neigiamai.

Dinaminiai poveikiai dažnai yra sudėtingesni negu statiniai dėl laike kintančių apkrovų, todėl šio tipo uždavinių sprendimas tampa taip pat sudėtingesnis. Norint nusakyti dinaminę apkrovą, reikia žinoti ne tik jėgų didumą, pridėties taškus bei kryptis, bet ir jų kitimo dėsnius. Tik kai kurių tampriųjų elementų dinaminio poveikio parametrus skaičiuoti gali tiktai nesudėtinga medžiagų mechanikos metodika, kuri dažniausiai siūlo parametrus, gautus statinio poveikio nagrinėjimo metodais, dauginti iš vadinamojo *dinamiškumo koeficiento* [13].

1.2. Dinamiškumo koeficientai

Tiltai ir viadukai yra projektuojami naudojant statines apkrovas, kurios yra padidintos naudojant dinamiškumo koeficientą (DLA^1 arba DAF^2). Dinamiškumo koeficientas yra didžiausio tarpatramio ilgio arba savųjų svyravimų dažnio – funkcija, kurioje įvertinami judančių transporto priemonių dinaminiai efektai.

Mokslininkai H. Moghimi, H. R. Ronagh savo straipsnyje [36] apžvelgia įvairių normų formules, kuriomis skaičiuojamos dinaminių koeficientų reikšmės. Dinamiškumo koeficientas priklauso tiek nuo dinaminių apkrovų, tiek nuo statinių, kurios gali būti nesusijusios, išskyrus tuos atvejus, kai transporto priemonės svoris yra mažiau kaip 10 procentų viso tilto anstato svorio. Dinamiškumo koeficientas apibrėžiamas kaip maksimalaus dinaminio įlinkio ir

¹ Dynamic load allowance (anglų k.)

² Dynamic amplification factor (anglų k.)

maksimalaus statinio įlinkio santykis, tarpatramio viduryje:

$$DLA = \frac{D_{dyn} - D_{sta}}{D_{sta}} \text{ arba } DLA + 1 = \frac{D_{dyn}}{D_{sta}}; \quad (1.2.1)$$

čia D_{dyn} – dinaminis įlinkis;

D_{sta} – statinis įlinkis.

Tilto virpesiai, dėl transporto priemonių judėjimo, turi tenkinti dvi svarbias sąlygas. Pirmoji sąlyga – reikia kontroliuoti dinaminį ir statinį įtempių santykį. Tai įvertinama statikos projektavime naudojant jau minėtą dinamiškumo koeficientą. Antroji sąlyga – kontroliuoti juntamus virpesius, nes per didelę jų amplitudę gali kelti nepasitikėjimo ir nesaugumo jausmą, nors tilto konstrukcija ir saugi [18]. Tiltu savieji ir priverstiniai svyravimai priklauso nuo tam tikrų charakteristikų tokių, kaip transporto priemonės masė, greitis, pakabos standumas, ašių skaičius, taip pat priklauso nuo kelio dangos nelygumų, temperatūrinių siūlių konstrukcijos, tilto standumo, transporto priemonės ir tilto slopinimo [26, 38].

Daugelyje normų dinamiškumo koeficientas skaičiuojamas tik pagal tarpatramio ilgį. 1992 AASHTO³ normose formulė pagal kurią galima apskaičiuoti statiškai ekvivalentišką jėgą, kuri atitinka dinaminę:

$$DLA = \frac{50}{L(ft) + 125} = \frac{15,25}{L(m) + 38,1} \leq 30\%, \quad (1.2.2)$$

čia L – tarpatramio skaičiuojamasis ilgis (ft arba m) esant paprastam atrėmimo atvejui.

Japonai naudoja 1.2.3 formulę panašią kaip ir AASHTO normų. Irano ir Vokietijos (DIN 1072-1976) normų atitinkamai 1.2.4 ir 1.2.5 formulės:

$$DLA = \frac{20}{L(m) + 50}. \quad (1.2.3)$$

$$DLA = 0,3 - 0,005 \cdot L(m) - 0,15; \quad (1.2.4)$$

$$DLA = 0,4 - 0,008 \cdot L(m) - 0,1 \cdot h, \quad 0 \leq DLA \leq 0,3; \quad (1.2.5)$$

čia L – tarpatramio skaičiuojamasis ilgis (m);

h – pakloto aukštis (m).

Gelžbetoninių tiltų dinamiškumo koeficientas prancūzų normose (French cahier des Prescriptos Communes (1973)) pateikiamas 1.2.6 formulėje, o Italijos 1.2.7 formulė:

$$DLA = \frac{0,64}{0,2L(m) + 1}; \quad (1.2.6)$$

³ Standard specification for Highway bridge (anglų k.)

$$DLA = \frac{(100 - L(m))^2}{100 \cdot (250 - L(m))} \geq 0; \quad (1.2.7)$$

Eurokodas 1 - Poveikiai konstrukcijoms, 2 dalis: Tiltų eismo apkrovos teikia tokią dinaminio daugiklio priklausomybę nuo metrais aprašyto redukuoto tilto ilgio L_Φ :

- Puikiai prižiūrimam keliui nustatomos ribos $1,0 \leq \Phi_2 \leq 1,67$ pagal formulę:

$$\Phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{L_\Phi} - 0,2} + 0,82; \quad (1.2.8)$$

- Normaliai prižiūrimam keliui nustatomos ribos $1,0 \leq \Phi_2 \leq 2,0$ pagal formulę:

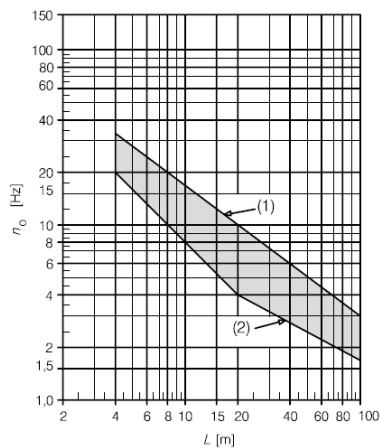
$$\Phi_3 = \frac{2,16}{\sqrt{L_\Phi} - 0,2} + 0,73. \quad (1.2.8)$$

Pasirinktas tyrimo objektas – tiltas per upę Šušvę buvo projektuojamas pagal rusiškas projektavimo normas. Šiam tiltui buvo taikoma tokia dinamiškumo koeficiento formulė:

$$\mu_{din} = 1 + \mu = 1 + \frac{45 - \lambda}{135}; \quad (1.2.9)$$

čia λ – tarpatramio skaičiuojamasis ilgis (m).

Dinamiškumo koeficientas Φ nusako įtempių dinaminį pobūdį ir virpesių poveikius, tačiau jis neapima nei rezonanso, nei didelių perdangos svyravimų [14]. Dinamiškumo koeficientas Φ taikomas konstrukcijos, kurių savųjų svyravimų pirmosios modos dažniai patenka į zoną, parodytą 1.1 paveiksle:



1.1 pav. Dinamiškumo koeficiento Φ taikymo zona (tarp pasvirusių tiesių). 1 – viršutinė dažnių riba, 2 – apatinė dažnių riba [14]

Taikymo zonos ribos aprašomos šiomis išraiškėmis:

- Viršutinės dažnių ribos:

$$n_0 = 94,76 \cdot L^{-0,748}; \quad (1.2.10)$$

- Apatinės dažnių ribos:

$$n_0 = 80 / L, \text{ kai } 4 \leq L \leq 20m; \quad (1.2.11)$$

$$n_0 = 23,58 \cdot L^{-0,592}, \text{ kai } 20 \leq L \leq 100m. \quad (1.2.12)$$

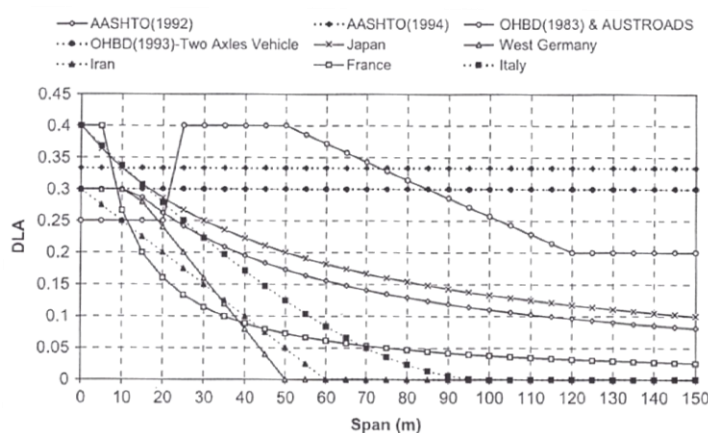
Dvitramių lenkiamųjų konstrukcijų savųjų svyravimų dažniai apytikriai skaičiuojami pagal formulę:

$$n_0 = 17,75 / \sqrt{\delta_0}; \quad (1.2.13)$$

čia δ_0 – maksimalus įlinkis, veikiant nuolatinėms apkrovoms.

Kai kuriose normose dinamiškumo koeficientas taip pat skaičiuojamas pagal savųjų svyravimų dažnius. Gautos išraiškos galioja tik tada, kai svyravimai vyksta išilgine kryptimi ir kai tiltas apkrautas simetriškai. Tačiau realus tilto paviršius yra dvimatis, todėl svyravimai vyksta dviem kryptimis. Dažni atvejai, kai tilto viena pusė labiau apkrauta, dėl to atsiranda tilto perdangos sukimas. Šiuo atveju apskaičiuotas dinamiškumo koeficientas pagal savųjų svyravimų dažnį tampa netikslus.

Paveiksle 1.2 palyginti įvairių normų dinamiškumo koeficientai, kurie apskaičiuoti pagal tarpatramio ilgį. Pagal gautus rezultatus, kai tarpatramio ilgis daugiau kaip 20 m reikšmės labiausiai atitinka AUSTROADS IR 1983 OHBD⁴ normų. Mažo ilgio tiltams DLA koeficientai labiausiai sutampa japonų ir italų. Chan ir O'Connor [26] tyrė 37 skirtingus plieninius tiltus ir pasiūlė, jog, esant normalioms sąlygoms, dinamiškumo koeficientas turi būti mažiau 0,25, o didesnės reikšmės, tokios kaip 1,0, gali būti gaunamos neįprastomis sąlygomis, pavyzdžiui, smūgio atveju. Pagal naujausius tyrimus 1992 AASHTO normos teisingiausiai atspindi dinامينius poveikius, kurie veikia tiltus.



1.2 pav. Dinamiškumo koeficientai pagal skirtingas normas [36]

Dinamiškumo koeficientas yra svarbus parametras projektuojant tiltus ir viadukus, tačiau iki dabar pasauliniu mastu nėra bendro susitarimo dėl šio parametro reikšmės. Tarp įvairių tiltų projektavimo normų yra keletas nesutapimų ir netikslumų. Vienas iš jų toks, kad

⁴ 1983 Ontario Highway Bridge Design Code (OHBD) (anglų k.)

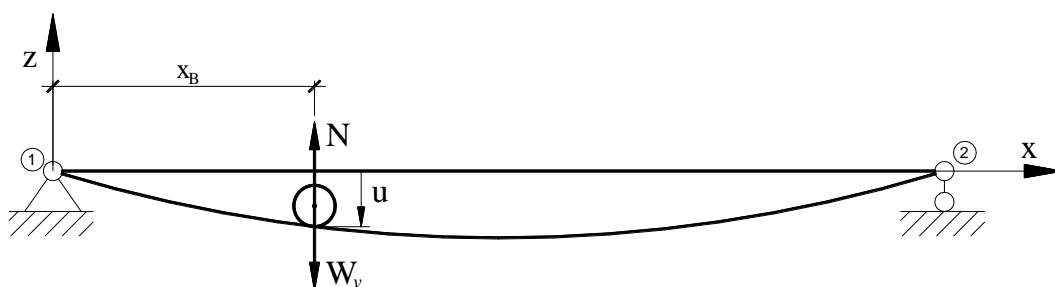
dinamiškumo koeficientai yra skaičiuojami pagal didžiausią tarpatramio ilgį arba pagal savųjų virpesių svyravimų dažnį, o kiti svarbūs parametrai lieka neįvertinti [37]. Todėl šiomis dienomis tiltų dinaminė analizė tapo aktuali ir svarbi. Kuriami įvairūs modeliai skirti aprašyti tiltus veikiančius dinامينius procesus.

1.3. Tiltų dinamiką aprašantys matematiniai modeliai

Tiltą veikianti dinaminė apkrova atsiranda, kai įvairios transporto priemonės važiuoja linkstančiu tilto paviršiumi. Jei tilto danga nelygi, jis yra veikiamas dinaminiais smūgiais, kurie priklauso nuo transporto priemonės greičio, nelygumų dydžio ir kitų veiksnių. Papildomos apkrovos atsiranda transporto priemonėms stabdant ir greitėjant ar kitaip manevruojant. Tiltas yra veikiamas ne tik vertikalių bet ir horizontalių apkrovų. Tiltų dinaminiai tyrimai tapo svarbūs nagrinėjant tilto laikančiųjų konstrukcijų darbą, veikiant dinaminėms apkrovoms. Todėl dinaminei analizei atlikti kuriami įvairūs modeliai, skaičiavimo principai bei atliekami įvairūs eksperimentiniai tyrimai rezultatams palyginti.

1849 metais vieni iš pirmųjų, kurie pradėjo dinامينius tyrimus tai R. Willis ir G. G. Stokes [28]. Jų siūlomas sprendinys – *judančios masės modelis*, kuris pateikiamas 1.3 paveiksle [10]. Mokslininkai teigė, kad judanti apkrova gali sukelti dinaminį įlinkį ir įtempius. Nuo šios idėjos prasidėjo tiltų dinaminė analizė, o šiuo metu literatūroje esančius modelius galima suskirstyti į tris grupes, kurie vadinami *judančios masės*, *judančios apkrovos* ir *judančios masės tampriu ryšiu*.

Judančios masės modelis yra paprasčiausias, jame atsižvelgiama į judančio transporto masę m_v , kuri juda iškreivinta trajektorija. Tačiau šiame modelyje nepaisome tilto masės, todėl nagrinėjamas uždavinys tampa vieno laisvės laipsnio.



1.3 pav. Transporto priemonė, judanti deformuojamu tiltu [10]

Modelis sukurtas remiantis Niutono dėsniau:

$$m_v \cdot \ddot{u} = W_v - N; \tag{1.3.1}$$

čia $W_v = m_v \cdot g$ – krovinio svorio jėga;

Nagrinėjama sija – dviatramė, todėl jos įlinkis bet kuriame taške lygus:

$$u = \frac{N \cdot x^2 \cdot (l - x^2)}{3 \cdot l \cdot E \cdot I}; \quad (1.3.2)$$

čia x – tam tikras sijos taškas;

E – tamprumo modulis;

I – inercijos momentas;

N – koncentruota jėga veikianti siją.

Vertikali greičio ir pagreičio komponentės atitinkamai:

$$\dot{u} = \frac{du}{dt} = \frac{du}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = v \cdot u'; \quad (1.3.3)$$

$$\ddot{u} = v^2 \cdot u''; \quad (1.3.4)$$

čia $v = \frac{dx}{dt}$ – yra transporto judėjimo greitis ant tilto (brūkšneliu žymima išvestinė

koordinatės x atžvilgiu);

Gauta transporto judėjimo lygtis:

$$N = m_v \cdot g - v^2 \cdot u''; \quad (1.3.3)$$

čia v – transporto priemonės judėjimo greitis;

u'' – vertikalus sijos pagreitis;

m_v – transporto priemonės masė;

g – laisvojo kritimo pagreitis.

Turėdami pagreičio komponentę ir taško vertikalųjį poslinkį, kurį veikia jėga N , gauname transporto priemonės judėjimo diferencialinę lygtį:

$$v^2 \cdot u'' + \frac{3 \cdot l \cdot E \cdot I}{x^2 \cdot (l - x)^2} u = m_v \cdot g; \quad (1.3.4)$$

Šios lygties sprendimas sudėtingas, tačiau G. G. Stokes ją išsprendė begaline algebrine eilute. Šio modelio didžiausias trūkumas, kad yra nepaisoma į tilto masę, kuri beveik visada yra gerokai didesnė nei transporto priemonės [10]. Mokslininkas taip pat parodė, kad dinaminis įlinkis priklauso nuo savųjų svyravimų. R. Willis atlikdamas dinaminius testus įrodė, kad sijos įlinkis priklauso nuo transporto priemonės judėjimo greičio. Didelių greičių atveju sijos dinaminis įlinkis padidėja nuo 2 iki 3 kartų, palyginti su statiniu įlinkiu [36].

Kitas modelis tilto dinaminiam įlinkiui skaičiuoti yra priešingas prieš tai nagrinėtam, kuris vadinamas – *judančios apkrovos modelis*. Šiame modelyje yra įvertinama tilto masė, bet nėra atsižvelgiama į transporto priemonės masę. Transporto masę pakeičiama jėga ir jos

masės inertiškumo nepaisome. Nagrinėjamas uždavinys turės du laisvės laipsnius. Kai jėga veikia tašką B, tai visas vidurio taško įlinkis:

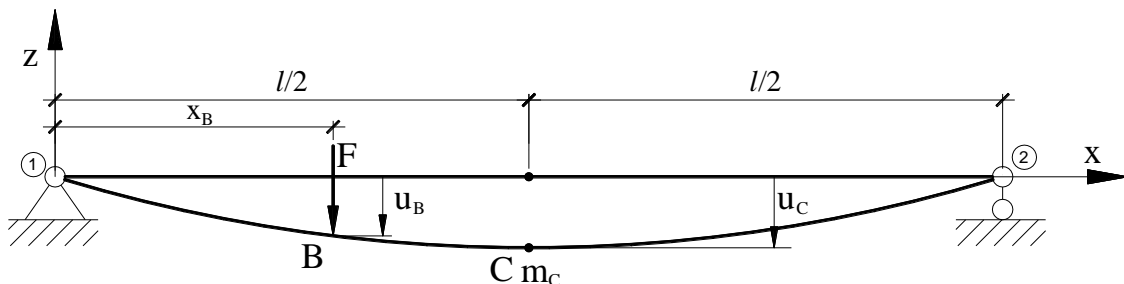
$$u_c = F \cdot \delta_{CB} + \Phi \cdot \delta_{CC}; \quad (1.3.5)$$

čia F – jėga, kuri lygi transporto priemonės svoriui;

Φ – inercijos jėga;

δ_{CB} – taško C įlinkis dėl vienatinės jėgos, veikiančios tašką B (Maksvelo teorema);

δ_{CC} – taško C įlinkis dėl vienatinės jėgos, veikiančios tašką C.



1.4 pav. Lenkiamojo tilto aproksimacija viena mase [10]

Taško B įlinkis δ_{CB} dėl vienatinės jėgos, veikiančios tašką C yra lygus:

$$\delta_{CB} = \delta_{CC} \cdot \sin \frac{\pi \cdot x_B}{l} = \delta_{BC}. \quad (1.3.6)$$

Yra daroma prielaida, kad sijos įlinkio forma – sinusoidė. Kadangi inercijos jėga $\Phi = -m_c \cdot \ddot{u}_c$ tai lygtį 1.3.5 galime užrašyti taip:

$$m_c \cdot \delta_{CC} \cdot \ddot{u}_c + u_c = F \cdot \delta_{CC} \cdot \sin \frac{\pi \cdot x_B}{l}. \quad (1.3.7)$$

Sijos standis, jėgai veikiant tašką C, $k_c = 1 / \delta_{CC}$, dėl to diferencialinė lygtis lygi:

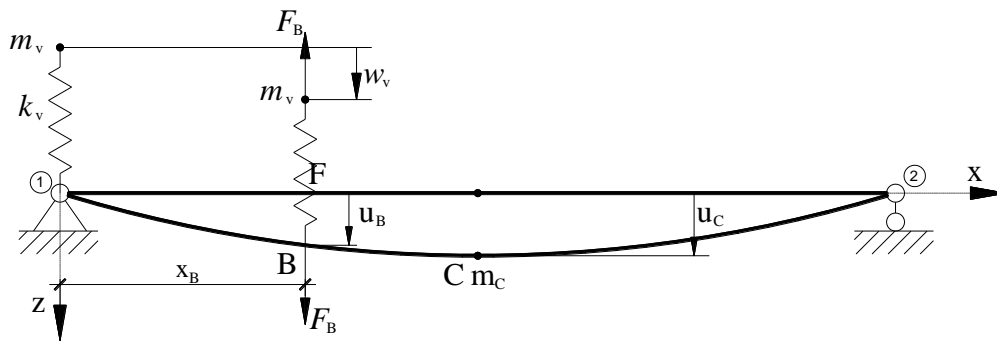
$$m_c \cdot \ddot{u}_c + k_c \cdot u_c = F \cdot \sin \theta t. \quad (1.3.8)$$

Čia konstanta $\theta = \pi v / l$, kadangi $\frac{\pi \cdot x_B}{l} = \frac{\pi \cdot v}{l} t = \theta t$. Laikome, kad transportas juda pastoviu greičiu v [10].

Šis modelis teisingas tuo atveju, jei transporto priemonės masė, palyginti su tiltu, maža. Tačiau praktikoje dažnai pasitaiko, kad masių santykis būna mažas. Dar vienas trūkumas, kad šiame modelyje nėra vertinama sąveika tarp tilto ir transporto, todėl šiuo modeliu kelio nelygumų įvertinti negalima.

Judančios masės tampriu ryšiu modelis sudėtingiausias, nes atsižvelgiama ne tik į tilto masę, bet ir transporto priemonės masę. Šį modelį aprašo profesoriai V. Kargaudas, R. Vaičaitis knygoje „Konstrukcijų virpesiai“ [10] ir S. Zadlauskas daktaro disertacijos

santraukoje [22]. Šio modelio schema pateikta žemiau esančiame paveiksle:



1.5 pav. Lenkiamas tiltas ir spyruokle atremta transporto priemonė [10]

Uždavinys turės du laisvės laipsnius, nes skaičiuojant yra įvertinama tilto masė ir krovinio masė. Norint supaprastinti skaičiavimą, priimtos tokios prielaidos:

- laikoma, kad transporto priemonė ideali sistema su vienu laisvės laipsniu ir masė koncentruota centre;
- tilto perdanga nagrinėjama kaip viena sija ir jos masė bus koncentruojama centre;
- traktuojama, kad sijos įlinkio forma – sinusoidė;
- transporto priemonės judėjimo greitis pastovus.

Transporto priemonė remiasi į dviatramę siją tampriu ryšiu: spyruokle, kurios standumas k_v . Jėga, kuria spyruoklė veikia į siją ir transportą lygi:

$$F_B = k_v \cdot (w_v - u_B); \quad (1.3.9)$$

čia w_v – yra vertikalus judančios masės m_v poslinkis;

u_B – taško B poslinkis.

Šiam modeliui rašomos dvi lygtys:

- viena iš jų – Niutono dėsnis masės m_v judesiui:

$$m_v \cdot \ddot{w}_v = -k_v \cdot (w_v - u_B); \quad (1.3.10)$$

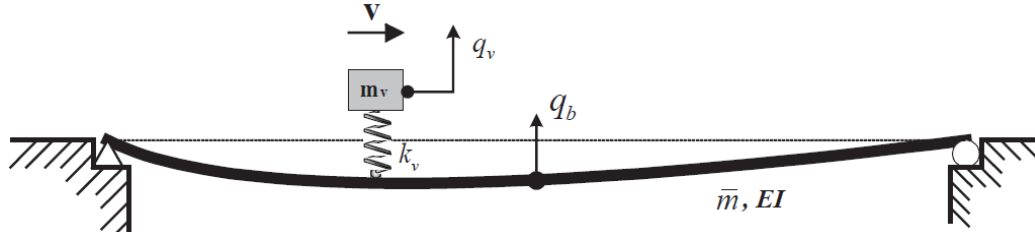
- antroji lygtis yra masės m_c poslinkių lygybė:

$$u_C = F_B \cdot \delta_{CB} + \Phi \cdot \delta_{CC} + W_v \cdot \delta_{CB}. \quad (1.3.11)$$

Įvedus į lygtis visus parametrus gauname diferencialinių lygčių sistemą, kurios sprendinys plačiau aprašomas 7 skyriuje.

Mokslininkai Y. B. Yang ir C. W. Lin savo straipsnyje [28] rėmėsi panašiu modeliu. Jie taip pat prie judančios masės pridėjo tamprų ryšį – spyruoklę, todėl šiame modelyje galima įvertinti ne tik tilto svyravimus, bet ir transporto pakabos. Transporto priemonės masė yra priimta maža lyginant su tilto anstatu. Naudojant modalinį superpozicijos principą ir kreivinius integralus, tyrėjai gavo du supaprastintus sprendinius, skirtus tilto ir transporto

sąveikos nagrinėjimui. Nors pateikiamas modelis (1.6 paveikslas) laikomas paprasčiausias, kuriuo galima tirti dinaminę sąveiką tarp dviejų atskirų sistemų, tačiau dauguma tyrėjų modelių plėtojo, neatsižvelgdami į transporto dinaminę sąveiką laike.



1.6 pav. Judanti transporto priemonė ant šarnyriškai atremtos tilto sijos [28]

Paveiksle 1.6 pavaizduota laisvai atremta sija, kuri apkrauta pastoviu greičiu v judančia transporto priemone. Sistemoje į slopinimą neatsižvelgiama, o sija priimta pastovaus skerspjūvio Bernulio-Oilerio tipo. Judėjimo lygtys aprašančios vertikalūs virpesius abiejų sistemų pateikiamos 1.3.12 ir 1.3.13:

$$\bar{m} \cdot \ddot{u} + E \cdot I \cdot u'''' = p(x, t); \quad (1.3.12)$$

$$m_v \cdot \ddot{q}_v + k_v \cdot q_v = k_v \cdot u|_{x=v \cdot t}; \quad (1.3.13)$$

Čia \bar{m} – masė per ilgio vienetą, m_v ir k_v atitinkamai transporto masė ir pakabos standumas. q_v – vertikalus transporto poslinkis, $u(x, t)$ – sijos įlinkis, $p(x, t)$ – jėga veikianti tam tikrame taške esant vt pozicijoje. Ši jėga išreiškiama taip:

$$p(x, t) = f_c(t) \cdot \delta(x - v \cdot t); \quad (1.3.14)$$

Čia $\delta(x - v \cdot t)$ yra Dirako delta funkcija, kuri apskaičiuojama taške $x = v \cdot t$, o taškinė jėga $f_c(t)$ yra lygi sumai transporto masės ir tamprios jėgos, kurią sudaro pakabos sistema:

$$f_c(t) = -m_v \cdot g + k_v (q_v - u|_{x=v \cdot t}); \quad (1.3.15)$$

Reikia paminėti, kad vertikalus pakabos poslinkis yra nustatomas iš statiškai pusiausvyros pozicijos. O siją veikia jėga, dėl kurios spyruoklė susispaudžia arba pailgėja. Lygtis 1.3.12 gali būti išreiškiama tokiomis išraiškoms kaip modų formos $\phi_n(x)$ ir modų koordinatės $q_{bn}(t)$:

$$u(x, t) = \sum_n \phi_n(x) \cdot q_{bn}(t). \quad (1.3.16)$$

Laisvai atremtai sijai svyravimo formos žinomos, todėl jos nagrinėjamos kaip sinusoidės tipo. 1.3.16 lygtis tampa:

$$u(x, t) = \sum_n \left[\sin \frac{n \cdot \pi \cdot x}{L} \cdot q_{bn}(t) \right]. \quad (1.3.17)$$

Pakeitus poslinkio 1.3.17 lygtį į 1.3.12, padauginus abi puses iš $\phi_n(x)$ ir atlikus integravimą pagal x , gauname:

$$\int_0^L \bar{m} \cdot \phi_m \cdot \sum_n (\phi_n \cdot \ddot{q}_{bn}) dx + \int_0^L EI \cdot \phi_m \cdot \sum_n (\phi_n'''' \cdot q_{bn}) dx = \int_0^L f_c(t) \cdot \delta(x - v \cdot t) \cdot \phi_m dx. \quad (1.3.18)$$

Pakeitus apatinius indeksus m į n 1.3.18 lygtis sumažėja:

$$\ddot{q}_{bn} + \omega_{bn}^2 \cdot q_{bn} = \frac{f_c(t) \cdot \int_0^L \delta(x - v \cdot t) \cdot \phi_n(x) dx}{\bar{m} \cdot \int_0^L \phi_n^2(x) dx}; \quad (1.3.19)$$

čia ω_{bn} – tilto n -osios modos svyravimų dažnis:

$$\omega_{bn} = \frac{n^2 \cdot \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\bar{m}}}. \quad (1.3.20)$$

Atlikus 1.3.19 lygties dešinės pusės pertvarkymus, n -osios modos lygtis gali būti tokia:

$$\begin{aligned} \ddot{q}_{bn} + \omega_{bn}^2 \cdot q_{bn} + \frac{2 \cdot \omega_v^2 \cdot m_v}{\bar{m} \cdot L} \sin \frac{n\pi vt}{L} \cdot \sum_j \left[\sin \frac{j\pi vt}{L} q_{bj} \right] - \\ - \left[\frac{2 \cdot \omega_v^2 \cdot m_v}{\bar{m} \cdot L} \sin \frac{n\pi vt}{L} \right] q_v = \frac{-2 \cdot m_v \cdot g}{\bar{m} \cdot L} \sin \frac{n\pi vt}{L}. \end{aligned} \quad (1.3.21)$$

Panašūs pertvarkymai atliekami su 1.3.13 lygtimi, kuri užrašoma taip:

$$\ddot{q}_v + \omega_v^2 \cdot q_v = \omega_v^2 \sum_n \sin \frac{n\pi vt}{L} q_{bn}; \quad (1.3.22)$$

čia ω_v – svyravimų dažnis transporto priemonės:

$$\omega_v^2 = \sqrt{\frac{k_v}{m_v}}. \quad (1.3.23)$$

Kaip jau minėta, autoriai priėmė prielaidą, kad transporto priemonės masė m_v daug mažesnė nei tilto $m_v / \bar{m}L \ll 1$, todėl 1.3.21 lygtį galime perrašyti taip:

$$\ddot{q}_{bn} + \omega_{bn}^2 \cdot q_{bn} = \frac{-2 \cdot m_v \cdot g}{\bar{m} \cdot L} \sin \frac{n\pi vt}{L}. \quad (1.3.24)$$

Tilto dinaminė reakcija:

Priėmus pradines sąlygas lygias nuliui ir išsprendus antros eilės kreivinį integralą, gauname:

$$q_{bn}(t) = \frac{\Delta_{sn}}{1 - S_n^2} \cdot \left[\sin\left(\frac{n\pi vt}{L}\right) - S_n \cdot \sin(\omega_{bn} \cdot t) \right]; \quad (1.3.25)$$

čia Δ_{sn} – yra statinis įlinkis pagal n -osios eilės modą, kai veikia transporto priemonė:

$$\Delta_{stm} = \frac{-2 \cdot m_v \cdot g \cdot L^3}{n^4 \cdot \pi^4 \cdot E \cdot I}; \quad (1.3.26)$$

S_n – nedimensinis greičio parametras:

$$S_n = \frac{n\pi v}{L \cdot \omega_{bn}}; \quad (1.3.27)$$

Suminis tilto įlinkis nuo judančios transporto priemonės greičiu v :

$$u(x, t) = \sum_n \frac{\Delta_{stm}}{1 - S_n^2} \cdot \left\{ \sin \frac{n\pi x}{L} \left[\sin \frac{n\pi v t}{L} - S_n \cdot \sin(\omega_{bn} \cdot t) \right] \right\}; \quad (1.3.28)$$

Apskaičiavus pirmą išvestinę pagal laiką t , gauname tilto reakcijos greitį:

$$\dot{u}(x, t) = \sum_n \frac{\Delta_{stm}}{1 - S_n^2} \cdot \left\{ \sin \frac{n\pi x}{L} \left[\left(\frac{n\pi v}{L} \right) \cos \frac{n\pi v t}{L} - (\omega_{bn} \cdot S_n) \cdot \cos(\omega_{bn} \cdot t) \right] \right\}; \quad (1.3.29)$$

Apskaičiavus antrą išvestinę pagal laiką t , gauname tilto reakcijos pagreitį:

$$\ddot{u}(x, t) = \sum_n \frac{\Delta_{stm}}{1 - S_n^2} \cdot \left\{ \sin \frac{n\pi x}{L} \left[(\omega_{bn}^2 \cdot S_n) \sin \omega_{bn} \cdot t - \left(\frac{n\pi v}{L} \right)^2 \cdot \sin \frac{n\pi v t}{L} \right] \right\}; \quad (1.3.30)$$

Transporto priemonės dinaminė reakcija:

Įstačius poslinkio 1.3.25 lygties dešinę pusę į 1.3.22, gauname transporto priemonės judėjimo lygtį:

$$\ddot{q}_v + \omega_v^2 \cdot q_v = \underbrace{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Delta_{stm} \cdot \omega_v^2}{1 - S_n^2} \cdot \left\{ \sin \frac{n\pi v t}{L} \left[\sin \frac{n\pi v t}{L} - S_n \cdot \sin(\omega_{bn} \cdot t) \right] \right\}}_{g(t)}. \quad (1.3.31)$$

čia $g(t)$ – laiko funkcija, kuri išreiškia sąveiką tarp tilto ir transporto priemonės.

1.3.31 lygtis gali būti išsprędžiama naudojant Duhamelio⁵ integralą:

$$q_v(t) = \frac{1}{\omega_v} \cdot \int_0^t g(\tau) \sin \omega_v(t - \tau) d\tau. \quad (1.3.32)$$

Naudojant $g(t)$ išraišką 1.3.31 formulėje vertikalus poslinkis transporto priemonės gali būti apskaičiuojamas:

$$q_v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_{1n} \cdot \cos\left(\frac{(n-1)\pi v}{L} t\right) + A_{2n} \cdot \cos\left(\frac{(n+1)\pi v}{L} t\right) + A_{3n} \cdot \cos(\omega_v t) + \right. \\ \left. + A_{4n} \cdot \cos\left(\omega_{bn} - \frac{n\pi v}{L}\right) t + A_{5n} \cdot \cos\left(\omega_{bn} + \frac{n\pi v}{L}\right) t \right]; \quad (1.3.33)$$

⁵ Duhamelio integralas – pagal virpesių teoriją, tai yra būdas, kuriuo galima apskaičiuoti konstrukcijų reakciją dėl išorinio sužadavimo laike.

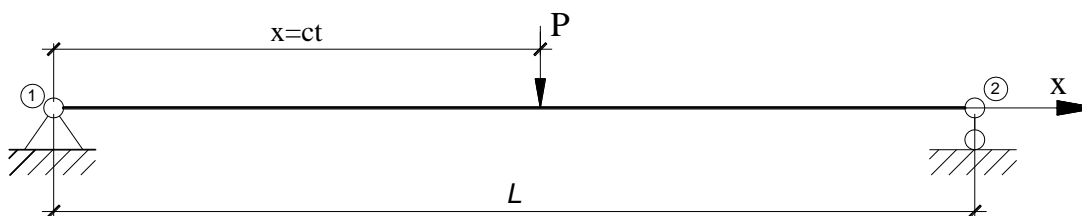
Autorių atlikti tyrimai sudarytam modeliui parodė, kad gautų virpesių amplitudės labai priklauso nuo svyravimo modos. Tai dar kartą patvirtino J. M. Biggs teoriją, kad, norint gauti norimo tikslumo rezultatus, reikia atsižvelgti tik į pirmą svyravimo modą.

Kitas parametras, kuris taip pat įtakoja svyravimų amplitudę yra greičio parametras S (1.3.27 formulė). Jis apibūdinamas kaip transporto priemonės pakabos ir tilto savųjų svyravimų dažnių santykis. Atliekant tyrimus, pastebėta, kad šiam parametrai didėjant, didėja tilto įlinkio amplitudė, nes tiltas gauna didesnę energijos kiekį. Todėl transporto priemonei važiuojant tokiu pat greičiu per skirtingo ilgio tiltus, didesnė energija yra sukaupiama didesnio ilgio tilto konstrukcijoje. O tai paaiškina, kodėl įlinkio amplitudė padidėja, esant didesniai transporto greičiui.

L. Fryba savo knygoje [20] taip pat pateikė *judančios apkrovos* ir *judančios masės* modelius, kuriais galima aprašyti judančias apkrovas konstrukcijoms. Autorius šiems modeliams taip pat taikė įvairius supaprastinimus ir prielaidas:

- sija yra pastovaus skerspjūvio ir pastovios masės per visą ilgį;
- apkrova juda pastoviu greičiu, iš kairės į dešinę;
- sijos slopinimas proporcingas virpesių greičiui;
- skaičiavimai atliekami dviatramei sijai, kurios galuose lenkimo momentas ir deformacijos lygios nuliui.

Judančios apkrovos modelyje (1.7 paveikslas) transporto masė buvo laikoma maža lyginant su sijos mase. Tiltų perdanga modeliuojama kaip Bernulio-Oilerio sija ir analizuojant tokios sijos dinamiką, taikomi Huko dėsniai, Navjė hipotezės ir Sant-Venano principai. Šį uždavinį sprendamas, jis pateikė dviatramės sijos schemą, kuri veikiama judančios pastovios apkrovos:



1.7 pav. Judanti jėga ant dviatramės sijos [20]

Uždaviniui spręsti pateikė tokią diferencialinę lygtį:

$$EJ \frac{\partial v^4(x,t)}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial v^2(x,t)}{\partial t^2} + 2\mu\omega_b \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = \delta(x-ct)P; \quad (1.3.34)$$

čia x – atstumas nuo jėgos P koordinatės iki sijos kairiojo krašto;

t – laikas;

$v(x,t)$ – sijos įlinkis taške x , laiku t , kada sija apkrauta savo svoriu;

E – Jungo modulis sijos;

J – sijos skerspjūvio inercijos momentas;

μ – sijos masė per ilgio vienetą;

ω_b – slopinimo dažnis;

P – pastovaus dydžio koncentruota jėga;

l – tarpatramio ilgis;

c – apkrovos pastovus greitis.

Ribos, kurios taikomos 1.3.34 lygčiai:

$$\begin{aligned} v(0,t) = 0; \quad v(l,t) = 0; \\ \left. \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} \right|_{x=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} \right|_{x=l} = 0; \end{aligned} \quad (1.3.35)$$

Pradinės sąlygos:

$$v(x,0) = 0; \quad \left. \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} \right|_{t=0} = 0. \quad (1.3.36)$$

Lygtis 1.3.34 kartu su sąlygomis 1.3.35-36 gali būti išspręsta naudojant integralų transformaciją. Lygties 1.3.34 kiekvienas narys dauginamas iš $j\pi x/l$ ir atliekamas integravimas pagal x tarp 0 ir l . Toliau taikomos Furjė integralų transformacijos ir gauname:

$$\begin{aligned} V(j,t) &= \int_0^l v(x,t) \sin \frac{j\pi x}{l} dx, \quad j = 1, 2, 3, \dots \\ v(x,t) &= \frac{2}{l} \cdot \sum_{j=1}^{\infty} V(j,t) \sin \frac{j\pi x}{l}. \end{aligned} \quad (1.3.37)$$

Po visų pertvarkymų sprendinys tampa toks:

$$\begin{aligned} v(x,t) = v_0 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j^2 \cdot (j^2 \cdot (j^2 - \alpha^2)^2 + 4 \cdot \alpha^2 \cdot \beta^2)} \cdot [j^2 \cdot (j^2 - \alpha^2) \sin j\omega t - \\ - \frac{j \cdot \alpha \cdot [j^2 \cdot (j^2 - \alpha^2)^2 - 2 \cdot \beta^2]}{(j^4 - \beta^2)^{1/2}} e^{-\omega_b t} \sin \omega'_{(j)} t - \\ - 2 \cdot j \cdot \alpha \cdot \beta \cdot (\cos j\omega t - e^{-\omega_b t} \cos \omega'_{(j)} t) \sin \frac{j\pi x}{l}. \end{aligned} \quad (1.3.38)$$

čia v_0 – sijos vidurio įlinkis nuo statinės jėgos P taške $x=l/2$:

$$v_0 = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot J} \approx \frac{2 \cdot P}{\mu \cdot l \cdot \omega_{(1)}^2}; \quad (1.3.39)$$

$\omega'_{(j)}$ – prislopintos sijos dažnis, esant atitinkamai mažam ir dideliame slopinimui:

$$\omega'_{(j)}{}^2 = \omega_{(j)}^2 - \omega_b^2; \quad (1.3.40)$$

$$\omega_{(j)}^2 = \omega_b^2 - \omega'_{(j)}{}^2; \quad (1.3.41)$$

Nedimensiniai parametrai:

$$\alpha = \frac{\omega}{\omega_{(1)}} = \frac{c}{2 \cdot f_{(1)} \cdot l} = \frac{c \cdot l}{\pi} \cdot \left(\frac{\mu}{EI} \right)^{1/2} = \frac{c}{c_{cr}}; \quad (1.3.42)$$

$$\beta = \frac{\omega_b}{\omega_{(1)}} = \frac{\omega_b \cdot l^2}{\pi^2} \cdot \left(\frac{\mu}{EI} \right)^{1/2} = \frac{\mathcal{G}}{2 \cdot \pi}. \quad (1.3.43)$$

Laisvai atremtos sijos j -osios modos virpesių dažnis:

$$\omega_{(j)}^2 = \frac{j^4 \cdot \pi^4}{l^4} = \frac{EI}{\mu}. \quad (1.3.44)$$

Atitinkamai savųjų virpesių dažnis:

$$f_{(j)} = \frac{\omega_{(j)}}{2 \cdot \pi} = \frac{j^2 \cdot \pi}{2 \cdot l^2} \left(\frac{EI}{\mu} \right)^{1/2}. \quad (1.3.45)$$

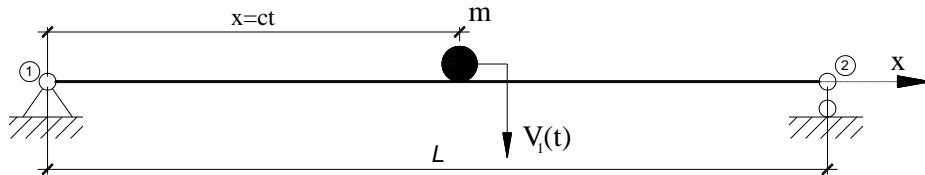
Kritinis greitis:

$$c_{cr} = \frac{2 \cdot f_{(j)} l}{j} \approx \frac{\pi}{l} \left(\frac{EI}{\mu} \right)^{1/2}, \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (1.3.46)$$

Logaritminis dekrementas:

$$\mathcal{G} = \frac{\omega_b}{f_{(1)}}. \quad (1.3.47)$$

Sekantis L. Frybos pateikiamas modelis – *judančios masės*, kuriame dėmesys kreipiamas į transporto masę. Šiam uždaviniui numatoma tokia prielaida, kad tilto sijos masė maža, lyginant su transporto priemonės. Modelio schema pateikiama 1.8 paveiksle:



1.8 pav. Judanti masė ant dviatramės sijos [20]

Ant sijos pastoviu greičiu c juda transporto priemonė, kurios apkrova P . Pagal d' Alembert's principą inercijos jėga – $md^2v(ct, t)/dt^2$ priklauso nuo vertikalios pagreičio taške $x=ct$. Sijos įlinkis taške x ir laikas t yra aprašomas formule:

$$v(x, t) = \left[P - m \frac{d^2v(ct, t)}{dt^2} \right] \cdot G(x, ct). \quad (1.3.48)$$

Lygčiai taikomos tos pačios ribos ir pradinės sąlygos kaip ir anksčiau nagrinėtam modelyje (1.3.35-36). $G(x, ct)$ – yra funkcija sijos įlinkio taške x , kuri sukelia statinė apkrova $P=I$ taške ct . Ji aprašoma taip:

$$G(x, ct) = \begin{cases} \frac{1}{6 \cdot EI \cdot l} \left[-(l-ct) \cdot x^2 + (2 \cdot l^2 - 3 \cdot l \cdot ct + ct^2) \cdot x \right] \cdot x, & x \leq ct; \\ \frac{1}{6 \cdot EI \cdot l} \left[-(l-x) \cdot ct^2 + (2 \cdot l^2 - 3 \cdot l \cdot x + x^2) \cdot x \right] \cdot ct, & x \geq ct. \end{cases} \quad (1.3.49)$$

1.3.49 išraišką įstačius į 1.3.48 lygtį, gauname pirmos eilės diferencialinę lygtį su antros eilės kintamais koeficientais. Atlikus algebrinius pertvarkymus ir lygtį išsprendus gaunamas bendrasis šios lygties sprendinys:

$$y(\tau) = \left[A_1 - \frac{4 \cdot \alpha'}{W(\tau)} \int y_2(\tau) d\tau \right] \cdot y_1(\tau) + \left[A_2 - \frac{4 \cdot \alpha'}{W(\tau)} \int y_1(\tau) d\tau \right] \cdot y_2(\tau). \quad (1.3.50)$$

čia $\tau = ct/l$ – naujas kintamasis;

α' – konstanta:

$$\alpha' = \frac{12 \cdot EI \cdot g}{P \cdot l \cdot c^2}. \quad (1.3.51)$$

$y_1(\tau) = \tau^k (1-\tau)^{1-k}$, $y_2(\tau) = \tau^{1-k} (1-\tau)^k$ – gautos išraiškos iš 1.3.48 homogeninės lygties.

Tyrimai dinaminių poveikių, kuriuos sukelia judančio transporto apkrovos, daugiausiai atliekami laisvai atremtai sijai. Šios konstrukcinės schemos pasirinkimą įtakoja paprastesnis modelio kūrimas ir didelis tiltų paplitimas pagal šią schemą. Kitas bendras bruožas tarp nagrinėtų modelių – priimamos prielaidos. Dauguma literatūroje nagrinėtų modelių jos priimamos tokios:

- viso tilto sistema (kelio danga, šalitiltis, sijos) nagrinėjama kaip viena sija su ekvivalentišku stiprumu ir standumu;
- tik pirmas savasis svyravimų dažnis turi būti atsižvelgtas;
- nepaisant ašių skaičiaus ir atitinkamo skaičiaus spyruoklių ir padangų, transporto priemonė laikoma idealizuota sistema su vienu laisvės laipsniu, o svoris koncentruojamas per vidurį.

Priimtos prielaidos leidžia supaprastinti uždavinio sprendimą matematinio požiūriu. Tačiau yra atvejų, kai šios prielaidos tampa ne visai teisingos. Pirmoji prielaida nevisiškai teisinga jeigu tiltas pakankamai platus, o transporto priemonės juda tilto kraštinėse juostuose. Todėl dažniausiai tiltas ne tik deformuojasi vertikaloje plokštumoje, einančioje per išilginę

ašį. Kartu vyksta sukamieji virpesiai [10]. Trečioji prielaida gali būti taip pat abejotina, kadangi transporto priemonė turi daug laisvės laipsnių, nes autotransportas turi mažiausiai dvi ašis. Šių prielaidų galiojimas priklauso nuo santykio tarp tilto tarpatramio ilgio ir atstumo tarp transporto priemonių ašių ilgio. Jeigu šis santykis daugiau kaip 5, prielaidas galima taikyti [36].

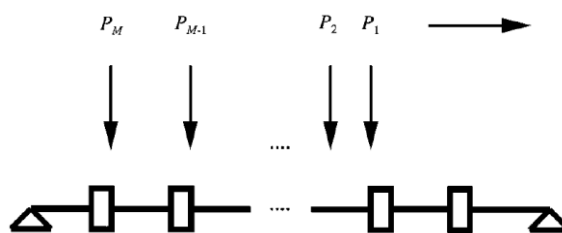
1.4. Tiltų dinamiką aprašantys metodai

Tiltus ir viadukus veikiančių dinaminį apkrovų informacija tapo svarbi ne tik projektuojant naujus tiltus bet ir eksploatuojant senus [25]. Seniau pastatyti tiltai buvo projektuojami mažesnėms apkrovoms ir greičiams. Šiomis dienomis šie tiltai yra veikiami didesnėmis apkrovomis, o to pasekoje plieniniuose tiltuose pasireiškia per didelis plieno nuovargis, o gelžbetoniniuose tiltuose atsiranda betono pleišėjimas [30].

Tiesiogiai matuoti tiltą veikiančias apkrovas sunku, nes apkrovos juda laike. Tradiciniai prietaisai, kurie skirti matuoti transporto priemonių svorius yra brangūs, nepraktiški, o jų didžiausias trūkumas – jais galima išmatuoti tik statinę apkrovą. Todėl pastaruoju metu matematinių modelių, skirtų tiltų dinaminei analizei, panaudojimas tapo svarbus nustatant tiltus veikiančias dinamines apkrovas. Literatūroje minimi keli judančios apkrovos įvertinimo metodai: „*Judančios apkrovos I interpretavimo metodas*“, „*Judančios apkrovos II interpretavimo metodas*“, „*Laiko srities įvertinimo metodas*“, „*Dažnio-laiko įvertinimo metodas*“ [24]. Šie metodai skirti veikiančių apkrovų netiesioginiam matavimui pagal gautas tilto dinamines reakcijas. Tiek dinaminės, tiek statinės apkrovos yra apskaičiuojamos panaudojant įvairius matematinius modelius [30].

Judančių apkrovų tyrimus pradėjo mokslininkai C. O' Connor ir T. H. T. Chan, kurie rėmėsi sumodeliuota konstrukcija, kurią veikė laike kintanti apkrova. Tiltų ir transporto sistema labai sudėtinga, nes jų sąveiką sąlygoja daug parametrų. Norint supaprastinti uždavinį, mokslininkai naudoja tris skirtingus modelius, tokius kaip: „sija-elementas“ (C. O' Connor ir T. H. T. Chan), „nekarpyta sija“ (Bernulio-Oilerio ar Timošenko sija) ir plokštes (izotropines arba ortotropines plokštes) [31].

„*Judančios apkrovos I interpretavimo metodą*“ pasiūlė C. O' Connor ir T. H. T. Chan. Pagal šį metodą judančios apkrovos apskaičiuojamos naudojant „sija-elementas“ modelį. Tiltas modeliuojamas kaip visuma baigtinių elementų, kurie tarpusavyje sujungti tampriais bemasiais sijiniais elementais (1.9 paveikslas).



1.9 pav. „Sija-elementas“ modelis [24]

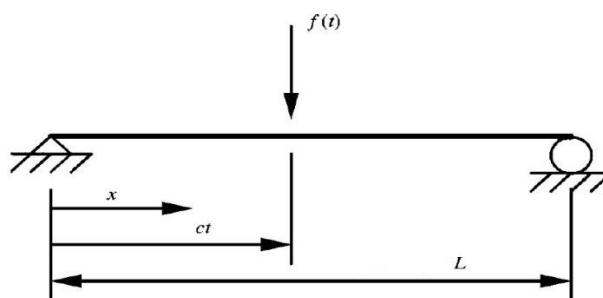
Taškų poslinkius ir lenkimo momentus galima apskaičiuoti pagal lygtis 1.4.1 ir 1.4.2 atitinkamai:

$$\{Y\} = [Y_A] \cdot \{P\} - [Y_I] \cdot [\Delta m] \cdot \{\ddot{Y}\} - [Y_I] \cdot [C] \cdot \{\dot{Y}\}; \quad (1.4.1)$$

$$\{M\} = [M_A] \cdot \{P\} - [M_I] \cdot [\Delta m] \cdot \{\ddot{Y}\} - [M_I] \cdot [C] \cdot \{\dot{Y}\}; \quad (1.4.2)$$

Čia $\{P\}$ yra ratų apkrovų vektorius; $[\Delta m]$ yra matricos įstrižainė, kurioje aprašoma baigtinių elementų masės; $[C]$ yra slopinimo matrica; $\{M\}$, Y , \dot{Y} , \ddot{Y} atitinkamai yra taškų lenkimo momentai, įlinkiai, greičiai ir pagreičiai; $[Y_A]$, $[Y_I]$ yra taškų jėgų matricos, norint gauti taškų įlinkius ir $[M_A]$, $[M_I]$ yra taškų jėgų matricos, norint gauti taškų lenkimo momentus.

Mokslininkai S. S. Law, T. H. T. Chan ir H. Q. Zeng pasiūlė „Judančios apkrovos II interpretavimo metodą“. Šiam metodui buvo naudojamas nekarpytos sijos modelis (Bernulio-Oilerio sija) [25], kuris pateikiamas 1.10 paveiksle. Šiame modelyje priimta, kad sija yra pastovios masės ir skerspjūvio per visą ilgį. Sija turi tiesišką slopinimą su mažais įlinkiais, neatsižvelgiant į šlyties deformacijas.



1.10 pav. Šarnyriškai atremta sija apkrauta judančia apkrova [24]

Metodas yra aprašomas 1.4.3 lygtimi. Tą pačią lygtį L. Fryba naudojo dinaminei analizei (1.3.34 lygtis).

$$EJ \frac{\partial v^4(x,t)}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial v^2(x,t)}{\partial t^2} + C \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = \delta(x-ct)P; \quad (1.4.3)$$

čia x – atstumas nuo jėgos P koordinatės iki sijos kairiojo krašto;

t – laikas;

$v(x,t)$ – sijos įlinkis taške x , laiku t , kada sija apkrauta savo svoriu;

E – sijos Jungo modulis;

J – sijos skerspjūvio inercijos momentas;

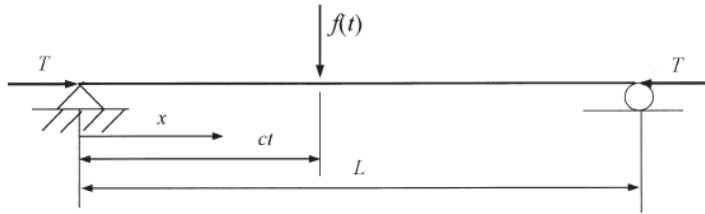
μ – sijos masė per ilgio vienetą;

C – slopinimo santykis.

Mokslininkai S. S. Law, T. H. T. Chan, T. H. Yung pateikia tokią judėjimo lygtį ir modelį (1.11 paveikslas), jei nagrinėjama įtempto gelžbetonio sija:

$$EJ \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial v^2(x,t)}{\partial t^2} + C \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} - T \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} = \delta(x-ct)P; \quad (1.4.4)$$

čia T – gniuždančioji jėga.



1.11 pav. Šarnyriškai atremta sija apkrauta judančia apkrova [33]

Ribos, kurios taikomos 1.4.3 lygčiai:

$$\begin{aligned} v(0,t) &= 0; & v(l,t) &= 0; \\ \left. \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} \right|_{x=0} &= 0; & \left. \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} \right|_{x=l} &= 0; \end{aligned} \quad (1.4.5)$$

Pradinės sąlygos:

$$v(x,0) = 0; \quad \left. \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} \right|_{t=0} = 0. \quad (1.4.6)$$

Sprendinys remiamas modaliniu superpozicijos principu, todėl dinaminis įlinkis gali būti aprašomas taip:

$$v(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_n(x) \cdot q(t); \quad (1.4.7)$$

čia n – modos eilės numeris;

$\phi_n(x)$ – n -osios modos formos funkcija;

$q(t)$ – n -osios modos amplitudė.

Aprašytam modeliui i -oji svyravimo modos forma priimta $\sin(i\pi x/l)$, todėl 1.4.3 sprendinys keičiasi taip:

$$v = \sum_{i=1}^{\infty} \sin \frac{i\pi x}{L} \cdot q_i(t); \quad (1.4.8)$$

čia $q_i(t)$ – modaliniai poslinkiai.

Formulę 1.4.8 įstačius į 1.4.3 lygtį ir kiekvienas narys dauginamas iš $j\pi x/l$. Atliekamas integravimas pagal x tarp 0 ir l . Naudojant ribas ir Dirako funkcijos ypatybes, gauname tokią lygtį:

$$\ddot{q}_j(t) + 2 \cdot \xi_j \cdot \omega_{(j)} \cdot \dot{q}_j(t) + \omega_{(j)}^2 \cdot q_j(t) = \frac{2 \cdot P}{\mu \cdot L} \sin \frac{j\pi x}{L}, \quad j = 1, 2, \dots, \infty. \quad (1.4.9)$$

$$\omega_{(j)}^2 = \frac{j^4 \cdot \pi^4 \cdot EI}{L^4 \cdot \mu}, \quad \xi_{(j)} = \frac{C}{2 \cdot \mu \cdot \omega_{(j)}}. \quad (1.4.10)$$

Jeigu yra n judančių apkrovų ant sijos 1.4.8, lygtis gali būti užrašoma taip:

$$\begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \vdots \\ \ddot{q}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2 \cdot \xi_1 \cdot \omega_1 \cdot \dot{q}_1 \\ 2 \cdot \xi_2 \cdot \omega_2 \cdot \dot{q}_2 \\ \vdots \\ 2 \cdot \xi_n \cdot \omega_n \cdot \dot{q}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_1^2 \cdot q_1 \\ \omega_2^2 \cdot q_2 \\ \vdots \\ \omega_n^2 \cdot q_n \end{bmatrix} = \frac{2}{\mu \cdot L} \begin{bmatrix} \sin \frac{\pi \cdot (c \cdot t - \hat{x}_1)}{L} & \sin \frac{\pi \cdot (c \cdot t - \hat{x}_2)}{L} & \dots & \sin \frac{\pi \cdot (c \cdot t - \hat{x}_k)}{L} \\ \sin \frac{2\pi \cdot (c \cdot t - \hat{x}_1)}{L} & \sin \frac{2\pi \cdot (c \cdot t - \hat{x}_2)}{L} & \dots & \sin \frac{2\pi \cdot (c \cdot t - \hat{x}_k)}{L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sin \frac{n \cdot \pi \cdot (c \cdot t - \hat{x}_1)}{L} & \sin \frac{n \cdot \pi \cdot (c \cdot t - \hat{x}_2)}{L} & \dots & \sin \frac{n \cdot \pi \cdot (c \cdot t - \hat{x}_k)}{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_k \end{bmatrix}; \quad (1.4.11)$$

čia \hat{x}_k – atstumas tarp k apkrovų.

Jeigu P_1, P_2, \dots, P_k yra konstantos, supaprastintas 1.4.3 lygties sprendinys:

$$v(x, t) = \frac{L^3}{48 \cdot EI} \sum_{i=1}^k P_i \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j^2 \cdot (j^2 - \alpha^2)} \cdot \sin \frac{j\pi x}{L} \left(\sin \frac{j \cdot \pi \cdot (c \cdot t - \hat{x}_i)}{L} - \frac{\alpha}{j} \sin \omega_{(j)} \cdot \left(t - \frac{\hat{x}_i}{c} \right) \right); \quad (1.4.12)$$

čia $\alpha = \pi \cdot c / l \cdot \omega$;

Jeigu mes žinome sijos įlinkius taškuose x_1, x_2, \dots, x_k , judančios apkrovos yra apskaičiuojamos:

$$\{v\} = [S_{vp}] \cdot \{P\}; \quad (1.4.13)$$

čia $\{v\} = [v_1, v_2, \dots, v_k]^T$, $\{P\} = [P_1, P_2, \dots, P_k]$

$$[S_{vp}] = \begin{bmatrix} s_{11} & \dots & \dots & \dots & s_{1k} \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ s_{m1} & & s_{mi} & & s_{mk} \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ s_{l1} & \dots & \dots & \dots & s_{lk} \end{bmatrix}; \quad (1.4.14)$$

$$s_{mi} = \frac{L^3}{48 \cdot EI} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j^2 \cdot (j^2 - \alpha^2)} \cdot \sin \frac{j\pi x}{L} \left(\sin \frac{j \cdot \pi \cdot (c \cdot t - \hat{x}_i)}{L} - \frac{\alpha}{j} \sin \omega_{(j)} \cdot \left(t - \frac{\hat{x}_i}{c} \right) \right). \quad (1.4.15)$$

Jeigu $l \geq k$, tai reiškia, kad taškų poslinkių skaičius yra didesnis arba lygus ašių apkrovų skaičiui ir ekvivalentinė statinė ašies apkrova gaunama naudojant mažiausių kvadratų metodą:

$$\{P\} = ([S_{vp}]^T [S_{vp}])^{-1} [S_{vp}]^T \{v\}. \quad (1.4.16)$$

Jeigu apkrovos nėra pastovios laike, tada naudojamas baigtinių skirtumų metodas, norint gauti modalinius greičius ir pagreičius iš modalinių poslinkių. Lygtis 1.4.11 tampa linijinė, iš kurios P_k gali būti apskaičiuojamas mažiausių kvadratų metodu.

„Laiko srities įvertinimo metodą“ pasiūlė mokslininkai S. S. Law, T. H. T. Chan, Q. H. Zeng [24, 32, 21]. Šiam metodui naudojamas modalinis superpozicijos principas t.y. priimant, kad dinaminės jėgos modeliuojamos ant laisvai atremtos Bernulio-Oilerio sijos kaip žingsnio funkcijos mažame laiko intervale. Metodas paremtas tuo pačiu modeliu (1.10 paveikslas) kaip ir judančios apkrovos II interpretavimo metodas ir aprašant sijos virpesius laikomasi tų pačių prielaidų, kaip L. Frybos modelyje. Pagal „Laiko srities įvertinimo“ metodas aprašomas ta pačia diferencialine lygtimi (1.4.3) kaip ir prieš tai nagrinėtas metodas. Tačiau dinaminis įlinkis išreiškiamas pagal modalinį superpozicijos principą:

$$v(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \Phi_n(x) \cdot q_n(t); \quad (1.4.17)$$

Formulę 1.4.17 įstačius į 1.4.16 lygtį ir kiekvienas narys dauginamas iš $\Phi_j(x)$. Atliekamas integravimas pagal x tarp 0 ir l ir gaunama tokia išraiška:

$$\frac{d^2 q_n(t)}{dt^2} + 2 \cdot \xi_n \cdot \omega_n \frac{dq_n(t)}{dt} + \omega_n^2 \cdot q_n(t) = \frac{1}{M} P_n(t); \quad (1.4.18)$$

čia ω_n – sijos modos kampinis dažnis, kurios numeris n ;

ξ_n – slopinimo santykis;

M_n – n -osios modos masė;

$p_n(t)$ – modalinė jėga.

Sijos modaliniai parametrai aprašomi 1.4.19-22 formulėmis:

$$\omega_n = \frac{n^2 \cdot \pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho}}; \quad (1.4.19)$$

$$\Phi_n(x) = \sin \frac{n\pi x}{l}; \quad (1.4.20)$$

$$M_n = \frac{\rho \cdot l}{2}; \quad (1.4.21)$$

$$p_n(t) = f(t) \sin \frac{n\pi ct}{l}. \quad (1.4.22)$$

Lygtis 1.4.18 gali būti aprašoma laiko srities kreiviniu integralu:

$$q_n(t) = \frac{1}{M_n} \int_0^t h_n \cdot (t - \tau) \cdot p(\tau) d\tau; \quad (1.4.23)$$

čia:

$$h_n(t) = \frac{1}{\omega'_n} e^{-\xi_n \omega_n t} \cdot \sin(\omega'_n \cdot t), \quad t \geq 0, \quad (1.4.24)$$

$$\omega'_n = \omega_n \sqrt{1 - \xi_n^2}. \quad (1.4.25)$$

Pakeičiant lygtis 1.4.23 ir 1.4.20 į 1.4.17, sijos dinaminis įlinkis apskaičiuojamas taške x ir laike t :

$$v(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\rho \cdot l \cdot \omega'_n} \sin \frac{n\pi x}{l} \int_0^t e^{-\xi_n \omega_n \tau} \cdot \sin \omega'_n \cdot (t - \tau) \cdot \sin \frac{n\pi c\tau}{l} f(\tau) d\tau. \quad (1.4.26)$$

Aprašysime modelio pritaikymą ir nustatysime veikiančias jėgas iš lenkimo momentų, kurie gali būti gaunami bandymų metu, naudojant įtempių matuoklius.

Sijos lenkimo momentas taške x ir laike t :

$$m(x, t) = -EI \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2}. \quad (1.4.27)$$

Įstačius 1.4.26 lygtį į 1.4.27 gauname:

$$m(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot EI \cdot \pi^2 n^2}{\rho \cdot l^3 \cdot \omega'_n} \sin \frac{n\pi x}{l} \int_0^t e^{-\xi_n \omega_n \tau} \cdot \sin \omega'_n \cdot (t - \tau) \cdot \sin \frac{n\pi c\tau}{l} f(\tau) d\tau. \quad (1.4.28)$$

Priimant, kad jėga $f(t)$ yra žingsnio funkcija mažame laiko intervale, todėl lygtį 1.4.28 galime perrašyti taip:

$$m(i) = \frac{2 \cdot EI \cdot \pi^2}{\rho \cdot l^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2}{\omega'_n} \sin \frac{n\pi x}{l} \sum_{j=0}^i e^{-\xi_n \omega_n \Delta t (i-j)} \cdot \sin \omega'_n \cdot \Delta t \cdot (i - j) \cdot \sin \frac{n\pi c \Delta t j}{l} f(j) \Delta t; \quad (1.4.29)$$

$i = 0, 1, 2, \dots, N.$

čia Δt – laiko intervalas.

Pasižymime:

$$C_{xn} = \frac{2 \cdot EI \cdot \pi^2}{\rho \cdot l^3} \frac{n^2}{\omega'_n} \cdot \sin \frac{n\pi x}{l} \Delta t; \quad (1.4.30)$$

$$E_n^k = e^{-\xi_n \omega_n \Delta t k}, \quad S_1(k) = \sin(\omega_n' \Delta t k), \quad S_2(k) = \sin(n\pi c \Delta t k / l). \quad (1.4.31)$$

Pakeičiant 1.4.29 lygtį į matricos formą:

$$\begin{Bmatrix} m(0) \\ m(1) \\ m(2) \\ \vdots \\ m(N) \end{Bmatrix} = \sum_{n=1}^{\infty} C_{.xn} \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & E_n^1 S_1(1) S_2(1) & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & E_n^{N-1} S_1(N-1) S_2(1) & E_n^{N-2} S_1(N-2) S_2(2) & \dots & E_n^{N-N} S_1(N-N_B) S_2(N_B) \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} f(0) \\ f(1) \\ f(2) \\ \vdots \\ f(N_B) \end{Bmatrix}; \quad (1.4.32)$$

čia:

$$N_B = \frac{l}{c \cdot \Delta t}; \quad (1.4.33)$$

Ir priimant sąlygas: $f(0)=0, f(N_B)=0, m(0)=0, m(1)=0$.

$$\begin{Bmatrix} m(2) \\ m(3) \\ \vdots \\ m(N) \end{Bmatrix} = \sum_{n=1}^{\infty} C_{.xn} \times \begin{bmatrix} E_n^1 S_1(1) S_2(1) & 0 & \dots & 0 \\ E_n^2 S_1(1) S_2(1) & E_n^1 S_1(1) S_2(2) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ E_n^{N-1} S_1(N-1) S_2(1) & E_n^{N-2} S_1(N-2) S_2(2) & \dots & b_{ee} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} f(1) \\ f(2) \\ \vdots \\ f(N_B-1) \end{Bmatrix}; \quad (1.4.34)$$

čia:

$$b_{ee} = E_n^{N-N_B+1} \cdot S_1(N-N_B+1) \cdot S_2 \cdot (N_B-1); \quad (1.4.35)$$

1.4.34 lygtis perrašoma:

$$\begin{matrix} B & F & = & M \\ (N-1) \times (N_B-1) & (N_B-1) \times 1 & & (N-1) \times 1 \end{matrix}; \quad (1.4.36)$$

Jeigu $N=N_B$, tai B yra žemesnė trikampė matrica. Jėgos vektorių F mes galime rasti išsprendę 1.4.36 lygtį. Jeigu $N > N_B$ ir/ar N_l lenkimo momentai ($N_l > 1$) yra išmatuoti, mažiausių kvadratų metodu galima rasti jėgų vektorius F iš:

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_{N_l} \end{bmatrix} \cdot F = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_{N_l} \end{bmatrix}; \quad (1.4.37)$$

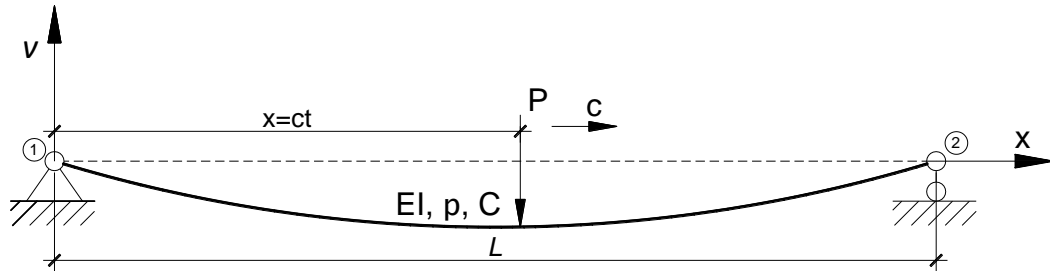
Aukščiau pateikta išraiška skirta nustatyti vieną jėgą. Naudojant tiesinį superpozicijos principą, 1.4.36 išraiška gali būti pakeista, norint nustatyti dvi veikiančias dinamines jėgas:

$$\begin{bmatrix} B_a & 0 \\ B_b & B_a \\ B_c & B_b \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} = m; \quad (1.4.38)$$

Čia $B_a [N_s \times (N_B - 1)]$, $B_b [(N - 1 - 2N_s) \times (N_B - 1)]$, $B_c [N_s \times (N_B - 1)]$, submatricos B matricos. Pirma eilutė submatricos aprašo pirmą judančią apkrovą (jėgą). Antroji ir trečioji submatricos aprašo atvejus, kai yra dvi jėgos ant sijos. $N_s = l_s / c \cdot \Delta t$, čia l_s yra atstumas tarp veikiančių jėgų. Dvi dinaminės jėgos gali būti nustatytos naudojant daugiau negu vieną

lenkimo momento matavimą. Taip pat veikiančias apkrovas galima nustatyti ir iš išmatuotų pagreičių.

Paskutinis judančių apkrovų nustatymo metodas „Dažnio-laiko įvertinimo metodas“. Šį metodą pasiūlė mokslininkai L. Yu, T. H.T. Chan, kurie rėmėsi ta pačia L. Frybos 1.4.3 diferencialine lygtimi, o jų pateikiamas modelis:



1.12 pav. Judanti jėga ant dviatramės sijos [29]

Sprendinys paremtas modų superpozicija, jeigu n -oji sijos modos formos funkcija $\Phi_n(x) = \sin(n\pi x / L)$, sprendimas 1.4.3 lygties:

$$v(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi x}{L} \cdot q_n(t), \quad (1.4.39)$$

Čia n yra modos numeris (MN), $q_n(t)$, ($n=1,2,\dots,\infty$) yra n -tieji modaliniai poslinkiai. Formulę 1.4.39 įstačius į 1.4.3 lygtį, atliekamas integravimas pagal x tarp 0 ir l . Naudojant ribas ir Dirako funkcijos ypatybes, gauname tokią modalinio poslinkio judėjimo lygtį:

$$\frac{d^2 q_n(t)}{dt^2} + 2 \cdot \xi_n \cdot \omega_n \frac{dq_n(t)}{dt} + \omega_n^2 \cdot q_n(t) = \frac{2}{\mu \cdot L} p_n(t), \quad (n=1,2,\dots,\infty); \quad (1.4.40)$$

čia

$$\omega_n = \frac{n^2 \cdot \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\mu}}, \quad \xi_n = \frac{C}{2 \cdot \rho \cdot \omega_n}, \quad p_n(t) = P(t) \cdot \sin\left(\frac{n\pi ct}{L}\right). \quad (1.4.41)$$

Čia atitinkamai yra n -tasis modalis dažnis, modalinis slopinimas ir modalinė jėga. Atlikus greitą Furjė transformaciją (FFT) lygčiai 1.4.40, gauta tokia formulė dinaminiam įlinkiui skaičiuoti:

$$V(x, \omega) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{M_n} \cdot \Phi_n(x) H_n(\omega) P_n(\omega); \quad (1.4.42)$$

čia $M_n = \rho \cdot L / 2$, $H_n(\omega)$ yra n -osios modos virpesių dažnio reakcijos funkcija:

$$H_n(\omega) = \frac{1}{\omega_n^2 - \omega^2 + i \cdot 2 \cdot \xi_n \cdot \omega_n \cdot \omega}; \quad (1.4.43)$$

$$\Phi_n(x) = \sin(n\pi x / L); \quad (1.4.44)$$

$$P_n(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} p_n(t) e^{-i\omega t} dt. \quad (1.4.45)$$

Furjė transformacija sijos pagreičio taške x gali būti užrašoma taip:

$$\ddot{V}(x, \omega) = -\omega^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{M_n} \cdot \Phi_n(x) H_n(\omega) P_n(\omega). \quad (1.4.46)$$

Ištačius 1.4.43-45 formules į 1.4.46 gauname:

$$\ddot{V}(x, \omega) = - \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\Delta f^3 m^2}{M_n} \cdot \Phi_n(x) H_n(m) \Psi_n(m-k) F(k), \quad m=0, 1, \dots, N-1; \quad (1.4.47)$$

Čia Ψ_n ir F yra Furjė transformacija n -osios modos formos ir judančios jėgos $P(t)$ atitinkamai. Δf yra dažnio sprendinys, N – informacijos kiekis. Atsižvelgus į periodiškąs savybes atskiros Furjė transformacijos, 1.4.46 lygtį galima perrašyti matricos forma:

$$\ddot{V}_{(N+2) \times 1} = A_{(N+2) \times (N+2)} F_{(N+2) \times 1}; \quad (1.4.48)$$

Čia \ddot{V} ir F yra Furjė transformacijos pagreičio vektorius ir jėgos vektorius $P(t)$ atitinkamai. Matrica A yra susijusi su tilto-transporto priemonės sąveika. Atlikus algebrinius pertvarkymus turime tokias dvi lygčių sistemas:

$$\begin{cases} \ddot{V}_{N \times 1} = \frac{1}{N} \cdot A_{N \times N} \cdot W_{N \times N_B} \cdot P_{N_B \times 1}, \\ \ddot{v}_{N \times 1} = (W^*)^T \cdot A_{N \times N} \cdot W_{N \times N_B} \cdot P_{N_B \times 1}, \\ \ddot{v}_{N_c \times 1} = (W^*)^T \cdot A_{N_c \times N} \cdot W_{N \times N_B} \cdot P_{N_B \times 1}. \end{cases} \quad (1.4.49)$$

$$\begin{cases} M_{N \times 1} = \frac{1}{N} \cdot B_{N \times N} \cdot W_{N \times N_B} \cdot P_{N_B \times 1}, \\ m_{N \times 1} = (W^*)^T \cdot B_{N \times N} \cdot W_{N \times N_B} \cdot P_{N_B \times 1}, \\ m_{N_c \times 1} = (W^*)^T \cdot B_{N_c \times N} \cdot W_{N \times N_B} \cdot P_{N_B \times 1}. \end{cases} \quad (1.4.50)$$

čia W_B ir P_B – submatricos W ir P atitinkamai.

Furjė transformacija jėgos F vektoriui gali būti užrašomas taip:

$$F = \frac{1}{N} WP; \quad (1.4.51)$$

čia $W = e^{-i2k\pi/N}$;

Pirmoji lygčių sistema skirta nustatyti judančias apkrovas iš gautų sijos pagreičio rezultatų, o kita – nustatyti judančias apkrovas iš sijos lenkimo momentų, kurie gauti nustatant siją veikiančius įtempimus. Šių lygčių 1.4.49 ir 1.4.50 sprendinys tam tikrais atvejais gaunamas išsprendus n -osios eilės lygtis, atskirais atvejais sprendimui naudojama mažiausių kvadratų metodas.

S. P. Timoshenko „Judančios masės“ uždavinį supaprastino iki „Judančios apkrovos“. Šioje srityje autoriai sėkmingai išplėtojo keturis judančių apkrovų metodus, kurie buvo paminėti anksčiau. „Judančios apkrovos I interpretavimo metode“ judančios dinaminės apkrovos buvo apskaičiuotos tiltų modeliuojant, kaip baigtinių elementų visumą, kuri apjungta bemasiais sijiniais elementais. „Judančios apkrovos II interpretavimo metode“ jėgos nustatytos naudojant modalines koordinates. „Laiko srities įvertinimo metode“ dinaminės jėgos modeliuojamos ant Bernulio-Oilerio sijos, kaip žingsnio funkcijos mažame laiko intervale. „Dažnio-laiko įvertinimo metode“ išplėta Furjė transformacija aprašant sijos virpėjimo lygtį.

1.5. Pirmo skyriaus išvados

Apibendrinant literatūros apžvalgą pastebėta, kad:

- įvairiose normose dinamiškumo koeficientai skaičiuojami pagal didžiausią tarpatramio ilgį arba pagal savųjų svyravimų dažnį. Tai pat pateiktose normose dinamiškumo koeficiento formulėse neina įvertinti svarbių parametru, kurie susiję su tilto ir autotransporto sąveika;
- tiltų dinamiką (virpesius) aprašančius modelius galima suskirstyti į tris grupes: *judančios masės*, *judančios apkrovos* ir *judančios masės tampriu ryšiu*.
- tiltų dinamiką aprašantys modeliai pritaikyti ne tik nustatyti tilto dinaminę reakciją, bet taip pat spręsti kitą uždavinį – nustatyti judančias dinamines apkrovas. Šiam tikslui išplėtoti keturi metodai: „*Judančios apkrovos I interpretavimo metodas*“, „*Judančios apkrovos II interpretavimo metodas*“, „*Laiko srities įvertinimo metodas*“, „*Dažnio-laiko įvertinimo metodas*“;
- išanalizavus matematinius modelius tiltų perdangų dinaminiam įlinkiui skaičiuoti pastebėta, kad autorių pateikiami modeliai sunkiai pritaikomi praktikoje dėl sudėtingų matematinių išraiškų. Taip pat modeliuose neina įvertinti pradinių sąlygų ir kliūtis norint įvertinti nelygų tilto paviršių (duobę).

2. TYRIMO OBJEKTO PARINKIMAS

Lietuvoje yra išlikę daug senų tiltų, kurie svarbūs šalyje didėjančiams transporto srautams. Vienas iš jų yra tiltas per upę Šušvę, esantis 3501 kelio Betygala–Ilgiziai–Kračės 18,45 kilometre. Tiltas suprojektuotas pagal rusiškas projektavimo normas – CH 200-62 (1962 m.) ir CH 365-67 (1967 m.) (projektinės apkrovos: H-30 ir HK-80) ir pastatytas 1984 metais.

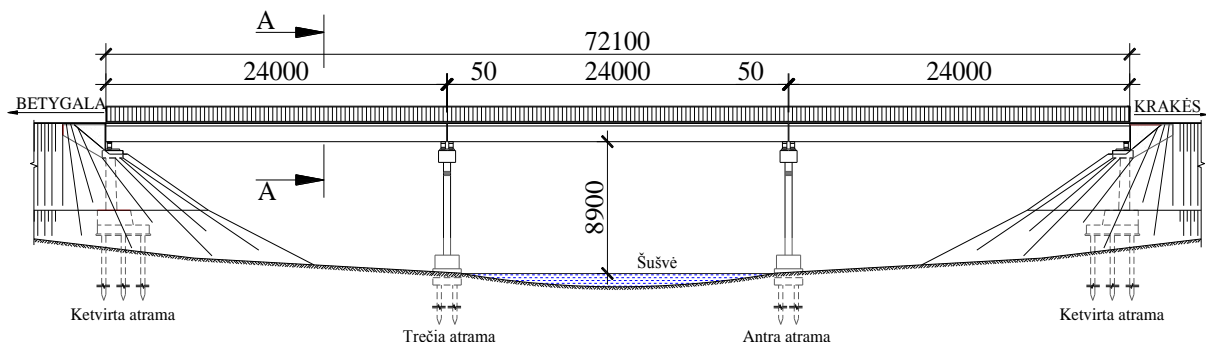
Šiomis dienomis tapo svarbu žinoti tiltų reakciją į padidėjusias apkrovas. Tyrimų rezultatai tampa svarbūs ne tik projektuojant naujus tiltus, bet ir suteikiant reikiamą priežiūrą esamiems tiltams. Tiltas per Šušvę pagal konstrukciją panašus į daugelį ne tik Lietuvoje, bet ir pasaulyje pastatytus tiltus. Todėl šiam tiltui atliekant dinaminę analizę problemos sprendimas tampa ypač aktualus ir kitiems tiltams.

2.1. Tiltų konstrukcijų bendri duomenys

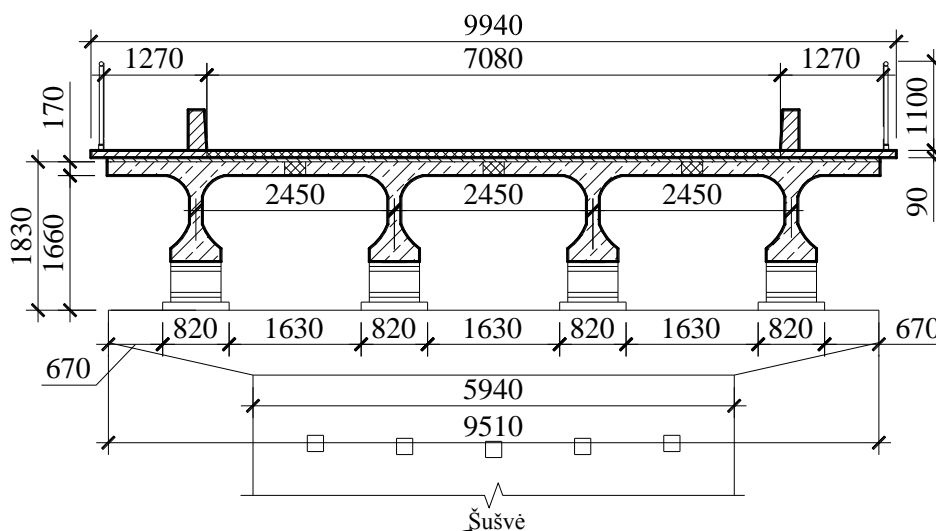
Tiltas per upę Šušvę – trijų tarpatramių, geležbetoninis, sijinis, karpytos sistemos su nepertraukiama važiuojamąja kelio dalimi. Šio tilto perdangą sudaro keturios įtemptojo geležbetonio sijos, kurių ilgis 24 metrai (skaičiuojamasis ilgis 23,4 m). Tiltas pagal dydį priskiriamas vidutinio dydžio, o pagal statinę schemą – sijinis. Tiltų sijų skaičiuojamoji schema – dvitramė sija. Ši schema atitinka daugelį nagrinėtų matematinių modelių, kuriais atliekama dinaminio įlinkio analizė.

Skersiniame tilto perdangos pjūvyje – keturios įtemptojo geležbetonio dvitėjinio skerspjūvio sijos. Sijos suprojektuotos kintamo skerspjūvio: aukštis per visą ilgį – 1,23 m, apatinės lentynos plotis – 0,62 m, sienutės storis sijos viduriniame pjūvyje – 0,16 m, o ties atramomis sijų sienučių storis – 0,26 m. Sijos ant taurų ir ramtų galvenų atremtos per paslankius ir nepaslankius atraminius guolius.

Tiltų fasado vaizdas pateiktas 2.1 paveiksle, o skersinis pjūvis 2.2 paveiksle:



2.1 pav. Tiltų fasado vaizdas



2.2 pav. Tiltu skersinis pjūvis „A-A“

2.2. Tiltu bendri vaizdai

Tiltu bedri vaizdai pateikiami 2.3-2.6 paveiksluose:



2.3 pav. Tiltu bendras vaizdas nuo aukščiau pusės



2.4 pav. Tiltu bendras vaizdas nuo žemupio pusės



2.5 pav. Antrojo tarpatramio perdangos bendras vaizdas



2.6 pav. Paslankių/nepaslankių atraminių guolių bendras vaizdas

3. TILTO PER UPE ŠUŠVĘ EKSPERIMENTINIAI BANDYMAI

VšĮ Kelių ir transporto tyrimo institutas 2013 metų spalio 9 d. atliko eksperimentinius bandymus tiltui per upę Šušvę. Darbo ataskaitoje pateikti pirmojo ir trečiojo tarpatramių perdangų statinio ir dinaminio bandymų duomenys. Išbandant tiltą, vadovautasi tiltų bandymų taisyklėmis ST 188710638.10:2005 „Automobilių kelių tiltų bandymas“ [36].

3.1. Statinis bandymas

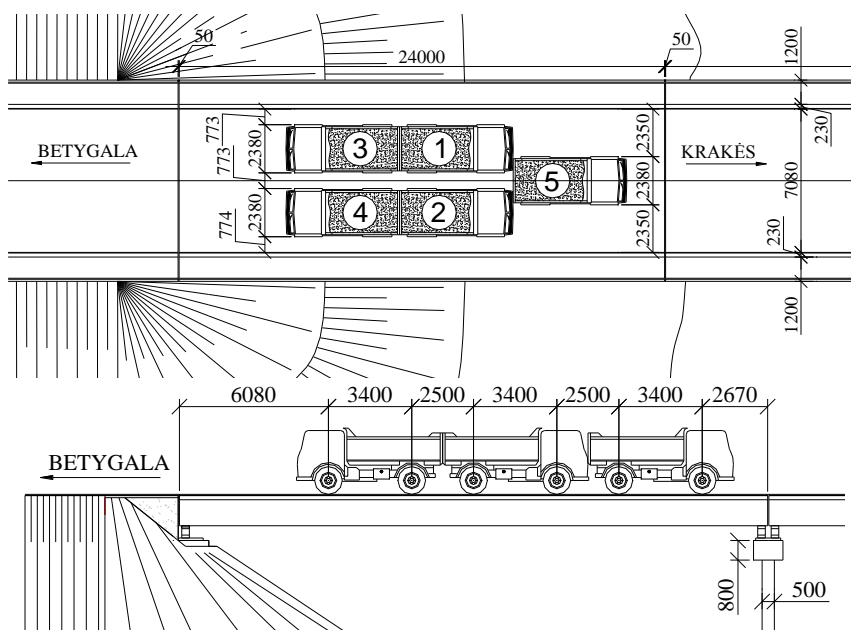
Statinio bandymo tikslas – nustatyti įlinkių (deformacijų) pasiskirstymą tarp tilto sijų. Statiniam apkrovimui buvo naudojami penki pilnai pakrauti „MAZ“ markės automobiliai. Bendra visos apkrovos masė 89,65 t. Prieš bandymą automobiliai buvo sveriami (nustatyti svoriai, tenkantys priekinei ir galinei automobilių ašims). Svėrimo rezultatus žr. 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Bandymui naudotų automobilių suvestinė

Eil. Nr.	Priekinės ašies masė, t	Galinės ašies masė, t	Bendra masė, t
1	7,50	12,35	19,85
2	7,10	11,05	18,15
3	7,10	10,50	17,60
4	6,70	10,40	17,10
5	5,50	11,45	16,95
Vidutinė masė	6,78	10,75	17,93

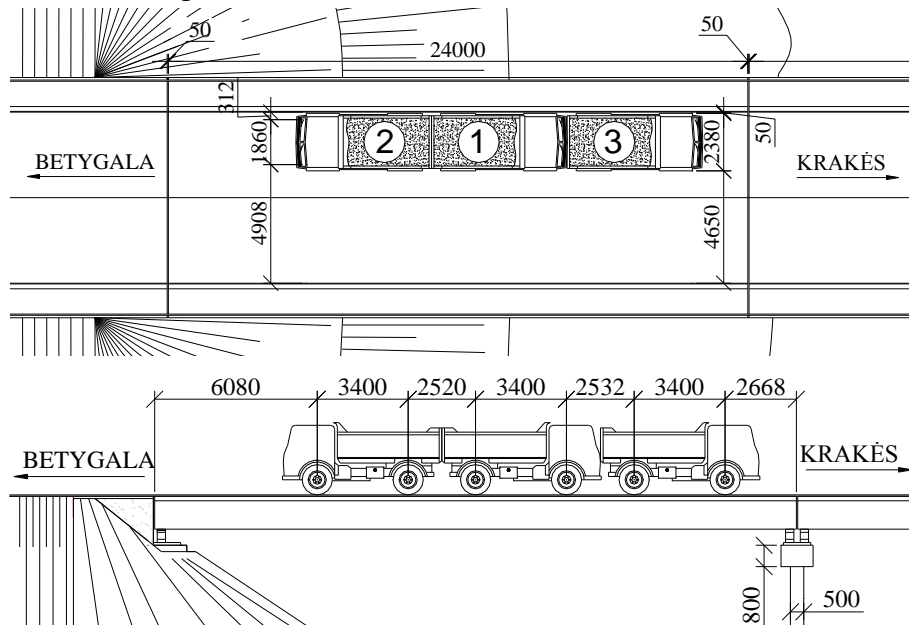
Statinio bandymo metu buvo išbandytos pirmojo ir trečiojo tarpatramių perdangos simetrine (1 apkrovimo variantas) ir asimetrine (2 apkrovimo variantas) apkrovomis. Tiltu perdangos buvo apkraunamos palaipsniui. Kiekviena apkrova buvo išlaikoma ant tilto perdangų tol, kol įlinkių prieaugis per 5 min. tampa ne didesnis kaip 5%.

- Simetrinis apkrovimas:



3.1 pav. Simetrinio apkrovimo vaizdas iš viršaus ir iš šono

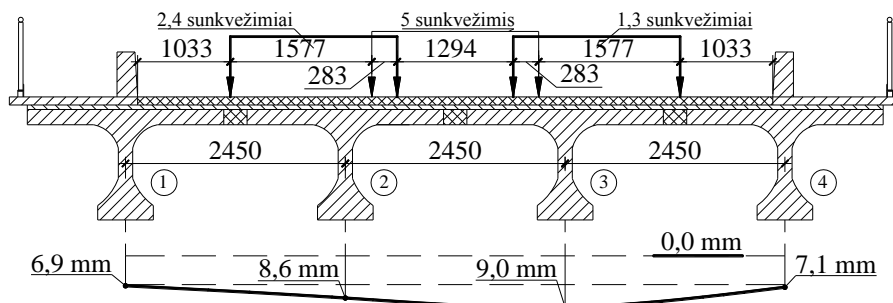
- Asimetrinis apkrovimas:



3.2 pav. Asimetrinio apkrovimo vaizdas iš viršaus ir iš šono

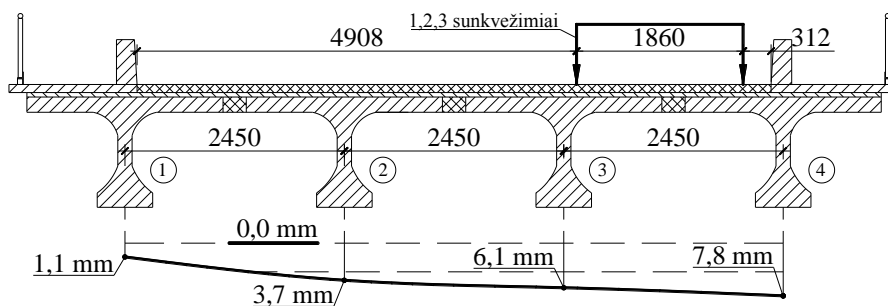
Statinio bandymo metu įlinkiams ir deformacijoms matuoti buvo naudojami mechaniniai įlinkiomačiai ir indikatoriai. Gauti rezultatai:

- Įlinkiai, pirmojo tarpatramio perdangos viduriniame pjūvyje, simetrinio apkrovimo atveju:



3.3 pav. Pirmojo tarpatramio sijų įlinkių pasiskirstymas simetrinio apkrovimo atveju

- Įlinkiai, trečiojo tarpatramio perdangos viduriniame pjūvyje, asimetrinio apkrovimo atveju:



3.4 pav. Trečiojo tarpatramio sijų įlinkių pasiskirstymas asimetrinio apkrovimo atveju

Eksperimentiniu būdu gautus įlinkius palyginsime su teoriškai apskaičiuotais 6 skyriuje.

3.2. Dinaminis bandymas

Bandymo tikslas – nustatyti tilto perdangų svarbiausius dinامينius rodiklius, t. y. laisvųjų slopinamųjų virpesių dažnį, periodą, formą, dinamiškumo koeficientą, pagreičius. Tiltų perdangos virpesiams sukelti buvo naudojami dviašis 19,85 t masės automobilis (MAZ). Tiltų perdanga buvo bandoma:

- skirtingiems greičiams;
- skirtingiems greičiams įvertinus duobę kelio dangoje.

Dinaminų bandymų variantai pateikiami 3.2 lentelėje:

3.2 lentelė. Pirmojo tarpatramio perdangos dinaminio bandymo variantai

Varianto numeris	Kliūties vieta	Kliūties storis, mm	Automobilio greitis, km/h
1	-	-	10
2	-	-	20
3	-	-	40
4,5	-	-	50
6	Pirmojo tarpatramio perdangos vidurys	20	5
7		20	10
8		20	20

Matavimo prietaisai ir jų išdėstymas:

Tiltų pirmojo tarpatramio perdangos sijų vertikaliuose plokštumose taškų virpesiai, nuo dinaminės apkrovos, buvo užfiksuoti dinaminų bandymų laboratorijos jutikliais.

Tiltų perdangoje sukeltus virpesius programinė įranga registravo 250 Hz dažniu. Signalų trikdžiai filtruoti „Chebechev“, „Betterwoth“ ir „Bessell“ būdais. Bandymo duomenų blokuose, virpesių dažnio turinio analizei, naudotos greitosios Furje transformacijos ir laipsniškas spektrinio tankio tyrimas.

Bandymo metu skaičiuojamas vertikalių ir horizontalių virpesių nuslopavimo logaritminis dekrementas:

$$v = \delta \cdot T = \frac{1}{i} \ln \frac{a_0}{a_i}; \quad (3.2.1)$$

čia a_0 ir a_i – atitinkamai pirmoji ir paskutinioji virpesių amplitudė vibrogramos intervale iT ; i – vibrogramos amplitudžių (bangų) skaičius tame intervale; δ – virpesių slopinimo koeficientas [5].

Virpesių pagreitis:

$$a = 4 \cdot \pi^2 \cdot A_{\max} \cdot n_0; \quad (3.2.2)$$

čia A_{\max} – didžiausia virpesių amplitudė.

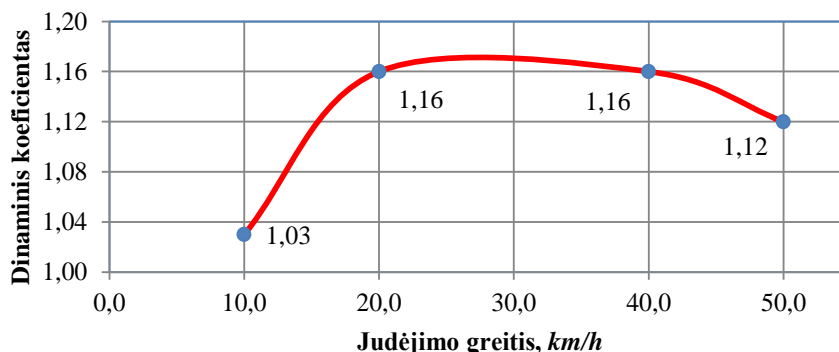
Dinaminių bandymų rezultatai ir analizė:

Visi tilto pirmojo tarpatramio perdangos dinaminiai rodikliai, užfiksuoti eksperimento metu, pateikti 3.3 lentelėje. Dinaminių bandymų metu išmatuotas sijos statinis įlinkis 1,96mm.

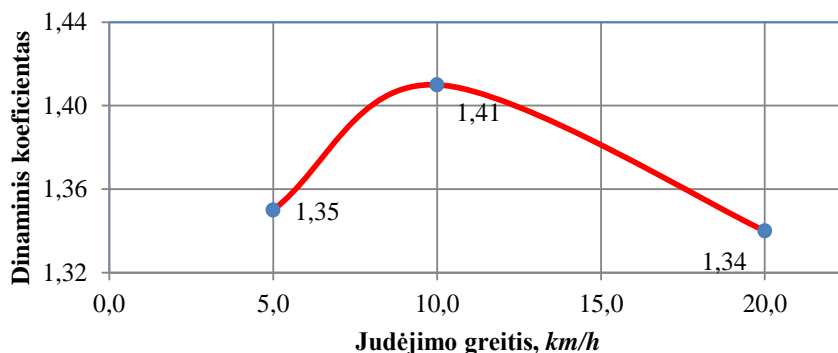
3.3 lentelė. Tiltu pirmojo tarpatramio perdangos dinaminiai rodikliai

Eil. Nr.	Kliūtis vieta / greitis km/h	Dažnis, Hz	Periodas, s	Logaritminis gesimo dekrementas	Pagreitis, g	Dinaminis įlinkis, mm	Dinamiškumo koeficientas $1 + \mu$
1	10	4,39	0,228	-	0,00916	2,02	1,03
2	20	4,47	0,224	-	0,01312	2,28	1,16
3	40	4,34	0,230	-	0,03052	2,28	1,16
4	50	4,36	0,229	-	0,00549	2,20	1,12
5	50	4,48	0,223	-	0,00824	2,20	1,12
6	I tarpatramio vidurys, 5 km/h	4,19	0,239	0,2303	0,02319	2,65	1,35
7	I tarpatramio vidurys, 10 km/h	4,23	0,236	0,2162	0,06836	2,77	1,41
8	I tarpatramio vidurys, 20 km/h	4,49	0,223	0,3426	0,13519	2,63	1,34
Vidurkis		4,37	0,229				

Tiltu pirmojo tarpatramio perdangos dinamiškumo koeficiento kitimo kreivė, judant sunkiasvorėms transporto priemonėms skirtingais greičiais lygia važiuojamąja kelio danga, pateikta 3.6 paveiksle, o imituojant kelio dangos nelygumus – 3.7 paveiksle.



3.5 pav. Dinamiškumo koeficiento kitimo kreivė sunkiasvorėi transporto priemonei judant lygia kelio danga



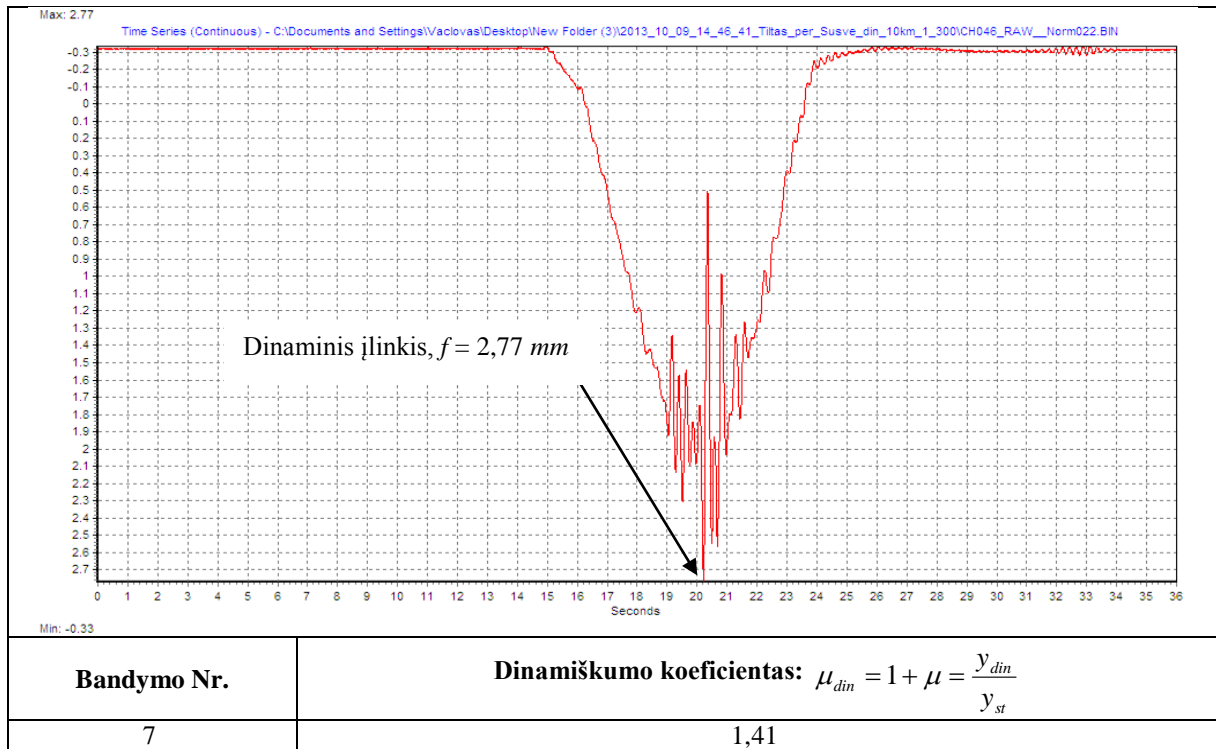
3.6 pav. Dinamiškumo koeficiento kitimo kreivė sunkiasvorėi transporto priemonei judant nelygia kelio danga

Pagal 3.6 ir 3.7 paveiksluose pateiktus grafikus galima pastebėti, kad neimituojant kelio dangos nelygumų ir judant skirtingais greičiais, dinamiškumo koeficientas kinta nuo 1,03 iki

1,16, tačiau imituojant kelio dangos nelygumus, dinamiškumo koeficientas apie 1,21 karto padidėja.

Perdangos virpesių grafikai:

Pateikiamos didžiausio dinaminio įlinkio vibrogramos. Pateiktų grafikų apačioje nurodytas bandymo numeris ir būdingi dinaminiai rodikliai.

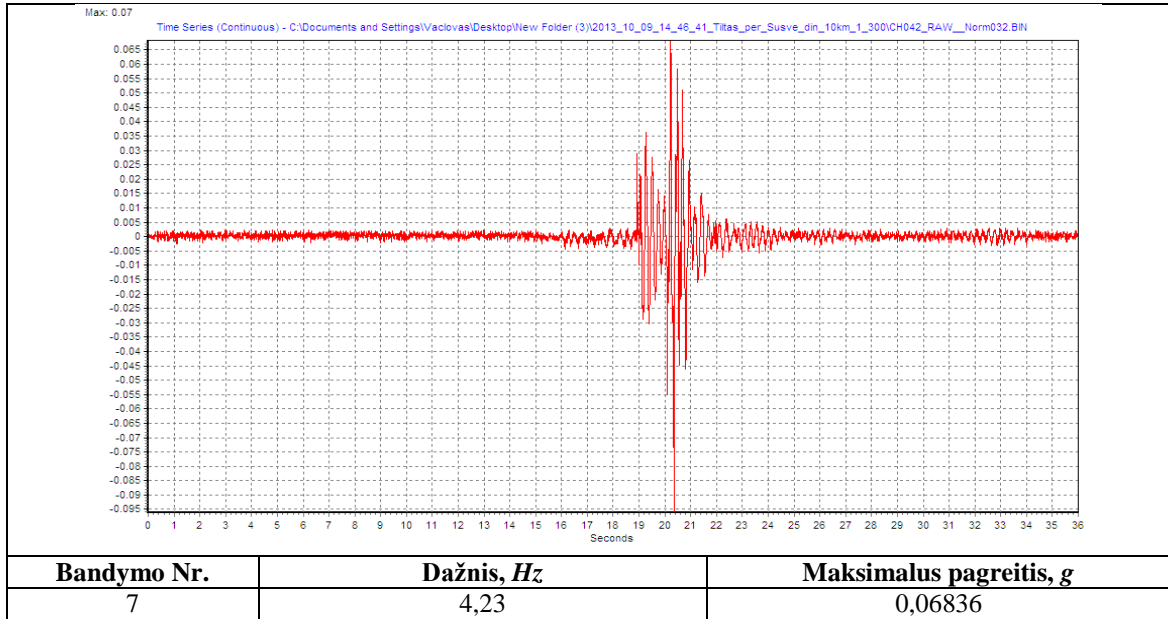


3.7 pav. Poslinkių jutikliu, pirmojo tarpatriamio perdangos viduriniame pjūvyje, užregistruotas dinaminio įlinkio grafikas

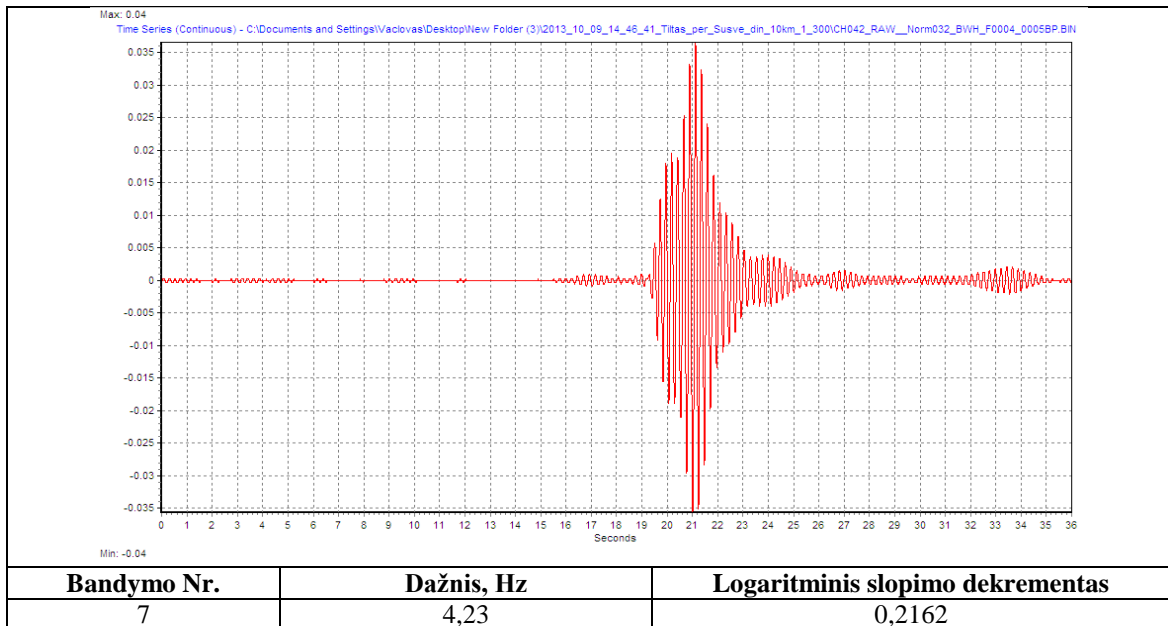


3.8 pav. Pagreičių jutikliu, pirmojo tarpatriamio perdangos viduriniame pjūvyje, užregistruotas perdangos virpesių grafikas

Pagal Eurokodą LST EN 1990:2004 [3] savųjų virpesių pirmos modos dažnis neįeina į 0,5-1,25 Hz intervalą, kuriame egzistuoja tikimybė įvykti rezonansui. Be to svyravimo dažnis viršija 3,0 Hz ribą, todėl šiam tiltui nereikia patikrinti pėsčiųjų komforto kriterijaus.



3.9 pav. Pagreičių jutikliu, pirmojo tarpatramio perdangos viduriniame pjūvyje, užregistruotų pagreičių grafikas



3.10 pav. Pagreičių jutikliu, pirmojo tarpatramio perdangos viduriniame pjūvyje, užregistruotų laisvųjų slopinamųjų virpesių nufiltruotas grafikas

Eksperimentiniu būdu gautus įlinkius palyginsime su teoriškai apskaičiuotais 7 skyriuje.

3.3. Trečio skyriaus išvados

Atlikus eksperimentinius tyrimus tiltui per upę Šušvę pastebėta, kad:

- statinio bandymo metu visos sijos įsijungė į apkrovos atlaikymo procesą, tačiau nevienodu laipsniu. Didžiausias įlinkis simetrinio apkrovimo atveju 9,0 mm, asimetrinio – 7,8 mm;
- dinamiškumo koeficientas tiesiogiai nepriklauso nuo greičio.

4. APKROVŲ SKAIČIAVIMAS

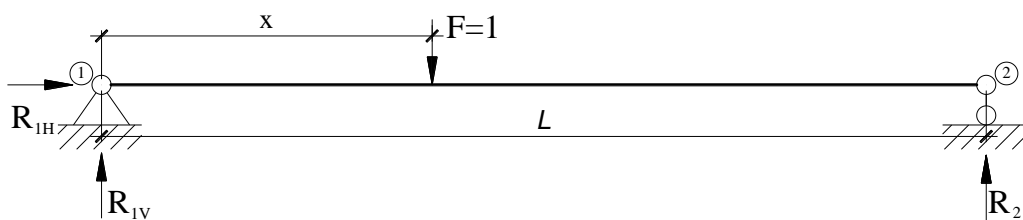
Tiltų sijines perdangas veikia nuolatinės ir kintamosios apkrovos. Projektuojant mažus ir vidutinius tiltus, galima tarti, kad nuolatinė apkrova pasiskirsto tolygiai ir veikia visas sijas vienodai. Pavyzdžiui, kaip tilto per upę Šušvę atveju, perdanga surenkama ir jos sandūros monolitinamos visame ilgyje, laikoma, kad nuolatinė apkrova visoms pagrindinėms sijoms tenka po lygiai.

Kintamos eismo apkrovos dažniausiai pateikiamos įvairių apkrovų modelių forma. Jos turi būti parinktos pagal projektavimo normų reikalavimus ir išdėstytos ant perdangos taip, kad sukeltų skaičiuojamojoje sijoje didžiausias įrašas. Apkrovų modeliai nėra realios transporto apkrovos. Tai dirbtinės apkrovos, kurios modeliuoja realų transporto poveikį su tam tikra tikimybe. Eurokode pateikiamos apkrovų modelių reprezentacinės reikšmės įvertina dinaminį šių apkrovų pobūdį, todėl dauginti iš dinamiškumo koeficiento nebereikia [14].

Kintamos apkrovos bus skaičiuojamos pagal dvi normas: rusiškas (CH-200-62, CH-365-67) [6, 7] ir europines (LST EN 1991-1-2:2003. Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 2 dalis. Tiltų eismo apkrovos) [4]. Dauguma Lietuvoje esančių tiltų yra suprojektuoti pagal rusiškas projektavimo normas, o nauji pagal europines, todėl svarbu palyginti kiek apkrovos skiriasi tarp nagrinėjamų normų.

4.1. Infiluencių sudarymas apkrovų skaičiavimui

Tilto perdangos sijų įrašoms skaičiuoti sudarysime influentes. Influentė reikalinga sudaryti įrašų (reakcijų) grafikus, kurios priklauso nuo vienetinės jėgos padėties. Nagrinėjama tilto perdangos sijos skaičiuojamoji schema-dviatramė sija. Pagal nubraižytą schemą 4.1 pav. apsiskaičiuojame atramines reakcijas.

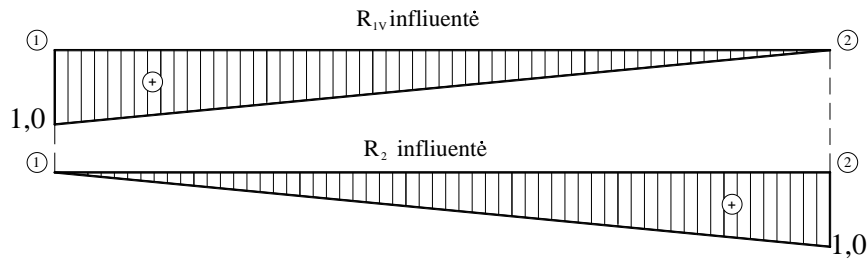


4.1 pav. Tiltų sijos skaičiuojamoji schema

Horizontali reakcija R_{1H} lygi 0, o rašydami visos sijos momentų pusiausvyros lygtį apie taškus 1 ir 2, galime nustatyti vertikalias reakcijas:

$$R_{1v} = \frac{l-x}{l}, \quad R_2 = \frac{l}{x}. \quad (4.1.1)$$

Gautos abi influentės yra tiesinės. Jos pavaizduotos 4.2 paveiksle.



4.2 pav. Tiltlo sijos R_{1V} ir R_2 influentės

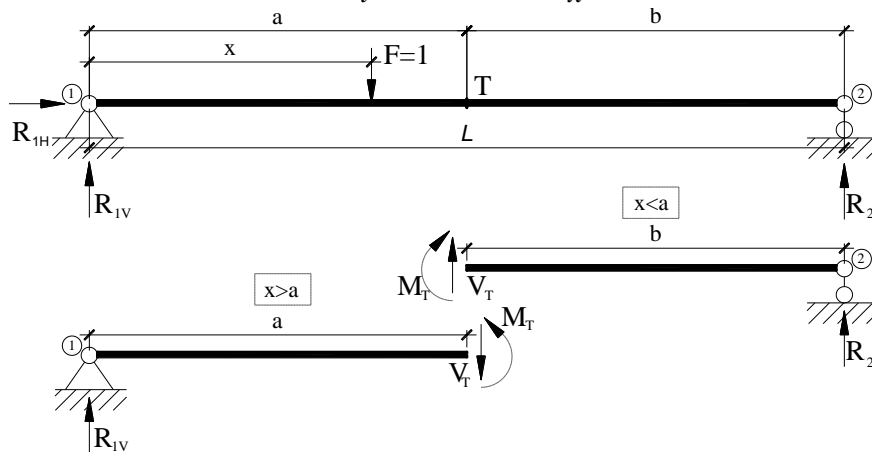
4.3 paveiksle pavaizduota dviatramė sija ir parinktas fiksuotas pjūvis T , nuo atramų nutolęs atstumais a ir b , kai $a+b=l$. Turime išnagrinėti du atvejus kai $x < a$ ir kai $x > a$. Abiems atvejams rašome pusiausvyros lygtis ir apskaičiuojame pjūvyje veikiančias įrašas:

- kai $x < a$:

$$V_T = -R_2 = -\frac{x}{l}, \quad M_T = \frac{x}{l} \cdot l, \quad (4.1.2)$$

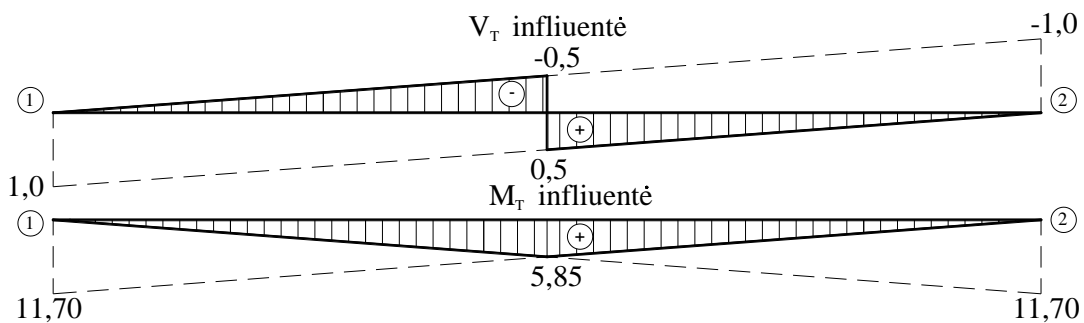
- kai $x > a$:

$$V_T = \frac{l-x}{l}, \quad M_T = a \cdot \frac{l-x}{x}, \quad (4.1.3)$$



4.3 pav. Tiltlo sijos skaičiuojamoji schema su fiksuotu pjūviu „T“

Pagal gautas pjūvio T įrašas sudaromos V_T ir M_T influentės. Braižant influentes l priimame tiltlo sijos skaičiuojamąjį ilgį $23,4 \text{ m}$:

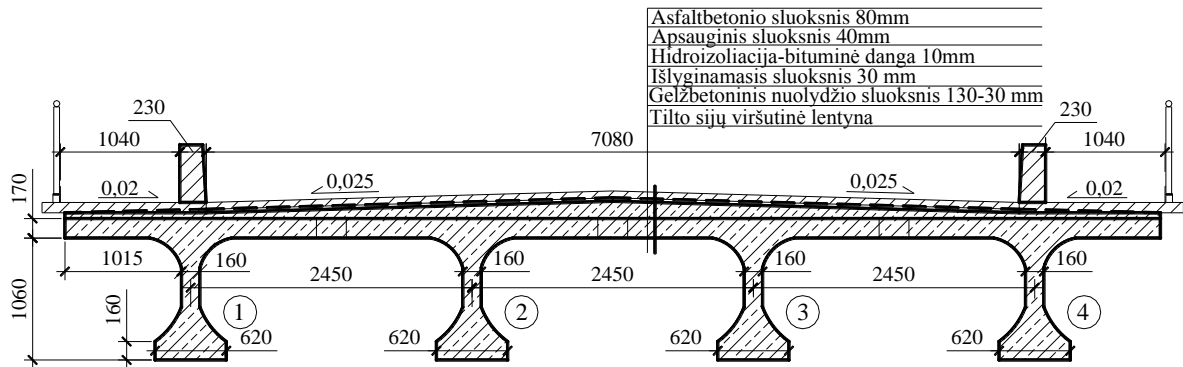


4.4 pav. Tiltlo sijos V_T ir M_T influentės

Influencijų taikymas projektuojant tiltų perdangas susijęs su pavojingiausios apkrovos padėties nustatymu ant konstrukcijos.

4.2. Nuolatinės apkrovos

Sekančiame 5 skyriuje bus atliekamas nagrinėjamo tilto sijos projektavimas, todėl reikalingas nuolatinių apkrovų skaičiavimas. Nuolatinės apkrovos: konstrukcijų savasis svoris, pakloto svoris su važiuojamosios dalies elementais ir šalitilčiais.



4.5 pav. Tiltu pakloto konstrukcija

Savojo svorio apkrovos surašomos 4.1 lentelę.

4.1 lentelė. Tiltu konstrukcijų savojo svorio apkrovos

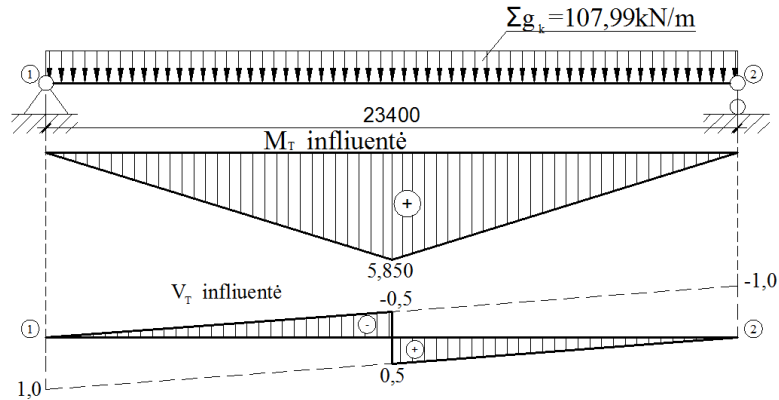
Nr.	Apkrovos pavadinimas	Charakteristinė apkrova, kN/m^2
1.	Asfaltbetonio danga, $t=0,08\ m, \gamma=25,0\ kN/m^3$	2,0
2.	Apsauginis sluoksnis, $t = 0,04\ m, \gamma=15,0\ kN/m^3$	0,60
3.	Izoliacija – bituminė danga, $t = 0,01\ m, \gamma=1,42\ kN/m^3$	0,014
4.	Išlyginamasis sluoksnis, $t = 0,03\ m, \gamma=15,0\ kN/m^3$	0,450
5.	Gelžbetoninė plokštė nuolydžiui formuoti, $t=0,08\ m, \gamma=25,0\ kN/m^3$	2,0
Visa denginio konstrukcijų apkrova $\sum g_k$:		5,064
Nr.	Apkrovos pavadinimas	Charakteristinė apkrova, kN/m
6.	Bordiūrai, $\gamma=24,0\ kN/m^3$	2,590
7.	Plieniniai turėklai	0,575
8.	Gelžbetonio sijos, $\gamma=25,0\ kN/m^3$	71,50
9.	Monolitiniai intarpai, $\gamma=25,0\ kN/m^3$	3,30
Visa denginio konstrukcijų apkrova $\sum g_k$:		77,97

Charakteristinės apkrovos skaičiuojamos į tiesinį metrą ir suvedamos į 4.2 lentelę:

4.2 lentelė. Konstrukcijų savojo svorio apkrova į tiesinį metrą

Nr.	Apkrovos pavadinimas	Charakteristinė apkrova, kN/m
1.	Asfaltbetonio danga, $t=0,08\ m, \gamma=25,0\ kN/m^3$	14,160
2.	Apsauginis sluoksnis, $t = 0,04\ m, \gamma=15,0\ kN/m^3$	5,720
3.	Izoliacija – bituminė danga, $t = 0,01\ m, \gamma=1,42\ kN/m^3$	0,130
4.	Išlyginamasis sluoksnis, $t = 0,03\ m, \gamma=15,0\ kN/m^3$	4,290
5.	Gelžbetoninė plokštė nuolydžiui formuoti, $t=0,08\ m, \gamma=25,0\ kN/m^3$	5,720
6.	Bordiūrai, $\gamma=24,0\ kN/m^3$	2,590
7.	Plieniniai turėklai	0,575
8.	Gelžbetonio sijos, $\gamma=25,0\ kN/m^3$	71,50
9.	Monolitiniai intarpai, $\gamma=25,0\ kN/m^3$	3,30
Visa denginio konstrukcijų apkrova $\sum g_k$:		107,99

Tiltu sijos projektavimui reikalingas maksimalus momentas sijos tarpatramio viduryje ir skersinės jėgos sijos kraštuose. Įrašas apskaičiuojame pagal sudarytas influentes:



4.6 pav. Nuolatinės apkrovos skaičiavimas

M_T influentės plotas:

$$S_{M_T} = 0,5 \cdot l_{sk} \cdot h = 0,5 \cdot 23,4 \cdot 5,85 = 68,45 \text{ pl.v}; \quad (4.2.1)$$

čia l_{sk} – sijos skaičiuojamasis ilgis; h – influentės aukštis.

R_{1V} ir R_2 influentės plotas:

$$S_{R_{1V}} = 0,5 \cdot l_{sk} \cdot h = 0,5 \cdot 23,4 \cdot 1,0 = 11,70 \text{ pl.v}; \quad (4.2.1)$$

Charakteristinis lenkimo momentas vienai sijai nuo nuolatinės apkrovos:

$$M_k^N = S_{M_T} \cdot q_k / 4 = 68,45 \cdot 107,99 / 4 = 1847,98 \text{ kNm}. \quad (4.2.2)$$

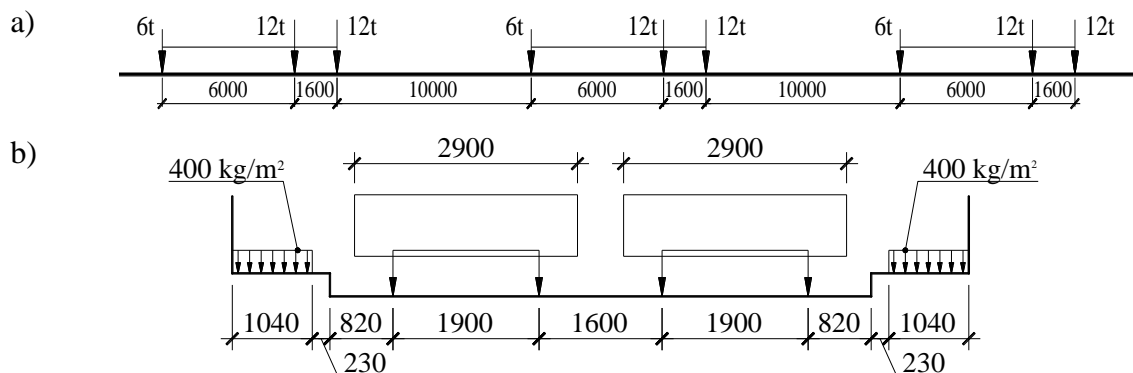
Charakteristinė skersinė jėga vienai sijai nuo nuolatinės apkrovos:

$$V_k^N = S_{R_{1V}} \cdot q_k / 4 = 11,70 \cdot 107,99 / 4 = 315,87 \text{ kNm}. \quad (4.2.3)$$

4.3. Kintamos apkrovos pagal rusiškas ir europines normas

Pagal rusiškas normas:

Tiltas per Šušvę suprojektuotas pagal rusiškas tiltų projektavimo normas, apkrovoms H-30 ir HK-80 (CH-200-62, CH-365-67) [6, 7]. Projektinę H-30 apkrovą sudaro dviejuose eismo juostuose išdėstytos dvi automobilių voros ir žmonių minios apkrova ant šalitilčių. Automobilinės ratinės H-30 apkrovos schema pateikta 4.7 paveiksle.

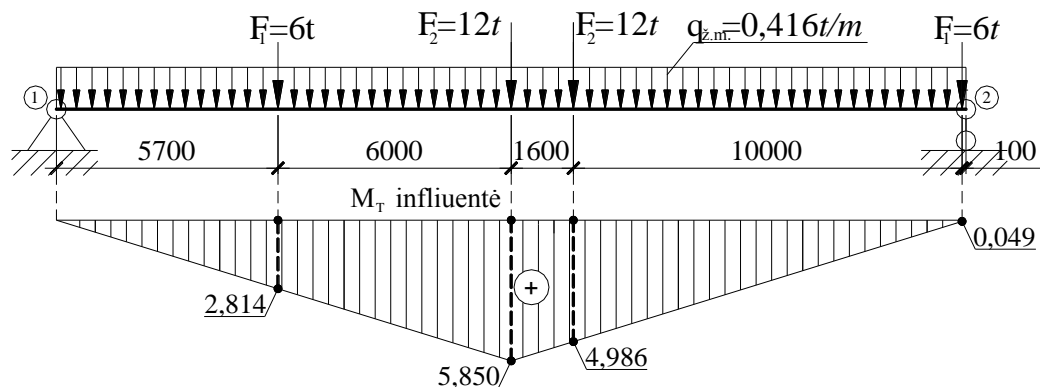


4.7 pav. Automobilinės ratinės H-30 apkrovos schema:

- a) ratinės apkrovos išdėstymas išilgai tarpatramio
- b) ratinės apkrovos išdėstymas skersai tarpatramio

Žmonių minios apkrova ant viaduko šaltiličių – $\lambda=0,4 \text{ t/m}^2$. Apkrovos dalinis koeficientas $\gamma_f=1,4$, automobilių voros koeficientas – $\gamma_v=0,9$ (dvi automobilių voros). Dinamiškumo koeficientas pirmojo ir trečiojo tarpatriamių perdangoms – $\mu_{din}=1+\mu=1,16$.

Toliau apskaičiuosime perdangos sijų įrašas. Įrašų skaičiavimui taikysime 4.1 skyriuje apskaičiuotas influentes. Pagal jas nusistatysime pavojingiausias apkrovų vietas, kuriose gausime didžiausias įrašas. Apskaičiuojame lenkimo momento reikšmę nuo H–30 apkrovos:



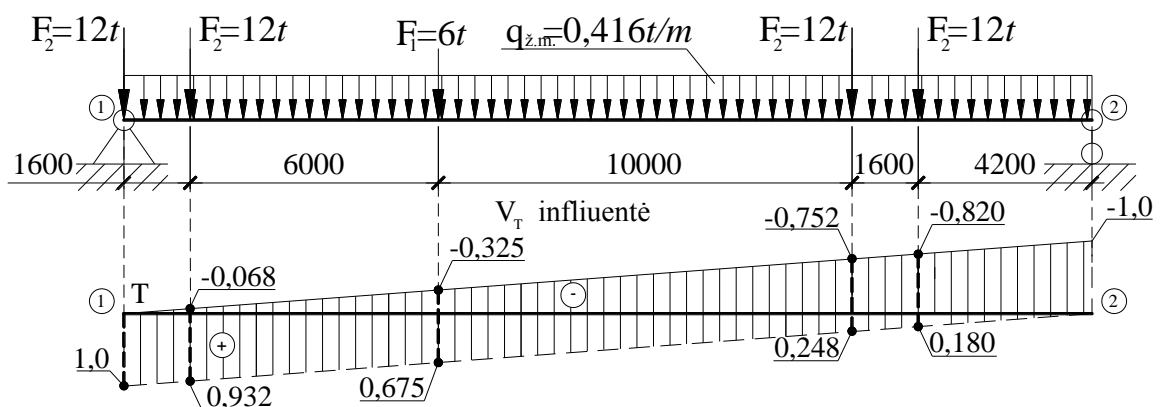
4.8 pav. M_T influentė H-30 apkrovai

Maksimalus charakteristinis lenkimo momentas nuo automobilių vorų ir žmonių minios skaičiuojamas, dauginant apkrovas iš influentės ordinačių ir ploto:

$$M_{k,Q} = 2 \cdot \gamma_v \cdot \mu_{din} \sum M_{Qi} + 2 \cdot \mu_{din} \cdot M_{qi} = 2 \cdot \gamma_v \cdot \mu_{din} (\sum F_i \cdot \gamma_i) + 2 \cdot \mu_{din} (\sum q_{z.m.} \cdot S_{M_T}) =$$

$$= 2 \cdot 0,9 \cdot 1,16 \cdot (6 \cdot 2,814 + 12 \cdot 5,850 + 12 \cdot 4,986 + 6 \cdot 0,049) + 2 \cdot 1,16 \cdot (0,416 \cdot 68,45) = 2 \cdot 0,9 \cdot 1,16 \cdot 147,210 + 2 \cdot 1,16 \cdot 28,475 = 373,436 \text{ tm} = 3734,36 \text{ kNm}. \quad (4.3.1)$$

Apskaičiuojame maksimalią charakteristinę skersinę jėgą nuo H–30 apkrovos:



4.9 pav. V_T influentė H-30 apkrovai

Influentės plotas skersinei jėgai skaičiuoti:

$$S_{V_T} = 0,5 \cdot l_{sk} \cdot h = 0,5 \cdot 23,4 \cdot 1,0 = 11,70 \text{ pl.v.} \quad (4.3.2)$$

Charakterinės skersinės jėgos nuo automobilių vorų ir žmonių minios gaunamos, dauginant apkrovas iš influentės ordinačių ir ploto:

$$V_{k,Q}^d = 2 \cdot \gamma_v \cdot \mu_{din} \sum V_{Qi} + 2 \cdot \mu_{din} \cdot V_{qi} = 2 \cdot \gamma_v \cdot \mu_{din} (\sum F_i \cdot \gamma_i) + 2 \cdot \mu_{din} (\sum q_{z.m.} \cdot S_{V_T}) =$$

$$= 2 \cdot 0,9 \cdot 1,16 \cdot (12 \cdot (-0,820) + 12 \cdot (-0,752) + 6 \cdot (-0,325) + 12 \cdot (-0,068)) + 2 \cdot 1,16 \cdot$$

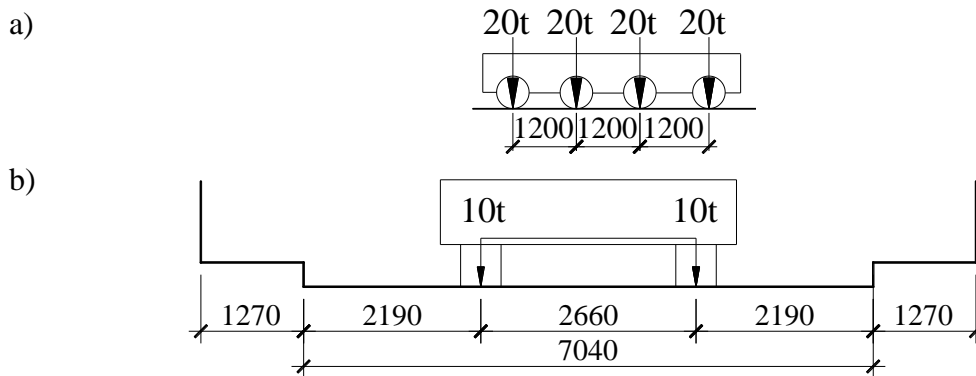
$$\cdot 0,416 \cdot (-11,70) = 2 \cdot 0,9 \cdot 1,16 \cdot (-21,630) + 2 \cdot 1,16 \cdot (-4,8670) = -56,455t = -564,55kN. \quad (4.3.3)$$

$$V_{k,Q}^k = 2 \cdot \gamma_v \cdot \mu_{din} \sum V_{Qi} + 2 \cdot \mu_{din} \cdot V_{qi} = 2 \cdot \gamma_v \cdot \mu_{din} (\sum F_i \cdot \gamma_i) + 2 \cdot \mu_{din} (\sum q_{z.m.} \cdot S_{V_T}) =$$

$$= 2 \cdot 0,9 \cdot 1,16 \cdot (12 \cdot 0,180 + 12 \cdot 0,248 + 6 \cdot 0,675 + 12 \cdot 0,932 + 12 \cdot 1,0) + 2 \cdot 1,16 \cdot$$

$$\cdot (0,416 \cdot 11,70) = 2 \cdot 0,9 \cdot 1,16 \cdot 32,370 + 2 \cdot 1,16 \cdot 4,867 = 79,622t = 796,22kN. \quad (4.3.4)$$

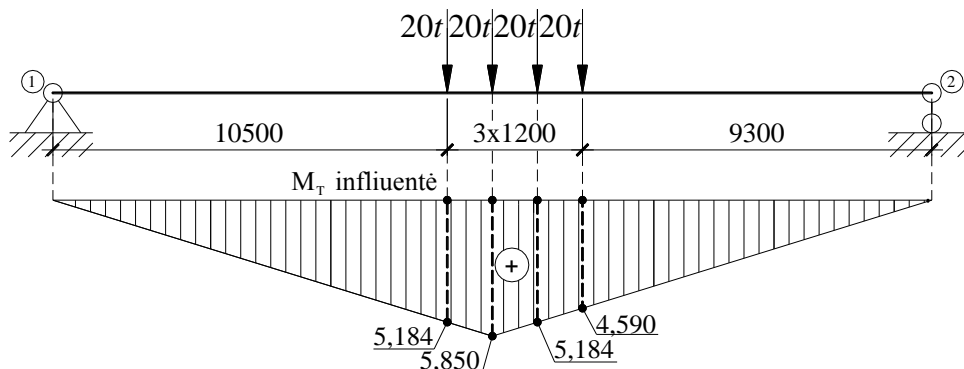
Projektinė HK-80 apkrova - ratinė keturių ašių automobilinė apkrova, kurios kiekvienos ašies svoris 20t. Automobilinė ratinė HK-80 apkrova pastatoma išilgai tilto tarpatramio taip, kad sukeltų pavojingiausią apkrovimo atvejį. Per visa tilto ilgį gali būti tik viena tokia apkrova. Projektinės HK-80 apkrovos schema pateikta 4.9 paveiksle.



4.10 pav. Automobilinės ratinės HK-80 apkrovos schema:

- a) ratinės apkrovos išdėstymas išilgai tarpatramio
- b) ratinės apkrovos išdėstymas skersai tarpatramio

Šaltilčiai kartu su apkrova HK-80 neapkraunami. Dinamiškumo koeficientas pirmojo tarpatramio ir trečiojo tarpatramių perdangos - $\mu_{din}=1+\mu=1,0$. Apkrovos patikimumo koeficientas: $\gamma_f=1,1$.



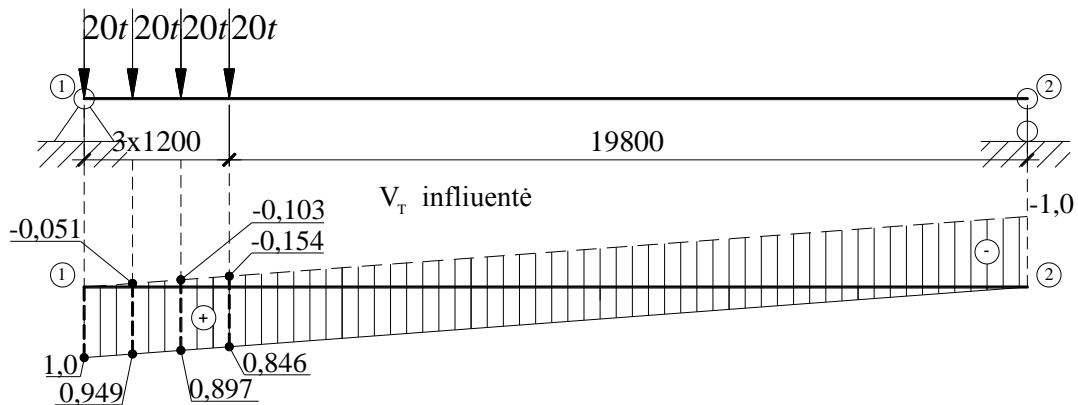
4.11 pav. M_T influentė HK-80 apkrovai

Maksimalus charakteristinis lenkimo momentas:

$$M_{k,Q} = \mu_{din} \cdot \sum F_i \cdot \gamma_i = 1,0 \cdot 5,184 \cdot 20 + 5,850 \cdot 20 + 5,184 \cdot$$

$$\cdot 20 + 4,590 \cdot 20 = 416,16tm = 4161,60kNm. \quad (4.3.5)$$

Charakteristinės skersinės jėgos:



4.12 pav. V_T influentė HK-80 apkrovai

$$V_{k,Q}^d = \mu_{din} \cdot \sum F_i \cdot \gamma_i = 1,0 \cdot 20 \cdot (-0,051) + 20 \cdot (-0,103) + 20 \cdot (-0,154) = -6,160t = -61,60kN. \quad (4.3.6)$$

$$V_{k,Q}^k = \mu_{din} \cdot \sum F_i \cdot \gamma_i = 1,0 \cdot 20 \cdot 1,0 + 20 \cdot 0,949 + 20 \cdot 0,897 + 20 \cdot 0,846 = 73,84t = 738,40kN. \quad (4.3.7)$$

Kintamos apkrovos pagal Eurokodą:

Pagrindinis apkrovos modelis – 1-asis apkrovų modelis. Šiam modeliui apkrovas naudojamos iš Eurokodo 1. Poveikiai konstrukcijoms. 2 dalis. Tiltų eismo apkrovos. Ši apkrovos modelį sudaro:

1. Dviašė koncentruota apkrova, kurios vienos ašies svoris $\alpha_Q Q_{ik}$;
čia: α_Q – apkrovos koeficientas.
2. Tolygiai išskirstyta apkrova, kurios svorio intensyvumas (kN/m^2): $\alpha_q q_{ik}$;
čia: α_q – apkrovos koeficientas.

4.3 lentelė. 1-ojo apkrovų modelio apkrovos

Vieta	Tandeminė apkrova TS	UDL tolygiai paskirstyta apkrova
	Ašies apkrovos Q_{ik} (kN)	q_{ik} (kN/m^2)
1-oji juosta	300	9,0
2-oji juosta	200	2,5
3-oji juosta	100	2,5
Kitos juostos	0	2,5
Liekamasis plotas	0	2,5

Pagal 5.3.2.1 punktą automobilinių kelių tiltams, laikantiems pėsčiųjų ar dviračių takus, reikia apibrėžti tolygiai paskirstytą apkrovą q_{fk} . Rekomenduojamoji vertė yra $q_{fk}=5,0 kN/m^2$.

Pagal 4.3.2 (3) 1 pastabą apkrovas skaičiuosime abiem atvejais:

- 1) Magistraliniams keliams apkrovos koeficientų α_{Qi} ir α_{qi} vertės: $\alpha_{Qi}=0,8$, visų kitų dydžių $\alpha_{Qi} = \alpha_{qi} = 1,0$.
- 2) Krašto ir vietinės reikšmės keliams, kai tiltų tarpatramis mažesnis nei 25 m,

užsakovui sutikus taikomos sumažintos apkrovos koeficientų reikšmės:

- Pirmosios ir antrosios apkrovų juostos tandemams $\alpha_{Q1} = \alpha_{Q2} = 0,65$;
- Pirmosios eismo juostos paskirstytai apkrovai $\alpha_{q1} = 0,65$;
- Visi kiti koeficientai $\alpha_{Qi} = \alpha_{qi} = 1,0$.

Eismo juostų skaičius:

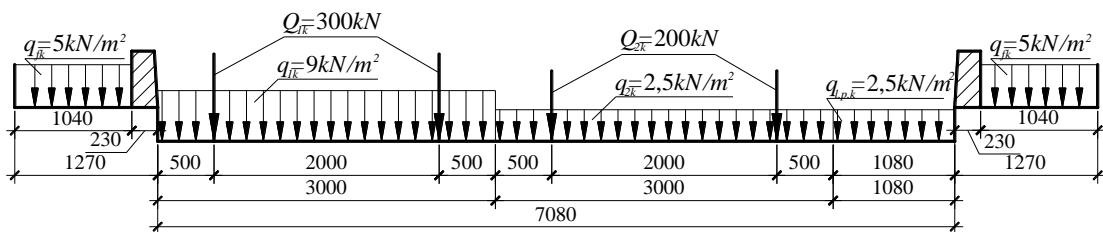
$$n_l = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right) = \text{Int}\left(\frac{7,08}{3}\right) = 2; \quad (4.3.8)$$

čia w – važiuojamosios dalies plotis, m .

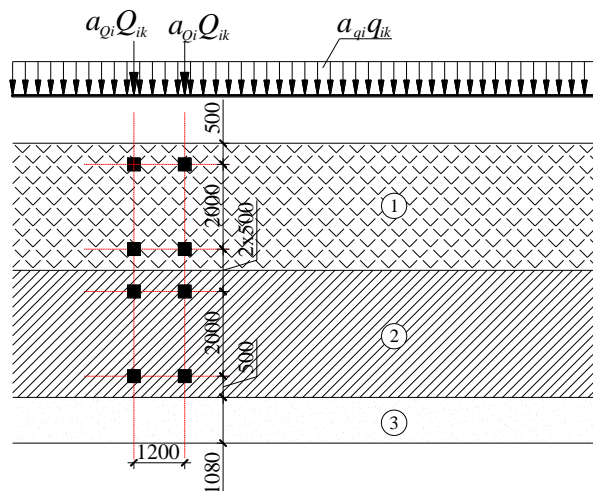
Likusio ploto plotis:

$$w - 3 \cdot n_l = 7,08 - 3 \cdot 2 = 1,08m. \quad (4.3.9)$$

Pirmojo apkrovų modelio schema pagal nagrinėjamą tiltą, pavaizduota 4.13 paveiksle:



4.13 pav. Pirmojo apkrovų modelio schema nagrinėjamam tiltui



4.14 pav. Pirmojo apkrovų modelio schemos planas ir išilginis vaizdas

Apskaičiuojame charakteristines apkrovas į tiesinį metrą ir koncentruotas pagal nagrinėjamą schemą 4.13 paveiksle.

1. Magistraliniams keliams:

- Išskirstytas krūvis:

$$\begin{aligned} q_M &= \alpha_{q1} \cdot q_{1k} \cdot 3,0 + \alpha_{q2} \cdot q_{2k} \cdot 3,0 + \alpha_{q3} \cdot q_{l.p.k} \cdot 1,08 + q_{fk} \cdot 2,08 = \\ &= 1,0 \cdot 9,0 \cdot 3,0 + 1,0 \cdot 2,5 \cdot 3,0 + 1,0 \cdot 2,5 \cdot 1,08 + 5,0 \cdot 2,08 = 47,60kN/m; \end{aligned} \quad (4.3.10)$$

- Koncentruotos apkrovos:

$$Q_M = \alpha_{Q1} \cdot Q_{1k} + \alpha_{Q2} \cdot Q_{2k} = 0,8 \cdot 300 + 1,0 \cdot 200 = 440kNm. \quad (4.3.11)$$

2. Krašto ir vietinės reikšmės keliams:

- Išskirstytas krūvis:

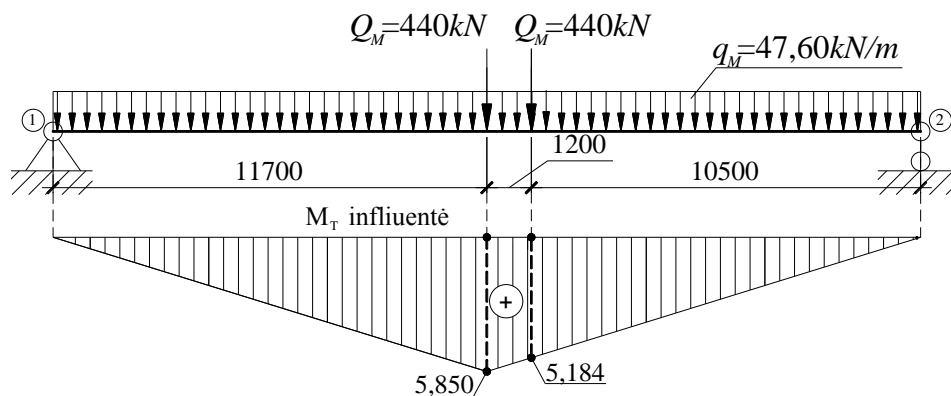
$$q_{KV} = \alpha_{q1} \cdot q_{1k} \cdot 3,0 + \alpha_{q2} \cdot q_{2k} \cdot 3,0 + \alpha_{q3} \cdot q_{l.p.k} \cdot 1,08 + q_{fk} \cdot 2,08 =$$

$$= 0,65 \cdot 9,0 \cdot 3,0 + 1,0 \cdot 2,5 \cdot 3,0 + 1,0 \cdot 2,5 \cdot 1,08 + 5,0 \cdot 2,08 = 38,15 \text{ kN/m}; \quad (4.3.12)$$

- Koncentruotos apkrovos:

$$Q_{KV} = \alpha_{Q1} \cdot Q_{1k} + \alpha_{Q2} \cdot Q_{2k} = 0,65 \cdot 300 + 0,65 \cdot 200 = 325 \text{ kNm}. \quad (4.3.13)$$

Apskaičiuojame įrašas nuo pirmo apkrovų modelio ir nuo pėsčiųjų minios, kai nagrinėjama magistraliniai keliai.



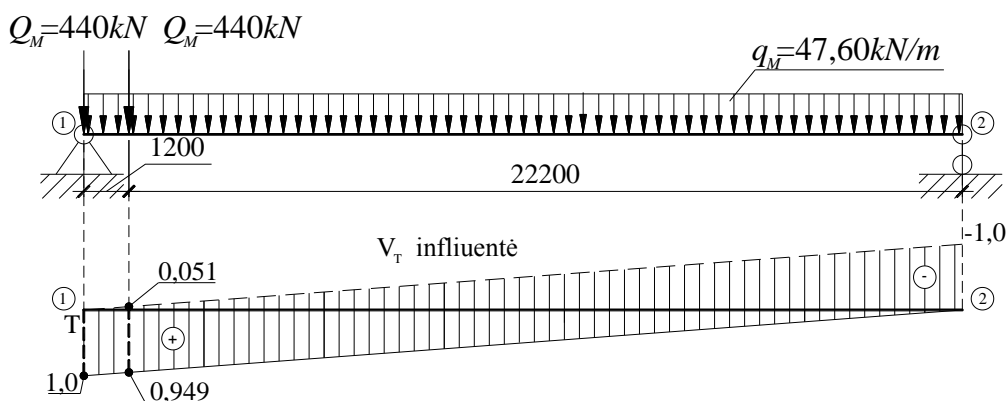
4.15 pav. M_T influentė 1-ajam apkrovų modeliui (magistraliniams keliams)

Maksimalus charakteristinis lenkimo momentas:

$$M_{k,Q} = \sum M_{Qi} + M_{qi} = \sum Q_M \cdot \gamma_i + \sum q_M \cdot S_{M_T} = 5,850 \cdot 440 +$$

$$+ 5,184 \cdot 440 + 68,45 \cdot 47,6 = 4855,0 + 3258,20 = 8113,20 \text{ kNm}. \quad (4.3.14)$$

Charakteristinės skersinės jėgos:



4.16 pav. V_T influentė 1-ajam apkrovų modeliui (magistraliniams keliams)

$$V_{k,Q}^k = \sum V_{Qi} + V_{qi} = \sum Q_M \cdot \gamma_i + \sum q_M \cdot S_{M_T} = 1,0 \cdot 440 + 0,949 \cdot$$

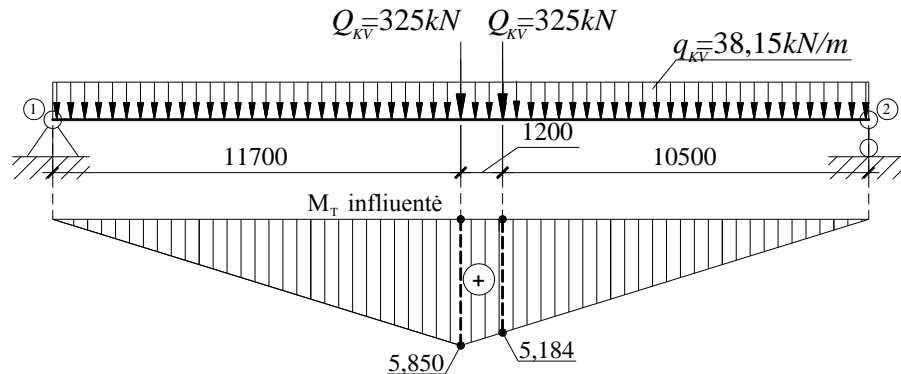
$$\cdot 440 + 11,70 \cdot 47,6 = 857,56 + 556,92 = 1414,48 \text{ kNm}; \quad (4.3.15)$$

$$V_{k,Q}^d = \sum V_{Qi} + V_{qi} = \sum Q_M \cdot \gamma_i + \sum q_M \cdot S_{M_T} = (-0,051) \cdot$$

$$\cdot 440 + (-11,70) \cdot 47,6 = (-22,44) + (-556,92) = -579,36 \text{ kNm}. \quad (4.3.16)$$

Apskaičiuojame įrašas nuo pirmo apkrovų modelio ir nuo pėsčiųjų minios, kai nagrinėjama krašto ir vietinės reikšmės keliai.

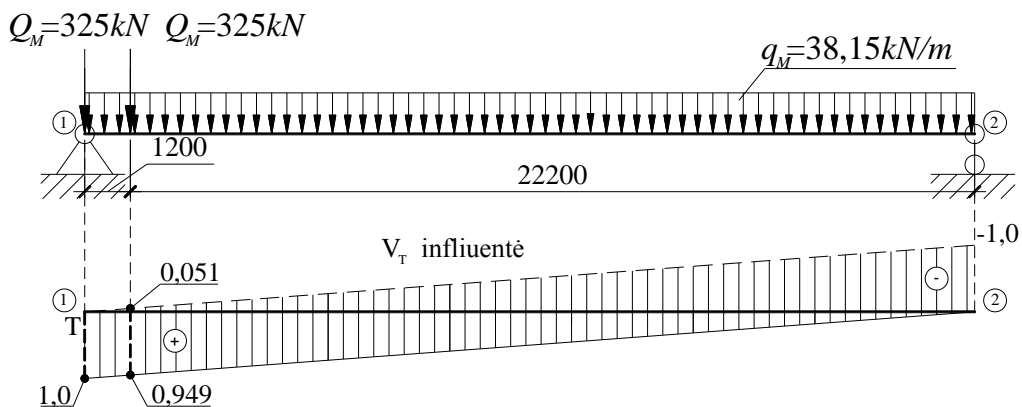
Maksimalus charakteristinis lenkimo momentas:



4.17 pav. M_T influentė 1-ajam apkrovų modeliui (krašto ir vietinės reikšmės keliams)

$$M_{k,Q} = \sum M_{Q_i} + M_{q_i} = \sum Q_M \cdot \gamma_i + \sum q_M \cdot S_{M_T} = 5,850 \cdot 325 + 5,184 \cdot 325 + 68,45 \cdot 38,15 = 3586,05 + 2611,37 = 6197,42 \text{ kNm.} \quad (4.3.17)$$

Charakteristinės skersinės jėgos:



4.18 pav. V_T influentė 1-ajam apkrovų modeliui (krašto ir vietinės reikšmės keliams)

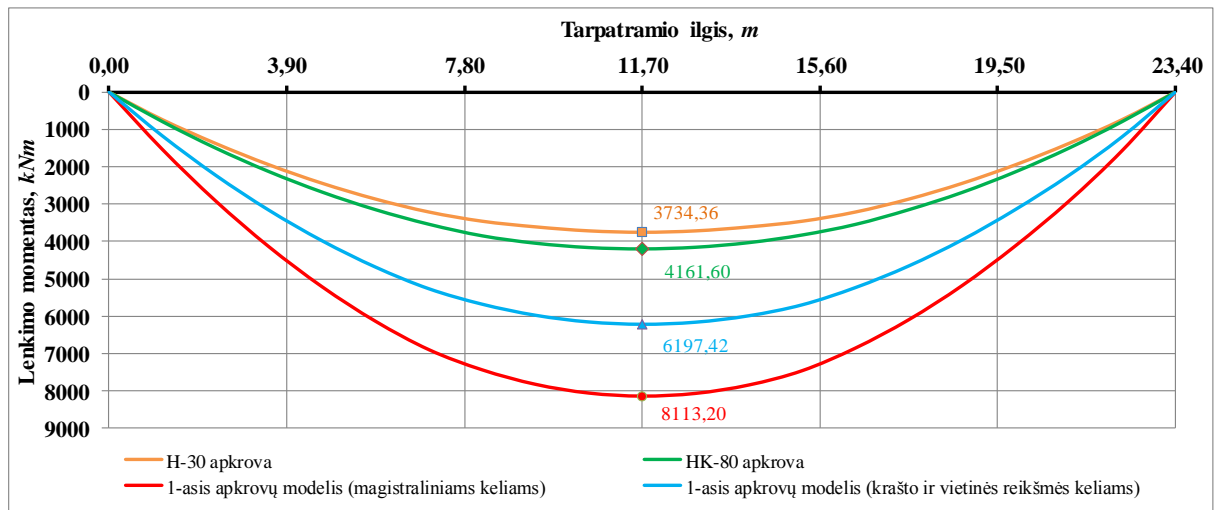
$$V_{k,Q}^k = \sum V_{Q_i} + V_{q_i} = \sum Q_M \cdot \gamma_i + \sum q_M \cdot S_{M_T} = 1,0 \cdot 325 + 0,949 \cdot 325 + 11,70 \cdot 38,15 = 633,43 + 446,36 = 1079,79 \text{ kNm;} \quad (4.3.18)$$

$$V_{k,Q}^d = \sum V_{Q_i} + V_{q_i} = \sum Q_M \cdot \gamma_i + \sum q_M \cdot S_{M_T} = (-0,051) \cdot 325 + (-11,70) \cdot 38,15 = (-16,58) + (-446,36) = -462,94 \text{ kNm.} \quad (4.3.19)$$

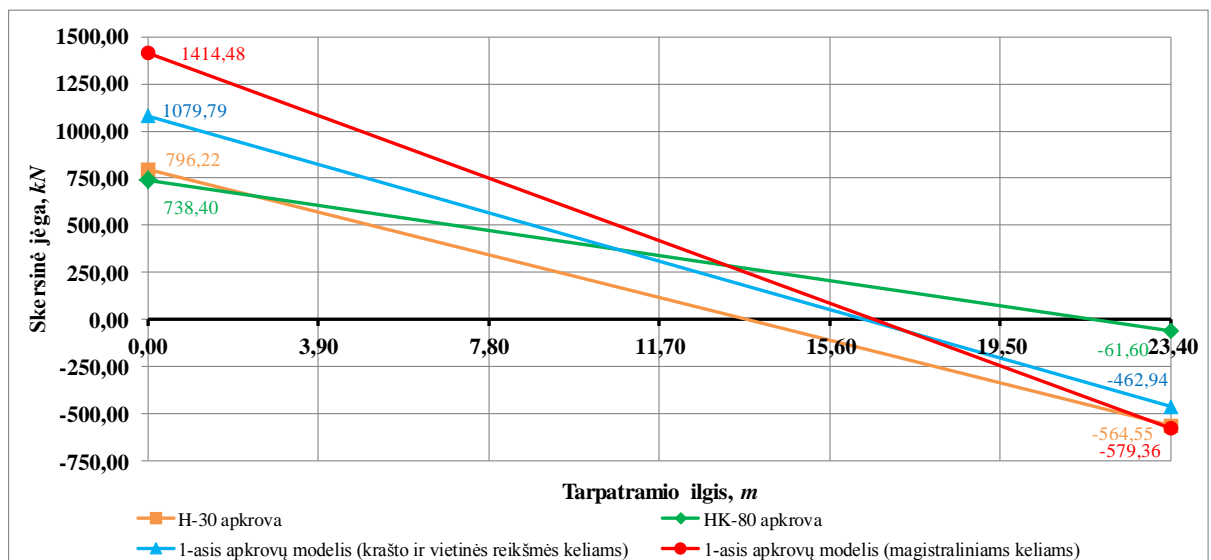
Gautas kintamų apkrovų įrašas pagal rusiškas ir europines normas suvedame į 4.4 lentelę. Paveiksluose 4.19 ir 4.20 pateikiama grafinis įrašų palyginimas.

4.4 lentelė. Kintamų apkrovų įrašos pagal rusiškas ir europines normas

Apkrovos pavadinimas	Charakteristinis lenkimo momentas, kNm	Charakteristinės skersinės jėgos, kN
Rusiškos projektavimo normos:		
Apkrova H-30	3734,36	796,22/-564,55
Apkrova HK-80	4161,60	738,40/-61,60
Europinės projektavimo normos:		
1-asis apkrovų modelis magistraliniams keliams	8113,20	1414,48/-579,36
1-asis apkrovų modelis krašto ir vietinės reikšmės keliams	6197,42	1079,79/-462,94



4.19 pav. Lenkimo momentų gaubtinės pagal rusiškas ir europines projektavimo normas



4.20 pav. Skersinės jėgos pagal rusiškas ir europines projektavimo normas

4.4. Ketvirto skyriaus išvados

Atlikus įrašų skaičiavimą tiltui per upę Šušvę pastebėta, kad:

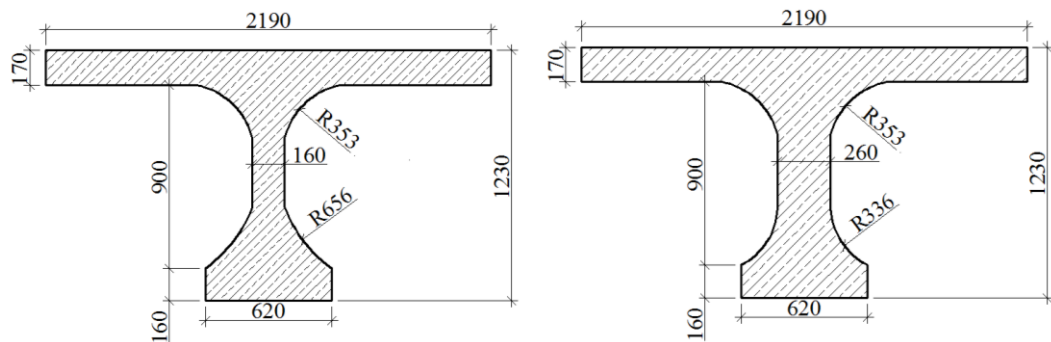
- tilto perdangai apskaičiuotos įrašos, pagal euronormų 1-ąjį apkrovų modelį magistraliniams keliams, 2,17 karto viršija įrašas pagal projektinę apkrovą H-30 ir 1,95 karto pagal HK-80;
- tilto perdangai apskaičiuotos įrašos, pagal euronormų 1-ąjį apkrovų modelį krašto ir vietinės reikšmės keliams, 1,65 karto viršija įrašas pagal projektinę apkrovą H-30 ir 1,49 karto pagal HK-80;
- projektuojant pagal rusiškas apkrovų normas, tilto sijos pjūvis ties atrama turi būti tikrinamas H-30 apkrovai, o tarpatramio vidurys HK-80 apkrovai.

5. TILTO PERDANGOS SIJOS PROJEKTAVIMAS

Pagrindinis šio skyriaus tikslas – suprojektuoti tilto karpytą sijinę perdangą, gauti perdangos tikrąjį standumą ir palyginti bandymų metu gautus tilto sijų įlinkius su teoriškai apskaičiuotais. Tiltų sijų projektavimas atliekamas pagal rusiškas normas, naudojant H-30 ir HK-80 apkrovas. Suprojektavus siją yra palyginamas teorinis armatūros kiekis su realiai sijoje esančiu kiekiu. Tiltų standumas taip pat reikalingas atlikti tiltų dinaminei analizei.

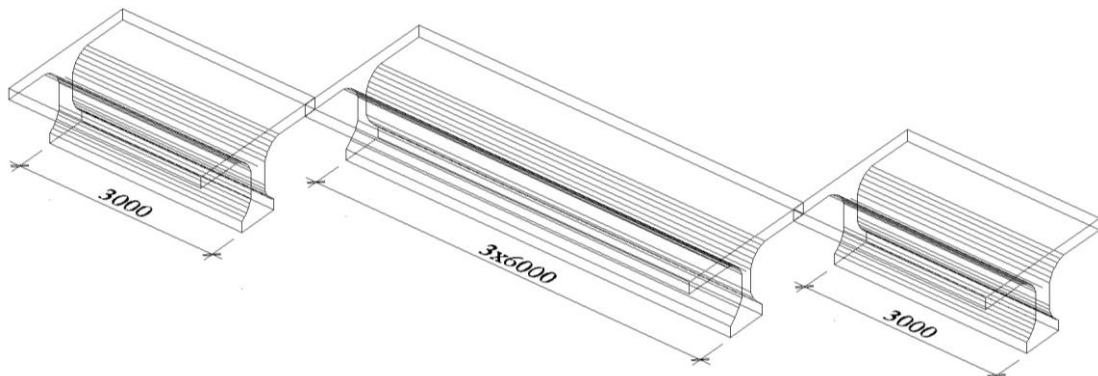
5.1. Bendri duomenys

Tiltų perdangą, kaip jau minėta 2 skyriuje, sudaro – keturios įtemptojo gelžbetonio dvitėjinio skerspjūvio sijos. Sijos suprojektuotos kintamo skerspjūvio: sienutės storis sijos viduriniame pjūvyje – 0,16 m, o ties atramomis sijų sienučių storis – 0,26 m. Ties atramomis sienelės storis didinamas, nes veikia dideli svarbiausieji tempimo bei gniuždymo įtempimai, taip pat vietiniai įtempimai prie įtemptosios armatūros inkarų. Skerspjūviai pateikiami 5.1 paveiksle:



5.1 pav. Tiltų sijos skerspjūviai ties sijos viduriu ir ties atrama

Sija surenkama iš atskirų blokų, kurių ilgis 3 m ir 6 m. Kintamo skerspjūvio 3 metrų blokai ir jie dedami sijos galuose ties atramomis, o viduryje – 3 blokai po 6 metrus (5.2 paveiksle siją sudarantys blokai). Šie blokai buvo pagaminti su atvirais kanalais, į kuriuos įverinama armatūra. Ji įtempinama ir paskui inkaruojama plieniniais išoriniais inkarais, o blokai tarpusavyje jungiami epoksidiniais klijais.

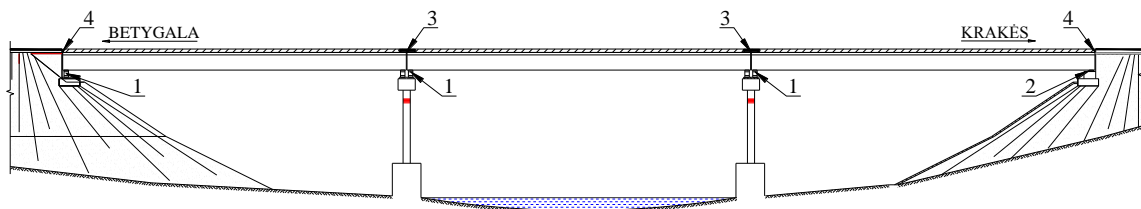


5.2 pav. Siją sudarantys blokai

Pagrindinės sijos armuojamos tiesia ir lenkta armatūra. Lenktos armatūros išankstinio įtempimo jėga sumažina sijos skersinę jėgą prie atramų. Be to, sumažėjus armatūros išankstinio įtempimo jėgos ekscentricitetui, sumažėja viršutinės sijos zonos betono tempimo įtempimai [11].

Tiltas pastatytas be skersinių diafragmų. Skersinį standumą užtikrina vien tik paklotą laikanti plokštė (pagrindinių sijų viršutinė lentyna), kuri ne tik perima tiesioginę nuolatinę ir laikiną judančią apkrovą, bet ir sujungia pagrindines sijas, kad jos dirbtų bendrai. Tokios plokštės armuojamos dviem armatūros tinklais, nes plokštės tarpatriamio viduryje gali atsirasti apačią arba viršų tempiantys lenkimo momentai.

Nagrinėjamo tilto paklotas nekarpytos konstrukcijos. Gretimų tarpatriamio perdangų konstrukcijos sujungiamos taip, kad, kintant temperatūrai, perdangos konstrukcija dirbtų kaip sijinė nekarpyta, o veikiant laikinai judančiai apkrovai – kaip sijinė karpyta.



5.3 pav. Sijinės karpytos su nepertraukta pakloto danga perdangos schema:

- 1 – paslankus atraminis guolis; 2 – nepaslankus atraminis guolis;
3 – šarnyrinis sujungimas; 4 – deformacinis pjūvis.

Ištisinis paklotas tilto konstrukcijoje įrengtas, pakeičiant jo deformacinį pjūvį šarnyrišku sujungimu. Šarnyrais sujungtos gretimų tarpatriamio perdangos, keičiantis temperatūrai, horizontaliai pasislenka per paslankius atraminius guolius. Pakloto konstrukcija turi didelę įtaką tilto perdangos standumui. Atliekant tikslius deformacijų skaičiavimus tilto paklotą reikėtų įvertinti.

5.2. Pagrindinės sijos įrašų skaičiavimas

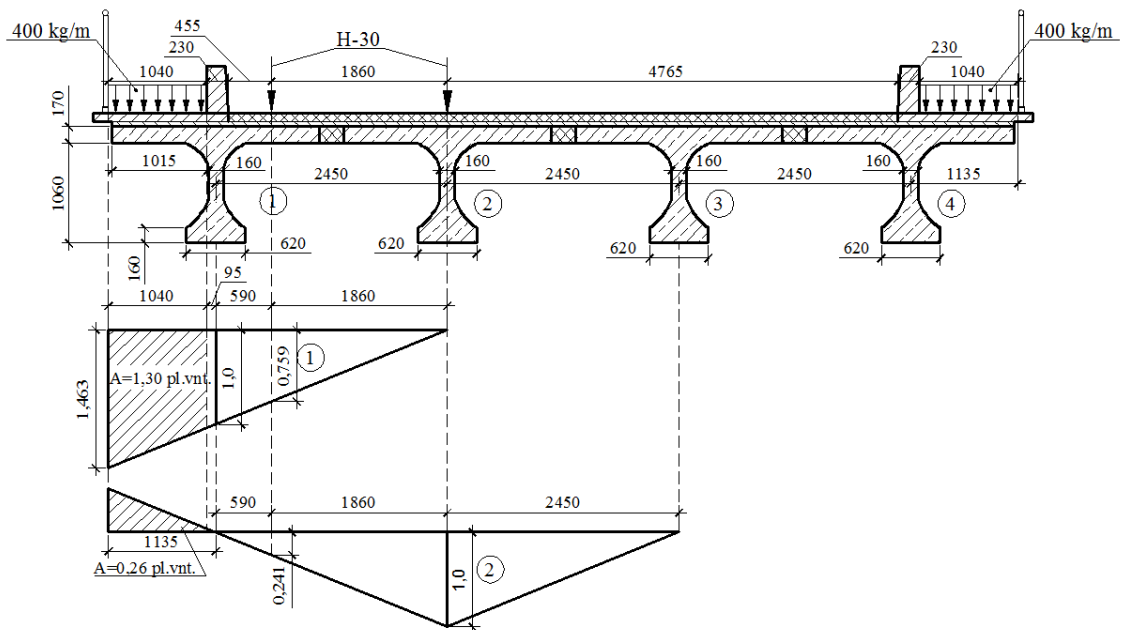
Kaip jau minėta 4 skyriuje, perdangos nuolatinė apkrova pasiskirsčiusi tolygiai, tačiau kintamoji eismo apkrova pasiskirto daug sudėtingiau. Nagrinėjamo tilto perdanga yra vientisa, tai visos sijos įsijungia į apkrovos atlaikymo procesą, bet nevienodu laipsniu. Todėl norint rasti apkrovų pasiskirstymą tarp sijų yra skaičiuojamas skersinio pasiskirstymo koeficientas.

Kadangi tilto perdanga sudaryta be diafragmų, norint apskaičiuoti, kur susidaro didžiausios įrašos nuo laikinosios apkrovos, bus naudojamas svarto metodą. Naudojant šį metodą yra sudaromos influentės, sąlygiškai laikant, kad plokštė perkirpta prie pagrindinių sijų ir pastarosios gali įlinkti nuo laikinosios apkrovos nepriklausomai viena nuo kitos.

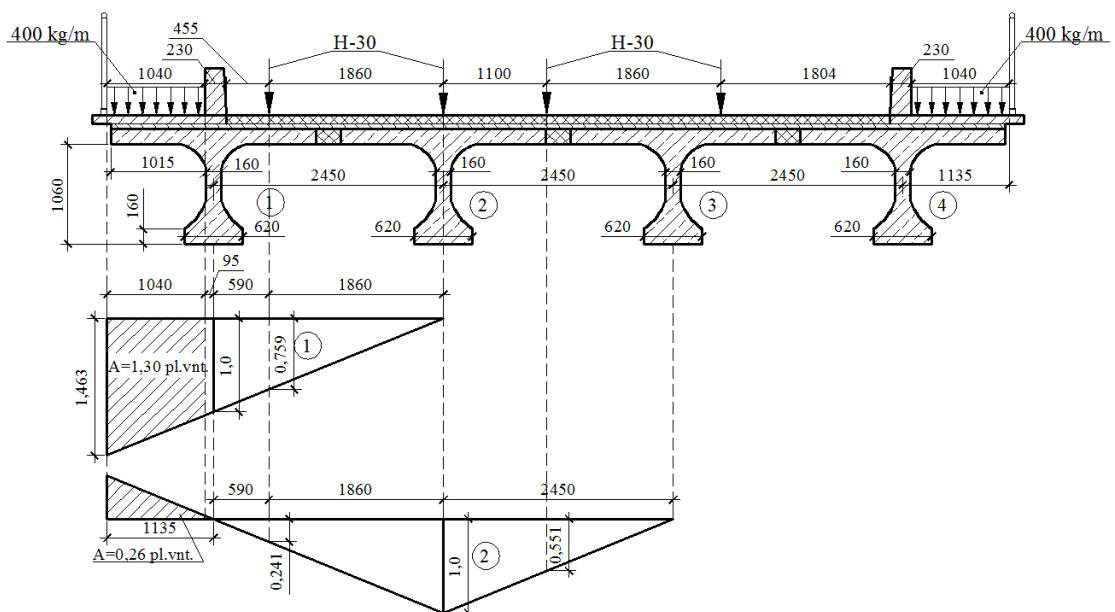
Influentės apkraunamos atskirai laikinosiomis paslankiomis apkrovomis HK-80 ir H-30 ir žmonių minia. Šis metodas nėra visiškai tikslus, gautos įrašos ties tilto tarpatramio viduriu yra didesnės nei skaičiuojant kitais metodais, tačiau skersinės jėgos ties atramomis gaunamos gana tikslios. Sijų deformacijoms skaičiuoti bus naudojamas tikslesnis metodas – ortotropinės plokštės. O sijos projektavimui naudosime jau minėtą svėro metodą [15, 11].

Apkrovai H-30 skersinio pasiskirstymo koeficientą skaičiuosime dvejais atvejais:

- Kintamoji apkrova išdėstyta viena eile (5.4 pav.);
- Kintamoji apkrova išdėstyta dviem eilėms (5.5 pav.).



5.4 pav. Automobilinės ratinės H-30 apkrovos išdėstymas viena eile



5.5 pav. Automobilinės ratinės H-30 apkrovos išdėstymas dvejomis eilėmis

Apskaičiuojami skersinio pasiskirstymo koeficientai 1 ir 2 sijoms nuo automobilių vorų ir žmonių minios apkrovų, kai kintama apkrova išdėstyta viena eile:

- Nuo automobilio apkrovos pirmai sijai:

$$\psi_{1,v} = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{2} \cdot \sum y_i = \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{2} \cdot (0,759 + 0) = 0,38; \quad (5.2.1)$$

čia m – vorų skaičius;

y_i – influentės ordinatė.

- Nuo automobilio apkrovos antrai sijai:

$$\psi_{2,v} = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{2} \cdot \sum y_i = \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{2} \cdot (0,241 + 1,0) = 0,62; \quad (5.2.2)$$

- Nuo žmonių apkrovos pirmai sijai:

$$\psi_{1,\dot{z}} = \sum A_i / d = (1,30 + (-0,26)) / 1,04 = 1,0; \quad (5.2.3)$$

- Nuo žmonių apkrovos antrai sijai:

$$\psi_{2,\dot{z}} = \sum A_i / d = 0. \quad (5.2.4)$$

Apskaičiuojami skersinio pasiskirstymo koeficientai 1 ir 2 sijoms nuo automobilių vorų ir žmonių minios apkrovų, kai kintama apkrova išdėstyta dvejomis eilėmis:

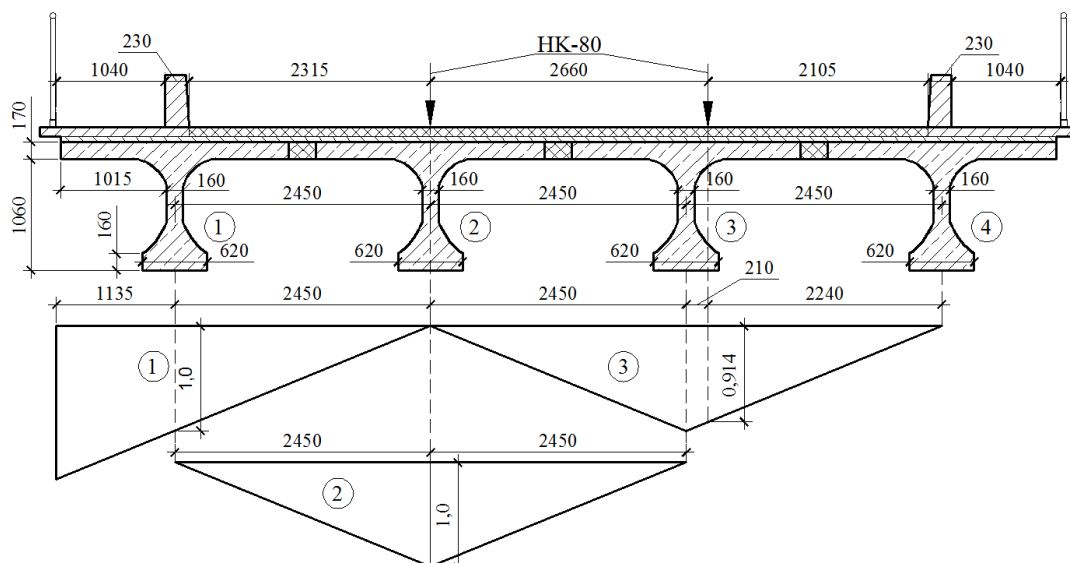
- Nuo automobilio apkrovos pirmai sijai:

$$\psi_{3,v} = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{2} \cdot \sum y_i = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot (0,759 + 0) = 0,19; \quad (5.2.5)$$

- Nuo automobilio apkrovos antrai sijai:

$$\psi_{4,v} = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{2} \cdot \sum y_i = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot (0,241 + 1,0 + 0,551) = 0,45. \quad (5.2.6)$$

Apkrovai HK-80 skersinio pasiskirstymo koeficientą skaičiuosime vienu atveju: kai kintamoji apkrova išdėstyta per tilto vidurį (5.6 pav.).



5.6 pav. Automobilinės ratinės HK-80 apkrovos išdėstymas tilto viduryje

Apskaičiuojamas skersinio pasiskirstymo koeficientai 1, 2 ir 3 sijoms nuo automobilinės voros:

- Nuo automobilio apkrovos, pirmai sijai:

$$\psi_{5,v} = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{2} \cdot \sum y_i = 0; \quad (5.2.7)$$

- Nuo automobilio apkrovos, antrai sijai:

$$\psi_{6,v} = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{2} \cdot \sum y_i = \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,0 = 0,50; \quad (5.2.8)$$

- Nuo automobilio apkrovos trečiai sijai:

$$\psi_{7,v} = \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{2} \cdot \sum y_i = \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,914 = 0,46; \quad (5.2.9)$$

Ketvirtame skyriuje apskaičiavome įrąžas visai tilto perdangai, todėl toliau apskaičiuosime įrąžas labiausiai apkrautai sijai. Šiam tikslui naudosime jau apskaičiuotus skersinio pasiskirstymo koeficientus. Apskaičiuojame lenkimo momento reikšmę sijai nuo H–30 apkrovos, kai apkrova išdėstyta viena eile:

- Pirmai sijai:

$$M_{1,Q} = \psi_{1,v} \cdot \mu_{din} \cdot \sum M_{Qi} + \psi_{1,z} \cdot \mu_{din} \cdot M_{qi} = 0,38 \cdot 1,16 \cdot 147,210 + 1,0 \cdot 1,16 \cdot 28,475 = 64,890 + 33,031 = 97,921tm = 979,21kNm. \quad (5.2.10)$$

- Antrai sijai:

$$M_{2,Q} = \psi_{2,v} \cdot \mu_{din} \cdot \sum M_{Qi} = 0,62 \cdot 1,16 \cdot 147,210 = 105,873tm = 1058,73kNm. \quad (5.2.11)$$

Apskaičiuojame skersines jėgas sijai nuo H–30 apkrovos, kai apkrova išdėstyta viena eile:

- Pirmai sijai:

$$V_{1,Q}^d = \psi_{1,v} \cdot \mu_{din} \cdot \sum V_{Qi} + \psi_{1,z} \cdot \mu_{din} \cdot V_{qi} = 0,38 \cdot 1,16 \cdot (-32,370) + 1,0 \cdot 1,16 \cdot (-4,867) = -14,269 + (-15,646) = -19,915t = -199,15kN; \quad (5.2.12)$$

$$V_{1,Q}^k = \psi_{1,v} \cdot \mu_{din} \cdot \sum V_{Qi} + \psi_{1,z} \cdot \mu_{din} \cdot V_{qi} = 0,38 \cdot 1,16 \cdot 21,630 + 1,0 \cdot 1,16 \cdot 4,867 = 9,535 + 5,646 = 15,181t = 151,81kN. \quad (5.2.13)$$

- Antrai sijai:

$$V_{2,Q}^d = \psi_{2,v} \cdot \mu_{din} \cdot \sum V_{Qi} = 0,62 \cdot 1,16 \cdot (-32,370) = 23,281t = 232,81kN; \quad (5.2.14)$$

$$V_{2,Q}^k = \psi_{2,v} \cdot \mu_{din} \cdot \sum V_{Qi} = 0,62 \cdot 1,16 \cdot 21,630 = 15,556t = 155,56kN. \quad (5.2.15)$$

Apskaičiuojame lenkimo momento reikšmę antrai sijai nuo H–30 apkrovos, kai voros išdėstytos dvejomis eilėmis:

$$M_{2,Q} = \psi_{2,v} \cdot \mu_{din} \cdot \gamma_v \cdot 2 \cdot \sum M_{Qi} = 0,45 \cdot 1,16 \cdot 0,9 \cdot 2 \cdot 1472,10 = 1383,19kNm. \quad (5.2.16)$$

Apskaičiuojame skersines jėgas antrai sijai nuo H–30 apkrovos, kai voros išdėstytos dvejomis eilėmis:

$$V_{2,Q}^d = \psi_{2,v} \cdot \mu_{din} \cdot \gamma_v \cdot 2 \cdot \sum V_{Qi} = 0,45 \cdot 1,16 \cdot 0,9 \cdot 2 \cdot (-32,370) = -30,415t = -304,15kN; \quad (5.2.17)$$

$$V_{2,Q}^k = \psi_{2,v} \cdot \mu_{din} \cdot \gamma_v \cdot 2 \cdot \sum V_{Qi} = 0,45 \cdot 1,16 \cdot 0,9 \cdot 2 \cdot 21,630 = 20,324t = 203,24kN. \quad (5.2.18)$$

Apskaičiuojame lenkimo momento reikšmę antrai sijai nuo HK–80 apkrovos. Naudojame antros sijos skersinio pasiskirstymo koeficientą, nes nagrinėjamu atveju gausime didžiausias įrašas:

$$M_{2,Q} = \psi_{6,v} \cdot \mu_{din} \cdot \sum M_{Qi} = 0,50 \cdot 1,0 \cdot 416,160 = 208,080tm = 2080,80kNm. \quad (5.2.19)$$

Apskaičiuojame skersines jėgas antrai sijai nuo HK–80 apkrovos:

$$V_{2,Q}^d = \psi_{2,v} \cdot \mu_{din} \cdot \sum V_{Qi} = 0,50 \cdot 1,0 \cdot (-6,160) = -3,080t = -30,80kN; \quad (5.2.20)$$

$$V_{2,Q}^k = \psi_{2,v} \cdot \mu_{din} \cdot \gamma_v \cdot 2 \cdot \sum V_{Qi} = 0,50 \cdot 73,84 = 36,920t = 369,20kN. \quad (5.2.21)$$

Vienu ir kitu atveju gauta, kad maksimalios įrašos susidaro antroje sijoje.

5.3. Apkrovų deriniai

Apkrovų deriniai sudaromi pagal rusiškas projektavimo normas. Kiekvienas derinys skaičiuojamas su skirtingomis ratinėmis apkrovomis:

- H-30 apkrovai: $\sum G_i \cdot \gamma_G + \sum Q_j \cdot \gamma_f$; kai $\gamma_f = 1,4$; (5.3.1)

- HK-80 apkrovai: $\sum G_i \cdot \gamma_G + \sum Q_j \cdot \gamma_f$, kai $\gamma_f = 1,1$. (5.3.2)

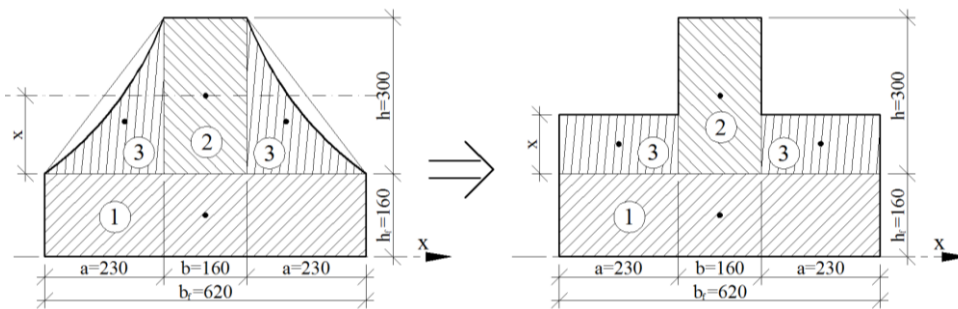
5.1 lentelė. Derinių suvestinė

Nr.	Apkrovos pavadinimas	Charakteristinis lenkimo momentas, kN/m	Charakteristinė skersinė jėga, kN	Dalinis koeficientas, γ_G, γ_Q	Skaičiuotinis lenkimo momentas, kN/m	Skaičiuotinė skersinė jėga, kN
1.	Nuolatinė apkrova $\sum g_k$	1847,98	315,87	-	2125,54	363,32
2.	Kintama apkrova H-30	1383,19	304,15	1,4	1936,47	425,81
3.	Kintama apkrova HK-80	2080,80	369,20	1,1	2288,88	406,12
4.	Derinys apkrovai H-30	3231,17	620,02	-	4062,01	774,80
5.	Derinys apkrovai HK-80	3928,78	651,37	-	4414,42	769,44

Pagal gautus rezultatus sija bus projektuojama 4414,42 kNm lenkimo momentui ir 774,80 kN skersinei jėgai.

5.3. Ekvivalentinio sijos skerspjūvio nustatymas

Nagrinėjamo tilto sijos skerspjūviai yra pateikti 5.1 paveiksle. Sijos skerspjūvis, su 260 mm sienele, projektuojamas 1,82 m ilgio abiejuose sijos galuose. Likusią sijos vidurinę dalį (20,36 m) sudaro skerspjūvis, kurio senelės storis 160 mm. Vienas ir kitas skerspjūvis su apvalintais kraštais, todėl projektuoti tokią siją būtų sudėtinga. Skaičiuosime ekvivalentinius sijos skerspjūvius. Šiam tikslui užapvalintus kraštus norint įvertinti ir supaprastinti, reikia padidinti skerspjūvio apatinės ir viršutinės lentynos aukštį h_f ir h'_f .



5.7 pav. Sijos apatinės dalies skerspjūvis

Apskaičiuojame 5.7 paveiksle 3 elementų inercijos momentą [8]:

$$2 \cdot I_3 \approx \frac{a \cdot h^3}{18} + a \cdot h \cdot \left(h_f + \frac{h}{3} \right)^2 = \frac{0,23 \cdot 0,30^3}{18} +$$

$$+ 0,23 \cdot 0,30 \cdot \left(0,16 + \frac{0,3}{3} \right)^2 = 5,009 \cdot 10^{-3} m^4 \quad (5.3.1)$$

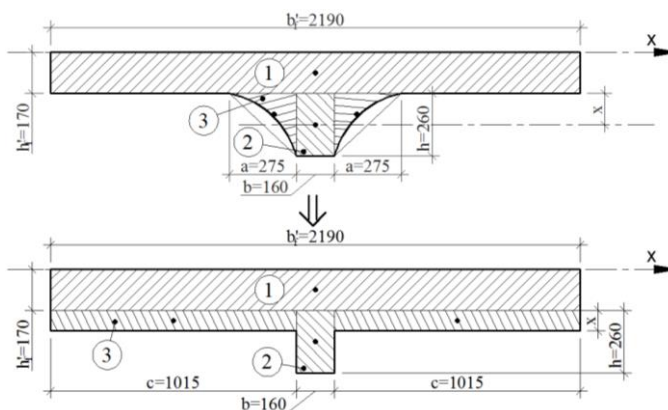
Apskaičiuojame apatinės lentynos padidėjimą x priartėjimo būdu su programa „Mathcad“:

$$2 \cdot I_3 = 2 \cdot \left(\frac{a \cdot x^3}{12} + a \cdot x \cdot \left(h_f + \frac{x}{2} \right)^2 \right);$$

$$5,009 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot \left(\frac{0,23 \cdot x^3}{12} + 0,23 \cdot x \cdot \left(0,16 + \frac{x}{2} \right)^2 \right); \quad (5.3.2)$$

$$x = 0,1725m.$$

Gavome, kad ekvivalentinis apatinės lentynos aukštis $h_f = 0,3325 m$, priimame 0,333 m.



5.8 pav. Sijos viršutinės dalies skerspjūvis

Apskaičiuojame 5.8 paveiksle 3 elementų inercijos momentą:

$$2 \cdot I_3 \approx \frac{a \cdot h^3}{18} + a \cdot h \cdot \left(h_f + \frac{h}{3} \right)^2 = \frac{0,275 \cdot 0,26^3}{18} +$$

$$+ 0,275 \cdot 0,26 \cdot \left(0,17 + \frac{0,26}{3} \right)^2 = 4,979 \cdot 10^{-3} m^4 \quad (5.3.3)$$

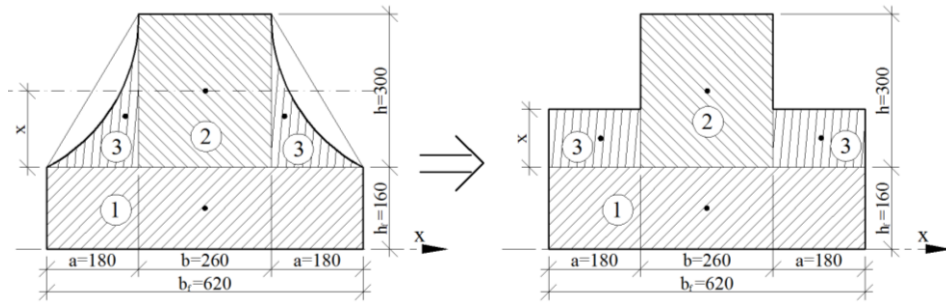
Apskaičiuojame viršutinės lentynos padidėjimą x jau minėta programa:

$$2 \cdot I_3 = 2 \cdot \left(\frac{c \cdot x^3}{12} + c \cdot x \cdot \left(h_f + \frac{x}{2} \right)^2 \right);$$

$$4,979 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot \left(\frac{1,015 \cdot x^3}{12} + 1,015 \cdot x \cdot \left(0,17 + \frac{x}{2} \right)^2 \right); \quad (5.3.4)$$

$$x = 0,06065m.$$

Ekvivalentinis viršutinės lentynos aukštis $h_f = 0,2307 m$, priimame $0,231m$. Toliau apskaičiuojamas ekvivalentinis 260 mm storio sienelės skerspjūvis:



5.9 pav. Sijos apatinės dalies skerspjūvis

Apskaičiuojame 5.9 paveiksle 3 elementų inercijos momentą:

$$2 \cdot I_3 \approx \frac{a \cdot h^3}{18} + a \cdot h \cdot \left(h_f + \frac{h}{3} \right)^2 = \frac{0,18 \cdot 0,30^3}{18} +$$

$$+ 0,18 \cdot 0,30 \cdot \left(0,16 + \frac{0,30}{3} \right)^2 = 3,920 \cdot 10^{-3} m^4 \quad (5.3.5)$$

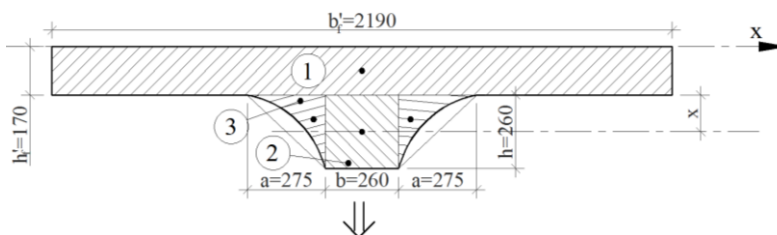
Apskaičiuojame apatinės lentynos padidėjimą x :

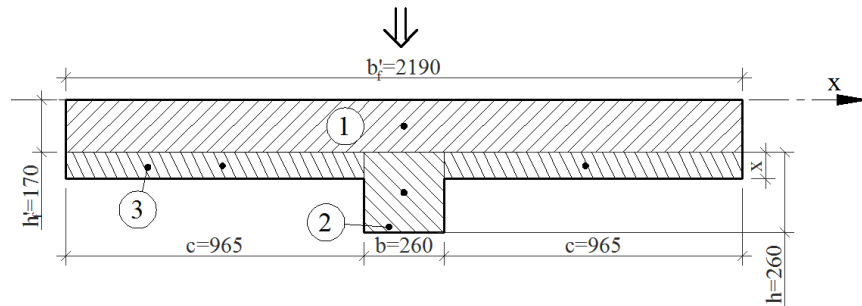
$$2 \cdot I_3 = 2 \cdot \left(\frac{a \cdot x^3}{12} + a \cdot x \cdot \left(h_f + \frac{x}{2} \right)^2 \right);$$

$$3,920 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot \left(\frac{0,18 \cdot x^3}{12} + 0,18 \cdot x \cdot \left(0,16 + \frac{x}{2} \right)^2 \right); \quad (5.3.6)$$

$$x = 0,1725m.$$

Ekvivalentinis apatinės lentynos aukštis $h_f = 0,3325 m$, priimame $0,333 m$.





5.10 pav. Sijos viršutinės dalies skerspjūvis

Apskaičiuojame 5.10 paveiksle 3 elementų inercijos momentą:

$$2 \cdot I_3 \approx \frac{a \cdot h^3}{18} + a \cdot h \cdot \left(h'_f + \frac{h}{3} \right)^2 = \frac{0,275 \cdot 0,26^3}{18} +$$

$$+ 0,275 \cdot 0,26 \cdot \left(0,17 + \frac{0,26}{3} \right)^2 = 4,979 \cdot 10^{-3} m^4 \quad (5.3.7)$$

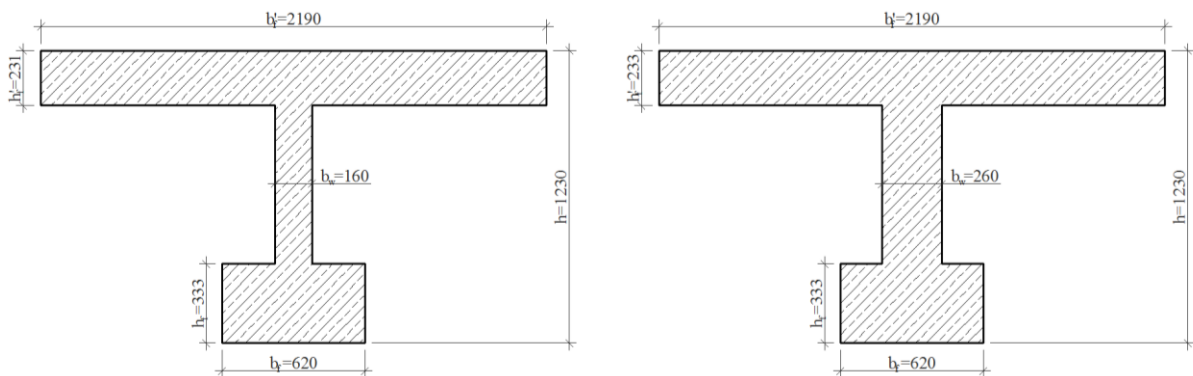
Apskaičiuojame viršutinės lentynos padidėjimą x :

$$2 \cdot I_3 = 2 \cdot \left(\frac{c \cdot x^3}{12} + c \cdot x \cdot \left(h'_f + \frac{x}{2} \right)^2 \right);$$

$$4,979 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot \left(\frac{0,965 \cdot x^3}{12} + 0,965 \cdot x \cdot \left(0,17 + \frac{x}{2} \right)^2 \right); \quad (5.3.8)$$

$$x = 0,6302m.$$

Ekvivalentinis viršutinės lentynos aukštis $h_f = 0,233$. Gauti ekvivalentiniai skerspjūviai pateikiami 5.11 paveiksle:



5.11 pav. Ekvivalentiniai sijos skerspjūviai ties viduriu ir atrama

5.4. Sijos medžiagų skaičiuojamosios charakteristikos ir kiti duomenys

Betonas kietinamas termiškai atmosferinio slėgio sąlygomis. Sija armuojama lygios vielos pluoštais, kai vielų stiprumo klasė - Y1860S. Pluoštai inkaruojami betone vidiniais strypiniais inkarais. Vielų skaičius vielapluoštyje – 24. Sija armuojama ir paprastąja armatūra, kurios stiprumo klasė – S400. Sijos viršutinėje lentynoje ir sienelėje dedami suvirinti tinklai, apatinėje – suvirintas erdvinis strypynas.

Betono klasė – C55/67, charakteristinis gniuždomasis stipris $f_{ck}=55,0MPa$, charakteristinis tempiamasis stipris $f_{ctk0,05}= 3,0MPa$, vidutinis tempiamasis stipris $f_{ctm}=4,20MPa$, tamprumo modulis $E_{cm} = 38,0GPa$.

Įtempioji armatūra – Y1860S klasės viela, tempiamasis stipris $f_{pk} =1860 MPa$, charakteristinis stipris pagal sąlyginę takumo ribą $f_{p0,1k} =1600MPa$, skaičiuotinis stipris $f_{p0,1d} =1389MPa$, tamprumo modulis $E_{sp}=195GPa$; strypinė armatūra – S400 klasės, charakteristinis stipris $f_{yk} =400MPa$, skaičiuotinis stipris $f_{yd}=365MPa$, skersinės armatūros skaičiuotinis stipris $f_{ywd}=263MPa$, tamprumo modulis $E_s =200GPa$.

Skaičiuojamasis C55/67 klasės betono stiprumas:

$$f_{cd} = \alpha \cdot \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,9 \cdot 1,0 \cdot \frac{55}{1,5} = 33,0MPa; \quad (5.4.1)$$

Skaičiuojamasis betono C55/67 tempiamasis stipris:

$$f_{ctd} = \alpha \cdot \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} = 0,9 \cdot 1,0 \cdot \frac{3,0}{1,5} = 1,80MPa; \quad (5.4.2)$$

čia $\alpha = 0,9$, kai charakteristinis betono stipris $\leq 50 MPa$;

$$\alpha_{cc}=1,0;$$

$$\alpha_{ct}=1,0;$$

f_{ck} – charakteristinis betono gniuždomasis stipris, MPa ;

γ_c – patikimumo koeficientas.

Skaičiuojamasis armatūros S400 stiprumas:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{400}{1,11} = 365MPa; \quad (5.4.3)$$

čia f_{yk} – charakteristinis plieno stipris, MPa ;

γ_s – dalinis armatūros patikimumo koeficientas.

5.5. Išankstinis armatūros parinkimas

Sijos armatūros skaičiavimą atliekame pagal STR ir Venckevičius metodiką [1, 16]. Armatūra įtempinama į betoną mechaniniu būdu. Pradinius armatūros įtempius priimame:

$$\sigma_p = 0,7 \cdot f_{pk} = 0,7 \cdot 1600 = 1120 N / mm^2. \quad (5.5.1)$$

Išankstiniai įtempiai σ_{p1} ir σ_{p2} nustatomi įvertinant leistinus nuokrypius p taip, kad strypinei ir vielinei armatūrai būtų tenkinamos sąlygos:

$$\begin{aligned} \sigma_p + p &\leq f_{pk}; \rightarrow 1120 + 56,0 = 1176,0 < 1600,0MPa; \\ \sigma_p - p &\geq 0,3 \cdot f_{pk}; \rightarrow 1120 - 56,0 = 1064,0 > 480,0MPa. \end{aligned} \quad (5.5.2)$$

Nuokrypio p reikšmė lygi $0,05 \sigma_p$, kai armatūra įtempinama mechaniniu būdu. Priimame

1100 MPa.

Armatūros išankstinio įtempimo reikšmės dauginamos iš įtempimo tikslumo koeficiento γ_{sp} , nustatomo pagal formulę:

$$\begin{aligned}\gamma_{sp} &= 1 \pm \Delta\gamma_{sp}; \\ \gamma_{sp} &= 1 + 0,1 = 1,1; \\ \gamma_{sp} &= 1 - 0,1 = 0,9.\end{aligned}\tag{5.5.3}$$

„Pluso“ ženklas taikomas esant nepalankiai išankstinio įtempimo įtakai (t. y. jeigu šioje konstrukcijos darbo stadijoje arba nagrinėjamoje elemento dalyje išankstinis įtempimas mažina laikymo galią, pagreitina plyšių susidarymą ir pan.), „minuso“ ženklas – palankiai įtakai. Kai armatūra įtempinama mechaniniu būdu, $\Delta\gamma_{sp}$ reikšmės laikomos lygiomis 0,1.

Įvertinus išankstinio įtempimo tikslumą:

$$\sigma_p = 0,9 \cdot 1100 = 990,0 \text{ N/mm}^2.\tag{5.5.4}$$

Armatūros įtempimai MPa (N/mm^2), atsižvelgiant į jos takumo ribą, kai naudojama stiprioji viela:

$$\sigma_{s,\text{lim}} = f_{yd} + 400 - \sigma_p = 1389 + 400 - 990 = 799,0 \text{ N/mm}^2.\tag{5.5.5}$$

Iš formulės 5.5.1 nustatomas ribinis gniuždomosios betono zonos santykinis aukštis:

Betono gniuždomosios zonos charakteristika:

$$\omega = \alpha - 0,008 \cdot f_{cd} = 0,85 - 0,008 \cdot 33 = 0,586;\tag{5.5.6}$$

čia α – koeficientas įvertinantis betono rūšį (sunkiajam betonui - 0,85);

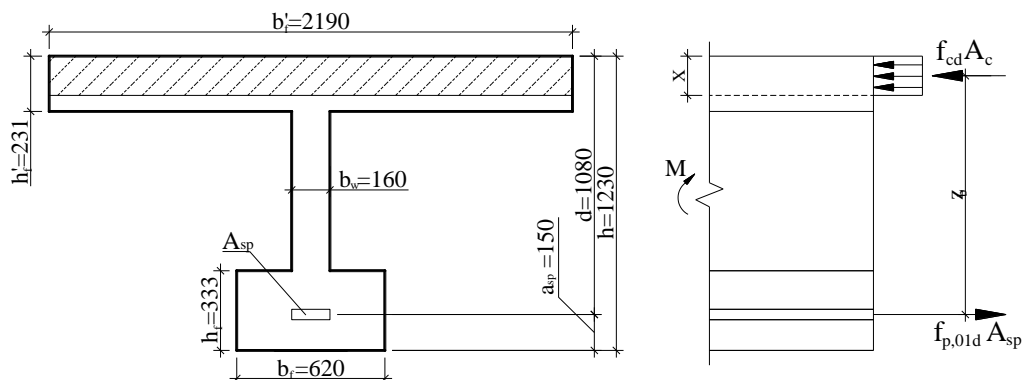
Ribinis elemento gniuždomosios zonos aukštis:

$$\xi_{\text{lim}} = \frac{\omega}{1 + \frac{\sigma_{s,\text{lim}}}{\sigma_{sc,\text{lim}}} \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right)} = \frac{0,586}{1 + \frac{799,0}{500} \cdot \left(1 - \frac{0,586}{1,1}\right)} = 0,335;\tag{5.5.7}$$

čia $\sigma_{s,\text{lim}}$ – armatūros įtempimai;

$\sigma_{sc,\text{lim}}$ – gniuždomosios zonos armatūros ribiniai įtempimai.

Sijos normalinio pjūvio stiprumo apskaičiavimo schema:



5.12 pav. Ekvivalentinis skerspjūvis ir pjūvio įtempimų būvio schema

Lenkimo momentas:

$$M_f' = f_{cd} \cdot b_f' \cdot h_f' \cdot (d - 0,5 \cdot h_f') = 33,0 \cdot 10^6 \cdot 2,19 \cdot 0,231 \cdot (1,08 - 0,5 \cdot 0,231) = 16110,07 \text{ kNm}; \quad (5.5.8)$$

$$M_{Ed} < M_f' : 4414,42 < 16110,07 \text{ kNm}.$$

Priimame, kad gniuždoma zona bus lentynoje, taigi:

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{f_{cd} \cdot b_f \cdot d^2} = \frac{4414,42 \cdot 10^3}{33 \cdot 10^6 \cdot 2,19 \cdot 1,08^2} = 0,0524. \quad (5.5.9)$$

Elemento gniuždomos zonos santykinis aukštis:

$$\xi = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu_{Ed}} = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot 0,0524} = 0,0539 < \xi_{lim} = 0,302. \quad (5.5.10)$$

Gniuždomos zonos aukštis bus:

$$x = \xi \cdot d = 0,0538 \cdot 1,08 = 0,058 \text{ m}; \quad (5.5.11)$$

Sąlyga $h_f' > x$ tenkinama.

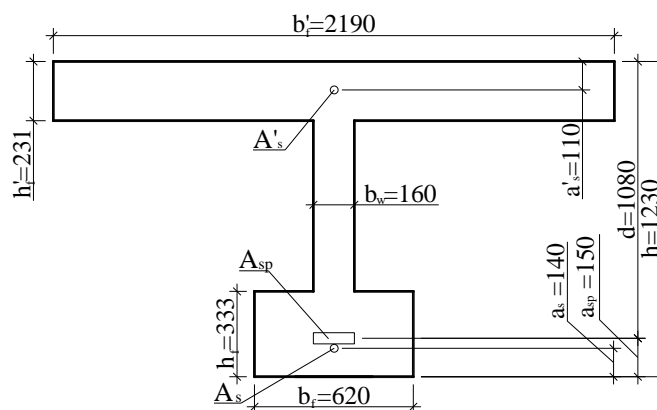
Darbo sąlygų koeficientas, įvertinantis įtemptos armatūros stiprumą aukščiau takumo ribos:

$$\gamma_{sy} = \eta - (\eta - 1) \cdot \left(\frac{2 \cdot \xi}{\xi_{lim}} - 1 \right) = 1,10 - (1,10 - 1) \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,0539}{0,335} - 1 \right) = 1,17 < 1,10. \quad (5.5.12)$$

Stipriajai vielai ir lynams ir $\eta = 1,10$, kai strypinės armatūros plieno takumo riba didesnė kaip 950 N/mm^2 . Priimame $\gamma_{sy} = 1,10$.

Išilginės įtemptosios armatūros reikiamas skerspjūvio plotas:

$$A_s = \frac{\eta \cdot f_{cd} \cdot \xi \cdot b_f \cdot d}{\gamma_{sy} \cdot f_{yd}} = \frac{1,1 \cdot 33,0 \cdot 10^6 \cdot 0,0539 \cdot 2,19 \cdot 1,08}{1,1 \cdot 1389 \cdot 10^6} = 30,29 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2. \quad (5.5.13)$$

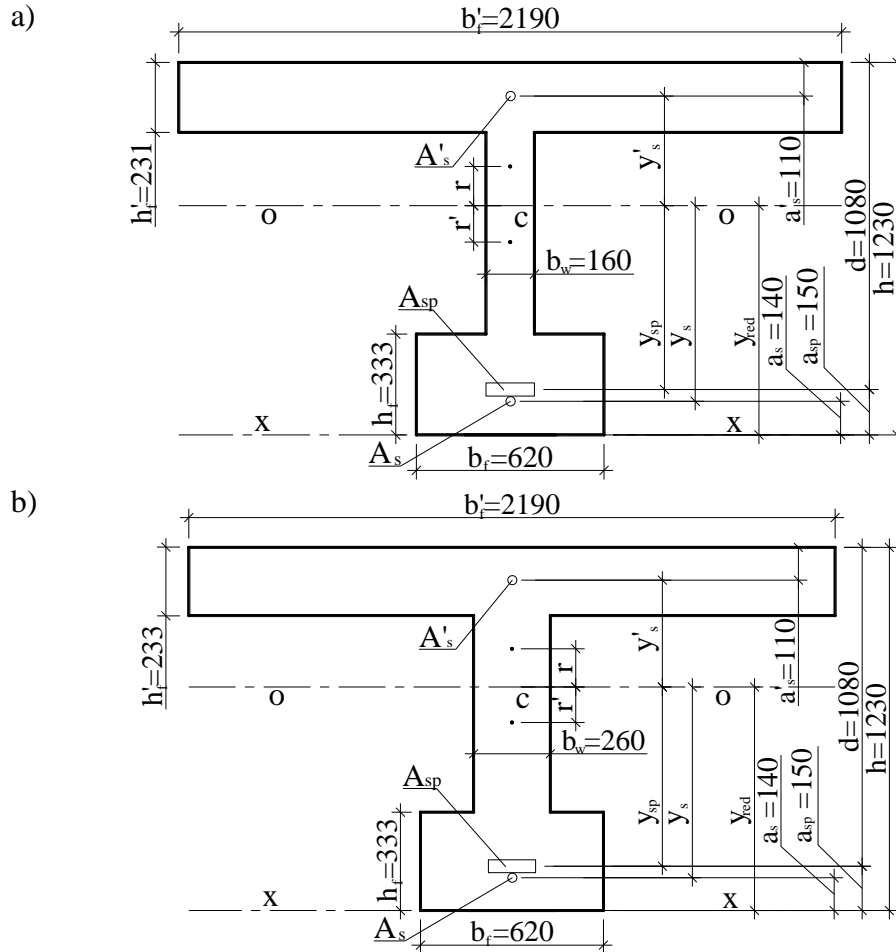


5.13 pav. Armatūros išdėstymas skerspjūvyje

Vielapluoštį sudaro 24 $\varnothing 5 \text{ mm}$ skersmens vielos, kurio skerspjūvio plotas: $A_s = 4,71 \text{ cm}^2$. Parenkame 7 vielapluoščius, kurių $A_{sp} = 32,97 \text{ cm}^2$. Viršutinė lentyna taip pat armuojama paprasta armatūra $28\varnothing 6 \text{ mm}$, $A_s' = 7,92 \text{ cm}^2$, apatinė lentyna $10\varnothing 10 \text{ mm}$, $A_s = 7,85 \text{ cm}^2$.

5.6. Skerspjūvio geometrinės charakteristikos

Sijos skerspjūvio geometrinės charakteristikos apskaičiuojamos naudojantis ekvivalentiško skerspjūvio schema 5.14 pav.



5.14 pav. Ekvivalentinių skerspjūvių schemas

- a) Pjūvis tarpatramio viduryje;
b) Pjūvis ties sijos atramą.

Apskaičiuotos sijos skerspjūvio geometrinės charakteristikos suvedamos į 5.2 lentelę:

5.2 lentelė. Sijos skerspjūvių geometrinės charakteristikos

Nr.	Rodiklis	Žymėjimas	Pjūvis tarpatramio viduryje (5.14 pav. a)	Pjūvis ties atrama (5.14 pav. b)	Matavimo vnt.
1.	Sijos skerspjūvio aukštis	h	1,23	1,23	m
2.	Sienelės plotis	b	0,16	0,26	m
3.	Viršutinės lentynos plotis	b'_f	2,19	2,19	m
4.	Viršutinės lentynos aukštis	h'_f	0,231	0,233	m
5.	Apatinės lentynos plotis	b_f	0,620	0,620	m
6.	Apatinės lentynos aukštis	h_f	0,333	0,333	m
7.	Viršutinės lentynos armatūros plotas	A'_s	7,92	7,92	cm^2
8.	Apatinės lentynos armatūros plotas	A_s	7,85	7,85	cm^2

5.2 lentelė. Sijos skerspjūvių geometrinės charakteristikos (lentelės tęsinys)

Nr.	Rodiklis	Žymėjimas	Pjūvis tarpatramio viduryje (5.14 pav. a)	Pjūvis ties atrama (5.14 pav. b)	Matavimo vnt.
9.	Įtemptosios armatūros skerspjūvio plotas	A_{sp}	32,97	32,97	cm^2
10.	Redukuotas skerspjūvio plotas	A_{red}	0,8445	0,9150	m^2
11.	Skerspjūvio statinis momentas x-x krašto atžvilgiu	S_{red}	0,6772	0,7254	m^3
12.	Redukuoto skerspjūvio svorio centro atstumas nuo x-x krašto	y_{red}	0,802	0,793	m
13.	Redukuoto skerspjūvio inercijos momentas o-o ašies atžvilgiu	$I_{red} (I_{eff})$	0,1524	0,1562	m^4
14.	Ekvivalentinio skerspjūvio atstumas nuo krašto iki skerspjūvio svorio centro	y'_s	0,318	0,327	m
15.	Ekvivalentinio skerspjūvio atstumas nuo krašto iki skerspjūvio svorio centro	y_{sp}	0,652	0,643	m
16.	Ekvivalentinio skerspjūvio atstumas nuo krašto iki skerspjūvio svorio centro	y_s	0,662	0,653	m
17.	Redukuoto skerspjūvio atsparumo momentai apatinio krašto atžvilgiu	$W_{red,b}$	0,1900	0,1970	m^3
18.	Redukuoto skerspjūvio atsparumo momentai viršutinio krašto atžvilgiu	$W'_{red,t}$	0,3559	0,3572	m^3
19.	Atstumas nuo redukuoto skerspjūvio svorio centro iki viršutinio branduolio taško	r	0,225	0,215	m
20.	Atstumas nuo redukuoto skerspjūvio svorio centro iki apatinio branduolio taško	r'	0,421	0,390	m

5.7. Armatūros išankstinių įtempių nuostoliai

Armatūra įtempama į atramas mechaniniu būdu. Betonas kietinamas šūtinant.

Pirminiai nuostoliai:

- Armatūros išankstinių įtempių nuostoliai dėl relaksacijos:

$$\sigma_{los}^1 = 0MPa; \quad (5.7.1)$$

- Nuostoliai dėl temperatūrų skirtumo:

$$\sigma_{los}^2 = 0MPa; \quad (5.7.2)$$

- Tempimo įrenginių inkarų deformacijos:

$$\sigma_{los}^3 = \left(\frac{\Delta l_1 + \Delta l_2}{l} \right) \cdot E_s = \left(\frac{1+1}{24000} \right) \cdot 1,95 \cdot 10^5 = 16,25MPa; \quad (5.7.3)$$

čia $\Delta l_1 = 1 \text{ mm}$ – presuotų poveržlių ir plokštelių tarp inkarų ir betono elementų apgnūždymas;

$\Delta l_2 = 1 \text{ mm}$ – inkarų, griebtuvų, veržlių ir pan. deformacijos;

l – įtempiamo strypo (elemento) ilgis, mm .

- Armatūros trintis su kanalų sienelėmis arba konstrukcijų betono paviršiumi:

$$\sigma_{los}^4 = 0MPa; \quad (5.7.4)$$

- Plieninio klojinio, gaminant iš anksto įtemptąsias gelžbetonines konstrukcijas, deformacija:

$$\sigma_{los}^5 = 0MPa. \quad (5.7.5)$$

Nuostoliai dėl greitai pasireiškiančio betono valkšnumo lygūs 0 pagal STR 2.05.05:2005 9 lentelės 6 pozicijos nurodymus:

$$\sigma_{los}^6 = 0MPa. \quad (5.7.6)$$

Suminiai pirminiai nuostoliai:

$$\sigma_{los1} = \sum \sigma_{los}^i = 16,25MPa. \quad (5.7.7)$$

Antriniai nuostoliai:

- Armatūros įtempių relaksacija:

$$\sigma_{los}^7 = \left(0,22 \cdot \frac{\sigma_{cp1}}{f_{cp}} - 0,1 \right) \cdot \sigma_{sp} = \left(0,22 \cdot \frac{1100}{1860} - 0,1 \right) \cdot 1083,75 = 32,63MPa; \quad (5.7.8)$$

- Klasės C55/67 betono susitraukimo nuostoliai, kai betonas šildomas esant atmosferiniam slėgiui, yra $\sigma_{los}^8 = 40MPa$.
- Betono valkšnumas. Apskaičiuojant armatūros įtempimo nuostolius dėl valkšnumo, reikia žinoti įtempius betone ties A_{sp} armatūra, atmetus nuostolius pagal STR 2.05.05:2005 9 lentelės 1–6 poz., t. y. pagal apspaudimo jėgą $P_{m,I}$:

$$P_{m,I} = \gamma_{sp} \cdot A_{sp} \cdot (\sigma_p - \sigma_{los}^3) = 1,1 \cdot 32,97 \cdot 10^{-4} \cdot (1100 - 16,25) = 3,93044MN = 3930,44kN. \quad (5.7.8)$$

Lenkimo momentas sijos viduryje nuo savojo svorio, kai sija yra sandėliuojama:

$$M_{s2,ser} = \frac{g \cdot l^2}{8} = \frac{17,88 \cdot 22,4^2}{8} = 1121,43kNm. \quad (5.7.9)$$

Išankstiniai įtempimai betone armatūros lygyje, sukelti apgniuždymo, įvertinant pirminius nuostolius:

$$\sigma_{cp,1} = \frac{P_{ml}}{A_{red}} + \frac{P_{ml} \cdot e_{0p1} \cdot (y_{red} - a_{sp})}{I_{red}} - \frac{M_{s.s} \cdot (y_{red} - a_{sp})}{I_{red}} = \frac{3,93044}{0,8445} + \frac{3,93044 \cdot 0,652 \cdot (0,802 - 0,15)}{0,1524} - \frac{1,12143 \cdot (0,802 - 0,15)}{0,1524} = 10,82MPa; \quad (5.7.10)$$

Kai $\frac{\sigma_{cp,1}}{f_{cp}} = \frac{10,82}{44,0} = 0,246$, kai $f_{cp} = 0,8 \cdot f_{ck} = 0,8 \cdot 55 = 44,0 N/mm^2$.

$$\sigma_{cp,1} = 10,82 \text{ MPa} < 0,6 \cdot f_{cp} = 0,6 \cdot 44 = 26,40 \text{ MPa}.$$

Nuostoliai dėl betono valkšnumo:

$$\sigma_{los}^9 = 150 \cdot \chi \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{cp}} = 150 \cdot 0,85 \cdot \frac{10,82}{44,0} = 31,37 \text{ MPa}. \quad (5.7.11)$$

- Betono glemžimas po spiralėmis arba žiedinėmis armatūros vijomis:

$$\sigma_{los}^{10} = 0 \text{ MPa}; \quad (5.7.12)$$

- Sandūrų tarp blokų apgniūždymo deformacijos:

$$\sigma_{los}^{11} = \frac{n \cdot \Delta l}{l} = \frac{4 \cdot 0,3}{24000} \cdot 195000 = 9,75 \text{ MPa}. \quad (5.7.13)$$

Suminiai antriniai nuostoliai:

$$\sigma_{los2} = \sum \sigma_{los}^i = 32,63 + 40,0 + 31,37 + 9,75 = 113,75 \text{ MPa}. \quad (5.7.14)$$

Suminiai nuostoliai:

$$\sigma_{los1,2} = \sigma_{los1} + \sigma_{los2} = 16,25 + 113,75 = 130,0 \text{ MPa}. \quad (5.7.15)$$

Išankstiniai įtempimai armatūroje įvertinus suminius nuostolius:

$$\sigma_{sp2} = \sigma_{sp} - \sigma_{los1,2} = 1100 - 130 = 970,0 \text{ MPa}. \quad (5.7.16)$$

5.8. Viršutinės zonos atsparumas pleišėjimui

Apgniūždymo jėga, įvertinus pirminius nuostolius ir $\gamma_{sp} = 1,10$, $P_{ml} = 3,93044 \text{ MN}$.

Lenkimo momentas, kai $\gamma_d = 1$ ir $\gamma_f = 1$, $M_{s2,ser} = 1,12143 \text{ MNm}$.

Plyšiai neatsiras, jei bus tenkinama sąlyga:

$$P_{ml} \cdot (e_{op1} - \varphi \cdot r) - M_{s2,ser} \leq f_{ctp} \cdot W_{pl}'. \quad (5.8.1)$$

Kai $f_{cp} = 44,0 \text{ MPa}$:

Įtempimai betone ties sijos apatiniu kraštu:

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{P_{ml}}{A_{red}} + \frac{P_{ml} \cdot e_{op1} - M_{s2,ser}}{W_{red}} = \frac{3,93044}{0,8445} + \\ &+ \frac{3,93044 \cdot 0,652 - 1,12143}{0,190} = 12,24 \text{ MPa}. \end{aligned} \quad (5.8.2)$$

Pagal formulę:

$$\varphi = 1,6 - \frac{\sigma_c}{f_{ck}} = 1,6 - \frac{12,24}{55,0} = 1,38 > 1,0; \text{ imame } \varphi = 1,0; \quad (5.8.3)$$

$$r_1 = \varphi \cdot \frac{W_{red}'}{A_{red}} = 1,0 \cdot \frac{0,3559}{0,8445} = 0,421 \text{ m}. \quad (5.8.4)$$

Pagal STR 2.05.05:2005 5 priedo 1 lentelę, kai yra nesimetris dvitėjis, tai $\gamma=1,25$:

$$\frac{b'_f}{b_w} = \frac{2,19}{0,16} = 13,70 > 8; \quad \frac{h_f}{h} = \frac{0,333}{1,23} = 0,27 < 0,3. \quad (5.8.5)$$

Tuomet plastinis atsparumo momentas:

$$W'_{pl} = \gamma \cdot W'_{red} = 1,25 \cdot 0,3559 = 0,4449 m^3. \quad (5.8.6)$$

Tikriname viršutinio krašto pleišėjimą;

$$\begin{aligned} P_{ml} \cdot (e_{0pl} - r_1) - M_{s2,ser} &= 3,93044 \cdot (0,652 - 0,421) - \\ &- 1,12143 = -0,2135 MNm < 1,3347 MNm; \\ f_{ctk} \cdot W'_{pl} &= 3,0 \cdot 0,4449 = 1,3347 MNm. \end{aligned} \quad (5.8.7)$$

Vadinasi viršutinėje zonoje plyšiai neatsivers.

Pjūvis ties atrama. Lenkimo momentas, sukeltas sijos savojo svorio,

$$M_{s2,ser} = -0,5 \cdot g_{s,k} \cdot l_1^2 = -0,5 \cdot 17,88 \cdot 0,80^2 = -5,722 kNm.$$

Dydis $e_{op,1} = y_{red} - a_{sp} = 0,802 - 0,150 = 0,652 m$.

Įtempimai betone:

$$\begin{aligned} \sigma_{cp} &= \frac{P_{ml}}{A_{red}} + \frac{P_{ml} \cdot (y_{red} - a_{sp}) + M_{s2,ser}}{W_{red}} = \frac{3,93044}{0,9150} + \\ &\frac{3,93044 \cdot (0,793 - 0,150) + 0,005722}{0,1970} = 17,15 MPa; \end{aligned} \quad (5.8.8)$$

$$\varphi = 1,6 - \frac{\sigma_c}{f_{ck}} = 1,6 - \frac{17,15}{55,0} = 1,28 > 1,0; \text{ imame } \varphi = 1,0; \quad (5.8.9)$$

$$r_1 = \varphi \cdot \frac{W'_{red}}{A_{red}} = 1,0 \cdot \frac{0,3572}{0,9150} = 0,390 m. \quad (5.8.10)$$

Kai yra nesimetris dvitėjis, tai $\gamma=1,25$:

$$\frac{b'_f}{b_w} = \frac{2,19}{0,26} = 8,42 > 8; \quad \frac{h_f}{h} = \frac{0,333}{1,23} = 0,27 < 0,3. \quad (5.8.11)$$

Tuomet plastinis atsparumo momentas:

$$W'_{pl} = \gamma \cdot W'_{red} = 1,25 \cdot 0,3572 = 0,4465 m^3. \quad (5.8.12)$$

Tikriname viršutinio krašto pleišėjimą;

$$\begin{aligned} P_{ml} \cdot (e_{0pl} - r_1) + M_{s2,ser} &= 3,93044 \cdot (0,643 - 0,390) + \\ &+ 0,005722 = 1,00012 MNm < 1,3395 MNm \\ f_{ctk} \cdot W'_{pl} &= 3,0 \cdot 0,4465 = 1,3395 MNm. \end{aligned} \quad (5.8.13)$$

Viršutinėje zonoje, ties sijos atrėmimo vieta, plyšiai taip pat neatsivers.

5.9. Atsparumas normaliniams plyšiams

Normaliniai plyšiai sijos apatinės zonos krašte neatsivers, jei bus tenkinama sąlyga:

$$M \leq M_{crc} = f_{ctk} \cdot W_{pl} + P_{mII} \cdot (e_{op} + \varphi \cdot r_2) \quad (5.9.1)$$

Pjūvis sijos tarpatramio viduryje: $W_{red}^b = 0,190 m^3$; $r' = 0,225 m$.

Pagal STR 2.05.05:2005 5 priedo 1 lentelę, kai yra nesimetrinis dvitėjis, tai $\gamma = 1,25$:

$$\frac{b_f'}{b_w} = \frac{2,19}{0,16} = 13,70 > 8; \quad \frac{h_f}{h} = \frac{0,333}{1,23} = 0,27 < 0,3. \quad (5.9.2)$$

Tuomet plastinis atsparumo momentas:

$$W_{pl}' = \gamma \cdot W_{red}^b = 1,25 \cdot 0,190 = 0,2375 m^3; \quad (5.9.2)$$

$$P_{m,II} = \gamma_{sp} \cdot A_{sp} \cdot \sigma_{sp2} = 1,1 \cdot 32,97 \cdot 10^{-4} \cdot 970,0 = 3,51790 MN = 3517,90 kN; \quad (5.9.3)$$

$$e_{op2} = e_{op1} = y_{red} - a_{sp} = 0,802 - 0,15 = 0,652 m. \quad (5.9.4)$$

Maksimalus lenkimo momentas: $M_{max} = M'_{ser} = 3928,78 kNm$.

Įtempimai betone ties viršutiniu kraštu:

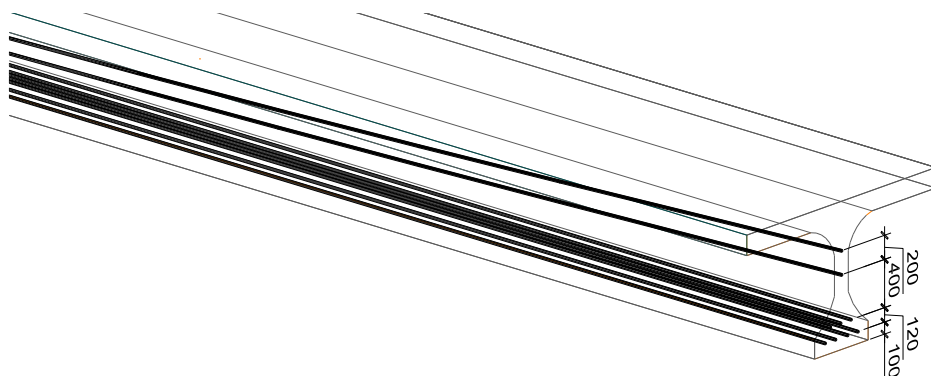
$$\sigma_c = \frac{P_{mII}}{A_{red}} + \frac{M_{ser} - P_{mII} \cdot e_{op2}}{W_{red}^b} = \frac{3,51790}{0,8445} + \frac{3,92878 - 3,51790 \cdot 0,652}{0,190} = 12,77 MPa; \quad (5.9.5)$$

$$\varphi = 1,6 - \frac{\sigma_c}{f_{ck}} = 1,6 - \frac{12,77}{55,0} = 1,36 > 1,0; \text{ imame } \varphi = 1,0; \quad (5.9.6)$$

$$r_2 = \varphi \cdot \frac{W_{red}^b}{A_{red}} = 1,0 \cdot \frac{0,190}{0,8445} = 0,225 m; \quad (5.9.7)$$

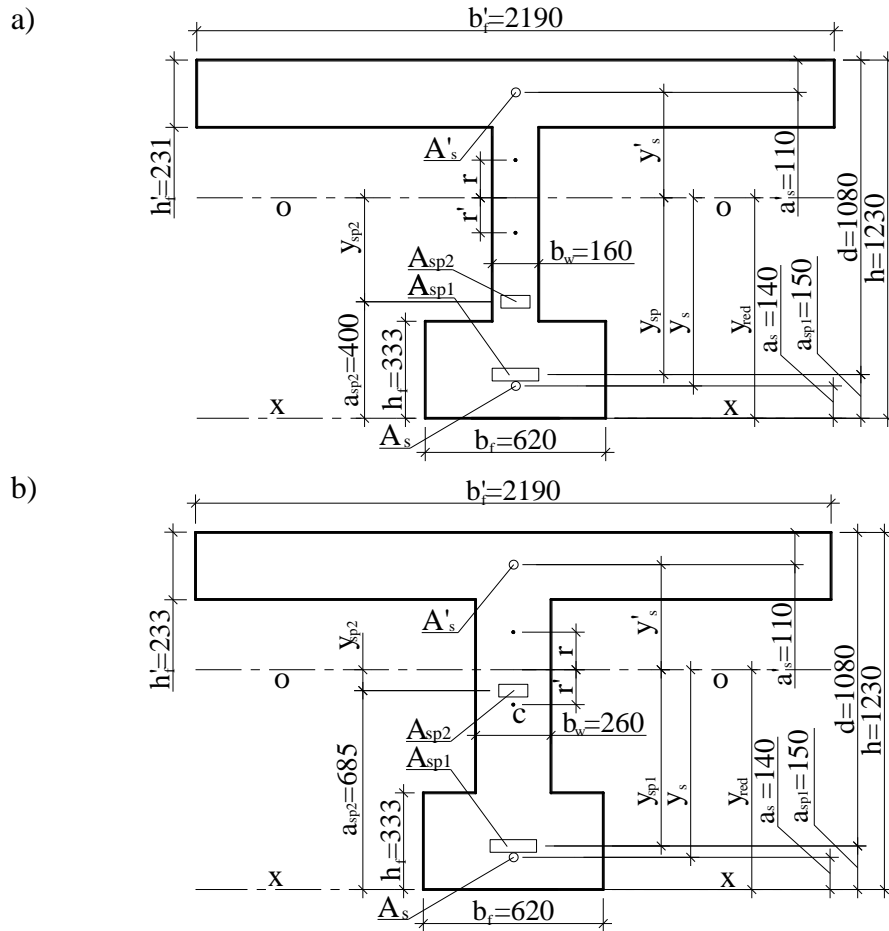
$$M_{crc} = f_{ctk} \cdot W_{pl} + P_{mII} \cdot (e_{op} + r_2) = 3,0 \cdot 0,2375 + 3,51790 \cdot (0,652 + 0,225) = 3,79769 MNm = 3797,69 kNm < M_{ser} = 3928,78 kNm. \quad (5.9.8)$$

Kaip matome iš sąlygos, kad plyšiai atsivers. Pagal STR 2.05.05:2005 5 priedo 2 lentelę agresyvioje aplinkoje iš anksto įtemptiems elementams plyšiai yra neleistini, todėl reikia padidinti armatūros kiekį. Pridėsime papildomai du vielapluoščius ($9,42 cm^2$), kurie įtempiami kreivine forma:



5.15 pav. Įtemptosios armatūros išdėstymas sijos gale

Ekvivalentinių skerspjūvių schemas pridėjus papildomos įtemptosios armatūros:



5.16 pav. Ekvivalentinių skerspjūvių schemas
a) Pjūvis tarpatramio viduryje;
b) Pjūvis ties sijos atrama.

Pastaba: toliau įtemptosios armatūros A_{sp} kiekį žymėsime A_{sp1} , o papildomai pridėtą žymėsime A_{sp2} .

Perskaičiuojame sijos geometrines charakteristikas įvertinant papildomą armatūros kiekį.

5.3 lentelė. Sijos skerspjūvių geometrinės charakteristikos

Nr.	Rodiklis	Žymėjimas	Pjūvis tarpatramio viduryje (5.16 pav. a)	Pjūvis ties atrama (5.16 pav. b)	Matavimo vnt.
1.	Sijos skerspjūvio aukštis	h	1,23	1,23	m
2.	Sienuelės plotis	b	0,16	0,26	m
3.	Viršutinės lentynos plotis	b'_f	2,19	2,19	m
4.	Viršutinės lentynos aukštis	h'_f	0,231	0,233	m
5.	Apatinės lentynos plotis	b_f	0,620	0,620	m
6.	Apatinės lentynos aukštis	h_f	0,333	0,333	m
7.	Viršutinės lentynos armatūros plotas	A'_s	7,92	7,92	cm^2

5.3 lentelė. Sijos skerspjūvių geometrinės charakteristikos (lentelės tęsinys)

Nr.	Rodiklis	Žymėjimas	Pjūvis tarpatriamio viduryje (5.16 pav. a)	Pjūvis ties atrama (5.16 pav. b)	Matavimo vnt.
8.	Apatinės lentynos armatūros plotas	A_s	7,85	7,85	cm^2
9.	Įtemptosios armatūros skerspjūvio plotas	A_{sp1}	32,97	32,97	cm^2
10.	Įtemptosios armatūros skerspjūvio plotas	A_{sp2}	9,42	9,42	cm^2
11.	Redukuotas skerspjūvio plotas	A_{red}	0,8534	0,9198	m^2
12.	Skerspjūvio statinis momentas x-x krašto atžvilgiu	S_{red}	0,6832	0,7287	m^3
13.	Redukuoto skerspjūvio svorio centro atstumas nuo x-x krašto	y_{red}	0,801	0,792	m
14.	Redukuoto skerspjūvio inercijos momentas o-o ašies atžvilgiu	$I_{red} (I_{eff})$	0,1525	0,1562	m^4
15.	Ekvivalentinio skerspjūvio atstumas nuo krašto iki skerspjūvio svorio centro	y'_s	0,320	0,328	m
16.	Ekvivalentinio skerspjūvio atstumas nuo krašto iki skerspjūvio svorio centro	y_{sp1}	0,651	0,642	m
17.	Ekvivalentinio skerspjūvio atstumas nuo krašto iki skerspjūvio svorio centro	y_{sp2}	0,401	0,107	m
18.	Ekvivalentinio skerspjūvio atstumas nuo krašto iki skerspjūvio svorio centro	y_s	0,661	0,652	m
19.	Redukuoto skerspjūvio atsparumo momentai apatinio krašto atžvilgiu	$W_{red,b}$	0,1906	0,1972	m^3
20.	Redukuoto skerspjūvio atsparumo momentai viršutinio krašto atžvilgiu	$W'_{red,t}$	0,3552	0,3568	m^3
21.	Atstumas nuo redukuoto skerspjūvio svorio centro iki viršutinio branduolio taško	r	0,223	0,214	m
22.	Atstumas nuo redukuoto skerspjūvio svorio centro iki apatinio branduolio taško	r'	0,416	0,3879	m

Reikia įvertinti papildomai pridėtos armatūros nuostolius dėl trinties:

- Armatūros trintis su betono paviršiumi:

$$\sigma_{los}^4 = \sigma_p \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{wx+\delta\Theta}}\right) = 1100 \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{0.1+0.55 \cdot 0,035}}\right) = 20,50 MPa; \quad (5.9.9)$$

čia e – natūrinio logaritmo pagrindas;

w ir δ – koeficientai;

x – atstumas nuo įtempiamojo įrenginio iki skaičiuojamojo pjūvio, m ;

Θ – suminis armatūros ašies posūkio kampas, rad ;

σ_p – nepaisant nuostolių.

Pirminiai nuostoliai dviem vielapluoščiams:

$$\sigma_{los1} = \sum \sigma_{los}^i = 16,25 + 20,50 = 36,75 MPa. \quad (5.9.10)$$

Antriniai nuostoliai:

- Armatūros įtempių relaksacija septyniems vielapluoščiams:

$$\sigma_{los}^7 = \left(0,22 \cdot \frac{\sigma_{cp1}}{f_{cp}} - 0,1 \right) \cdot \sigma_{sp} = \left(0,22 \cdot \frac{1100}{1860} - 0,1 \right) \cdot 1083,75 = 32,63 MPa; \quad (5.9.11)$$

- Armatūros įtempių relaksacija dviem vielapluoščiams:

$$\sigma_{los}^7 = \left(0,22 \cdot \frac{\sigma_{cp1}}{f_{cp}} - 0,1 \right) \cdot \sigma_{sp} = \left(0,22 \cdot \frac{1100}{1860} - 0,1 \right) \cdot 1063,25 = 32,01 MPa; \quad (5.9.12)$$

- Sunkiojo betono C55/67 klasės susitraukimo nuostoliai, kai betonas šildomas esant atmosferiniam slėgiui yra $\sigma_{los}^8 = 40 MPa$.
- Betono valkšnumas. Apskaičiuojant armatūros įtempimo nuostolius dėl valkšnumo, reikia žinoti įtempius betone ties A_{sp} armatūra, atmetus nuostolius pagal STR 2.05.05:2005 9 lentelės 1–6 poz., t. y. pagal apspaudimo jėgą $P_{m.I}$:

Septyniems vielapluoščiams:

$$P_{m.I}^1 = \gamma_{sp} \cdot A_{sp1} \cdot (\sigma_p - \sigma_{los}^3) = 1,1 \cdot 32,97 \cdot 10^{-4} \cdot (1100 - 16,25) = 3,93044 MN = 3930,44 kN. \quad (5.9.13)$$

Dviems vielapluoščiams:

$$P_{m.I}^2 = \gamma_{sp} \cdot A_{sp2} \cdot (\sigma_p - \sigma_{los}^3 - \sigma_{los}^4) = 1,1 \cdot 9,42 \cdot 10^{-4} \cdot (1100 - 16,25 - 20,50) = 1,10174 MN = 1101,74 kN. \quad (5.9.14)$$

Lenkimo momentas sijos viduryje nuo savojo svorio, kai sija yra sandėliuojama:

$$M_{s2,ser} = \frac{g \cdot l^2}{8} = \frac{17,88 \cdot 22,4^2}{8} = 1121,43 kNm. \quad (5.9.15)$$

Išankstiniai įtempimai betone armatūros lygyje, sukelti apgniūzdymo, įvertinant pirminius nuostolius:

$$\begin{aligned} \sigma_{cp,1} &= \frac{P_{ml}^1 + P_{ml}^2}{A_{red}} + \frac{P_{ml}^1 \cdot e_{0p1} \cdot (y_{red} - a_{sp1}) + P_{ml}^2 \cdot e_{0p2} \cdot (y_{red} - a_{sp2})}{I_{red}} - \frac{M_{s.s} \cdot (y_{red} - a_{sp})}{I_{red}} = \\ &= \frac{3,93044 + 1,10174}{0,8534} + \frac{3,93044 \cdot 0,651 \cdot (0,801 - 0,15) + 1,10174 \cdot 0,401 \cdot (0,801 - 0,40)}{0,1525} - \frac{1,12143 \cdot (0,801 - 0,210)}{0,1525} = 13,64 MPa. \end{aligned} \quad (5.9.16)$$

Kai $\frac{\sigma_{cp,1}}{f_{cp}} = \frac{13,64}{44,0} = 0,310$, kai $f_{cp} = 0,8 \cdot f_{ck} = 0,8 \cdot 55 = 44,0 N/mm^2$.

$$\sigma_{cp,1} = 13,64 MPa < 0,6 \cdot f_{cp} = 0,6 \cdot 44 = 26,40 MPa.$$

$$\sigma_{los}^9 = 150 \cdot \chi \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{cp}} = 150 \cdot 0,85 \cdot \frac{13,64}{44,0} = 39,52 MPa; \quad (5.9.17)$$

- Betono glemžimas po spiralėmis arba žiedinėmis armatūros vijomis:

$$\sigma_{los}^{10} = 0 MPa; \quad (5.9.18)$$

- Sandūrų tarp blokų apgniuždymo deformacijos:

$$\sigma_{los}^{11} = \frac{n \cdot \Delta l}{l} = \frac{4 \cdot 0,3}{24000} \cdot 195000 = 9,75 MPa. \quad (5.9.19)$$

Suminiai antriniai nuostoliai septyniems vielapluoščiams:

$$\sigma_{los2}^1 = \sum \sigma_{los}^i = 32,63 + 40,0 + 39,52 + 9,75 = 121,90 MPa. \quad (5.9.20)$$

Suminiai antriniai nuostoliai dviems vielapluoščiams:

$$\sigma_{los2}^2 = \sum \sigma_{los}^i = 32,01 + 40,0 + 39,52 + 9,75 = 121,28 MPa. \quad (5.9.21)$$

Suminiai nuostoliai septyniems vielapluoščiams:

$$\sigma_{los1,2} = \sigma_{los1} + \sigma_{los2} = 16,25 + 121,90 = 138,15 MPa. \quad (5.9.22)$$

Suminiai nuostoliai dviems vielapluoščiams:

$$\sigma_{los1,2} = \sigma_{los1} + \sigma_{los2} = 36,75 + 121,28 = 158,03 MPa. \quad (5.9.23)$$

Viršutinės zonos atsparumas pleišėjimui:

Apgniuždymo jėga, įvertinus pirminius nuostolius ir $\gamma_{sp} = 1,10$,
 $P_{m,l}^1 = 3,93044 MN$ $P_{m,l}^2 = 1,10174 MN$. Lenkimo momentas, kai $\gamma_d = 1$ ir $\gamma_f = 1$,
 $M_{s2,ser} = 1,12143 MNm$.

Plyšių neatsiras, jei bus tenkinama sąlyga:

$$P_{ml} \cdot (e_{op1} - \varphi \cdot r) - M_{s2,ser} \leq f_{ctp} \cdot W_{pl}'; \quad (5.9.24)$$

Kai $f_{cp} = 44,0 MPa$:

Įtempimai betone ties sijos apatiniu kraštu:

$$\sigma_c = \frac{P_{ml}^1 + P_{ml}^2}{A_{red}} + \frac{(P_{ml}^1 \cdot e_{0p1} + P_{ml}^2 \cdot e_{0p2}) - M_{s2,ser}}{W_{red}} = \frac{3,93044 + 1,10174}{0,8534} + \frac{(3,93044 \cdot 0,651 + 1,10174 \cdot 0,401) - 1,12143}{0,1906} = 15,76 MPa. \quad (5.9.25)$$

Pagal formulę:

$$\varphi = 1,6 - \frac{\sigma_c}{f_{ck}} = 1,6 - \frac{15,76}{55,0} = 1,31 > 1,0; \text{ imame } \varphi = 1,0. \quad (5.9.26)$$

$$r_1 = \varphi \cdot \frac{W_{red}'}{A_{red}} = 1,0 \cdot \frac{0,3552}{0,8534} = 0,416 m. \quad (5.9.27)$$

Kai yra nesimetrinis dvitėjis, tai $\gamma=1,25$:

$$\frac{b'_f}{b_w} = \frac{2,19}{0,16} = 13,70 > 8; \quad \frac{h_f}{h} = \frac{0,333}{1,23} = 0,27 < 0,3. \quad (5.9.28)$$

Tuomet plastinis atsparumo momentas:

$$W'_{pl} = \gamma \cdot W'_{red} = 1,25 \cdot 0,3552 = 0,4440 m^3. \quad (5.9.29)$$

Tikriname viršutinio krašto pleišėjimą;

$$P^1_{ml} \cdot (e_{0p1} - r_1) + P^2_{ml} \cdot (e_{0p2} - r_1) - M_{s2,ser} = 3,93044 \cdot (0,652 - 0,421) + \\ + 1,10174 \cdot (0,401 - 0,421) - 1,12143 = -0,23553 MNm; \quad (5.9.30)$$

$$f_{ctk} \cdot W'_{pl} = 3,0 \cdot 0,4449 = 1,3347 \text{ MNm}.$$

Vadinasi viršutinėje zonoje plyšių neatsivers.

Pjūvis ties atrama. Lenkimo momentas, sukeltas sijos savojo svorio:

$$M_{s2,ser} = -0,5 \cdot (g_{s,k} + g_{i,imp.}) \cdot l_1^2 = -0,5 \cdot (17,88 + 5,50) \cdot 0,80^2 = -7,48 kNm.$$

Dydis $e_{op,1} = y_{red} - a_{sp} = 0,802 - 0,150 = 0,652 m$.

Įtempimai betone:

$$\sigma_c = \frac{P^1_{ml} + P^2_{ml}}{A_{red}} + \frac{(P^1_{ml} \cdot e_{0p1} + P^2_{ml} \cdot e_{0p2}) + M_{s2,ser}}{W_{red}} = \frac{3,93044 + 1,10174}{0,9198} + \\ + \frac{(3,93044 \cdot 0,642 + 1,10110 \cdot 0,107) + 0,00748}{0,1972} = 18,90 MPa; \quad (5.9.31)$$

$$\varphi = 1,6 - \frac{\sigma_c}{f_{ck}} = 1,6 - \frac{18,90}{55,0} = 1,25 > 1,0; \text{ imame } \varphi = 1,0; \quad (5.9.32)$$

$$r_1 = \varphi \cdot \frac{W'_{red}}{A_{red}} = 1,0 \cdot \frac{0,3568}{0,9198} = 0,388 m. \quad (5.9.33)$$

Kai yra nesimetrinis dvitėjis, tai $\gamma=1,25$:

$$\frac{b'_f}{b_w} = \frac{2,19}{0,26} = 8,42 > 8; \quad \frac{h_f}{h} = \frac{0,333}{1,23} = 0,27 < 0,3. \quad (5.9.34)$$

Tuomet plastinis atsparumo momentas:

$$W'_{pl} = \gamma \cdot W'_{red} = 1,25 \cdot 0,3568 = 0,4460 m^3. \quad (5.9.35)$$

Tikriname viršutinio krašto pleišėjimą;

$$P^1_{ml} \cdot (e_{0p1} - r_1) + P^2_{ml} \cdot (e_{0p2} - r_1) - M_{s2,ser} = 3,93044 \cdot (0,642 - 0,388) - \\ - 1,10174 \cdot (0,107 - 0,388) + 0,00748 = 0,69622 MNm; \quad (5.9.36)$$

$$f_{ctk} \cdot W'_{pl} = 3,0 \cdot 0,4460 = 1,3380 \text{ MNm}.$$

Vadinasi viršutinėje zonoje, ties sijos atrėmimo vieta, plyšių nebus.

Atsparumas normaliniams plyšiams:

Pjūvis sijos tarpatramio viduryje: $W_{red}^b = 0,1915 m^3$; $r = 0,224 m$.

Kai yra nesimetrinis dvitėjis, tai $\gamma = 1,25$:

$$\frac{b_f'}{b_w} = \frac{2,19}{0,16} = 13,70 > 8; \quad \frac{h_f}{h} = \frac{0,333}{1,23} = 0,27 < 0,3. \quad (5.9.37)$$

Tuomet plastinis atsparumo momentas:

$$W_{pl}' = \gamma \cdot W_{red}^b = 1,25 \cdot 0,1915 = 0,2394 m^3; \quad (5.9.38)$$

$$P_{m,II}^1 = \gamma_{sp} \cdot A_{sp} \cdot \sigma_{sp2} = 1,1 \cdot 32,97 \cdot 10^{-4} \cdot 961,85 = 3,48834 MN = 3488,34 kN; \quad (5.9.39)$$

$$P_{m,II}^2 = \gamma_{sp} \cdot A_{sp} \cdot \sigma_{sp2} = 1,1 \cdot 9,42 \cdot 10^{-4} \cdot 941,97 = 0,97607 MN = 976,07 kN; \quad (5.9.40)$$

$$e_{op1} = y_{red} - a_{sp} = 0,801 - 0,15 = 0,651 m; \quad (5.9.41)$$

$$e_{op2} = y_{red} - a_{sp} = 0,801 - 0,40 = 0,401 m. \quad (5.9.42)$$

Maksimalus lenkimo momentas: $M_{max} = M'_{ser} = 3928,78 kNm$.

Įtempimai betone ties viršutiniu kraštu:

$$\sigma_c = \frac{P_{m,II}^1 + P_{m,II}^2}{A_{red}} + \frac{M_{ser} - P_{m,II}^1 \cdot e_{op1} - P_{m,II}^2 \cdot e_{op2}}{W_{red}^b} = \frac{3,48834}{0,8534} + \frac{3,92878 - 3,48834 \cdot 0,651 - 0,97607 \cdot 0,401}{0,1915} = 10,70 MPa; \quad (5.9.43)$$

$$\varphi = 1,6 - \frac{\sigma_c}{f_{ck}} = 1,6 - \frac{10,70}{55,0} = 1,40 > 1,0; \text{ imame } \varphi = 1,0; \quad (5.9.44)$$

$$r_2 = \varphi \cdot \frac{W_{red}^b}{A_{red}} = 1,0 \cdot \frac{0,1915}{0,8534} = 0,224 m; \quad (5.9.45)$$

$$M_{crc} = f_{ctk} \cdot W_{pl} + P_{m,II}^1 \cdot (e_{op1} + r_2) + P_{m,II}^2 \cdot (e_{op2} + r_2) = 3,0 \cdot 0,2394 + 3,48834 \cdot (0,651 + 0,224) + 0,97607 \cdot (0,401 + 0,224) = 4,38024 MNm = 4380,24 kNm > M_{ser} = 3928,78 kNm. \quad (5.9.46)$$

Normaliniai plyšiai neatsivers.

5.10. Stiprumas normaliniame pjūvyje

Tiksli ribinio santykinio gniuždomosios betono zonos aukščio reikšmė įvertinant išankstinius įtempimus armatūroje:

$$\sigma_{s,lim} = f_{yd} + 400 - \sigma_p = 1389 + 400 - 961,85 = 827,15 N/mm^2. \quad (5.10.1)$$

Ribinis elemento gniuždomosios zonos aukštis:

$$\xi_{lim} = \frac{\omega}{1 + \frac{\sigma_{s,lim}}{\sigma_{sc,lim}} \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right)} = \frac{0,586}{1 + \frac{827,15}{500} \cdot \left(1 - \frac{0,586}{1,1}\right)} = 0,331. \quad (5.10.2)$$

Betono gniuždomosios zonos charakteristika:

$$\omega = \alpha - 0,008 \cdot f_{cd} = 0,85 - 0,008 \cdot 33 = 0,586; \quad (5.10.3)$$

Priimame, kad gniuždoma zona bus lentynoje, taigi:

$$x = \frac{\gamma_{sy} \cdot f_{yd} \cdot (A_{sp1} + A_{sp2}) - f_{yd} \cdot A_s'}{b_f \cdot f_{cd}} = \quad (5.10.4)$$

$$= \frac{1,1 \cdot 1389,0 \cdot (32,97 + 9,42) \cdot 10^{-4} - 365,0 \cdot 7,92 \cdot 10^{-4}}{2,19 \cdot 33,0} = 0,086m < h_f' = 0,231m;$$

Santykinis gniuždomos zonos aukštis:

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{0,086}{1,020} = 0,084 < 0,331; \quad (5.10.5)$$

Darbo sąlygų koeficientas, įvertinantis įtemptos armatūros stiprumą aukščiau takumo ribos:

$$\gamma_{sy} = \eta - (\eta - 1) \cdot \left(\frac{2 \cdot \xi}{\xi_{lim}} - 1 \right) = 1,10 - (1,10 - 1) \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,084}{0,331} - 1 \right) = 1,15 < 1,10; \quad (5.10.6)$$

Normalinio pjūvio stiprumas:

$$M_u = f_{cd} \cdot b_f' \cdot x \cdot (d - 0,5 \cdot x) + f_{yd} \cdot A_s' \cdot (d - a_s') = 33,0 \cdot 2,19 \cdot 0,084 \cdot (1,020 - 0,5 \cdot 0,084) + 365,0 \cdot 7,92 \cdot 10^{-4} \cdot (1,020 - 0,11) = 6,20019MNm < 4,41442MNm. \quad (5.10.7)$$

Stiprumas normaliniame pjūvyje pakankamas.

5.11. Stiprumas įstrižuose pjūviuose

Stiprumas skersinei jėgai:

Didžiausia skersinė jėga veikianti prie atramos 774,80 kN. Medžiagų skaičiuotinės charakteristikos: armatūra S240, kurios skaičiuotinis skersinės armatūros stipris $f_{ywd} = 174 \text{ N/mm}^2$. Betono skaičiuotinis tempiamasis stipris:

$$f_{ctd} = \alpha \cdot \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot \frac{3,0}{1,5} = 2,0 \text{ N/mm}^2. \quad (5.11.1)$$

Skaičiuotinis gniuždomasis stipris:

$$f_{cd} = \alpha \cdot \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot \frac{55,0}{1,5} = 36,67 \text{ N/mm}^2; \quad (5.11.2)$$

Išankstinio įtempimo jėgos:

$$P_{m,II}^1 = 3,48834 \text{ MN} = 3488,34 \text{ kN}, \quad P_{m,II}^2 = 0,97607 \text{ MN} = 976,07 \text{ kN}.$$

Gelžbetoninių elementų be skersinės armatūros stiprumas, skersinių jėgų atžvilgiu, tikrinamas pagal tokias formules:

$$V_{Ed} \leq \frac{\varphi_{c4} \cdot (1 + \varphi_n) \cdot f_{ctd} \cdot b \cdot d^2}{c} = \frac{M_{c4}}{c} \geq V_{Rdc, \min}; \quad (5.11.3)$$

$$761,85 \leq \frac{1,5 \cdot (1 + 0,5) \cdot 2,0 \cdot 10^3 \cdot 0,26 \cdot 0,93^2}{2,325} = \frac{1011,93}{2,325} = 435,24 \geq 435,24.$$

Pagal skaičiavimą skersinė armatūra reikalinga.

Skersinė jėga, kurią atlaiko gniuždomas betonas ties atrama:

$$V_{Rd,c, \min} = \varphi_{c3} \cdot (1 + \varphi_n) \cdot f_{ctd} \cdot b \cdot d = 0,6 \cdot (1 + 0,5) \cdot 2,0 \cdot 10^3 \cdot 0,26 \cdot 0,93 = 435,24 \text{ kN}. \quad (5.11.4)$$

$$\varphi_n = 0,1 \cdot \frac{N_{Ed}}{f_{ctd} \cdot b \cdot d} = 0,1 \cdot \frac{3488,34 + 976,07}{2,0 \cdot 10^3 \cdot 0,26 \cdot 0,93} = 0,92 < 0,5 \text{ imame } 0,5. \quad (5.11.5)$$

Įstrižojo pjūvio, prasidedančio nuo atramos krašto, projekcija:

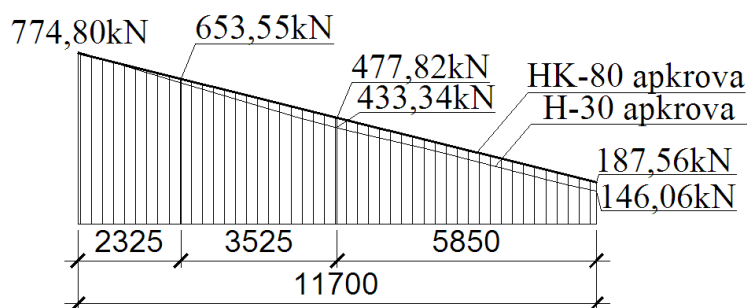
$$c_{\max} = \frac{\varphi_{c4}}{\varphi_{c3}} \cdot d = \frac{1,5}{0,6} \cdot 0,93 = 2,325 \text{ m}. \quad (5.11.6)$$

Konstrukcijose su iš anksto įtemptąja atlenkta armatūra [12], skersinė jėga V_{Ed} , kuri naudojama formulėje (5.11.8), priimama kaip skirtumas skersinių jėgų nuo išorinės apkrovos (V_{Ed}) ir apspaudimo jėgos (V_p), t. y.:

$$V_p = P_{mII}^2 \cdot \sin \Theta = 976,07 \cdot \sin 1,96^\circ = 33,38 \text{ kN}. \quad (5.11.7)$$

Apskaičiuojame minimalų armatūros intensyvumą ties atrama:

$$v_{sw, \min} = \frac{\varphi_{c3} \cdot (1 + \varphi_n) \cdot f_{ctd} \cdot b_w}{2} = \frac{0,6 \cdot (1 + 0,5) \cdot 2,0 \cdot 10^3 \cdot 0,26}{2} = 234,0 \text{ N/mm}; \quad (5.11.9)$$



5.17 pav. Skersinių jėgų diagrama nuo sijos krašto iki vidurio

Skersinės armatūros intensyvumas:

$$v_{sw} = \frac{V_{Ed} - V_p - V_{Rd,c}}{c} = \frac{774,80 - 33,38 - 580,32}{2,325} = 69,29 \text{ N/mm}. \quad (5.11.8)$$

Apskaičiuojame minimalų armatūros intensyvumą ties sijos viduriu:

$$v_{sw, \min} = \frac{\varphi_{c3} \cdot (1 + \varphi_n) \cdot f_{ctd} \cdot b_w}{2} = \frac{0,6 \cdot (1 + 0,5) \cdot 2,0 \cdot 10^3 \cdot 0,16}{2} = 144,0 \text{ N/mm}. \quad (5.11.10)$$

Sijos skerspjūvį armuosime S240 armatūra ir pagal minimalų intensyvumą. Ties atrama:

$s \leq 150 \text{ mm}$ ir $s_w \leq h/2 = 1230/2 = 615 \text{ mm}$.

$$\frac{A_{sw}}{s_w} = \frac{v_{sw,\min}}{f_{ywd}} = \frac{234,0}{174,0} = 1,345; \quad \frac{A_{sw}}{s_w} = \frac{134,0}{174,0} = 0,828. \quad (5.11.11)$$

Sijos skersinės armatūros žingsnis ties atrama:

$$s_{sw} = \frac{f_{ywd} \cdot A_{sw}}{v_{sw}} = \frac{174 \cdot 10^3 \cdot 1,57 \cdot 10^{-4}}{234,0} = 0,117 \text{ m}; \text{ imama } 100 \text{ mm}; \quad (5.11.12)$$

$$s_{sw,\max} = \frac{0,75 \cdot \varphi_{c2} \cdot (1 + \varphi_n) \cdot f_{ctd} \cdot b_w \cdot d^2}{V_{Ed}} =$$

$$= \frac{0,75 \cdot 2 \cdot (1 + 0,5) \cdot 2,0 \cdot 10^3 \cdot 0,26 \cdot 0,93^2}{774,80} = 1,31 \text{ m}. \quad (5.11.13)$$

Skersinė jėga, kurią atlaiko gniuždomas betonas ties sienelės susiaurėjimu:

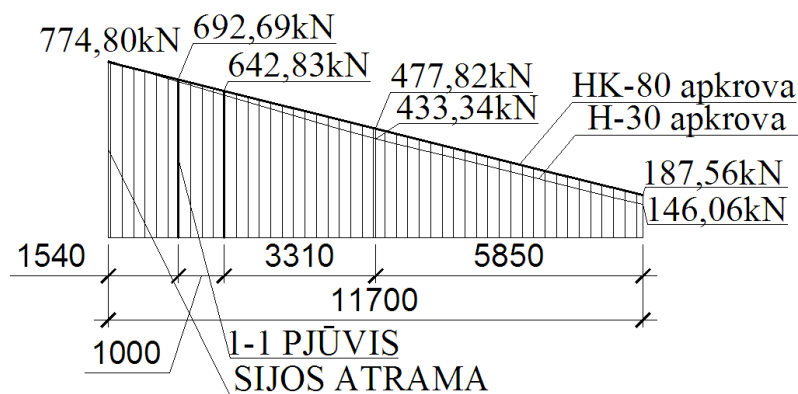
$$V_{Rd,c,\min} = \varphi_{c3} \cdot (1 + \varphi_n) \cdot f_{ctd} \cdot b \cdot d = 0,6 \cdot (1 + 0,5) \cdot 2,0 \cdot 10^3 \cdot 0,16 \cdot 0,96 = 276,48 \text{ kN}. \quad (5.11.14)$$

Skersinės armatūros intensyvumas:

$$v_{sw} = \frac{V_{Ed} - V_p - V_{Rd,c}}{c} = \frac{692,69 - 33,38 - 276,48}{2,325} = 164,66 \text{ N/mm}. \quad (5.11.15)$$

Apskaičiuojame minimalų armatūros intensyvumą ties sienelės susiaurėjimu:

$$v_{sw,\min} = \frac{\varphi_{c3} \cdot (1 + \varphi_n) \cdot f_{ctd} \cdot b_w}{2} = \frac{0,6 \cdot (1 + 0,5) \cdot 2,0 \cdot 10^3 \cdot 0,16}{2} = 144,0 \text{ N/mm}. \quad (5.11.16)$$



5.18 pav. Skersinių jėgų diagrama nuo sijos krašto iki vidurio

Apskaičiuojame atstumą nuo kurio galėsime sijos skerspjuvį armuoti minimaliu intensyvumu t.y. 144,0 N/mm. Priimame, kad sijos skersinės armatūros žingsnį keisime už 1 metro nuo pjūvio I-I. Apskaičiuojame armatūros intensyvumą:

Skersinė jėga, kurią atlaiko gniuždomas betonas 1 m nutolusiu nuo pjūvio I-I:

$$V_{Rd,c,\min} = \varphi_{c3} \cdot (1 + \varphi_n) \cdot f_{ctd} \cdot b \cdot d = 0,6 \cdot (1 + 0,5) \cdot 2,0 \cdot 10^3 \cdot 0,16 \cdot 0,97 = 279,36 \text{ kN}. \quad (5.11.17)$$

Skersinės armatūros intensyvumas:

$$V_{sw} = \frac{V_{Ed} - V_p - V_{Rd,c}}{c} = \frac{642,83 - 33,38 - 279,36}{2,325} = 141,98 N/mm; \quad (5.11.18)$$

$$s_{sw} = \frac{f_{ywd} \cdot A_{sw}}{V_{sw}} = \frac{174 \cdot 10^3 \cdot 1,57 \cdot 10^{-4}}{164,66} = 0,166 m; \text{ imama } 150 mm; \quad (5.11.19)$$

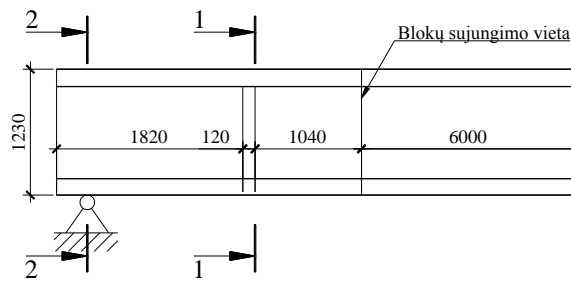
$$s_{sw} = \frac{f_{ywd} \cdot A_{sw}}{V_{sw}} = \frac{174 \cdot 10^3 \cdot 1,57 \cdot 10^{-4}}{144,0} = 0,190 m; \text{ imama } 175 mm. \quad (5.11.20)$$

5.4 lentelė. Skersinės armatūros išdėstymas

Atstumas nuo krašto, <i>m</i>	Armavimo intensyvumas, <i>N/mm</i>	$\frac{A_{sw}}{s_{sw}}$	Armatūros diametras, <i>mm</i>	Žingsnis, <i>mm</i>
0 – 1,84	234,0	1,345	10	100
1,84 – 2,84	164,66	0,946	10	150
2,84 – 6,0	144,0	0,828	10	175
6,0 – 12,0 (sijos vidurio)	144,0	0,828	10	175

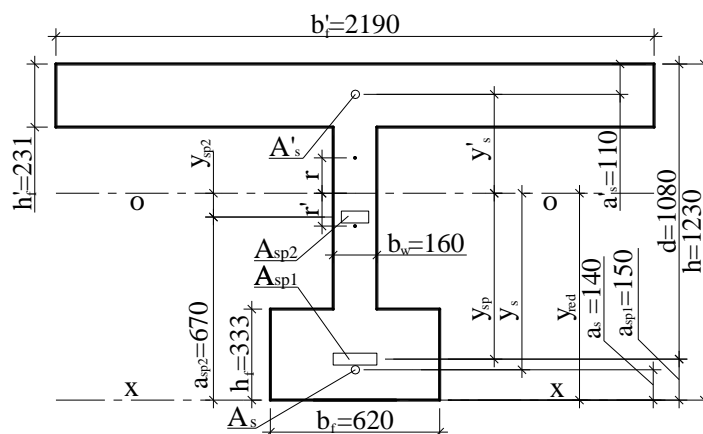
5.12. Atsparumas įstrižiams plyšiams

Sijos įstrižojo pjūvio pleišetumas tikrinamas dviejuose pjūviuose. Ties pjūviu 1-1, kur yra sienelės susiaurėjimas iki 160 mm ir pjūvyje 2-2 prie sijos atramos krašto.



5.19 pav. Įstrižų pjūvių vietos tikrinant pleišetumą

Pjūvio 1-1 ekvivalentinis skerspjūvis pateikiamas 5.20 paveiksle, o pjūvio 2-2 – 5.16 paveiksle.



5.20 pav. Pjūvio 1-1 ekvivalentinis skerspjūvis

Geometrinės charakteristikos pjūvyje 1-1 ir 2-2 pateikiamos 5.5 lentelėje:

5.5 lentelė. Sijos pjūvių geometrinės charakteristikos

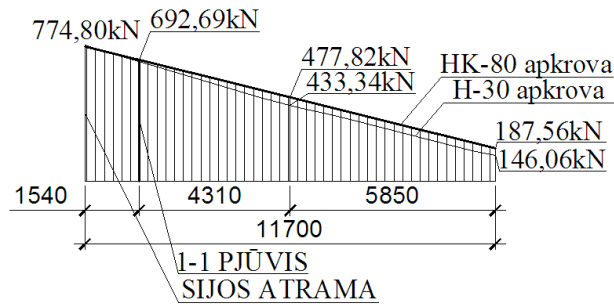
Nr.	Rodiklis	Žymėjimas	Pjūvis 1-1 (5.20 pav.)	Pjūvis 2-2 (5.16 pav. b)	Matavimo vnt.
1.	Sijos skerspjūvio aukštis	h	1,23	1,23	m
2.	Sienelės plotis	b	0,16	0,26	m
3.	Viršutinės lentynos plotis	b'_f	2,19	2,19	m
4.	Viršutinės lentynos aukštis	h'_f	0,231	0,233	m
5.	Apatinės lentynos plotis	b_f	0,620	0,620	m
6.	Apatinės lentynos aukštis	h_f	0,333	0,333	m
7.	Viršutinės lentynos armatūros plotas	A'_s	7,92	7,92	cm^2
8.	Apatinės lentynos armatūros plotas	A_s	7,85	7,85	cm^2
9.	Įtemptosios armatūros skerspjūvio plotas	A_{sp1}	32,97	32,97	cm^2
10.	Įtemptosios armatūros skerspjūvio plotas	A_{sp2}	9,42	9,42	cm^2
11.	Redukuotas skerspjūvio plotas	A_{red}	0,8494	0,9198	m^2
12.	Skerspjūvio statinis momentas x-x krašto atžvilgiu	S_{red}	0,6804	0,7288	m^3
13.	Redukuoto skerspjūvio svorio centro atstumas nuo x-x krašto	y_{red}	0,801	0,792	m
14.	Redukuoto skerspjūvio inercijos momentas o-o ašies atžvilgiu	$I_{red} (I_{eff})$	0,1525	0,1562	m^4
15.	Ekvivalentinio skerspjūvio atstumas nuo krašto iki skerspjūvio svorio centro	y'_s	0,319	0,328	m
16.	Ekvivalentinio skerspjūvio atstumas nuo krašto iki skerspjūvio svorio centro	y_{sp1}	0,651	0,642	m
17.	Ekvivalentinio skerspjūvio atstumas nuo krašto iki skerspjūvio svorio centro	y_{sp2}	0,131	0,08	m
18.	Ekvivalentinio skerspjūvio atstumas nuo krašto iki skerspjūvio svorio centro	y_s	0,661	0,652	m
19.	Redukuoto skerspjūvio atsparumo momentai apatinio krašto atžvilgiu	$W_{red,b}$	0,1903	0,1971	m^3
20.	Redukuoto skerspjūvio atsparumo momentai viršutinio krašto atžvilgiu	$W'_{red,t}$	0,3555	0,3569	m^3
21.	Atstumas nuo redukuoto skerspjūvio svorio centro iki viršutinio branduolio taško	r	0,224	0,214	m
22.	Atstumas nuo redukuoto skerspjūvio svorio centro iki apatinio branduolio taško	r'	0,419	0,3879	m

Pleišėjimo tikrinimas 1-1 pjūvyje:

Apskaičiuojame svarbiausius betono įtempius ties sijos skerspjūvio centru. Todėl skerspjūvio dalies, esančios virš sunkio centro, statinis momentas:

$$S_{red} = (b'_f - b_w) \cdot h'_f \cdot (h - y_{red} - 0,5 \cdot h'_f) + b_w \cdot \frac{(h - y_{red})^2}{2} = (2190 - 160) \cdot 231 \cdot (1230 - 801 - 0,5 \cdot 231) + 160 \cdot \frac{(1230 - 801)^2}{2} = 162,53 \cdot 10^6 \text{ mm}^3. \quad (5.12.1)$$

Skersinė jėga pjūvyje, kuriame išankstiniai įtempiai iki galo perduoti betonui (1–1 pjūvis):



5.21 pav. Skersinių jėgų diagrama

Konstrukcijose su iš anksto įtemptąja atlenkta armatūra, skersinė jėga V_{Ed} , kuri naudojama formulėje 5.12.2, priimama kaip skirtumas skersinių jėgų nuo išorinės apkrovos (V_{Ed}) ir apspaudimo jėgos (V_p), t. y.:

$$V = V_{Ed} - V_p = 692,69 - 33,38 = 659,31kN; \quad (5.12.2)$$

$$V_p = P_{mII}^2 \cdot \sin \Theta = 976,07 \cdot \sin 1,96^\circ = 33,38kN. \quad (5.12.3)$$

čia: P_{mII}^1 – įtempimo jėga pluošte ties atrama;

Θ - atlenktos armatūros kampas su horizontalia.

Apspaudimo jėga:

$$P_{d,inf} = P_{mII}^1 + (P_{mII}^2 - V_p) = 3488,34 + (976,07 - 33,38) = 4431,03kN. \quad (5.12.4)$$

Tangentiniai įtempiai (1–1 pjūvis) skerspjūvio centre:

$$\tau_{xy1} = \frac{V_{Ed,1} \cdot S_{red}}{I_{red} \cdot b_w} = \frac{659,31 \cdot 0,1625}{0,1525 \cdot 0,16} = 4613,20kN / m^2. \quad (5.12.5)$$

Tame pačiame taške veikiantys normaliniai įtempiai:

$$\sigma_{x1} = \frac{P_{d,inf}}{A_{red}} = \frac{4431,03}{0,8494} = 5216,66kN / m^2. \quad (5.12.6)$$

Betono svarbiausieji tempimo įtempiai:

$$\begin{aligned} \sigma_{mt} &= \frac{\sigma_{x1}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x1}}{2}\right)^2 + \tau_{xy1}^2} = -\frac{5216,66}{2} + \\ &+ \sqrt{\left(\frac{5216,66}{2}\right)^2 + 4613,20^2} = 2691,20kN / m^2. \end{aligned} \quad (5.12.7)$$

Betono svarbiausieji gniuždymo įtempiai:

$$\begin{aligned} \sigma_{mc} &= \frac{\sigma_{x1}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x1}}{2}\right)^2 + \tau_{xy1}^2} = -\frac{5216,66}{2} - \\ &- \sqrt{\left(\frac{5216,66}{2}\right)^2 + 4613,20^2} = -7907,86kN / m^2. \end{aligned} \quad (5.12.8)$$

Įstrižieji plyšiai neatsiras, jeigu galios sąlyga:

$$\sigma_{mt} \leq \gamma_{c,cr} \cdot f_{ctk}. \quad (5.12.9)$$

Betono, esančio sudėtingo įtempių būvio, darbo sąlygų koeficientas, nustatomas pagal formulę:

$$\gamma_{c,cr} = \frac{1 - \sigma_{mc} / f_{ck}}{0,2 + \alpha \cdot f_{ck,cube}} = \frac{1 - \frac{7,908}{55}}{0,2 + 0,01 \cdot 67} = 0,984 < 1,0 \text{ imame } 0,984; \quad (5.12.10)$$

čia $f_{ck} = 55 \text{ N/mm}^2$; $\alpha = 0,01$; $f_{ck,cube} = 67 \text{ N/mm}^2$.

Kadangi $\sigma_{mt} = 2,691 < \gamma_{c,cr} \cdot f_{ctk} = 0,984 \cdot 3,0 = 2,952 \text{ MPa}$, tai reiškia įstrižųjų plyšių 1–1 pjūvyje neatsiras.

Pleišėjimo tikrinimas ties sijos atramos kraštu (2–2 pjūvis):

Statinis momentas:

$$S_{red} = (b'_f - b_w) \cdot h'_f \cdot (h - y_{red} - 0,5 \cdot h'_f) + b_w \cdot \frac{(h - y_{red})^2}{2} = (2190 - 260) \cdot 233 \cdot (1230 - 792 - 0,5 \cdot 233) + 260 \cdot \frac{(1230 - 792)^2}{2} = 169,50 \cdot 10^6 \text{ mm}^3. \quad (5.12.11)$$

Apspaudimo jėga:

$$P_{d,inf} = P_{mII}^1 + (P_{mII}^2 - V_p) = 3488,34 + (976,07 - 33,38) = 4431,03 \text{ kN}. \quad (5.12.12)$$

Tangentiniai įtempiai (1–1 pjūvis) skerspjūvio centre:

$$\tau_{xy2} = \frac{V_{Ed,2} \cdot S_{red}}{I_{red} \cdot b_w} = \frac{659,31 \cdot 0,1695}{0,1562 \cdot 0,26} = 3094,42 \text{ kN/m}^2. \quad (5.12.13)$$

Tame pačiame taške veikiantys normaliniai įtempiai:

$$\sigma_{x2} = \frac{P_{d,inf}}{A_{red}} = \frac{4431,03}{0,9198} = 4817,38 \text{ kN/m}^2. \quad (5.12.14)$$

Kadangi čia yra gniuždymo įtempiai $\sigma_{x2} = -4817,38 \text{ kN/m}^2$;

$$\sigma_{y2} = \varphi_y \frac{V_{Ed}}{b_w \cdot h} = -0,411 \frac{741,42}{0,26 \cdot 1,23} = -953,59 \text{ kN}; \quad (5.12.15)$$

čia:

$$\varphi_y = \frac{2 \cdot \beta^2}{\pi} \cdot \left[\frac{3 - 2 \cdot \beta}{(1 + \alpha^2)^2} - \frac{\beta}{(\alpha^2 + \beta^2)^2} \right] = \frac{2 \cdot 0,64^2}{3,14} \cdot \left[\frac{3 - 2 \cdot 0,64}{(1 + 0,20^2)^2} - \frac{0,64}{(0,20^2 + 0,64^2)^2} \right] = -0,411; \quad (5.12.16)$$

$$\beta = \frac{y_{red}}{h} = \frac{0,792}{1,23} = 0,64; \quad \alpha = \frac{0,5 \cdot l_x}{h} = \frac{0,5 \cdot 0,2}{1,23} = 0,20. \quad (5.12.17)$$

Betono svarbiausieji įtempiai:

$$\sigma_{mt} = \frac{\sigma_{x2} + \sigma_{y2}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x2} - \sigma_{y2}}{2}\right)^2 + \tau_{xy2}^2} = -\frac{4817,38 + 953,59}{2} + \sqrt{\left(\frac{-4817,38 - 953,59}{2}\right)^2 + 3094,42^2} = 1345,52 \text{ kN/m}^2. \quad (5.12.18)$$

$$\sigma_{mc} = \frac{\sigma_{x2} + \sigma_{y2}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x2} - \sigma_{y2}}{2}\right)^2 + \tau_{xy2}^2} = -\frac{4817,38 + 953,59}{2} - \sqrt{\left(\frac{-4817,38 - 953,59}{2}\right)^2 + 3094,42^2} = -7116,50 \text{ kN/m}^2. \quad (5.12.19)$$

Apskaičiuojame koeficientą:

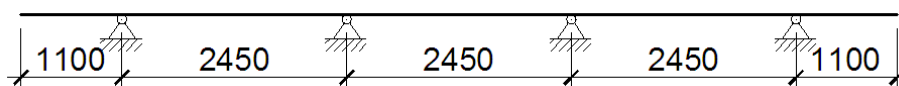
$$\gamma_{c,cr} = \frac{1 - \sigma_{mc} / f_{ck}}{0,2 + \alpha \cdot f_{ck, cube}} = \frac{1 - \frac{7,116}{55}}{0,2 + 0,01 \cdot 67} = 1,001 > 1,0 \text{ imame } 1,0; \quad (5.12.20)$$

čia imama σ_{mc} absoliutinė reikšmė.

Kadangi $\sigma_{mt} = 1,346 < \gamma_{c,cr} \cdot f_{ctk} = 1,0 \cdot 3,0 = 3,0 \text{ MPa}$, tai reiškia, kad visame sijos ilgyje statmenieji ir įstrižieji plyšiai neatsiras.

5.13. Sijos viršutinės lentynos skaičiavimas

Tilto lentynos skaičiuojamoji schema:



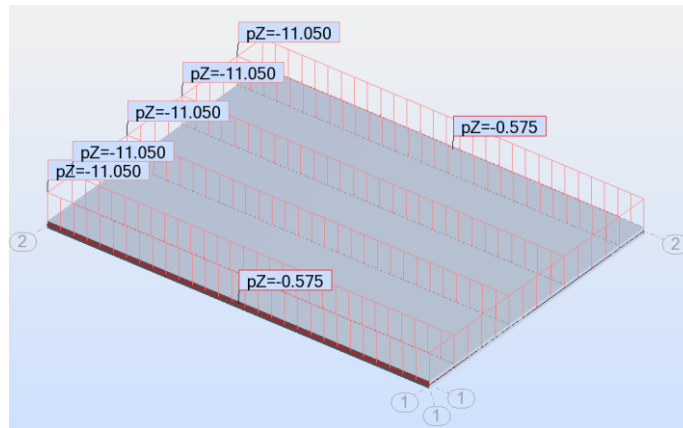
5.22 pav. Tilto lentynos skaičiuojamoji schema

Nuolatinė apkrova veikianti sijų lentynas:

5.6 lentelė. Apkrovos veikiančios tilto sijų lentynas

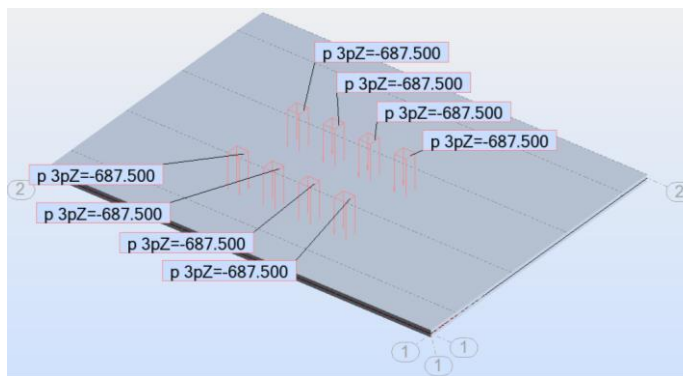
Nr.	Apkrovos pavadinimas	Charakteristinė apkrova	Skaičiuotinė apkrova	Matavimo vienetai
Nuolatinė apkrova				
1.	Asfaltbetonio dangą, $t=0,08 \text{ m}$, $\gamma=25,0 \text{ kN/m}^3$	2,0	3,0	kN/m^2
2.	Apsauginis sluoksnis, $t = 0,04 \text{ m}$, $\gamma=15,0 \text{ kN/m}^3$	0,60	0,66	kN/m^2
3.	Izoliacija – bituminė dangą, $t = 0,01 \text{ m}$, $\gamma=1,42 \text{ kN/m}^3$	0,014	0,017	kN/m^2
4.	Išlyginamasis sluoksnis, $t = 0,03 \text{ m}$, $\gamma=15,0 \text{ kN/m}^3$	0,45	0,50	kN/m^2
5.	Gelžbetoninė plokštė nuolydžiui formuoti, $t=0,08 \text{ m}$, $\gamma=25,0 \text{ kN/m}^3$	2,0	2,20	kN/m^2
6.	Sijų lentynos ir monolitiniai tarpai, $\gamma=25,0 \text{ kN/m}^3$, $t = 0,170 \text{ m}$	4,25	4,68	kN/m^2
Visa denginio konstrukcijų apkrova $\sum g_k$		9,31	11,05	kN/m^2
7.	Plieniniai turėklai	0,575	0,575	kN/m
Kintama apkrova				
1.	HK-80 vieno rato apkrova	100,0	110,0	kN

Įrašas skaičiuojame programa „Autodesk Robot Structural Analysis“ [39]. Nuolatinė apkrova programos aplinkoje:



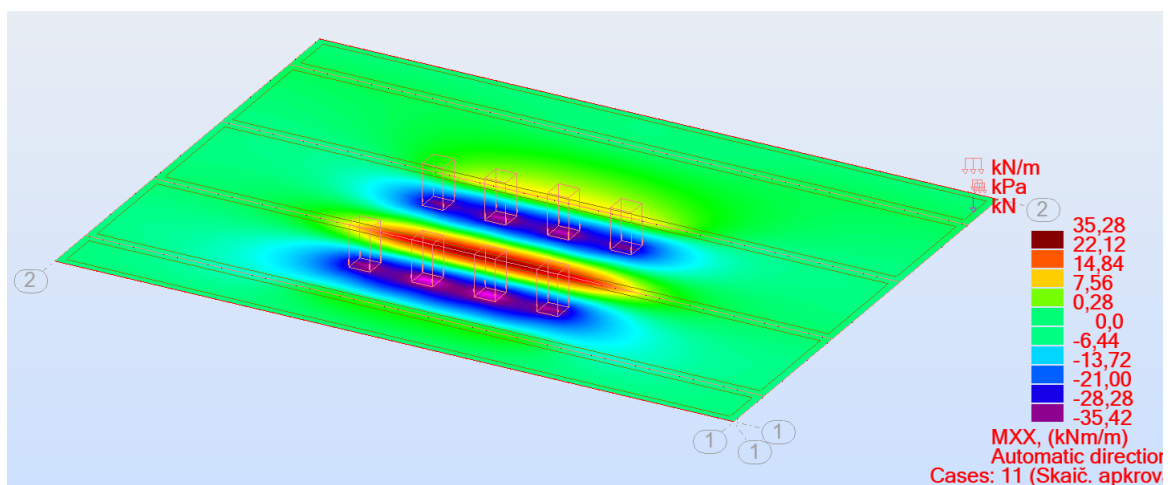
5.23 pav. Nuolatinė apkrova tenkanti sijos lentynoms

Vora HK-80 5.24 paveiksle pavaizduota, kad veikia visais 8 ratais. Rato pėdsakas priimtas 400x400 mm, todėl skaičiuotinė 110 kN koncentruota apkrova paskirstoma į plotelį.



5.24 pav. Kintamoji apkrova tenkanti sijos lentynoms

Lenkimo momentų diagrama nuo nuolatinių ir kintamų apkrovų:



5.25 pav. Lenkimo momentų diagrama

Apatinių sluoksnių didžiausias lenkimo momentas $-38,15 \text{ kNm/m}$, o viršutinių $41,01 \text{ kNm/m}$.

Armatūros apsauginį sluoksnį priimame 30 mm. Apskaičiuojame reikalingos viršutinės armatūros kiekį:

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2} = \frac{35,28}{33,0 \cdot 10^3 \cdot 1,0 \cdot 0,134^2} = 0,060. \quad (5.13.1)$$

Elemento gniuždomos zonos santykinis aukštis:

$$\xi = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu_{Ed}} = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot 0,060} = 0,061 < \xi_{lim} = 0,437; \quad (5.13.2)$$

$$\xi_{lim} = \frac{\omega}{1 + \frac{\sigma_{s,lim}}{\sigma_{sc,lim}} \left(1 - \frac{\omega}{1,1}\right)} = \frac{0,586}{1 + \frac{365}{500} \cdot \left(1 - \frac{0,586}{1,1}\right)} = 0,437. \quad (5.13.3)$$

Kadangi :

$$x = \xi \cdot d = 0,061 \cdot 134 = 8,23mm < 2 \cdot a = 72,0mm. \quad (5.13.4)$$

Reikiamas armatūros plotas 1 tiesiniui metrui:

$$A_s = \frac{f_{cd} \cdot b \cdot d \cdot \xi}{f_{yd}} = \frac{33,0 \cdot 1000 \cdot 134 \cdot 0,061}{365} = 739,02mm^2 / m. \quad (5.13.5)$$

Apskaičiuojame reikalingos apatinės armatūros kiekį:

$$\mu_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2} = \frac{35,42}{33,0 \cdot 10^3 \cdot 1,0 \cdot 0,134^2} = 0,060. \quad (5.13.6)$$

Elemento gniuždomos zonos santykinis aukštis:

$$\xi = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu_{Ed}} = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot 0,060} = 0,061 < \xi_{lim} = 0,437. \quad (5.13.7)$$

Reikiamas armatūros plotas 1 tiesiniui metrui:

$$A_s = \frac{f_{cd} \cdot b \cdot d \cdot \xi}{f_{yd}} = \frac{33,0 \cdot 1000 \cdot 134 \cdot 0,061}{365} = 739,02mm^2 / m. \quad (5.13.8)$$

Priimame Ø12 armatūrą ir ją išdėliojame kas 150 mm tiek apačioje, tiek viršuje.

5.14. Sijos įlinkio skaičiavimas nuo projektinių apkrovų

Gelžbetoninių konstrukcinių elementų deformacijų (įlinkių) apskaičiavimas atliekamas atsižvelgiant į konstrukcijai keliamus naudojimo reikalavimus. Projektuojamos sijos ribinis įlinkis:

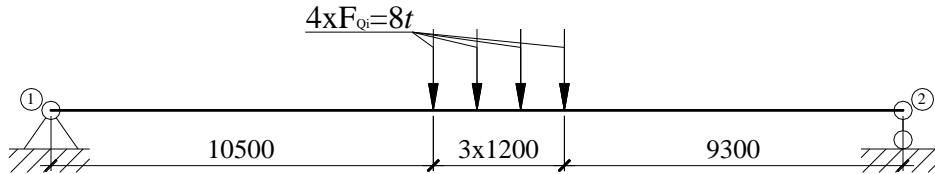
$$u_{rib} = \frac{l_{eff}}{300} = \frac{23400}{300} = 78mm. \quad (5.14.1)$$

Suminis įlinkis, kai neatsiveria normaliniai plyšiai:

$$u = u_1 + u_2 - u_3 - u_4. \quad (5.14.2)$$

Įlinkis u_1 nuo kintamų trumpalaikių poveikių, apskaičiuojamas kintamąją apkrovą,

padauginus iš $1-\psi_2$ (kai $\psi_2=0,2$). Ratinės voros HK-80 apkrovos – koncentruotos, todėl įlinkis skaičiuojamas taikant dvigubo integravimo metodą. Šiam tikslui sudaroma lenkimo momento diferencialinė lygtis. Integruodami x atžvilgiu, gausime posūkio kampo lygtį, kuriai taikydami pradines sąlygas: $E_{cm} \cdot I_{red} \cdot du_1/dx=0$, rasime tašką, kuriame bus didžiausias įlinkis. Integruodami du kartus x atžvilgiu, gausime formulę įlinkiui skaičiuoti. Skaičiuojamoji schema tokia:



5.26 pav. Kintamų poveikių įlinkio skaičiavimo schema

Pastaba: ašies apkrova 20t, skersinio pasiskirstymo koeficientas $\psi_{6,V} = 0,5$.

$$F_{Qi}=20 \cdot 0,5 \cdot (1-\psi_2) = 8t = 80kN.$$

Lenkimo momento diferencialinė lygtis:

$$E_{cm} I_{eff} \frac{d^2 u_1}{dx^2} = -\frac{F_{Qi} \cdot 44,4}{L} \cdot x + F_{Qi}(x-10,5) + F_{Qi}(x-11,7) + F_{Qi}(x-12,9) + F_{Qi}(x-14,1). \quad (5.14.3)$$

Lygtį 5.14.3 integruojame atitinkamai vieną ir du kartus:

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot \frac{du_1}{dx} = -\frac{F_{Qi} \cdot 44,4}{L \cdot 2} \cdot x^2 + \frac{F_{Qi}}{2} (x-10,50)^2 + \frac{F_{Qi}}{2} \cdot (x-11,70)^2 + \frac{F_{Qi}}{2} (x-12,90)^2 + \frac{F_{Qi}}{2} (x-14,10)^2 + C_1. \quad (5.14.4)$$

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_1 = -\frac{F_{Qi} \cdot 44,4}{L \cdot 6} \cdot x^3 + \frac{F_{Qi}}{6} (x-10,50)^3 + \frac{F_{Qi}}{6} (x-11,70)^3 + \frac{F_{Qi}}{6} (x-12,90)^3 + \frac{F_{Qi}}{6} (x-14,10)^3 + C_1 \cdot x + C_2. \quad (5.14.5)$$

Taikydami pradines sąlygas lygčiai $E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot du_1$, apskaičiuojame nežinomas konstantas:

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_1 = 0, \quad x = 0, \quad C_2 = 0;$$

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_1 = 0, \quad x = 23,4, \quad C_1 = 10598,63.$$

Lygtį 5.14.4 prilyginame 0, apskaičiuojame x , kuris lygus 11,86 m. Apskaičiuojame įlinkį nuo kintamų trumpalaikių poveikių, įvertindami koeficientą φ_{c1} :

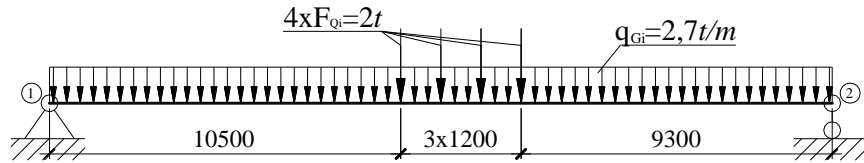
$$u_1 = \frac{1}{\varphi_{c1} \cdot E_{cm} \cdot I_{eff}} \cdot \left(-\frac{F_{Qi} \cdot 44,4}{L \cdot 6} \cdot x^3 + \frac{F_{Qi}}{6} (x-10,50)^3 + \frac{F_{Qi}}{6} (x-11,70)^3 + C_1 \cdot x \right) =$$

$$= \frac{1}{0,85 \cdot 38 \cdot 10^6 \cdot 0,1525} \cdot \left(-\frac{80 \cdot 44,4}{23,4 \cdot 6} \cdot 11,86^3 + \frac{80}{6} (11,86-10,50)^3 + \frac{80}{6} \cdot (11,86-11,70)^3 + 10598,63 \cdot 11,86 \right) = 16,95 \cdot 10^{-2} m = 16,96mm. \quad (5.14.6)$$

čia φ_{c1} – koeficientas, kuriuo įvertinama betono trumpalaikio valkšnumo įtaka,

sunkiajam betonui imamas 0,85.

Įlinkis u_2 nuo nuolatinių ir tariamai nuolatinių poveikių (nevertinant išankstinio apspaudimo). Šiam įlinkiui apskaičiuoti taip pat sudaroma lenkimo momento diferencialinė lygtis. Skaičiuojamoji schema tokia:



5.27 pav. Nuolatinių ir tariamai nuolatinių poveikių įlinkio skaičiavimo schema

Pastaba: ašies apkrova $20t$, skersinio pasiskirstymo koeficientas $\psi_{6,V} = 0,5$.

$F_{Qi} = 20 \cdot 0,5 \cdot \psi_2 = 2t = 20kN$, (kai $\psi_2 = 0,2$). Nuolatinė apkrova $27,0 kNm$.

Lenkimo momento diferencialinė lygtis:

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot \frac{d^2 u_2}{dx^2} = - \frac{q_{Gi} \cdot L^2 + F_{Qi} \cdot 88,8}{2 \cdot L} \cdot x + \frac{q_{Gi} \cdot x^2}{2} + F_{Qi} \cdot (x - 10,50) + F_{Qi} (x - 11,70) + F_{Qi} (x - 12,90) + F_{Qi} (x - 14,10). \quad (5.14.7)$$

Lygtį 5.14.7 integruojame atitinkamai vieną ir du kartus:

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot \frac{du_2}{dx} = - \frac{q_{Gi} \cdot L^2 + F_{Qi} \cdot 88,8}{4 \cdot L} \cdot x^2 + \frac{q_{Gi} \cdot x^3}{6} + \frac{F_{Qi}}{2} (x - 10,50)^2 + \frac{F_{Qi}}{2} \cdot (x - 11,70)^2 + \frac{F_{Qi}}{2} (x - 12,90)^2 + \frac{F_{Qi}}{2} (x - 14,10)^2 + C_1. \quad (5.14.8)$$

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_2 = - \frac{q_{Gi} \cdot L^2 + F_{Qi} \cdot 88,8}{12 \cdot L} \cdot x^3 + \frac{q_{Gi} \cdot x^4}{24} + \frac{F_{Qi}}{6} (x - 10,50)^3 + \frac{F_{Qi}}{6} (x - 11,70)^3 + \frac{F_{Qi}}{6} (x - 12,90)^3 + \frac{F_{Qi}}{6} (x - 14,10)^3 + C_1 \cdot x + C_2. \quad (5.14.9)$$

Taikydami pradines sąlygas lygčiai $E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot du_2$, apskaičiuojame nežinomas konstantas:

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_2 = 0, \quad x = 0, \quad C_2 = 0;$$

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_2 = 0, \quad x = 23,4, \quad C_1 = 17064,40.$$

Lygtį 5.14.8 prilyginame 0, apskaičiuojame x , kuris lygus $11,73 m$. Apskaičiuojame įlinkį nuo nuolatinių ir tariamai nuolatinių poveikių, įvertindami koeficientus φ_{c1} ir φ_{c2} :

$$u_2 = \frac{\varphi_{c2}}{\varphi_{c1} \cdot E_{cm} \cdot I_{eff}} \cdot \left(- \frac{q_{Gi} \cdot L^2 + F_{Qi} \cdot 88,8}{12 \cdot L} \cdot x^3 + \frac{q_{Gi} \cdot x^4}{24} + \frac{F_{Qi}}{6} (x - 10,5)^3 + \frac{F_{Qi}}{6} (x - 11,70)^3 \cdot \right.$$

$$\left. + C_1 \cdot x \right) = \frac{2,0}{0,85 \cdot 38 \cdot 10^6 \cdot 0,1525} \cdot \left(- \frac{27,0 \cdot 23,4^2 + 2,0 \cdot 88,8}{12 \cdot 23,4} \cdot 11,73^3 + \frac{27,0 \cdot 11,73^4}{24} \right.$$

$$\left. + \frac{80}{6} (11,73 - 10,50)^3 + \frac{80}{6} (11,73 - 11,70)^3 + 17064,40 \cdot 11,73 = 51,28 \cdot 10^{-2} m = 51,28 mm. \quad (5.14.10)$$

čia φ_{c2} – koeficientas, kuriuo įvertinama betono ilgalaikio valkšnumo įtaka, imamas iš

lentelių; kai santykinė drėgmė $\geq 75\%$, lygus 2,0.

Išlinkis u_3 nuo išankstinio apspaudimo:

$$u_3 = s \cdot l^2 \cdot \frac{P_2 \cdot e_{op}}{\varphi_{c1} \cdot E_{eff} \cdot I_{eff}} = \frac{1}{8} \cdot 23400^2 \cdot \frac{4,431 \cdot 10^6 \cdot 591,0}{0,85 \cdot 38,0 \cdot 10^3 \cdot 0,1525 \cdot 10^{12}} = 36,39 \text{ mm}. \quad (5.14.11)$$

Išlinkis dėl betono susitraukimo ir valkšnumo:

$$u_4 = s \cdot l^2 \cdot \frac{\varepsilon_{c1} - \varepsilon_{c2}}{d} = \frac{1}{8} \cdot 23400^2 \cdot \frac{4,08 \cdot 10^{-4} - 0}{1020} = 27,40 \text{ mm}. \quad (5.14.12)$$

Betono santykinės deformacijos išilginei tempiamosios armatūros sunkio centro lygyje:

$$\varepsilon_{c1} = \frac{\sigma_{c1}}{E_s} = \frac{\sigma_{los}^6 + \sigma_{los}^8 + \sigma_{los}^9}{E_s} = \frac{40 + 39,52}{195 \cdot 10^3} = 4,08 \cdot 10^{-4}. \quad (5.14.13)$$

Santykinė deformacija dėl betono valkšnumo:

$$\varepsilon_{c2} = 0. \quad (5.14.14)$$

Sijos įlinkis:

$$d = d_1 + d_2 - d_3 - d_4 = 16,96 + 51,28 - 36,39 - 27,40 = 4,45 \text{ mm} < d_{rib} = 78,0 \text{ mm}. \quad (5.14.15)$$

Tilto sijos išorinių apkrovų sukeltas įlinkis neviršija ribinio įlinkio.

5.15. Penkto skyriaus išvados

Atlikus sijos projektavimą suformuluotos tokios išvados:

- Atliktas įrašų skaičiavimas pagal H-30 ir HK-80 apkrovas naudojant sveto metodą. Vienu ir kitu atveju gauta, kad didžiausios įrašos susidaro vidurinėse sijose, todėl sijos projektavimas buvo atliekamas pagal vidurinę siją veikiančias įrašas;
- Projektuojant siją pastebėta, kad 7 įtemptosios armatūros vielapluoščių kiekis nepakankamas tenkinti atsparumą normaliniams plyšiams. Sijos atsparumui padidinti parinkti papildomai 2 vielapluoščiai, kurie įtempiami kreivine forma;
- Sijos įtemptosios armatūros kiekis atitinka su realiai esančiu tilto sijose t.y. 9 vielapluoščiai, kurių $A_{sp}=42,39 \text{ cm}^2$;
- Projektuojant tilto siją buvo naudojama – C55/67 stiprumo klasės betonas, armatūra įtemptoji - Y1860S, išilginė - S400, skersinė - S240. Tilto sija surenkama iš penkių blokų, kurių sandūros jungiamos naudojant epoksidinius klijus.

6. TEORINIŲ IR STATINIO BANDYMO METU GAUTŲ PERDANGOS SIJŲ ĮLINKIŲ PALYGINIMAS

Statinių bandymų metu buvo nustatyta tilto sijų įlinkiai. Tiltas buvo palaipsniui apkraunamas sunkvežimiais, kurių masės pateikiamos 3.1 skyriuje 3.1 lentelėje. Tiltos sijų įlinkiai buvo matuojami dviem atvejais: kai sunkvežimiai buvo pastatomi tilto viduryje vienodais atstumais nuo šaltilčių ir kai tiltas buvo apkraunamas vienu kraštu (kuo arčiau šaltilčio). Gauti rezultatai pateikti 3.1 skyriaus 3.3 ir 3.4 paveiksluose.

6.1. Betono parametrų kitimo įvertinimas tyrimo objektui

Tiriamasis objektas - tiltas per upę „Šušvė“ pastatytas 1984 metais, todėl norint tiksliau apskaičiuoti tilto statinį ir dinaminį įlinkį, reikia nustatyti pagrindinių sijų betono stiprumą ir tamprumo modulį.

Betono gniuždomasis stipris t amžiuje priklauso nuo cemento rūšies, temperatūros ir kietėjimo sąlygų. Standartinėmis sąlygomis saugojamų konstrukcijų įvairaus amžiaus betono gniuždomasis stipris $f_{cm}(t)$ gali būti apskaičiuotas taip [1]:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} = 1,27 \cdot 63 = 80,0 \text{ Mpa}; \quad (6.1.1)$$

Koeficientas:

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} = \exp \left\{ 0,25 \left[1 - \left(\frac{28}{10950} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} = 1,27; \quad (6.1.2)$$

čia $f_{cm}(t)$ – vidutinis betono C55/67 gniuždomasis stipris 80 MPa.

f_{cm} – 28 parų amžiaus vidutinis betono gniuždomasis stipris nurodytas 5 lentelėje;

$\beta_{cc}(t)$ – koeficientas, įvertinantis betono amžių t ;

t – betono amžius paromis;

s – koeficientas, įvertinantis cemento rūšį, kuris priimtas normaliai ir greitai kietėjančio cemento – 0,25.

Betono tamprumo modulio kitimas laike $E_{cm}(t)$ gali būti apskaičiuotas taip:

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0,3} \cdot E_{cm} = \left(\frac{80,0}{63,0} \right)^{0,3} \cdot 38,0 = 40,82 \text{ GPa}; \quad (6.1.3)$$

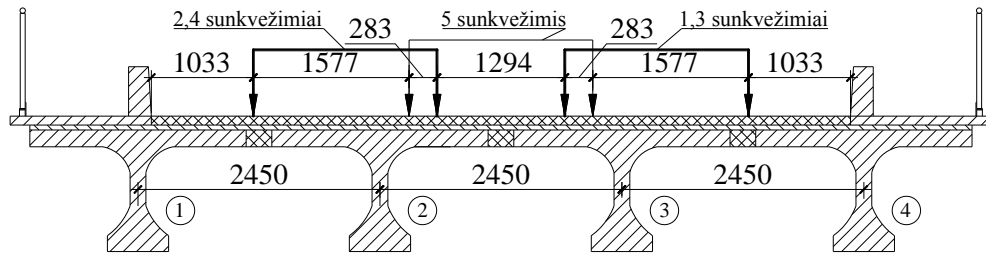
čia: E_{cm} – 28 parų amžiaus betono tamprumo modulis.

Atliekant statinio ir dinaminio įlinkio skaičiavimus betono tamprumo modulį priimsime – 40,82 GPa.

6.2. Teorinis sijų įlinkių skaičiavimas

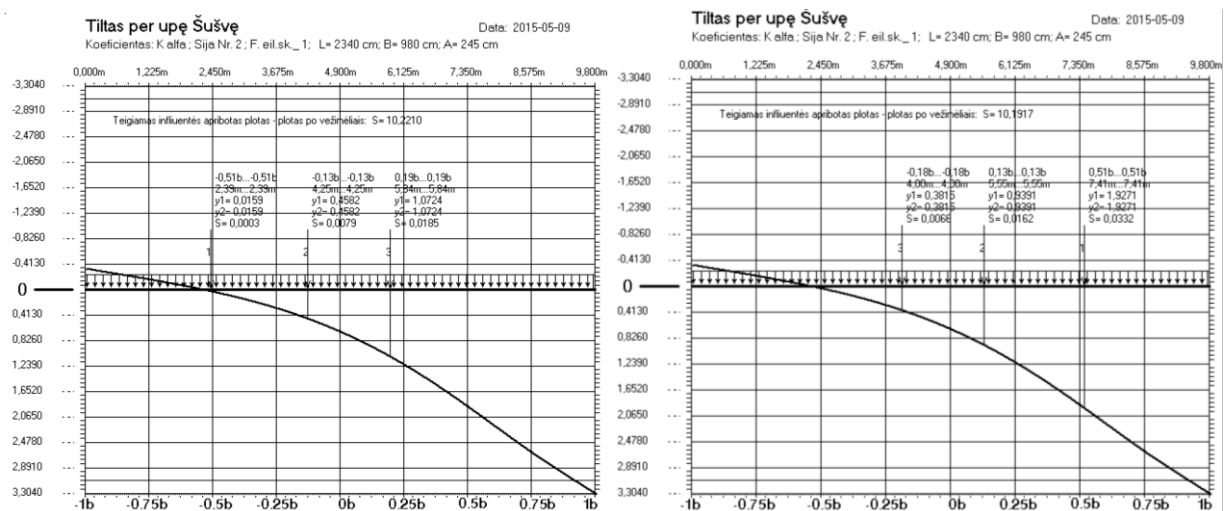
Sijų įlinkių skaičiavimas atliekamas pagal bandymo metu naudotas apkrovas. Apkrovų skaičiavimui tarp sijų naudojama programa „Tiltai-2000“ [17, 42], kurioje sudaromos influentės pagal ortotropinės plokštės metodą. O pagal gautas influentes apskaičiuojami skersinio pasiskirstymo koeficientai.

Pirmo (simetrinio) apkrovimo varianto schema skersai tilto, pateikiama 6.1 paveiksle:



6.1 pav. Skersai tilto išdėstyty apkrovų 1 variantas

Apskaičiuojame 4 sijos skersinio pasiskirstymo koeficientus:



6.2 pav. Pirmo varianto 1 ir 4 sijos skersinio pasiskirstymo influentes

- 1 ir 3 sunkvežimiams:

$$k_{\alpha Q(1,3)}^4 = \frac{\sum y_i}{2} = \frac{0,9391 + 1,9271}{2} \approx 1,433; \quad (6.2.1)$$

čia: y_i – influentės ordinatė po sutelktomis apkrovomis.

- 2 ir 4 sunkvežimiams:

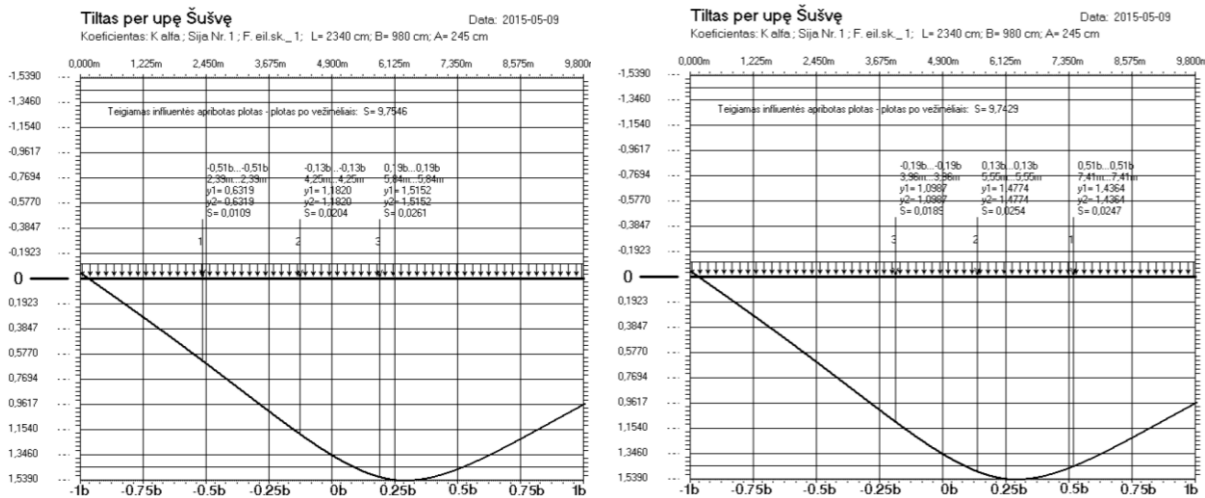
$$k_{\alpha Q(2,4)}^4 = \frac{\sum y_i}{2} = \frac{0,0159 + 0,4582}{2} \approx 0,237; \quad (6.2.2)$$

- 5 sunkvežimiui:

$$k_{\alpha Q(5)}^{1,4} = \frac{\sum y_i}{2} = \frac{1,0724 + 0,3815}{2} \approx 0,727. \quad (6.2.3)$$

Pastaba: 1 sijos skersinio pasiskirstymo koeficientai: $k_{\alpha Q(1,3)}^1 = 0,237$, $k_{\alpha Q(2,4)}^1 = 1,433$.

Apskaičiuojame 3 sijos skersinio pasiskirstymo koeficientus:



6.3 pav. Pirmo varianto 2 ir 3 sijos skersinio pasiskirstymo influentes

- 1 ir 3 sunkvežimiams:

$$k_{\alpha Q(1,3)}^3 = \frac{\sum y_i}{2} = \frac{1,4774 + 1,4364}{2} \approx 1,457; \quad (6.2.4)$$

- 2 ir 4 sunkvežimiams:

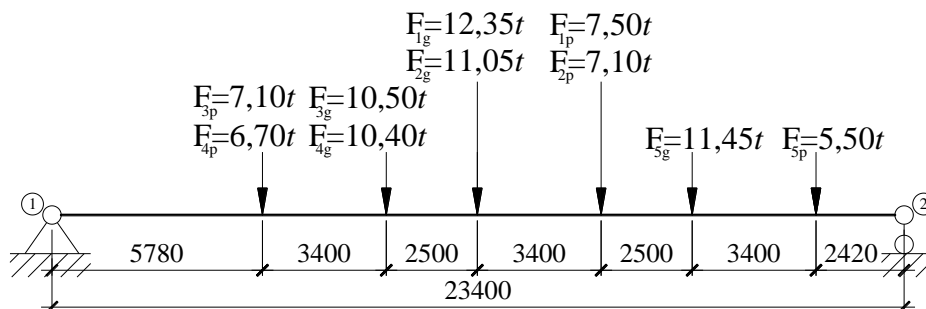
$$k_{\alpha Q(2,4)}^3 = \frac{\sum y_i}{2} = \frac{0,6319 + 1,1820}{2} \approx 0,907; \quad (6.2.5)$$

- 5 sunkvežimiui:

$$k_{\alpha Q(5)}^{2,3} = \frac{\sum y_i}{2} = \frac{1,5152 + 1,0987}{2} \approx 1,307. \quad (6.2.6)$$

Pastaba: 2 sijos skersinio pasiskirstymo koeficientai: $k_{\alpha Q(1,3)}^2 = 0,907$, $k_{\alpha Q(2,4)}^2 = 1,457$.

Pirmo apkrovimo varianto schema išilgai tilto pateikiama 6.4 paveiksle:



6.4 pav. Išilgai tilto išdėstytų apkrovų 1 variantas

Pastaba: Jėgos F_{ij} pirmas apatinis indeksas rodo sunkvežimio numerį, o antras jo priekinę (p) ar galinę (g) ašį.

Pirmos sijos įlinkio skaičiavimas:

Įlinkis skaičiuojamas taikant dvigubo integravimo metodą. Šiam tikslui sudaroma

lenkimo momento diferencialinė lygtis. Norint lygtį supaprastinti, apskaičiuojamos pirmajai sijaui tenkančios apkrovos pagal skersinio pasiskirstymo koeficientus:

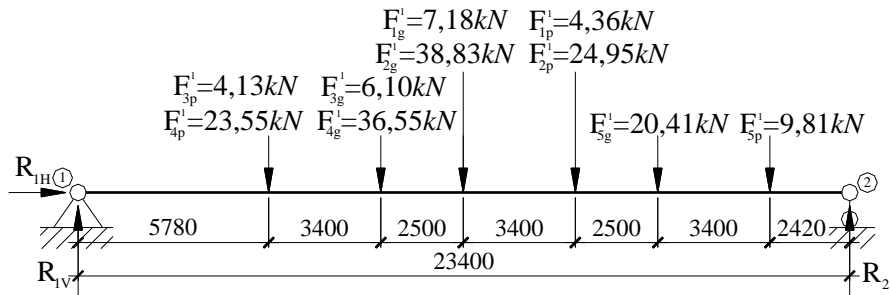
$$F_{3p}^{1,4} = \frac{F_{3p} \cdot k_{aQ(1,3)}^1}{n} = \frac{7,10 \cdot 1,433}{4} = 2,544t = 24,95kN; \quad (6.2.7)$$

čia: n – tilto perdangų sudarančių sijų skaičius.

Pastaba: laisvojo kritimo pagreitis priimtas: $9,81 \text{ m/s}^2$.

Naudojant 6.2.7 formulę, apskaičiuojamos likusios apkrovos, kurios veikia pirmą siją.

Gauti rezultatai pateikiami 6.5 paveiksle:



6.5 pav. Pirmą siją veikiančios apkrovos, esant pirmam apkrovų išdėstymo variantui

Reakcijos: $R_{1V}=86,32kN$, $R_2=89,55kN$, $R_{1H}=0kN$.

Lenkimo momento diferencialinė lygtis:

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot \frac{d^2 u_{max}^1}{dx^2} = -R_{1V} \cdot x + (F_{3p}^1 + F_{4p}^1) \cdot (x - 5,78) + (F_{3g}^1 + F_{4g}^1) \cdot (x - 9,18) + (F_{1g}^1 + F_{2g}^1) \cdot (x - 11,68) + (F_{1p}^1 + F_{2p}^1) \cdot (x - 15,08) + F_{5g}^1 \cdot (x - 17,58) + F_{5p}^1 \cdot (x - 20,98). \quad (6.2.8)$$

Lygtį 6.2.8 integruojame atitinkamai vieną ir du kartus:

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot \frac{du_{max}^1}{dx} = -\frac{R_{1V}}{2} \cdot x^2 + \frac{(F_{3p}^1 + F_{4p}^1)}{2} \cdot (x - 5,78)^2 + \frac{(F_{3g}^1 + F_{4g}^1)}{2} \cdot (x - 9,18)^2 + \frac{(F_{1g}^1 + F_{2g}^1)}{2} \cdot (x - 11,68)^2 + \frac{(F_{1p}^1 + F_{2p}^1)}{2} \cdot (x - 15,08)^2 + \frac{F_{5g}^1}{2} \cdot (x - 17,58)^2 + \frac{F_{5p}^1}{2} \cdot (x - 20,98)^2 + C_1. \quad (6.2.9)$$

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^1 = -\frac{R_{1V}}{6} \cdot x^3 + \frac{(F_{3p}^1 + F_{4p}^1)}{6} \cdot (x - 5,78)^3 + \frac{(F_{3g}^1 + F_{4g}^1)}{6} \cdot (x - 9,18)^3 + \frac{(F_{1g}^1 + F_{2g}^1)}{6} \cdot (x - 11,68)^3 + \frac{(F_{1p}^1 + F_{2p}^1)}{6} \cdot (x - 15,08)^3 + \frac{F_{5g}^1}{6} \cdot (x - 17,58)^3 + \frac{F_{5p}^1}{6} \cdot (x - 20,98)^3 + C_1 \cdot x + C_2. \quad (6.2.10)$$

Taikydami pradines sąlygas lygčiai $E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot du_{max}$, apskaičiuojame nežinomas konstantas:

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^1 = 0, \quad x = 0, \quad C_2 = 0;$$

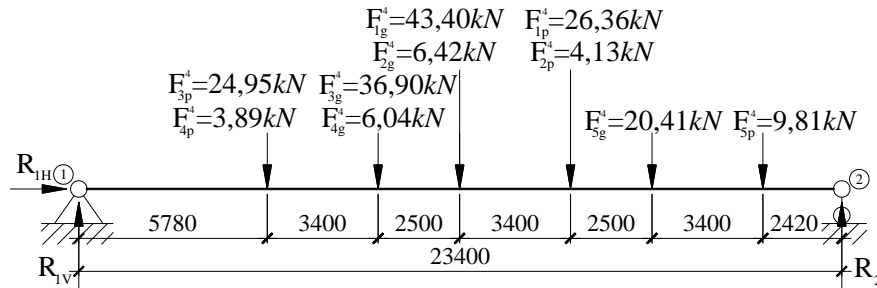
$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^1 = 0, \quad x = 23,4, \quad C_1 = 5248,16.$$

Lygtį 6.2.9 prilyginame 0, apskaičiuojame x , kuris lygus $11,70 \text{ m}$. Apskaičiuojame pirmos sijos įlinkį nuo veikiančių apkrovų:

$$u_{\max}^1 = \frac{1}{E_{cm} \cdot I_{eff}} \cdot \left(-\frac{R_{IV}}{6} \cdot x^3 + \frac{(F_{3p}^1 + F_{4p}^1)}{6} \cdot (x-5,78)^3 + \frac{(F_{3g}^1 + F_{4g}^1)}{6} \cdot (x-9,18)^3 + \right. \\ \left. + \frac{(F_{1g}^1 + F_{2g}^1)}{6} \cdot (x-11,68)^3 + C_1 \cdot x \right) = \frac{1}{40,82 \cdot 10^6 \cdot 0,1525} \cdot \left(-\frac{86,32}{6} \cdot 11,70^3 + \right. \\ \left. + \frac{(4,13 + 23,55)}{6} \cdot (11,70 - 5,78)^3 + \frac{(6,10 + 36,55)}{6} \cdot (11,70 - 9,18)^3 + \frac{(7,18 + 38,83)}{6} \cdot (11,70 - 11,68)^3 + 5248,16 \cdot 11,70 \right) = 6,33 \cdot 10^{-3} m = 6,33 mm. \quad (6.2.11)$$

Ketvirtos sijos įlinkio skaičiavimas:

Apskaičiuojame ketvirtą siją veikiančias apkrovas pagal 6.2.7 formulę. Gauti rezultatai pateikiami 6.6 paveiksle:



6.6 pav. Ketvirtą siją veikiančios apkrovos, esant pirmam apkrovų išdėstymo variantui

Reakcijos: $R_{1V}=89,69kN$, $R_2=92,62kN$, $R_{1H}=0kN$.

Skaičiuojamosios schemos lenkimo momento diferencialinė lygtis sutampa su 6.2.8 lygtimi, todėl į šią lygtį įstatome naujus kintamuosius R_{1V} ir F_{ij}^4 . Taikydami pradines sąlygas lygčiai $E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot du_{\max}$, apskaičiuojame nežinomas konstantas:

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{\max}^4 = 0, \quad x = 0, \quad C_2 = 0; \\ E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{\max}^4 = 0, \quad x = 23,4, \quad C_1 = 5456,05.$$

Lygtį 6.2.9 prilyginame 0, apskaičiuojame x , kuris lygus 11,70 m. Apskaičiuojame įlinkį nuo veikiančių apkrovų:

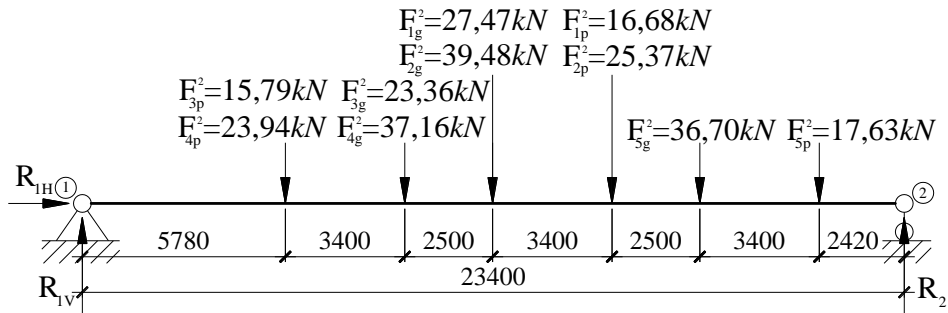
$$u_{\max}^4 = \frac{1}{E_{cm} \cdot I_{eff}} \cdot \left(-\frac{R_{IV}}{6} \cdot x^3 + \frac{(F_{3p}^4 + F_{4p}^4)}{6} \cdot (x-5,78)^3 + \frac{(F_{3g}^4 + F_{4g}^4)}{6} \cdot (x-9,18)^3 + \right. \\ \left. + \frac{(F_{1g}^4 + F_{2g}^4)}{6} \cdot (x-11,68)^3 + C_1 \cdot x \right) = \frac{1}{40,82 \cdot 10^6 \cdot 0,1525} \cdot \left(-\frac{89,69}{6} \cdot 11,70^3 + \right. \\ \left. + \frac{(24,95 + 3,89)}{6} \cdot (11,70 - 5,78)^3 + \frac{(36,90 + 6,04)}{6} \cdot (11,70 - 9,18)^3 + \frac{(43,40 + 6,42)}{6} \cdot (11,70 - 11,68)^3 + 5456,05 \cdot 11,70 \right) = 6,59 \cdot 10^{-3} m = 6,59 mm. \quad (6.2.12)$$

Antros sijos įlinkio skaičiavimas:

Antrą siją veikiančios apkrovos apskaičiuojamos taip pat naudojant skersinio pasiskirstymo koeficientus:

$$F_{3p}^2 = \frac{F_{3p} \cdot k_{aQ(1,3)}^2}{n} = \frac{7,10 \cdot 0,907}{4} = 1,610t = 15,79kN. \quad (6.2.13)$$

Naudojant 6.2.13 formulę, apskaičiuojamos likusios apkrovos, kurios veikia antrą siją. Gauti rezultatai pateikiami 6.7 paveiksle:



6.7 pav. Antrą siją veikiančios apkrovos, esant pirmam apkrovų išdėstymo variantui

Reakcijos: $R_{1V}=126,13kN$, $R_2=137,45kN$, $R_{1H}=0kN$.

Skaičiuojamosios schemos lenkimo momento diferencialinė lygtis sutampa su 6.2.8 lygtimi, todėl į šią lygtį įstatome naujus kintamuosius R_{1V} ir F_{ij}^2 . Taikydami pradines sąlygas lygčiai $E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot du_{max}$, apskaičiuojame nežinomas konstantas:

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^2 = 0, \quad x = 0, \quad C_2 = 0;$$

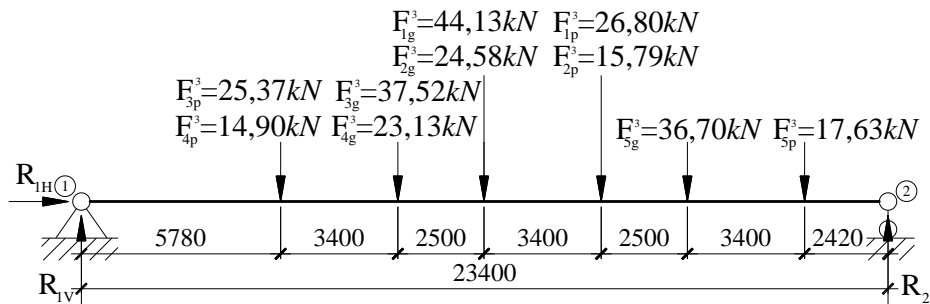
$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^2 = 0, \quad x = 23,4, \quad C_1 = 7747,25.$$

Lygtį 6.2.9 prilyginame 0, apskaičiuojame x , kuris lygus $11,70 m$. Apskaičiuojame įlinkį nuo veikiančių apkrovų:

$$u_{max}^2 = \frac{1}{E_{cm} \cdot I_{eff}} \cdot \left(-\frac{R_{1V}}{6} \cdot x^3 + \frac{(F_{3p}^2 + F_{4p}^2)}{6} \cdot (x - 5,78)^3 + \frac{(F_{3g}^2 + F_{4g}^2)}{6} \cdot (x - 9,18)^3 + \right. \\ \left. + \frac{(F_{1g}^2 + F_{2g}^2)}{6} \cdot (x - 11,68)^3 + C_1 \cdot x \right) = \frac{1}{40,82 \cdot 10^6 \cdot 0,1525} \cdot \left(-\frac{126,13}{6} \cdot 11,70^3 + \right. \quad (6.2.14) \\ \left. + \frac{(15,79 + 23,94)}{6} \cdot (11,70 - 5,78)^3 + \frac{(23,36 + 37,16)}{6} \cdot (11,70 - 9,18)^3 + \frac{(27,47 + 39,48)}{6} \cdot (11,70 - 11,68)^3 + 7747,25 \cdot 11,70 \right) = 9,40 \cdot 10^{-3} m = 9,40 mm.$$

Trečios sijos įlinkio skaičiavimas:

Apskaičiuojame trečią siją veikiančias apkrovas pagal 6.2.13 formulę. Gauti rezultatai pateikiami 6.8 paveiksle:



6.8 pav. Trečią siją veikiančios apkrovos, esant pirmam apkrovų išdėstymo variantui

Reakcijos: $R_{1V}=127,69kN$, $R_2=138,86kN$, $R_{1H}=0kN$.

Skaičiuojamosios schemos lenkimo momento diferencialinė lygtis sutampa su 6.2.8 lygtimi, todėl į šią lygtį įstatome naujus kintamuosius R_{IV} ir F_{ij}^3 . Taikydami pradines sąlygas lygčiai $E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot du_{max}$, apskaičiuojame nežinomas konstantas:

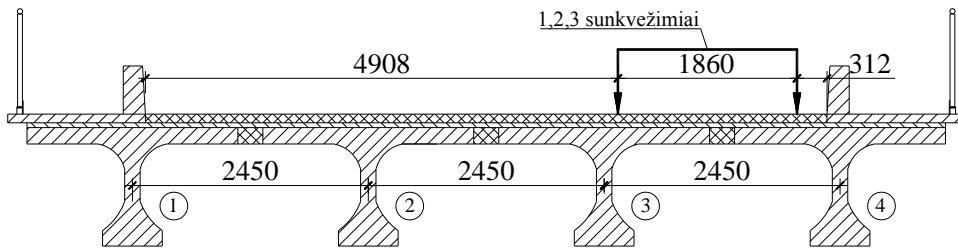
$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^3 = 0, \quad x = 0, \quad C_2 = 0;$$

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^3 = 0, \quad x = 23,4, \quad C_1 = 7825,99.$$

Lygtį 6.2.9 prilyginame 0, apskaičiuojame x , kuris lygus 11,70 m. Apskaičiuojame įlinkį nuo veikiančių apkrovų:

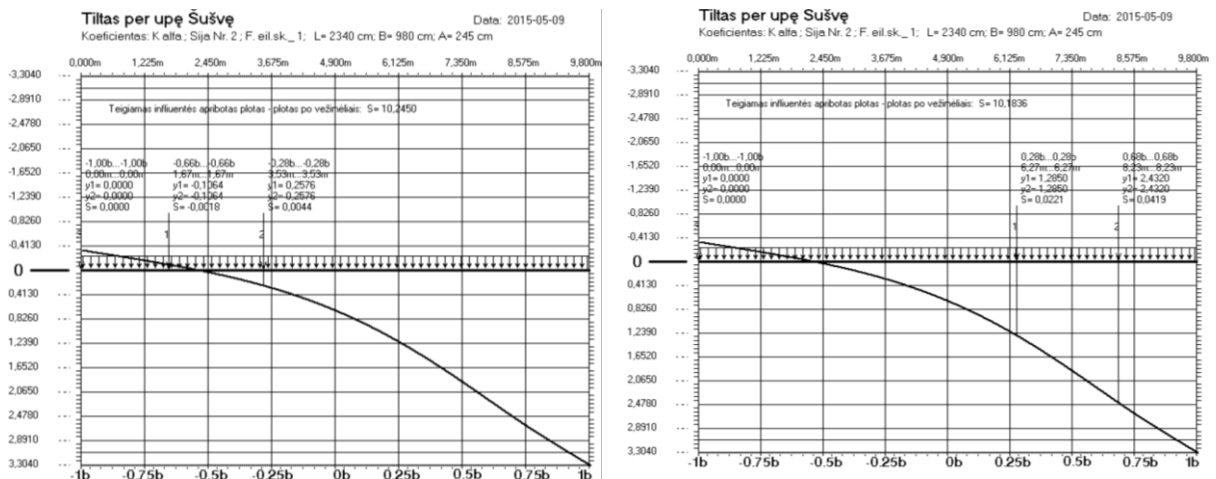
$$u_{max}^3 = \frac{1}{E_{cm} \cdot I_{eff}} \cdot \left(-\frac{R_{IV}}{6} \cdot x^3 + \frac{(F_{3p}^3 + F_{4p}^3)}{6} \cdot (x - 5,78)^3 + \frac{(F_{3g}^3 + F_{4g}^3)}{6} \cdot (x - 9,18)^3 + \right. \\ \left. + \frac{(F_{1g}^3 + F_{2g}^3)}{6} \cdot (x - 11,68)^3 + C_1 \cdot x \right) = \frac{1}{40,82 \cdot 10^6 \cdot 0,1525} \cdot \left(-\frac{127,69}{6} \cdot 11,70^3 + \right. \quad (6.2.15) \\ \left. + \frac{(25,37 + 14,90)}{6} \cdot (11,70 - 5,78)^3 + \frac{(37,52 + 23,13)}{6} \cdot (11,70 - 9,18)^3 + \frac{(44,13 + 24,58)}{6} \cdot \right. \\ \left. \cdot (11,70 - 11,68)^3 + 7747,25 \cdot 11,70 \right) = 9,48 \cdot 10^{-3} m = 9,48 mm.$$

Antro (asimetrinio) apkrovimo varianto schema skersai tilto, pateikiama 6.9 paveiksle:



6.9 pav. Skersai tilto išdėstytų apkrovų 2 variantas

Apskaičiuojame 1 ir 4 sijos skersinio pasiskirstymo koeficientus:



6.10 pav. Antro varianto 1 ir 4 sijos skersinio pasiskirstymo influentes

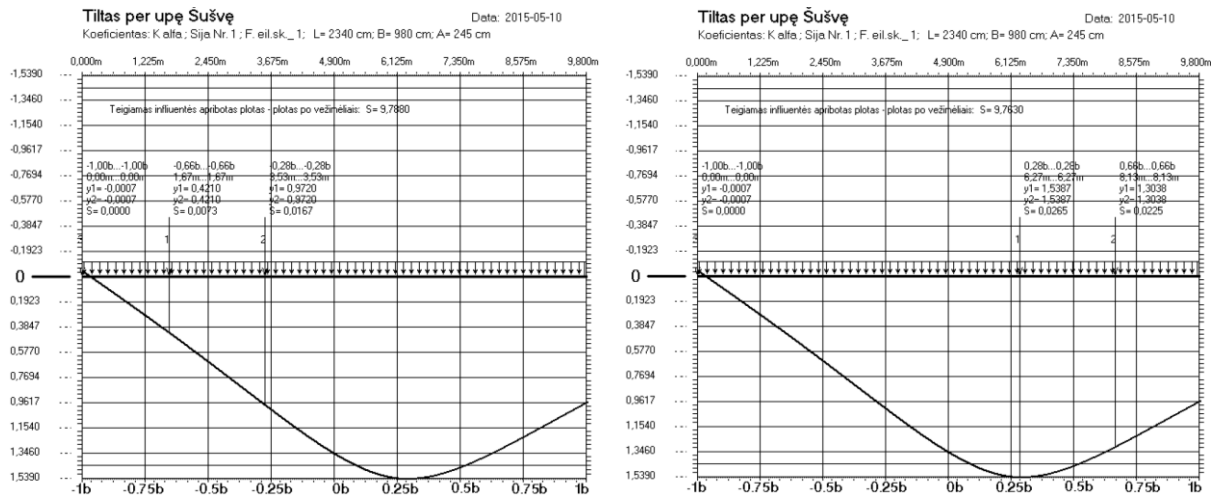
- 1 sijai:

$$k_{\alpha Q}^1 = \frac{\sum y_i}{2} = \frac{-0,1064 + 0,2576}{2} \approx 0,076. \quad (6.2.16)$$

- 4 sijai:

$$k_{\alpha Q}^4 = \frac{\sum y_i}{2} = \frac{1,2850 + 2,4320}{2} \approx 1,859. \quad (6.2.17)$$

Apskaičiuojame 2 ir 3 sijos skersinio pasiskirstymo koeficientus:



6.11 pav. Antro varianto 2 ir 3 sijos skersinio pasiskirstymo influentes

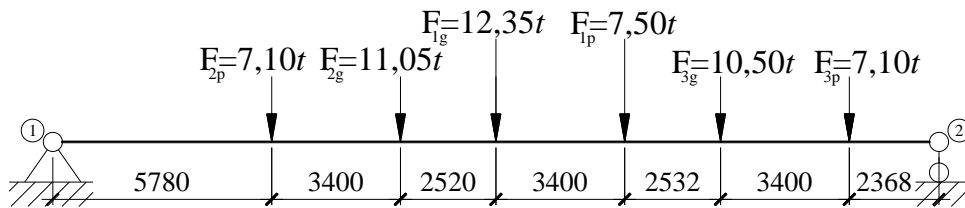
- 2 sijai:

$$k_{\alpha Q}^2 = \frac{\sum y_i}{2} = \frac{0,4210 + 0,9720}{2} \approx 0,697. \quad (6.2.18)$$

- 3 sijai:

$$k_{\alpha Q}^3 = \frac{\sum y_i}{2} = \frac{1,5387 + 1,3038}{2} \approx 1,421. \quad (6.2.19)$$

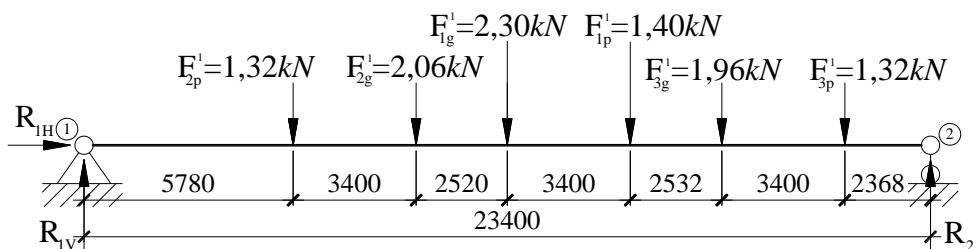
Antro varianto apkrovimo schema išilgai tilto pateikiama 6.12 paveiksle:



6.12 pav. Išilgai tilto išdėstytų apkrovų 2 variantas

Pirmos sijos įlinkio skaičiavimas:

Apskaičiuojame pirmą siją veikiančias apkrovas pagal 6.2.7 formulę. Gauti rezultatai pateikiami 6.13 paveiksle:



6.13 pav. Pirmą siją veikiančios apkrovos, esant antram apkrovų išdėstymo variantui

Reakcijos: $R_{IV}=4,51kN$, $R_2=5,85kN$, $R_{IH}=0kN$.

Lenkimo momento diferencialinė lygtis:

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot \frac{d^2 u_{max}^1}{dx^2} = -R_{IV} \cdot x + F_{2p}^1 \cdot (x-5,78) + F_{2g}^1 \cdot (x-9,18) + F_{1g}^1 \cdot (x-11,70) + F_{1p}^1 \cdot (x-15,10) + F_{3g}^1 \cdot (x-17,63) + F_{3p}^1 \cdot (x-21,03). \quad (6.2.20)$$

Lygtį 6.2.20 integruojame atitinkamai vieną ir du kartus:

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot \frac{du_{max}^1}{dx} = -\frac{R_{IV}}{2} \cdot x^2 + \frac{F_{2p}^1}{2} \cdot (x-5,78)^2 + \frac{F_{2g}^1}{2} \cdot (x-9,18)^2 + \frac{F_{1g}^1}{2} \cdot (x-11,70)^2 + \frac{F_{1p}^1}{2} \cdot (x-15,10)^2 + \frac{F_{3g}^1}{2} \cdot (x-17,63)^2 + \frac{F_{3p}^1}{2} \cdot (x-21,03)^2 + C_1. \quad (6.2.21)$$

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^1 = -\frac{R_{IV}}{6} \cdot x^3 + \frac{F_{2p}^1}{6} \cdot (x-5,78)^3 + \frac{F_{2g}^1}{6} \cdot (x-9,18)^3 + \frac{F_{1g}^1}{6} \cdot (x-11,70)^3 + \frac{F_{1p}^1}{6} \cdot (x-15,10)^3 + \frac{F_{3g}^1}{6} \cdot (x-17,63)^3 + \frac{F_{3p}^1}{6} \cdot (x-21,03)^3 + C_1 \cdot x + C_2. \quad (6.2.22)$$

Taikydami pradines sąlygas lygčiai $E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot du_{max}$, apskaičiuojame nežinomas konstantas:

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^1 = 0, \quad x = 0, \quad C_2 = 0;$$

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^1 = 0, \quad x = 23,4, \quad C_1 = 283,22.$$

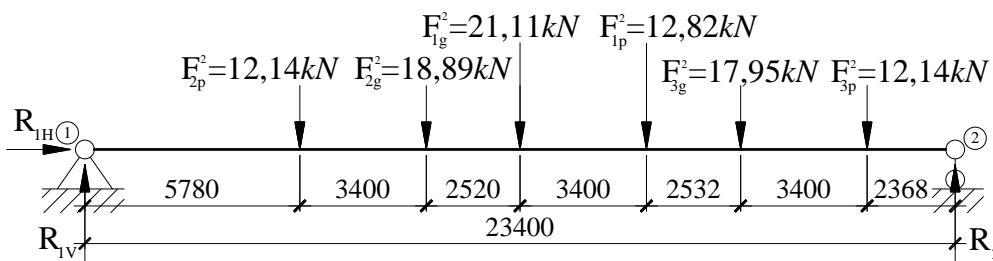
Lygtį 6.2.21 prilyginame 0, apskaičiuojame x , kuris lygus 11,70 m. Apskaičiuojame įlinkį nuo veikiančių apkrovų:

$$u_{max}^1 = \frac{1}{E_{cm} \cdot I_{eff}} \cdot \left(-\frac{R_{IV}}{6} \cdot x^3 + \frac{F_{2p}^1}{6} \cdot (x-5,78)^3 + \frac{F_{2g}^1}{6} \cdot (x-9,18)^3 + C_1 \cdot x \right) =$$

$$= \frac{1}{40,82 \cdot 10^6 \cdot 0,1525} \cdot \left(-\frac{4,51}{6} \cdot 11,70^3 + \frac{1,32}{6} \cdot (11,70-5,78)^3 + \frac{2,06}{6} \cdot (11,70-9,18)^3 + 283,22 \cdot 11,70 \right) = 0,347 \cdot 10^{-3} m = 0,347 mm. \quad (6.2.23)$$

Antros sijos įlinkio skaičiavimas:

Apskaičiuojame antrą siją veikiančias apkrovas pagal 6.2.7 formulę. Gauti rezultatai pateikiami 6.12 paveiksle:



6.14 pav. Antrą siją veikiančios apkrovos, esant antram apkrovų išdėstymo variantui

Reakcijos: $R_{IV}=41,38kN$, $R_2=53,67kN$, $R_{IH}=0kN$.

Skaičiuojamosios schemas lenkimo momento diferencialinė lygtis sutampa su 6.2.20 lygtimi, todėl į šią lygtį įstatome naujus kintamuosius R_{IV} ir F_{ij}^2 . Taikydami pradines sąlygas

lygčiai $E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot du_{max}$, apskaičiuojame nežinomas konstantas:

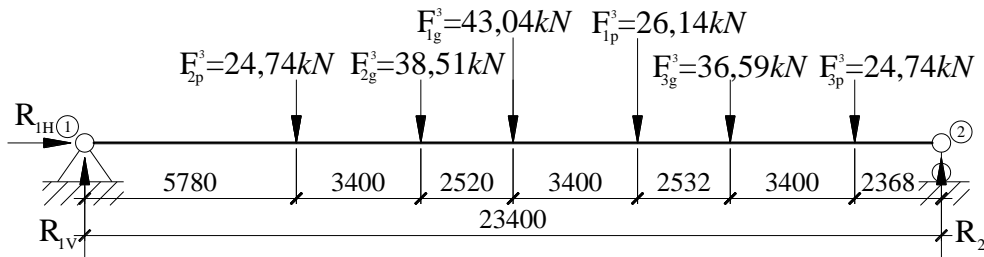
$$\begin{aligned} E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^2 &= 0, \quad x = 0, \quad C_2 = 0; \\ E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^2 &= 0, \quad x = 23,4, \quad C_1 = 2597,73. \end{aligned}$$

Lygtį 6.2.21 prilyginame 0, apskaičiuojame x , kuris lygus 11,80 m. Apskaičiuojame įlinkį nuo veikiančių apkrovų:

$$\begin{aligned} u_{max}^2 &= \frac{1}{E_{cm} \cdot I_{eff}} \cdot \left(-\frac{R_{IV} \cdot x^3}{6} + \frac{F_{2p}^1}{6} \cdot (x-5,78)^3 + \frac{F_{2g}^1}{6} \cdot (x-9,18)^3 + \frac{F_{1g}^1}{6} \cdot (x-11,70)^3 + C_1 \cdot x \right) = \\ &= \frac{1}{40,82 \cdot 10^6 \cdot 0,1525} \cdot \left(-\frac{41,38}{6} \cdot 11,80^3 + \frac{12,14}{6} \cdot (11,80-5,78)^3 + \frac{18,89}{6} \cdot (11,80-9,18)^3 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{21,11}{6} \cdot (11,80-11,70)^3 + 2597,73 \cdot 11,80 \right) = 3,18 \cdot 10^{-3} m = 3,18 mm. \end{aligned} \quad (6.2.24)$$

Trečios sijos įlinkio skaičiavimas:

Apskaičiuojame antrą siją veikiančias apkrovas pagal 6.2.7 formulę. Gauti rezultatai pateikiami 6.15 paveiksle:



6.15 pav. Trečią siją veikiančios apkrovos, esant antram apkrovų išdėstymo variantui

Reakcijos: $R_{IV}=83,35 kN$, $R_2=109,41 kN$, $R_{IH}=0 kN$.

Skaičiuojamosios schemas lenkimo momento diferencialinė lygtis sutampa su 6.2.20 lygtimi, todėl į šią lygtį įstatome naujus kintamuosius R_{IV} ir F_{ij}^3 . Taikydami pradines sąlygas lygčiai $E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot du_{max}$, apskaičiuojame nežinomas konstantas:

$$\begin{aligned} E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^3 &= 0, \quad x = 0, \quad C_2 = 0; \\ E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^3 &= 0, \quad x = 23,4, \quad C_1 = 5204,05. \end{aligned}$$

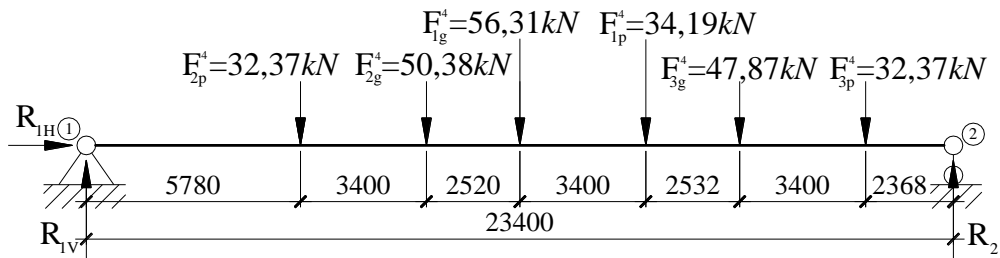
Lygtį 6.2.21 prilyginame 0, apskaičiuojame x , kuris lygus 11,78 m. Apskaičiuojame įlinkį nuo veikiančių apkrovų:

$$\begin{aligned} u_{max}^3 &= \frac{1}{E_{cm} \cdot I_{eff}} \cdot \left(-\frac{R_{IV} \cdot x^3}{6} + \frac{F_{2p}^1}{6} \cdot (x-5,78)^3 + \frac{F_{2g}^1}{6} \cdot (x-9,18)^3 + \frac{F_{1g}^1}{6} \cdot (x-11,70)^3 + C_1 \cdot x \right) = \\ &= \frac{1}{40,82 \cdot 10^6 \cdot 0,1525} \cdot \left(-\frac{83,35}{6} \cdot 11,78^3 + \frac{24,74}{6} \cdot (11,78-5,78)^3 + \frac{38,51}{6} \cdot (11,78-9,18)^3 + \right. \\ &\quad \left. + \frac{43,04}{6} \cdot (11,78-11,70)^3 + 5204,05 \cdot 11,78 \right) = 6,36 \cdot 10^{-3} m = 6,36 mm. \end{aligned} \quad (6.2.25)$$

Ketvirtos sijos įlinkio skaičiavimas:

Apskaičiuojame antrą siją veikiančias apkrovas pagal 6.2.7 formulę. Gauti rezultatai

pateikiami 6.16 paveiksle:



6.16 pav. Ketvirtą siją veikiančios apkrovos, esant antram apkrovų išdėstymo variantui

Reakcijos: $R_{1V}=110,35kN$, $R_2=143,14kN$, $R_{1H}=0kN$.

Skaičiuojamosios schemas lenkimo momento diferencialinė lygtis sutampa su 6.2.20 lygtimi, todėl į šią lygtį įstatome naujus kintamuosius R_{1V} ir F_{ij}^4 . Taikydami pradines sąlygas lygčiai $E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot du_{max}$, apskaičiuojame nežinomas konstantas:

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^4 = 0, \quad x = 0, \quad C_2 = 0;$$

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^4 = 0, \quad x = 23,4, \quad C_1 = 6927,36.$$

Lygtį 6.2.21 prilyginame 0, apskaičiuojame x , kuris lygus 11,80 m. Apskaičiuojame įlinkį nuo veikiančių apkrovų:

$$u_{max}^3 = \frac{1}{E_{cm} \cdot I_{eff}} \cdot \left(-\frac{R_{1V} \cdot x^3}{6} + \frac{F_{2p}^1}{6} \cdot (x - 5,78)^3 + \frac{F_{2g}^1}{6} \cdot (x - 9,18)^3 + \frac{F_{1g}^1}{6} \cdot (x - 11,70)^3 + C_1 \cdot x \right) =$$

$$= \frac{1}{40,82 \cdot 10^6 \cdot 0,1525} \cdot \left(-\frac{110,35}{6} \cdot 11,80^3 + \frac{32,37}{6} \cdot (11,80 - 5,78)^3 + \frac{50,38}{6} \cdot (11,80 - 9,18)^3 + \right. \quad (6.2.26)$$

$$\left. + \frac{56,31}{6} \cdot (11,80 - 11,70)^3 + 6927,36 \cdot 11,80 \right) = 8,49 \cdot 10^{-3} m = 8,49 mm.$$

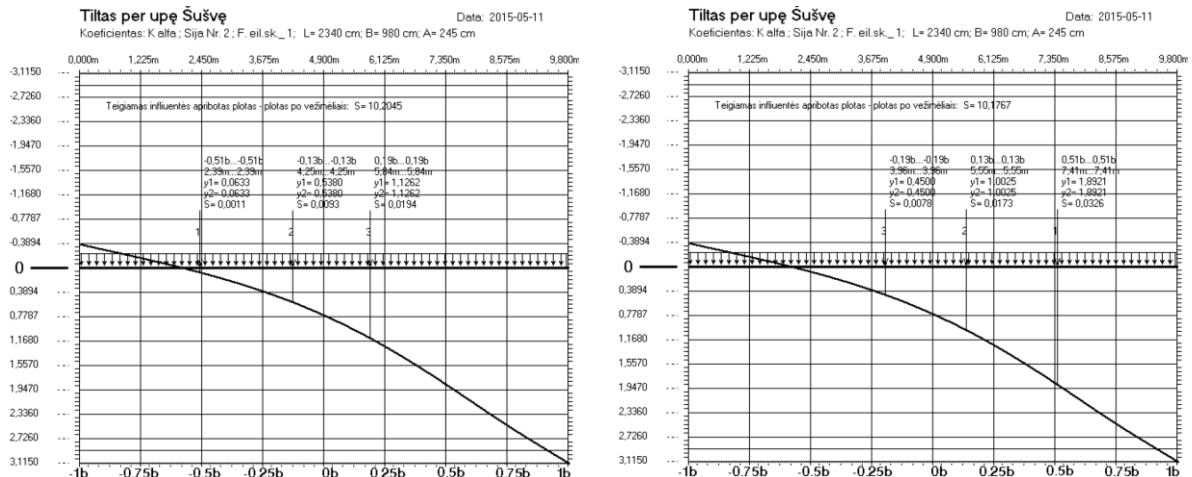
Ant tilto sijų viršutinių lentynų yra užlietas gelžbetoninis sluoksnis suformuoti nuolydžiui. Ši pakloto dalis tiltui prideda papildomą standumą į kuri reikėtų atsižvelgti. Atsižvelgsime į ploniausio šio sluoksnio dalį (3 cm), kuris yra šalia šaltilčių. Perskaičiuojame tilto sijos geometrines charakteristikas:

6.1 lentelė. Sijos pjūvių geometrines charakteristikos

Nr.	Rodiklis	Žymėjimas	Dydis	Matavimo vnt.
1.	Sijos skerspjuvio aukštis	h	1,23	m
2.	Sienuelės plotis	b	0,16	m
3.	Viršutinės lentynos plotis	b'_f	2,19	m
4.	Viršutinės lentynos aukštis	h'_f	0,231	m
5.	Apatinės lentynos plotis	b_f	0,620	m
6.	Apatinės lentynos aukštis	h_f	0,333	m
7.	Viršutinės lentynos armatūros plotas	A'_s	7,92	cm^2
8.	Apatinės lentynos armatūros plotas	A_s	7,85	cm^2
9.	Įtemptosios armatūros skerspjuvio plotas	A_{sp1}	32,97	cm^2
10.	Įtemptosios armatūros skerspjuvio plotas	A_{sp2}	9,42	cm^2
11.	Redukuotas skerspjuvio plotas	A_{red}	0,9103	m^2
12.	Skerspjuvio statinis momentas	S_{red}	0,7391	m^3
14.	Redukuoto skerspjuvio inercijos momentas	$I_{red} (I_{eff})$	0,1551	m^4

Skaičiavimų palyginimui naudosime pirmą apkrovimo schemą. Didesnį tilto perdangos standumą vertinsime ne tik išilgai, bet ir skersai, todėl perskaičiuosime skersinio pasiskirstymo koeficientus.

Apskaičiuojame 4 sijos skersinio pasiskirstymo koeficientus:



6.17 pav. 1 ir 4 sijos skersinio pasiskirstymo influencijos įvertinimus gelžbetoninę pakloto dalį

- 1 ir 3 sunkvežimiams:

$$k_{\alpha Q(1,3)}^4 = \frac{\sum y_i}{2} = \frac{1,0025 + 1,8921}{2} \approx 1,447. \quad (6.2.27)$$

- 2 ir 4 sunkvežimiams:

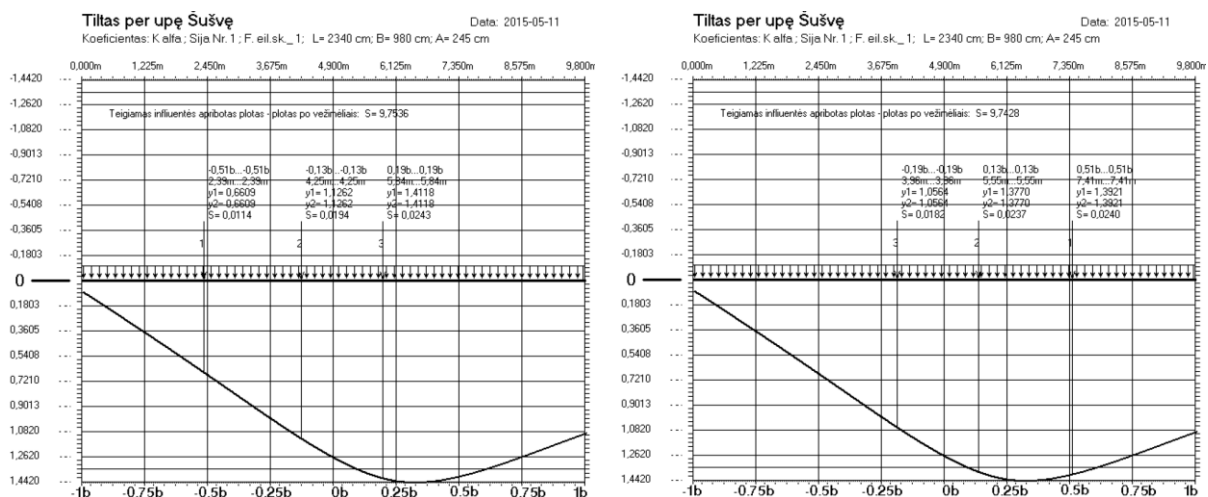
$$k_{\alpha Q(2,4)}^4 = \frac{\sum y_i}{2} = \frac{0,0633 + 0,5380}{2} \approx 0,301. \quad (6.2.28)$$

- 5 sunkvežimiui:

$$k_{\alpha Q(5)}^{1,4} = \frac{\sum y_i}{2} = \frac{1,1262 + 0,450}{2} \approx 0,788. \quad (6.2.29)$$

Pastaba: 1 sijos skersinio pasiskirstymo koeficientai: $k_{\alpha Q(1,3)}^1 = 0,301$, $k_{\alpha Q(2,4)}^1 = 1,447$.

Apskaičiuojame 3 sijos skersinio pasiskirstymo koeficientus:



6.18 pav. 2 ir 3 sijos skersinio pasiskirstymo influencijos įvertinimus gelžbetoninę pakloto dalį

- 1 ir 3 sunkvežimiams:

$$k_{\alpha Q(1,3)}^3 = \frac{\sum y_i}{2} = \frac{1,3770 + 1,3921}{2} \approx 1,385. \quad (6.2.30)$$

- 2 ir 4 sunkvežimiams:

$$k_{\alpha Q(2,4)}^3 = \frac{\sum y_i}{2} = \frac{0,6609 + 1,1262}{2} \approx 0,894. \quad (6.2.31)$$

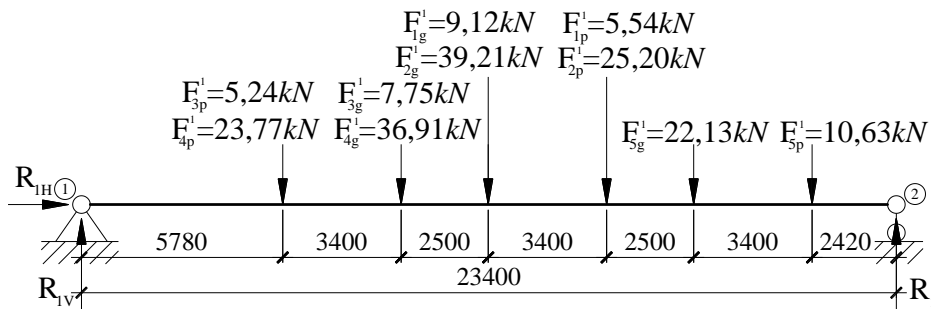
- 5 sunkvežimiui:

$$k_{\alpha Q(5)}^{2,3} = \frac{\sum y_i}{2} = \frac{1,0564 + 1,4118}{2} \approx 1,234. \quad (6.2.32)$$

Pastaba: 2 sijos skersinio pasiskirstymo koeficientai: $k_{\alpha Q(1,3)}^2 = 0,894$, $k_{\alpha Q(2,4)}^2 = 1,385$.

Pirmos sijos įlinkio skaičiavimas:

Apskaičiuojame pirmą siją veikiančias apkrovas pagal 6.2.7 formulę. Gauti rezultatai pateikiami 6.19 paveiksle:



6.19 pav. Pirmą siją veikiančios apkrovos įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį

Reakcijos: $R_{1V} = 90,72 \text{ kN}$, $R_2 = 94,78 \text{ kN}$, $R_{1H} = 0 \text{ kN}$.

Skaičiuojamosios schemos lenkimo momento diferencialinė lygtis sutampa su 6.2.8 lygtimi, todėl į šią lygtį įstatome naujus kintamuosius R_{1V} ir F_{ij}^1 . Taikydami pradines sąlygas lygčiai $E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot du_{max}$, apskaičiuojame nežinomas konstantas:

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^1 = 0, \quad x = 0, \quad C_2 = 0;$$

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^1 = 0, \quad x = 23,4, \quad C_1 = 5456,05.$$

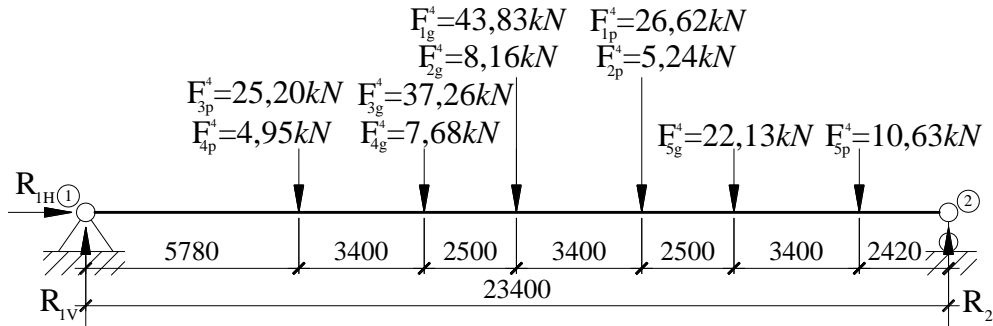
Lygtį 6.2.9 prilyginame 0, apskaičiuojame x , kuris lygus 11,70 m. Apskaičiuojame įlinkį nuo veikiančių apkrovų:

$$u_{max}^1 = \frac{1}{E_{cm} \cdot I_{eff}} \cdot \left(-\frac{R_{1V}}{6} \cdot x^3 + \frac{(F_{3p}^1 + F_{4p}^1)}{6} \cdot (x - 5,78)^3 + \frac{(F_{3g}^1 + F_{4g}^1)}{6} \cdot (x - 9,18)^3 + \right. \\ \left. + \frac{(F_{1g}^1 + F_{2g}^1)}{6} \cdot (x - 11,68)^3 + C_1 \cdot x \right) = \frac{1}{40,82 \cdot 10^6 \cdot 0,1551} \cdot \left(-\frac{90,72}{6} \cdot 11,70^3 + \right. \\ \left. + \frac{(5,24 + 23,77)}{6} \cdot (11,70 - 5,78)^3 + \frac{(7,75 + 36,91)}{6} \cdot (11,70 - 9,18)^3 + \frac{(9,12 + 39,21)}{6} \cdot (11,70 - 11,68)^3 + 5521,75 \cdot 11,70 \right) = 6,56 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 6,56 \text{ mm}. \quad (6.2.33)$$

Ketvirtos sijos įlinkio skaičiavimas:

Apskaičiuojame ketvirtą siją veikiančias apkrovas pagal 6.2.7 formulę. Gauti rezultatai

pateikiami 6.20 paveiksle:



6.20 pav. Ketvirtą siją veikiančios apkrovos įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį

Reakcijos: $R_{1V}=93,98kN$, $R_2=97,72kN$, $R_{1H}=0kN$.

Skaičiuojamosios schemos lenkimo momento diferencialinė lygtis sutampa su 6.2.8 lygtimi, todėl į šią lygtį įstatome naujus kintamuosius R_{1V} ir F_{ij}^4 . Taikydami pradines sąlygas lygčiai $E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot du_{max}$, apskaičiuojame nežinomas konstantas:

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^4 = 0, \quad x = 0, \quad C_2 = 0;$$

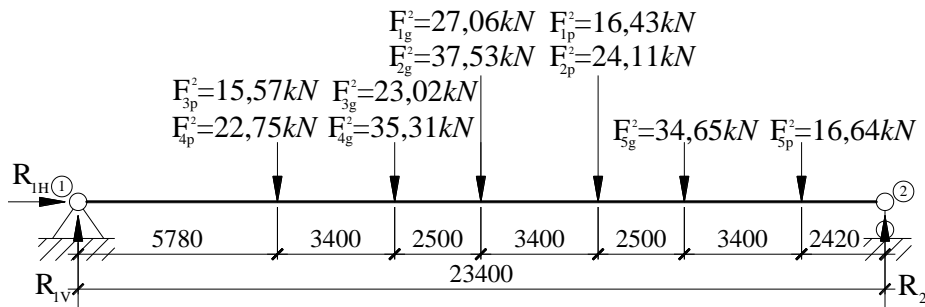
$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^4 = 0, \quad x = 23,4, \quad C_1 = 5722,55.$$

Lygtį 6.2.9 prilyginame 0, apskaičiuojame x , kuris lygus 11,70 m. Apskaičiuojame įlinkį nuo veikiančių apkrovų:

$$u_{max}^4 = \frac{1}{E_{cm} \cdot I_{eff}} \cdot \left(-\frac{R_{1V}}{6} \cdot x^3 + \frac{(F_{3p}^4 + F_{4p}^4)}{6} \cdot (x - 5,78)^3 + \frac{(F_{3g}^4 + F_{4g}^4)}{6} \cdot (x - 9,18)^3 + \right. \\ \left. + \frac{(F_{1g}^4 + F_{2g}^4)}{6} \cdot (x - 11,68)^3 + C_1 \cdot x \right) = \frac{1}{40,82 \cdot 10^6 \cdot 0,1551} \cdot \left(-\frac{93,98}{6} \cdot 11,70^3 + \right. \\ \left. + \frac{(25,20 + 4,95)}{6} \cdot (11,70 - 5,78)^3 + \frac{(37,26 + 7,68)}{6} \cdot (11,70 - 9,18)^3 + \frac{(43,83 + 8,16)}{6} \cdot (11,70 - 11,68)^3 + 5456,05 \cdot 11,70 \right) = 6,80 \cdot 10^{-3} m = 6,80 mm. \quad (6.2.34)$$

Antros sijos įlinkio skaičiavimas:

Apskaičiuojame Antrą siją veikiančias apkrovas pagal 6.2.7 formulę. Gauti rezultatai pateikiami 6.21 paveiksle:



6.21 pav. Antrą siją veikiančios apkrovos įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį

Reakcijos: $R_{1V}=121,40kN$, $R_2=131,67kN$, $R_{1H}=0kN$.

Skaičiuojamosios schemos lenkimo momento diferencialinė lygtis sutampa su 6.2.8

lygtimi, todėl į šią lygtį įstatome naujus kintamuosius R_{IV} ir F_{ij}^2 . Taikydami pradines sąlygas lygčiai $E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot du_{max}$, apskaičiuojame nežinomas konstantas:

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^2 = 0, \quad x = 0, \quad C_2 = 0;$$

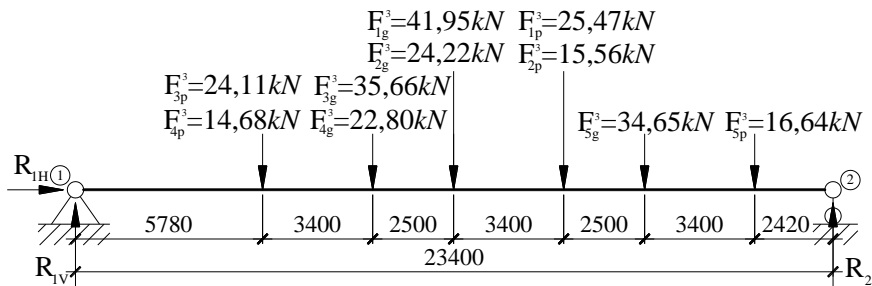
$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^2 = 0, \quad x = 23,4, \quad C_1 = 7434,08.$$

Lygtį 6.2.9 prilyginame 0, apskaičiuojame x , kuris lygus 11,70 m. Apskaičiuojame įlinkį nuo veikiančių apkrovų:

$$u_{max}^2 = \frac{1}{E_{cm} \cdot I_{eff}} \cdot \left(-\frac{R_{IV}}{6} \cdot x^3 + \frac{(F_{3p}^2 + F_{4p}^2)}{6} \cdot (x - 5,78)^3 + \frac{(F_{3g}^2 + F_{4g}^2)}{6} \cdot (x - 9,18)^3 + \right. \\ \left. + \frac{(F_{1g}^2 + F_{2g}^2)}{6} \cdot (x - 11,68)^3 + C_1 \cdot x \right) = \frac{1}{40,82 \cdot 10^6 \cdot 0,1551} \cdot \left(-\frac{121,40}{6} \cdot 11,70^3 + \right. \\ \left. + \frac{(15,57 + 22,75)}{6} \cdot (11,70 - 5,78)^3 + \frac{(23,02 + 35,31)}{6} \cdot (11,70 - 9,18)^3 + \frac{(27,06 + 37,53)}{6} \cdot \right. \\ \left. \cdot (11,70 - 11,68)^3 + 7434,08 \cdot 11,70 \right) = 8,85 \cdot 10^{-3} m = 8,85 mm. \quad (6.2.35)$$

Trečios sijos įlinkio skaičiavimas:

Apskaičiuojame trečią siją veikiančias apkrovas pagal 6.2.13 formulę. Gauti rezultatai pateikiami 6.8 paveiksle:



6.22 pav. Trečią siją veikiančios apkrovos įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį

Reakcijos: $R_{IV}=122,80kN$, $R_2=132,94kN$, $R_{IH}=0kN$.

Skaičiuojamosios schemos lenkimo momento diferencialinė lygtis sutampa su 6.2.8 lygtimi, todėl į šią lygtį įstatome naujus kintamuosius R_{IV} ir F_{ij}^3 . Taikydami pradines sąlygas lygčiai $E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot du_{max}$, apskaičiuojame nežinomas konstantas:

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^3 = 0, \quad x = 0, \quad C_2 = 0;$$

$$E_{cm} \cdot I_{eff} \cdot u_{max}^3 = 0, \quad x = 23,4, \quad C_1 = 7520,74.$$

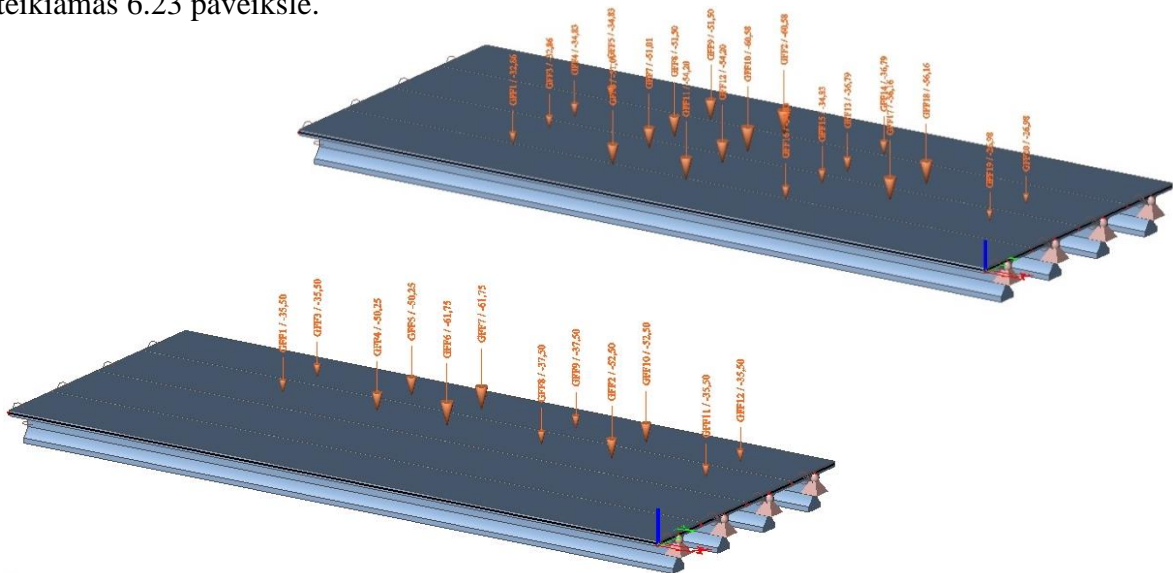
Lygtį 6.2.9 prilyginame 0, apskaičiuojame x , kuris lygus 11,70 m. Apskaičiuojame įlinkį nuo veikiančių apkrovų:

$$u_{max}^3 = \frac{1}{E_{cm} \cdot I_{eff}} \cdot \left(-\frac{R_{IV}}{6} \cdot x^3 + \frac{(F_{3p}^3 + F_{4p}^3)}{6} \cdot (x - 5,78)^3 + \frac{(F_{3g}^3 + F_{4g}^3)}{6} \cdot (x - 9,18)^3 + \right. \\ \left. + \frac{(F_{1g}^3 + F_{2g}^3)}{6} \cdot (x - 11,68)^3 + C_1 \cdot x \right) = \frac{1}{40,82 \cdot 10^6 \cdot 0,1551} \cdot \left(-\frac{122,80}{6} \cdot 11,70^3 + \right. \\ \left. + \frac{(24,11 + 14,68)}{6} \cdot (11,70 - 5,78)^3 + \frac{(35,66 + 22,80)}{6} \cdot (11,70 - 9,18)^3 + \frac{(41,95 + 24,22)}{6} \cdot \right. \\ \left. \cdot (11,70 - 11,68)^3 + 7747,25 \cdot 11,70 \right) = 8,95 \cdot 10^{-3} m = 8,95 mm. \quad (6.2.36)$$

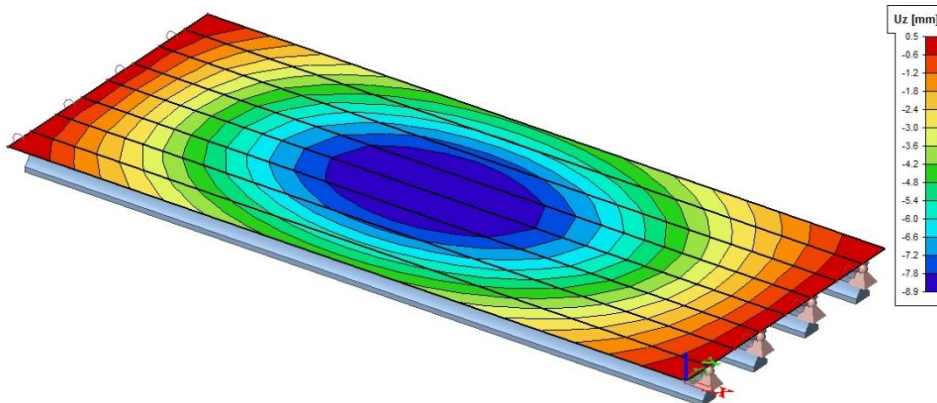
6.3. Teorinis sijų įlinkių skaičiavimas programa „Scia Engineer“

Konstrukcijų projektavimo programa „Scia Engineer“ sudarytas tilto per upę Šušvę vieno tarpatramio perdangos modelis (6.23 paveikslas) [40]. Programa taip pat galima atlikti tilto perdangos deformacijų analizę, remiantis ortotropinės plokštės metodu. Nagrinėjamo tilto atveju turime skirtingą perdangos standumą išilgine ir skersine kryptimi. Standumų dydį programa apskaičiuoja suvedus plokštės parametrų duomenis. Programa suskaičiuoja plokštės x ir y standumus lenkiant D_{11} , D_{22} , taip pat standumus plokštę sukant ir kerpant, atitinkamai koeficientai D_{33} , D_{44} , D_{55} [44]. Programos aplinkoje pasirenkamas plokštės tipas su sijomis. Joms priskiriamas faktinis tilto sijų skerspjūvis iš programos „Autodesk Autocad“.

Sumodeliavus tilto perdangą yra įvedamos apkrovos, kurios buvo naudojamos statinio bandymo metu, kai tiltas buvo apkraunamas viduryje ir krašte. Apkrovų išdėstymo pozicijos parodytos 6.1, 6.4, 6.9 ir 6.12 paveiksluose. Perdangos bendras vaizdas su apkrovomis pateikiamas 6.23 paveiksle.

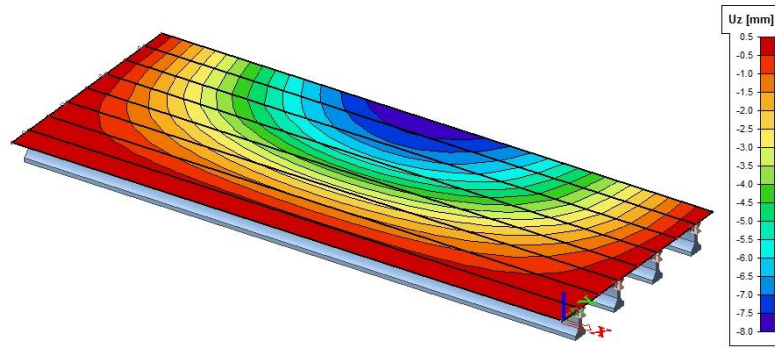


6.23 pav. Tilto perdangos modelis su simetriniu ir asimetriniu apkrovimo variantu



6.24 pav. Tilto perdangos įlinkiai simetrinio apkrovimo atveju

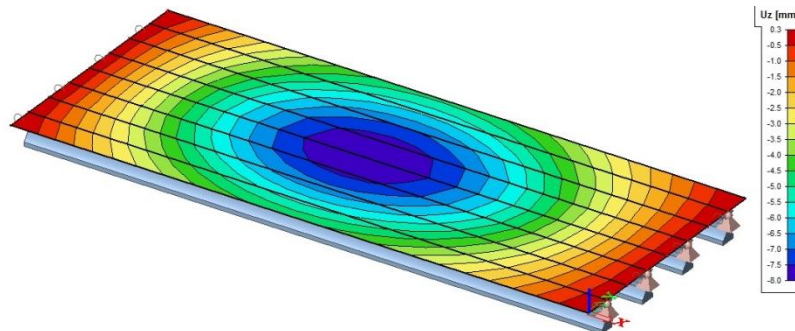
Simetriniu apkrovimo atveju perdangos sijos įlinkio 5,8 mm, 8,5 mm, 8,6 mm, 6,1 mm.



6.25 pav. Tiltlo perdangos įlinkiai asimetrinio apkrovimo atveju

Asimetriniu apkrovimo atveju perdangos sijos įlinkio 0,4 mm, 2,8 mm, 5,8 mm, 7,8 mm.

Programa „Scia Engineer“ taip pat atliktas skaičiavimas simetrinio apkrovimo variantui, įvertinant užlietą gelžbetonio sluoksnį ant perdangos sijų. Gauti rezultatai pateikiami 6.26 paveiksle:

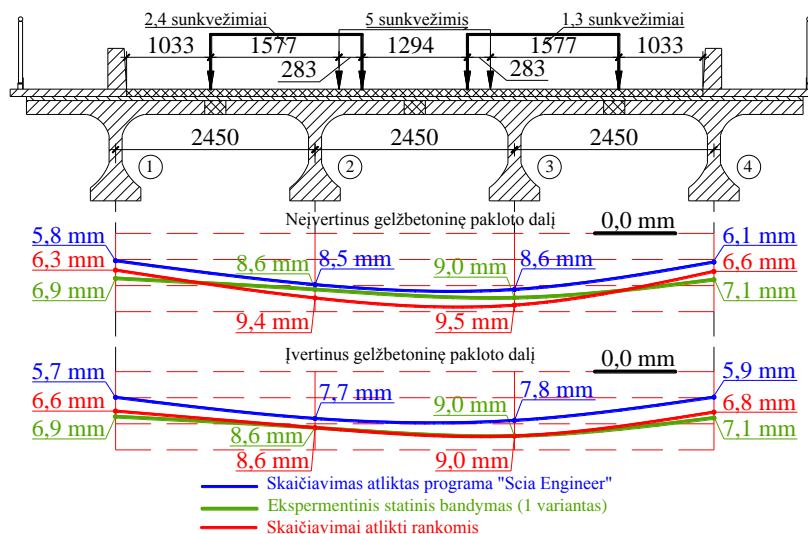


6.26 pav. Tiltlo perdangos įlinkiai įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį

Įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį, perdangos sijos įlinkio 5,7 mm, 7,7 mm, 7,8 mm, 5,9 mm.

6.4. Rezultatų palyginimas

Gautų rezultatų palyginimas pateikiamas 6.27, 6.28 paveiksluose ir 6.2, 6.3 lentelėse.

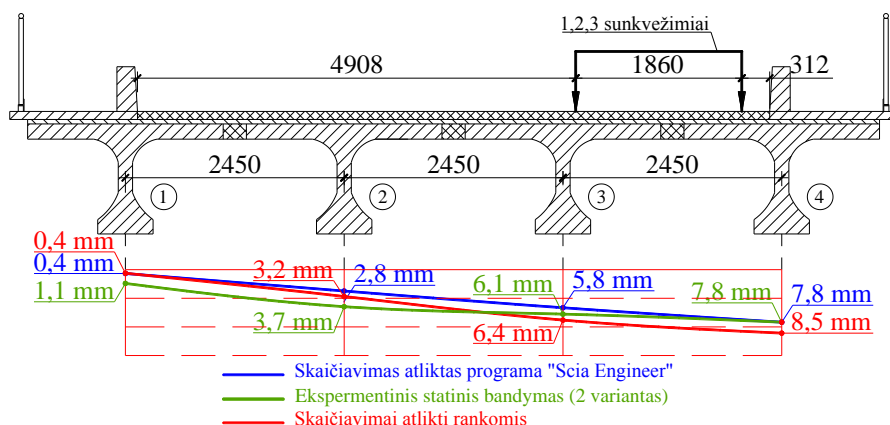


6.27 pav. Eksperimentinių ir teorinių skaičiavimų palyginimas simetrinio apkrovimo atveju

6.2 lentelė. Rezultatų palyginimas simetrinio apkrovimo atveju

	Sijos numeris			
	1	2	3	4
Santykinė paklaida %:	Neįvertinus gelžbetoninę pakloto dalį			
Skaičiavimo ranka:	8,70	9,30	5,55	7,04
Skaičiavimo programa „Scia Engineer“:	15,94	1,16	4,44	14,08
Santykinė paklaida %:	Įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį			
Skaičiavimo ranka:	4,34	0,0	0,0	4,23
Skaičiavimo programa „Scia Engineer“:	17,39	10,47	13,33	16,90

Simetrinio apkrovimo atveju, neįvertinus gelžbetoninės pakloto dalies, vidurinių sijų didžiausi įlinkio skirtumai gauti tarp teorinių ir eksperimentinių rezultatų, kai skaičiavimai atlikti ranka (didžiausias skirtumas 0,8 mm). Tačiau skaičiuojant ranka kraštinėse sijose gauti mažiausi įlinkių skirtumai (didžiausias skirtumas 0,6 mm). Rezultatų palyginimas simetrinio apkrovimo atveju, įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį, pateikiamas 6.27 paveikslo apačioje. Rankomis apskaičiuoti įlinkiai su maža paklaida atitinka eksperimentinius rezultatus, didžiausias skirtumas 0,3 mm, o programa gautas –1,2 mm.



6.28 pav. Eksperimentinių ir teorinių skaičiavimų palyginimas asimetrinio apkrovimo atveju

6.3 lentelė. Rezultatų palyginimas asimetrinio apkrovimo atveju

Santykinė paklaida %:	Sijos numeris			
	1	2	3	4
Skaičiavimo ranka:	63,64	13,50	4,92	8,97
Skaičiavimo programa „Scia Engineer“:	63,64	24,32	4,92	0

Asimetriniu apkrovimo atveju programa „Scia Engineer“ apskaičiuotas labiausiai apraustos sijos (4) įlinkis sutapo su eksperimentiniais bandymais.

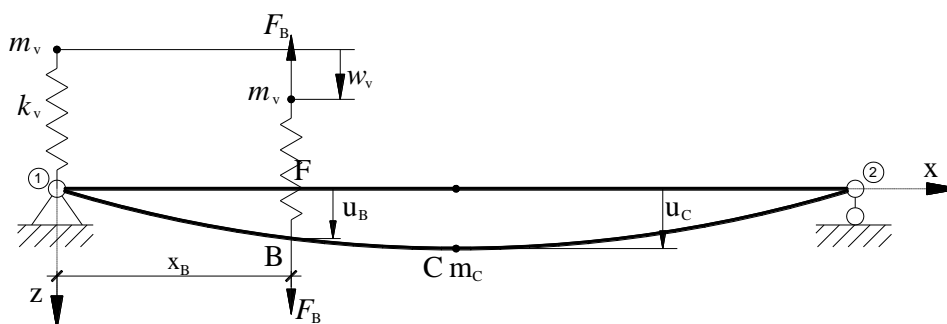
6.5. Šešto skyriaus išvados

Atlikus teorinių įlinkių skaičiavimą ranką ir programa „Scia Engineer“ pastebėta, kad:

- Neįvertinus gelžbetoninės pakloto dalies, gauti rezultatai skaičiuojant rankomis gauti su vidutiniškai 15,20% paklaida, o programa – 16,06 %;
- Įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį, gauti rezultatai skaičiuojant rankomis gauti su vidutiniškai 2,14% paklaida, o programa – 14,52 %.

7. TILTO DINAMINIO ĮLINKIO SKAIČIAVIMO MODELIS

Nagrinėjant tilto dinamiką svarbu tinkamai sudaryti skaičiavimo modelį, kuris kuo labiau atitiktų realią situaciją. Todėl nagrinėjamas modelis dinaminiam įlinkiui skaičiuoti yra sudarytas taip, kad būtų atsižvelgiama ne tik į tilto masę, bet ir į krovinio masę. Taip pat šiame modelyje vertinami transporto priemonės ir tilto standumai [10]. Tiltas nagrinėjamas kaip dviatramė sija, o tai ypač svarbu vertinant tilto per upę Šušvę dinamiką dėl konstrukcijos schemos. Šio modelio schema pateikta žemiau esančiame 7.1 paveiksle, kurį sudarė V. Kargaudas ir R. Vaičaitis.



7.1 pav. Lenkiamas tiltas ir spyruokle atremta transporto priemonė [10, 22]

Uždavinys turės du laisvės laipsnius, nes skaičiuodami įvertinsime tilto ir krovinio masę. Norint supaprastinti skaičiavimą priimsime tokias prielaidas:

- laikysime, kad transporto priemonė ideali sistema su vienu laisvės laipsniu ir masė koncentruota centre;
- tilto perdanga nagrinėjama kaip viena sija ir jos masė bus koncentruojama centre [19];
- traktuosime, kad sijos įlinkio forma – sinusoidė [9].
- transporto priemonės judėjimo greitis pastovus.

7.1. Krovinio ir tilto sijos judesio lygtys

Atsižvelgiant į priimtą antrą prielaidą, sijos masę pakeičiame ekvivalentiška sutelkta mase $m_c = m/2$. Visą sijos ilgį padaliname į du vienodus fragmentus ir kiekvieno jų galuose pridėdame po pusę fragmento masės. Sekanti prielaida, kad sijos įlinkio forma – sinusoidė. Remiantis Maksvelio teorema, taško B poslinkis dėl vienetinės tašką C veikiančios jėgos yra toks pats, kaip taško C poslinkis dėl vienetinės tašką B veikiančios jėgos:

$$u_B = u_C \cdot \sin \frac{\pi \cdot x_B}{l}; \quad (7.1.1)$$

čia: u_i – poslinkiai tam tikruose taškuose;

l – tarpatramio ilgis;

x_B – atstumas nuo sijos pradžios iki vienetinės jėgos pridėjimo taško.

Šio modelio dinaminiam įlinkiui aprašyti naudojama masės m_c poslinkių lygybė:

$$u_C = F_B \cdot \delta_{CB} + \Phi \cdot \delta_{CC} + W_v \cdot \delta_{CB}; \quad (7.1.2)$$

čia: F_B – spyruoklės (amortizatoriaus) jėga;

Φ – tilto inercijos jėga;

W_v – krovinio svoris, kuris apskaičiuojamas: $W_v = m_v g$;

δ_{CB} – taško C poslinkis nuo vienetinės jėgos taške B;

δ_{CC} – taško C poslinkis nuo vienetinės jėgos taške C.

Taško C poslinkis dėl vienetinės jėgos taške D atitinka pirmosios svyravimo modos formą ir aprašomas formule:

$$\delta_{CB} = \delta_{BC} = \delta_{CC} \cdot \sin \frac{\pi \cdot x_B}{l}. \quad (7.1.3)$$

Laikysime, kad transporto priemonė remiasi į siją tampriu ryšiu – spyruokle, kurios standumas k_v . Spyruoklės (amortizatoriaus) jėga aprašoma formule:

$$F_B = k_v \cdot (w_v - u_B); \quad (7.1.4)$$

čia: w_v – yra vertikalus judančios masės m_v poslinkis;

u_B – sijos įlinkis pajudėjus transportui atstumu x_B .

Tilto inercijos jėga aprašoma formule:

$$\Phi = -m_c \cdot u_c''; \quad (7.1.5)$$

čia: m_c – sijos masė svorio centre;

u_c'' – sijos taško C pagreitis.

Transportui (kroviniui) rašome II Niutono dėsnį:

$$m_v \cdot w_v'' = -k_v \cdot (w_v - u_B); \quad (7.1.6)$$

čia: m_v – krovinio masė;

w_v'' – krovinio pagreitis.

Lygtis 7.1.2 pertvarkoma įrašius 7.1.1, 7.1.4, 7.1.5 lygties išraiškas:

$$\delta_{CC} \cdot m_c \cdot u_c'' + u_c = k_v \cdot \left(w_v - u_c \cdot \sin \frac{\pi \cdot x_B}{l} \right) \cdot \delta_{CC} \cdot \sin \frac{\pi \cdot x_B}{l} + W_v \cdot \delta_{CC} \cdot \sin \frac{\pi \cdot x_B}{l}. \quad (7.1.7)$$

Pagal ketvirtą prielaidą laikome, kad krovinys juda pastoviu greičiu c , t.y. $x_B = c \cdot t$ (t – laikas), todėl 7.1.3 lygtį galime perrašyti taip: $\delta_{CB} = \delta_{CC} \cdot \sin \theta t$, nes $\theta = \pi \cdot c / l$. Sijos įlinkis nuo vienetinės jėgos taške C aprašomas formule:

$$\delta_{CC} = \frac{l^3}{48E \cdot I}; \quad (7.1.8)$$

čia: l – analizuojamos sijos ilgis (m);

E – tamprumo modulis,

I – inercijos momentas;

EI – sijos standumas (Nm^2).

Kadangi $k_c = l / \delta_{CC}$, tuomet 7.1.6 ir 7.1.7 lygtis galime perrašyti taip:

$$\begin{cases} m_c \cdot u_c'' + k_c \cdot u_c = k_v \cdot (w_v - u_c \cdot \sin \theta t) \cdot \sin \theta t + W_v \cdot \sin \theta t; \\ m_v \cdot w_v'' + k_v \cdot w_v = k_v \cdot u_c \cdot \sin \theta t. \end{cases} \quad (7.1.9)$$

Iš 7.1.9 lygčių sistemos antrosios lygties išreiškiame $k_v \cdot (w_v - u_c \cdot \sin \theta t) = -m_v \cdot w_v''$ ir įrašome į 7.1.9 lygčių sistemos pirmąją lygtį. Lygčių sistema keičiasi taip:

$$\begin{cases} m_c \cdot u_c'' + k_c \cdot u_c = (W_v - m_v \cdot w_v'') \cdot \sin \theta t; \\ m_v \cdot w_v'' + k_v \cdot w_v = k_v \cdot u_c \cdot \sin \theta t. \end{cases} \quad (7.1.10)$$

Tai tiesinių diferencialinių lygčių sistema, bet jos koeficientai ne konstantos.

7.2. Priverstiniai virpesiai

Lygčių sistemą 7.1.9 galima spręsti trigonometrinėmis eilutėmis. Iš pradžių rasime sistemos atskirąjį sprendinį – priverstinius virpesius. Pakeisime kintamuosius taip, kad liktų minimalus nepriklausomų parametrų skaičius ir išreikšime nepriklausomą kintamąjį t kintamuoju ζ :

$$t = \frac{l \cdot \zeta}{\pi \cdot c} = \frac{\zeta}{\theta}; \quad (7.2.1)$$

$$u_c = \frac{W_v}{k_c} \cdot u; \quad (7.2.2)$$

$$w_v = \frac{W_v}{k_c} \cdot w; \quad (7.2.3)$$

Lygčių 7.1.9 sistema keičiasi taip:

$$\begin{cases} \mu_1 \cdot u'' + u = (1 - \mu_0 \cdot w'') \cdot \sin \zeta; \\ \mu_2 \cdot w'' + w = u \cdot \sin \zeta. \end{cases} \quad (7.2.4)$$

čia: $u'' = d^2u / d\zeta^2$ ir $w'' = d^2w / d\zeta^2$ išvestinės ζ parametro atžvilgiu;

μ_j - nedimensiniai parametrai.

Pirmasis nedimensinis parametras μ_0 aprašomas:

$$\mu_0 = \frac{\pi^2 \cdot c^2}{l^2} \cdot \frac{m_v}{k_c}; \quad (7.2.5)$$

čia: m_v – transporto masė;

k_v – spyruoklės (amortizatoriaus) standis;

c – krovinio judėjimo greitis;

l – sijos ilgis.

Antrasis nedimensinis parametras μ_1 aprašomas:

$$\mu_1 = \frac{\pi^2 \cdot c^2}{l^2} \cdot \frac{m_c}{k_c}; \quad (7.2.6)$$

čia: m_c – sijos masė;

k_c – sijos standis.

Trečiasis nedimensinis parametras μ_2 aprašomas:

$$\mu_2 = \frac{\pi^2 \cdot c^2}{l^2} \cdot \frac{m_v}{k_v}. \quad (7.2.7)$$

Egzistuoja dvi ortogonalios funkcijų sekos intervale $[0, \pi]$:

$$\begin{aligned} &1, \cos \xi, \cos 2\xi, \cos 3\xi, \cos 4\xi, \dots \\ &\sin \xi, \sin 2\xi, \sin 3\xi, \sin 4\xi, \dots \end{aligned}$$

Kurias galima teikti bet kuriai tolydziai funkcijai aprašyti. Todėl bet kokį sprendinį galima teikti taip:

$$\begin{cases} u = A_1 \cdot \sin \xi + A_2 \cdot \sin 2\xi + A_3 \cdot \sin 3\xi + \dots; \\ w = D_0 + D_1 \cdot \cos \xi + D_2 \cdot \cos 2\xi + D_3 \cdot \cos 3\xi + \dots \end{cases} \quad (7.2.8)$$

Lygčių sistemoje 7.2.4 kairėje pusėje turime sumas $u + \mu_1 \cdot u''$ ir $w + \mu_2 \cdot w''$.

Apskaičiavę antros eilės išvestines ir atlikę algebrinius veiksmus gauname:

$$\begin{cases} u + \mu_1 \cdot u'' = A_1 \cdot \sin \xi + A_2 \cdot \sin 2\xi + A_3 \cdot \sin 3\xi - \\ - \mu_1 \cdot A_1 \cdot \sin \xi - 4\mu_1 \cdot A_2 \cdot \sin 2\xi - 9\mu_1 \cdot A_3 \cdot \sin 3\xi \dots; \\ w + \mu_2 \cdot w'' = D_0 + D_1 \cdot \cos \xi + D_2 \cdot \cos 2\xi + D_3 \cdot \cos 3\xi - \\ - \mu_2 \cdot D_1 \cdot \cos \xi - 4\mu_2 \cdot D_2 \cdot \cos 2\xi - 9\mu_2 \cdot D_3 \cdot \cos 3\xi \dots \end{cases} \quad (7.2.9)$$

Lygčių sistemoje 7.2.4 dešinėje pusėje turime sandaugas $u \cdot \sin \xi$ ir $w'' \cdot \sin \xi$:

$$\begin{cases} w'' \cdot \sin \xi = -D_1 \cdot \cos \xi \cdot \sin \xi - 4 \cdot D_2 \cdot \cos 2\xi \cdot \sin \xi - 9 \cdot D_3 \cdot \cos 3\xi \cdot \sin \xi \dots; \\ u \cdot \sin \xi = A_1 \cdot \sin \xi \cdot \sin \xi + A_2 \cdot \sin 2\xi \cdot \sin \xi + A_3 \cdot \sin 3\xi \cdot \sin \xi + \dots \end{cases} \quad (6.2.10)$$

Lygčių sistemai 7.2.10 pritaikome trigonometrines tapatybes:

$$2 \sin j\xi \cdot \sin \xi = \cos(j-1) \cdot \xi - \cos(j+1) \cdot \xi; \quad (7.2.11)$$

$$2 \cos j\xi \cdot \sin \xi = -\sin(j-1) \cdot \xi + \sin(j+1) \cdot \xi. \quad (7.2.12)$$

Gauname:

$$\begin{cases} 2 \cdot w'' \cdot \sin \xi = -D_1 \cdot \sin 2\xi - 4 \cdot D_2 \cdot (\sin 3\xi - \sin \xi) - 9 \cdot D_3 \cdot (\sin 4\xi - \sin 2\xi) \dots; \\ 2 \cdot u \cdot \sin \xi = A_1 \cdot (1 - \cos 2\xi) + A_2 \cdot (\cos \xi \cdot \cos 3\xi) + A_3 \cdot (\cos 2\xi - \cos 4\xi) + \dots \end{cases} \quad (7.2.13)$$

Lygtis 7.2.9 ir 7.2.13 įstatome į 7.2.4 lygčių sistemą. Atliekame pergrupavimą iš 7.2.4 pirmosios lygties $\sin \zeta, \sin 2\zeta, \sin 3\zeta, \dots$, lygybės:

$$\begin{cases} 2 \cdot A_1(1 - \mu_1) = 2 - 4 \cdot D_2 \cdot \mu_0; \\ 2 \cdot A_2(1 - 4 \cdot \mu_1) = D_1 \cdot \mu_0 - 9 \cdot D_3 \cdot \mu_0; \\ 2 \cdot A_3(1 - 9 \cdot \mu_1) = 4 \cdot D_2 \cdot \mu_0 - 16 \cdot D_4 \cdot \mu_0; \\ 2 \cdot A_4(1 - 16 \cdot \mu_1) = 9 \cdot D_3 \cdot \mu_0 - 25 \cdot D_5 \cdot \mu_0; \\ \dots \end{cases} \quad (7.2.14)$$

Atliekame pergrupavimą iš 7.2.4 antrosios lygties $\cos \zeta, \cos 2\zeta, \cos 3\zeta, \dots$, lygybės:

$$\begin{cases} A_1 = 2 \cdot D_2; \\ A_2 = 2 \cdot D_1(1 - \mu_2); \\ A_3 - A_1 = 2 \cdot D_2(1 - 4 \cdot \mu_2); \\ A_4 - A_2 = 2 \cdot D_3(1 - 9 \cdot \mu_2); \\ A_5 - A_3 = 2 \cdot D_4(1 - 16 \cdot \mu_2); \\ \dots \end{cases} \quad (7.2.15)$$

Iš 7.2.15 lygčių išreiškiame D_j reikšmes:

$$\begin{cases} D_0 = \alpha_0 \cdot A_1; \\ D_1 = \alpha_1 \cdot A_2; \\ D_2 = \alpha_2 \cdot (A_3 - A_1); \\ D_3 = \alpha_3 \cdot (A_4 - A_2); \\ D_4 = \alpha_4 \cdot (A_5 - A_3); \\ \dots \end{cases} \quad \alpha_j = \frac{1}{2(1 - j^2 \cdot \mu_2)}; \quad (7.2.16)$$

Šias D_j reikšmes įrašome į 7.2.16 lygčių sistemą ir išvedame tiesines lygtis, iš kurių galime apskaičiuoti konstantas A_1, A_2, A_3, \dots :

$$\begin{cases} 2 \cdot A_1(1 - \mu_1) = 2 - 4 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_2(A_3 - A_1); \\ 2 \cdot A_2(1 - 4\mu_1) = \mu_0 \cdot \alpha_1 \cdot A_2 - 9 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_3(A_4 - A_2); \\ 2 \cdot A_3(1 - 9\mu_1) = 4 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_2(A_3 - A_1) - 16 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_4(A_5 - A_3); \\ 2 \cdot A_4(1 - 16\mu_1) = 9 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_3(A_4 - A_2) - 25 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_5(A_6 - A_4); \\ 2 \cdot A_5(1 - 25\mu_1) = 16 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_4(A_5 - A_3) - 36 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_6(A_7 - A_5); \\ 2 \cdot A_6(1 - 36\mu_1) = 25 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_5(A_6 - A_4) - 49 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_7(A_8 - A_6); \\ \dots \end{cases} \quad (7.2.17)$$

Pirmoji lygtis 7.2.17 lygčių sistemos – nehomogeninė, nes laisvasis narys lygus 2. Antroji, ketvirtoji ir šeštoji lygtis turi bendrus koeficientus, tačiau ši lygčių sistema – homogeninė, todėl visi $A_2 = A_4 = A_6 = A_8 = \dots = 0$.

Aprašysime pirmąsias tris nelygines lygtis. Nežinomieji bus A_1, A_3, A_5 ir galima laikyti,

kad $A_7=0$. Gauname tokią lygčių sistemą:

$$\begin{cases} 2 \cdot A_1(1 - \mu_1) + 4 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_2(A_3 - A_1) = 2; \\ 2 \cdot A_3(1 - 9\mu_1) - 4 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_2(A_3 - A_1) - 16 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_4(A_5 - A_3) = 0; \\ 2 \cdot A_5(1 - 25\mu_1) - 16 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_4(A_5 - A_3) - 36 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_6(-A_5) = 0; \end{cases} \quad (7.2.18)$$

Nustatome priverstinių virpesių u_c ir w_c , t.y atskirąjį sprendinį:

$$\begin{aligned} u_c &= \frac{W_v}{k_c} \sum_{1,3,5..} A_j \cdot \sin j\xi \\ w_v &= \frac{W_v}{k_v} \sum_{0,2,4..} D_j \cdot \cos j\xi \end{aligned} \quad (7.2.19)$$

7.3. Nehomogeninės diferencialinių lygčių sistemos bendrasis sprendinys

Nehomogeninė diferencialinė 7.2.4 lygčių sistema buvo:

$$\begin{cases} \mu_1 \cdot u'' + u = (1 - \mu_0 \cdot w'') \cdot \sin \xi; \\ \mu_2 \cdot w'' + w = u \cdot \sin \xi. \end{cases} \quad (7.3.1)$$

Iš šios lygčių sistemos sudarome homogeninę lygčių sistemą:

$$\begin{cases} \mu_1 \cdot u'' + u = -\mu_0 \cdot w'' \cdot \sin \xi; \\ \mu_2 \cdot w'' + w = u \cdot \sin \xi. \end{cases} \quad (7.3.2)$$

Lygčių sistema yra ketvirtos eilės, todėl sprendinys susideda iš keturių nepriklausomų sprendinių:

$$\begin{cases} u_f = u^* + u^{**}; \\ w_f = w^* + w^{**}. \end{cases} \quad (7.3.3)$$

Sprendinio dalį u^* , w^* aprašome kaip nehomogeninės lygčių sistemos atskirąjį sprendinį įvesdami tam tikrus pakeitimus:

$$\begin{cases} u^* = A_1 \cdot \sin \xi + A_2 \cdot \sin 2\xi + A_3 \cdot \sin 3\xi + \dots; \\ w^* = D_0 + D_1 \cdot \cos \xi + D_2 \cdot \cos 2\xi + D_3 \cdot \cos 3\xi + \dots \end{cases} \quad (7.2.4)$$

Sprendinius u^* ir w^* aprašome kaip nehomogeninės lygčių sistemos atskirusius sprendinius, kurie sutampa su 7.2.17 lygties sistemos sprendiniais:

$$\begin{cases} 2 \cdot \widehat{A}_1(1 - \mu_1) = -4 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_2(\widehat{A}_3 - \widehat{A}_1); \\ 2 \cdot \widehat{A}_2(1 - 4\mu_1) = \mu_0 \cdot \alpha_1 \cdot A_2 - 9 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_3(\widehat{A}_4 - \widehat{A}_2); \\ 2 \cdot \widehat{A}_3(1 - 9\mu_1) = 4 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_2(\widehat{A}_3 - \widehat{A}_1) - 16 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_4(\widehat{A}_5 - \widehat{A}_3); \\ 2 \cdot \widehat{A}_4(1 - 16\mu_1) = 9 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_3(\widehat{A}_4 - \widehat{A}_2) - 25 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_5(\widehat{A}_6 - \widehat{A}_4); \\ 2 \cdot \widehat{A}_5(1 - 25\mu_1) = 16 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_4(\widehat{A}_5 - \widehat{A}_3) - 36 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_6(\widehat{A}_7 - \widehat{A}_5); \\ 2 \cdot \widehat{A}_6(1 - 36\mu_1) = 25 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_5(\widehat{A}_6 - \widehat{A}_4) - 49 \cdot \mu_0 \cdot \alpha_7(\widehat{A}_8 - \widehat{A}_6); \\ \dots \end{cases} \quad (7.3.5)$$

Iš 7.2.15 lygčių sistemos turime ryšį tarp priverstinių virpesių konstantų A ir D :

$$D_0 = \frac{1}{2} A_1, \quad D_1 = \alpha_1 \cdot A_2, \quad \alpha_j = \frac{1}{2(1 - j^2 \cdot \mu_2)}. \quad (7.3.6)$$

Atsižvelgdami tik į A_1 ir A_2 nustatome:

$$\begin{cases} u^* = \widehat{A}_1 \cdot \sin \xi + \widehat{A}_2 \cdot \sin 2\xi; \\ w^* = \frac{1}{2} \widehat{A}_1 + \left(\frac{1}{2} (1 - \mu_2) \cdot \widehat{A}_2 \right) \cos \xi. \end{cases} \quad (7.3.7)$$

Kitą fundamentalaus sprendinio dalį aprašome taip:

$$\begin{cases} u^{**} = B_0 + B_1 \cdot \cos \xi + B_2 \cdot \cos 2\xi + B_3 \cdot \cos 3\xi + \dots; \\ w^{**} = C_1 \cdot \sin \xi + C_2 \cdot \sin 2\xi + C_3 \cdot \sin 3\xi + \dots \end{cases} \quad (7.3.8)$$

Lygčių sistemoje 7.3.1 kairėje pusėje turime sumas $u + \mu_1 \cdot u''$ ir $w + \mu_2 \cdot w''$.

Apskaičiavę antros eilės išvestines ir atlikę algebrinius veiksmus gauname:

$$\begin{cases} u + \mu_1 \cdot u'' = B_0 + B_1 \cdot \cos \xi + B_2 \cdot \cos 2\xi - \mu_1 \cdot B_1 \cdot \cos \xi - 4\mu_1 \cdot B_2 \cdot \cos 2\xi \\ = B_0 + B_1(1 - \mu_1) \cdot \cos \xi + B_2(1 - 4\mu_1) \cdot \cos 2\xi + \dots; \\ w + \mu_2 \cdot w'' = C_1 \cdot \sin \xi + C_2 \cdot \sin 2\xi - \mu_2 \cdot C_1 \cdot \sin \xi - 4\mu_2 \cdot C_2 \cdot \sin 2\xi = \\ = C_1 \cdot (1 - \mu_2) \cdot \sin \xi + C_2 \cdot (1 - 4\mu_2) \cdot \sin 2\xi + \dots \end{cases} \quad (7.3.9)$$

Lygčių sistemoje 7.3.1 dešinėje pusėje turime sandaugas $u^{**} \cdot \sin \xi$ ir $w^{***} \cdot \sin \xi$ ir joms pritaikome trigonometrines tapatybes:

$$\begin{cases} -2\mu_0 \cdot w^{***} \cdot \sin \xi = -2\mu_0 \cdot C_1 \cdot \sin \xi \cdot \sin \xi - 2 \cdot \mu_0 \cdot 4C_2 \cdot \sin \xi \cdot \sin 2\xi - \\ - 2 \cdot \mu_0 \cdot 9 \cdot C_3 \cdot \cos \xi \cdot \sin 3\xi - 2 \cdot \mu_0 \cdot 16 \cdot C_4 \cdot \cos \xi \cdot \sin 4\xi = -\mu_0 \cdot C_1 \cdot \\ \cdot (1 - \cos 2\xi) - 4\mu_0 \cdot C_2 \cdot (\cos \xi - \cos 3\xi) - 9\mu_0 \cdot C_3 \cdot (\cos 2\xi - \cos 4\xi) - \\ - 16\mu_0 \cdot C_4 \cdot (\cos 3\xi - \cos 5\xi) = -\mu_0 \cdot C_1 - \mu_0 \cdot 4C_2 \cdot \cos \xi - (9C_3 - C_1) \cdot \\ \cdot \mu_0 \cdot \cos 2\xi - (16C_4 - 4C_2) \cdot \mu_0 \cdot \cos 3\xi - (25C_5 - 9C_3) \cdot \mu_0 \cdot \cos 4\xi - \dots, \\ 2u^{**} \cdot \sin \xi = 2B_0 \cdot \sin \xi + 2B_1 \cdot \sin \xi \cdot \cos \xi + 2B_2 \cdot \sin \xi \cdot \cos 2\xi + \\ + 2B_3 \cdot \sin \xi \cdot \cos 3\xi = 2B_0 \cdot \sin \xi + B_1 \cdot \sin 2\xi - B_2 \cdot \sin \xi + B_2 \cdot \sin 3\xi - \\ - B_3 \cdot \sin 2\xi + B_3 \cdot \sin 4\xi = (2B_0 - B_2) \cdot \sin \xi + (B_1 - B_3) \cdot \sin 2\xi + \\ + B_3 \cdot \sin 3\xi + B_4 \cdot \sin 3\xi + \dots \end{cases} \quad (7.3.10)$$

Lygtis 7.3.9 ir 7.3.10 įstatome į 7.3.2 lygčių sistemą. Atliekame pergrupavimą iš 7.3.3 pirmosios lygties $\cos \xi, \cos 2\xi, \cos 3\xi, \dots$, lygybės:

$$\begin{cases} 2 \cdot B_0 = \mu_0 \cdot C_1; \\ 2 \cdot B_1(1 - \mu_1) = 4\mu_0 \cdot C_2; \\ 2 \cdot B_2(1 - 4 \cdot \mu_1) = \mu_0(9C_3 - C_1); \\ 2 \cdot B_3(1 - 9 \cdot \mu_1) = \mu_0(16C_4 - 4C_2); \\ \dots \end{cases} \quad (7.3.11)$$

$$\begin{cases} 2(1-\mu_2) \cdot C_1 = 2 \cdot B_0 - B_2; \\ 2(1-4\mu_2) \cdot C_2 = B_1 - B_3; \\ 2(1-9\mu_2) \cdot C_3 = B_2 - B_4; \\ 2(1-16\mu_2) \cdot C_4 = B_3 - B_5; \\ \dots \end{cases} \quad (7.3.12)$$

$$\begin{cases} C_1 = \alpha_1 \cdot (2B_0 - B_2); \\ C_2 = \alpha_2 \cdot (B_1 - B_3); \\ C_3 = \alpha_3 \cdot (B_2 - B_4); \\ C_4 = \alpha_4 \cdot (B_3 - B_5); \\ \dots \end{cases} \quad \alpha_j = \frac{1}{2(1-j^2 \cdot \mu_2)}; \quad (7.3.13)$$

$$\begin{cases} 2 \cdot B_0 = \mu_0 \cdot \alpha_1 \cdot (2B_0 - B_2); \\ 2(1-\mu_1) \cdot B_1 = 4\mu_0 \cdot \alpha_2 \cdot (B_1 - B_3); \\ 2(1-4\mu_1) \cdot B_2 = 9\mu_0 \cdot \alpha_3 \cdot (B_2 - B_4) - \mu_0 \cdot \alpha_1 \cdot (2B_0 - B_2); \\ 2(1-9\mu_1) \cdot B_3 = 16\mu_0 \cdot \alpha_4 \cdot (B_3 - B_5) - 4\mu_0 \cdot \alpha_2 \cdot (B_1 - B_3); \\ \dots \end{cases} \quad (7.3.14)$$

Laisvai nepriklausoma konstanta laikome B_0 , o konstanta B_1, B_2, B_4 išreiškiame per B_0 . Konstantas B_3, B_5 išreiškiame per B_1 . Išreiškiame B_2, B_3 ir C_1, C_2 :

$$B_2 = 2B_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{\mu_0 \cdot \alpha_1}\right); \quad (7.3.15)$$

$$B_3 = B_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{2\mu_0 \cdot \alpha_2}(1 - \mu_1)\right); \quad (7.3.16)$$

$$C_1 = \alpha_1(2B_0 - B_2) = \alpha_1 \cdot 2B_0 - \alpha_1 \cdot \left(2B_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{\mu_0 \cdot \alpha_1}\right)\right); \quad (7.3.17)$$

$$C_2 = \alpha_2 \cdot (B_1 - B_3) = \alpha_2 \cdot B_1 - \alpha_2 \cdot B_3 = \alpha_2 \cdot B_1 - \alpha_2 \cdot \left(B_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{2\mu_0 \cdot \alpha_2}(1 - \mu_1)\right)\right). \quad (7.3.18)$$

Išreikštas konstantas (B_2, B_3 ir C_1, C_2) įrašę į 7.3.7, apskaičiuojame antrą lygčių sistemos fundamentalaus sprendinio dalį:

$$\begin{cases} u^{**} = B_0 + B_1 \cdot \cos \xi + 2 \cdot B_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{\mu_0 \cdot \alpha_1}\right) \cdot \cos 2\xi; \\ w^{**} = \left(2\alpha_1 \cdot B_0 - \alpha_1 \cdot \left(2B_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{\mu_0 \cdot \alpha_1}\right)\right)\right) \cdot \sin \xi + \\ + \left(\alpha_2 \cdot B_1 - \alpha_2 \cdot \left(B_1 \cdot \left(1 - \frac{1}{2\mu_0 \cdot \alpha_2} + (1 - \mu_1)\right)\right)\right) \cdot \sin 2\xi. \end{cases} \quad (7.3.19)$$

Nedimensines konstantas α_1 ir α_2 išreiškiame:

$$\alpha_1 = \frac{1}{2 \cdot (1 - \mu_2)}, \quad \alpha_2 = \frac{1}{2 \cdot (1 - 4\mu_2)}. \quad (7.3.20)$$

Išreikštas konstantas įrašome į 7.3.19 lygčių sistemą.

Bendroji homogeninio sprendinio išraiška aprašyta 7.3.3 lygčių sistema, o bendrasis nehomogeninis sprendinys aprašomas taip:

$$\begin{cases} u_g = u + u_f = u + u^* + u^{**}; \\ w_g = w + w_f = w + w^* + w^{**}. \end{cases} \quad (7.3.21)$$

Čia: u, w yra nehomogeninis sprendinys (priverstinių virpesių).

Bendrojo nehomogeninio sprendinio išvestinės aprašomos:

$$\begin{cases} u'_g = u' + u'^* + u'^{**}; \\ w'_g = w' + w'^* + w'^{**}. \end{cases} \quad (7.3.22)$$

Į 7.3.21 ir 7.3.22 lygčių sistemas įrašius 7.2.20, 7.3.7 ir 7.3.19 lygčių sistemų išraiškas bendrasis nehomogeninis sprendinys aprašomas:

$$\begin{cases} u_{g1} = \frac{W_v}{k_c} \cdot (A_1 \cdot \sin \xi + A_3 \cdot \sin 3\xi + A_5 \cdot \sin 5\xi) + \widehat{A}_1 \cdot \sin \xi + \\ + \widehat{A}_2 \cdot \sin 2\xi + B_0 + B_1 \cdot \cos \xi + B_0 \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot (1 - \mu_2)}{\mu_0}\right) \cdot \cos 2\xi; \\ w_{g1} = \frac{W_v}{k_c} \cdot (D_0 + D_2 \cdot \cos 2\xi + D_4 \cdot \cos 4\xi) + \frac{\widehat{A}_1}{2} + \\ + \left(\frac{\widehat{A}_2}{2(1 - \mu_2)}\right) \cos \xi + B_0 \cdot \frac{2}{\mu_0} \cdot \sin \xi + B_1 \cdot \frac{1 - \mu_1}{2 \cdot \mu_0} \cdot \sin 2\xi; \end{cases} \quad (7.3.23)$$

Bendrojo nehomogeninio sprendinio išvestinės yra tokios:

$$\begin{cases} u'_{g1} = \left(\frac{W_v}{k_c} \cdot (A_1 \cdot \cos \xi + 3A_3 \cdot \cos 3\xi + 5A_5 \cdot \cos 5\xi) + \widehat{A}_1 \cdot \cos \xi + \right. \\ \left. + 2\widehat{A}_2 \cdot \cos 2\xi - B_1 \cdot \sin \xi - 4B_0 \cdot \left(1 - \frac{2(1 - \mu_2)}{\mu_0}\right) \cdot \sin 2\xi \right) \cdot \frac{\pi \cdot c}{l}; \\ w'_{g1} = \left(\frac{W_v}{k_c} \cdot (-2D_2 \cdot \sin 2\xi + 4D_4 \cdot \sin 4\xi) - \left(\frac{\widehat{A}_2}{2(1 - \mu_2)}\right) \sin \xi + \right. \\ \left. + B_0 \cdot \frac{2}{\mu_0} \cdot \cos \xi + B_1 \cdot \frac{1 - \mu_1}{\mu_0} \cdot \cos 2\xi; \right) \cdot \frac{\pi \cdot c}{l}. \end{cases} \quad (7.3.24)$$

Bendrojo nehomogeninio sprendinio antrosios išvestinės yra tokios:

$$\begin{cases} u''_{g1} = \left(\frac{W_v}{k_c} \cdot (-A_1 \cdot \sin \xi - 9A_3 \cdot \sin 3\xi - 25A_5 \cdot \sin 5\xi) - \widehat{A}_1 \cdot \sin \xi - \right. \\ \left. - 4 \cdot \widehat{A}_2 \cdot \sin 2\xi - B_1 \cdot \cos \xi - 8B_0 \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot (1 - \mu_2)}{\mu_0}\right) \cdot \cos 2\xi \right) \cdot \left(\frac{\pi \cdot c}{l}\right)^2; \\ w''_{g1} = \left(\frac{W_v}{k_c} \cdot (-4D_2 \cdot \cos 2\xi + 16D_4 \cdot \cos 4\xi) - \left(\frac{\widehat{A}_2}{2(1 - \mu_2)}\right) \cos \xi - \right. \\ \left. - 2B_0 \cdot \frac{2}{\mu_0} \cdot \sin \xi - 2B_1 \cdot \frac{1 - \mu_1}{\mu_0} \cdot \sin 2\xi; \right) \cdot \left(\frac{\pi \cdot c}{l}\right)^2. \end{cases} \quad (7.3.25)$$

Turime šešis sprendinius (7.3.23-7.3.25 lygčių sistemos), tai tilto ir transporto priemonės vertikalūs poslinkiai, greičiai ir pagreičiai. Visi šie sprendiniai reikalingi atlikti dinaminę analizę tiek tiltui, tiek transportui. Poslinkiai ir pagreičiai reikalingi apskaičiuoti trūkstumų koeficientus (\widehat{A}_1 , \widehat{A}_2 , B_0 , B_1) ir patikrinti sprendinio teisingumą, o greičiai reikalingi apskaičiuoti judesio kiekį, norint įvertinti duobės parametrus. Į lygčių sistemas 7.3.23 ir 7.3.25 įrašius pradines sąlygas, apskaičiuojame konstantas \widehat{A}_1 , \widehat{A}_2 , B_0 , B_1 priartėjimo būdu kol paklaida taps minimali ir bus tenkinama pagrindinė lygčių sistema:

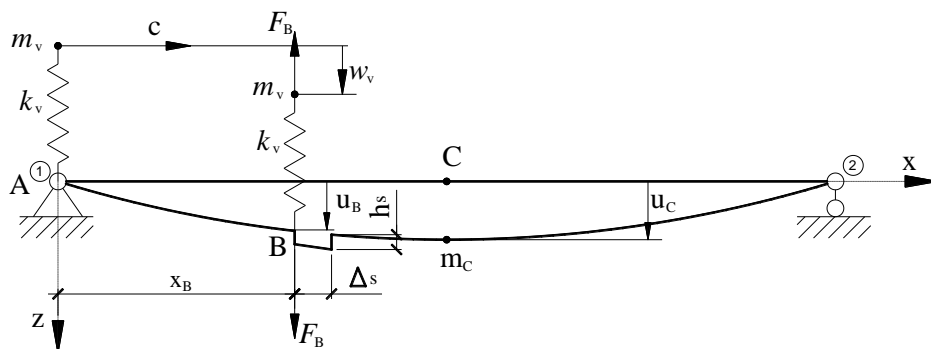
$$\begin{cases} \mu_1 \cdot u'' + u = (1 - \mu_0 \cdot w'') \cdot \sin \xi; \\ \mu_2 \cdot w'' + w = u \cdot \sin \xi. \end{cases} \quad (7.3.26)$$

Įrašę gautas reikšmes į 7.3.23-7.3.25 lygčių sistemas, gauname visus sprendinius. Apskaičiavus u_{gl} gausime sijos dinaminį įlinkį.

7.4. Tiltų perdangos dinaminis įlinkis dėl duobės važiuojamojoje kelio dangoje

Tiltų sijų dinaminio įlinkio skaičiuojamoji schema, įvertinanti važiuojamojoje kelio dangoje duobę, pateikta 7.2 paveiksle.

Skaičiavimuose daroma prielaida, kad duobės plotis daug mažesnis už sijos ilgį ($\Delta_s \ll l$). Laikas, per kurį duobė pervažiuojama ($t_s = \Delta_s / c$), yra gerokai trumpesnis už tiltų virpesių periodą.



7.2 pav. Tiltų perdangos dinaminio įlinkio skaičiuojamoji schema, įvertinanti duobę važiuojamojoje kelio dangoje [22]

Spyruoklės k_v jėgos pokytis ratui patekus į duobę aprašomas formule:

$$\Delta F_s = k_v \cdot h_s; \quad (7.4.1)$$

čia: h_s – duobės gylis;

k_v – spyruoklės standumas.

Duobės poveikio impulsas aprašomas formule:

$$S_s = \Delta F_s \cdot t_s = k_v \cdot h_s \cdot \Delta_s / c. \quad (7.4.2)$$

Skaičiuojant daroma prielaida, kad duobė yra tilto viduryje, smūgio jėga veikia tiesiai į masės centrą. Priimama, kad dėl tilto liaunumo, tilto atraminių reakcijų smūgio jėgų nėra. Smūgio metu kūnai nepasislenka, pasikeičia tik masių m_v ir m_c greičiai iš u'_{g1} , w'_{g1} į u'_{g2} , w'_{g2} . Šį pokytį aprašo dvi lygtys:

1. Pirmoji. Masėms m_v ir m_c smūgio jėga yra vidinė, todėl **bendras judesio kiekis išlieka toks pats ir jis išreiškiamas pagal formulę:**

$$m_v \dot{w}_{g2} + m_c \dot{u}_{g2} = m_v \dot{w}_{g1} + m_c \dot{u}_{g1}. \quad (7.4.3)$$

2. Antroji. Masei m_v poveikio impulsas S_s nukreiptas žemyn, nes jėga F_v sumažėja. **Masės poveikio impulsas** apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$m_v \dot{w}_{g2} - m_v \dot{w}_{g1} = S_s. \quad (7.4.4)$$

Remiantis 7.4.2, 7.4.3 ir 7.4.4 lygtimis, apskaičiuojame greičius u'_{g2} , w'_{g2} , kai poslinkiai $w_{g1} = w_{g2}$, $u_{g1} = u_{g2}$ prieš smūgį ir po smūgio yra lygūs. Tada apskaičiuotos reikšmės yra įrašomos į 7.2.23 ir 7.2.24 lygčių sistemas ir apskaičiuojamos keturios konstantos $(\hat{A}'_1, \hat{A}'_2, B'_0, B'_1)$, kurios aprašo transporto ir tilto judėjimą po smūgio [22].

7.5. Matematinio modelio taikymas tilto perdangos sijos dinaminiam įlinkiui skaičiuoti

Dinaminei analizei sudarytas skaičiavimo modelis pritaikomas tyrimo objektui – tiltui per Šušvės upę. Dinaminio įlinkio skaičiavimas atliekamas tilto pirmo tarpatramio vidurinei sijai esant:

- skirtingiems greičiams;
- skirtingiems greičiams įvertinus duobę kelio dangoje.

Skaičiavimo ir dinaminių bandymų variantai pateikiami 7.1 lentelėje:

7.1 lentelė. Skaičiavimo variantai

Variantų numeris	Kliūtys vieta	Kliūtys storis, mm	Automobilio greitis, km/h
1	-	-	10
2	-	-	20
3	-	-	40
4,5	-	-	50
6	Pirmojo tarpatramio perdangos vidurys	20	5
7		20	10
8		20	20

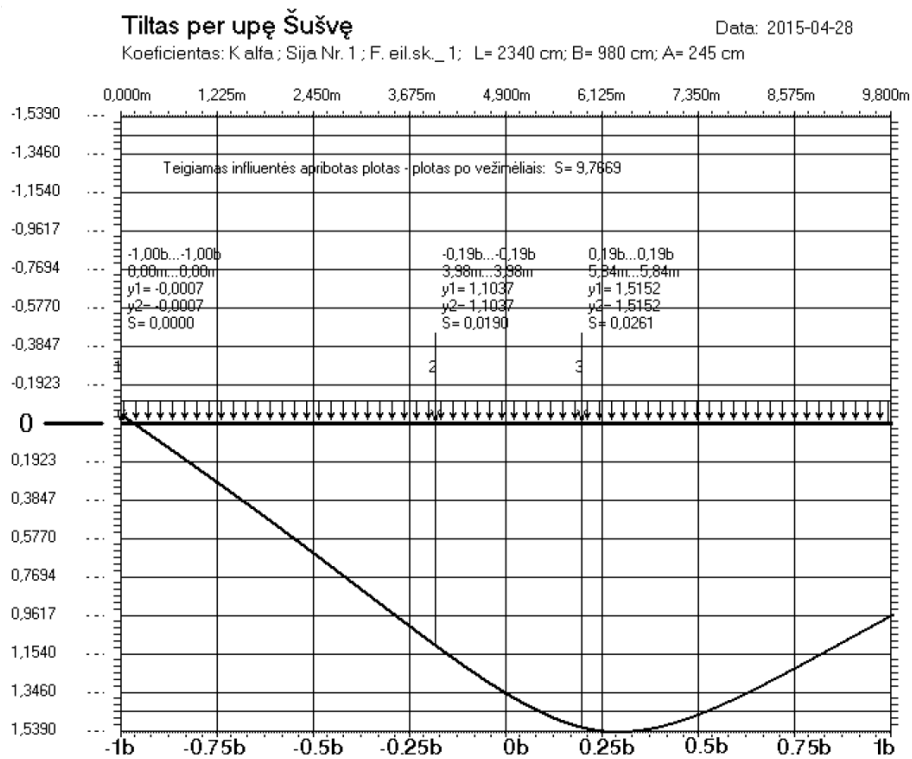
Pradiniai skaičiavimų duomenys pateikiami 7.2 lentelėje:

7.2 lentelė. Pradiniai duomenys

Tamprumo modulis, E, GPa:	Inercijos momentas, I, m ⁴	Sijos masė, m _c , kg:	Bendra krovinio masė, m _b , kg:	Sijos skaič. ilgis, l, m:	Krovinio savasis dažnis, Hz:
40,82	0,1525	29742,30	19850,0	23,40	2,70

Krovinio savasis dažnis $f=2,70$ Hz [21].

Norint apskaičiuoti vidurinės sijos dinaminį įlinkį, reikia apskaičiuoti sijai tenkančią statinę apkrovą. Šiam tikslui, išilgine kryptimi transporto apkrovą priimsime kaip koncentruotą, o skersine kryptimi naudosime programą „Tiltai-2000“ [17, 42], kad gautume įrašų pasiskirstymą tarp sijų:



7.3 pav. Infliuentė $K_{\alpha Qi}$ skaičiavimui

Apkrovų pasiskirstymo koeficientas:

$$k_{\alpha Qi} = \frac{\sum y_i}{2} = \frac{1,104 + 1,515}{2} \approx 1,31; \quad (7.5.1)$$

čia: y_i – influentės ordinatė po sutelktomis apkrovomis.

Sijai tenkanti apkrova:

$$m_v = \frac{m_b \cdot k_{\alpha Qi}}{n} = \frac{19850 \cdot 1,31}{4} \approx 6501 \text{ kg}; \quad (7.5.2)$$

čia: n – tilto perdangų sudarančių sijų skaičius.

Dinaminio įlinkio skaičiavimas pradedamas nuo 10 km/h greičio. Naudojant programą „Mathcad Professional“ [41] susivedame pradinis duomenis ir apskaičiuojame parametrus, kurie pateikti 7.3 lentelė:

7.3 lentelė. Apskaičiuoti parametrai programa

Įlinkis nuo vienatinės jėgos, m/N:	$\delta_{CC} = \frac{l^3}{48E \cdot I} = 4,3 \cdot 10^{-8} \text{ m / N};$
Tilto standumas, N/m:	$k_C = \frac{1}{\delta_{CC}} = 23320240,28 \text{ N / m};$
Transporto standumas, N/m:	$k_v = 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot m_b = 5712783,64 \text{ N / m};$
Pirmasis nedimensinis parametras μ_0 :	$\mu_0 = \frac{\pi^2 \cdot c^2}{l^2} \cdot \frac{m_v}{k_c} = 0,00004;$
Antrasis nedimensinis parametras μ_1 :	$\mu_1 = \frac{\pi^2 \cdot c^2}{l^2} \cdot \frac{m_c}{k_c} = 0,0002;$
Trečiasis nedimensinis parametras μ_2 :	$\mu_2 = \frac{\pi^2 \cdot c^2}{l^2} \cdot \frac{m_v}{k_v} = 0,00018;$

Priverstinių virpesių skaičiavimas:

Į lygčių sistemą 7.2.18 įstatome parametą α_j 7.2.1 ir programa apskaičiuojame parametrus A_1, A_3, A_5 :

$$\begin{cases} 2 \cdot A_1(1 - \mu_1) + 4 \cdot \mu_0 \cdot \frac{1}{2(1 - 4 \cdot \mu_2)} (A_3 - A_1) = 2; \\ 2 \cdot A_3(1 - 9\mu_1) - 4 \cdot \mu_0 \cdot \frac{1}{2(1 - 4 \cdot \mu_2)} (A_3 - A_1) - 16 \cdot \mu_0 \cdot \frac{1}{2(1 - 16 \cdot \mu_2)} (A_5 - A_3) = 0; \\ 2 \cdot A_5(1 - 25\mu_1) - 16 \cdot \mu_0 \cdot \frac{1}{2(1 - 16 \cdot \mu_2)} (A_5 - A_3) - 36 \cdot \mu_0 \cdot \frac{1}{2(1 - 36 \cdot \mu_2)} (-A_5) = 0; \end{cases} \quad (7.5.3)$$

Gauname tokius koeficientus:

$$(A_1, A_3, A_5) \rightarrow \begin{pmatrix} 1,000239 \\ -4,311607 \cdot 10^{-5} \\ 7,476067 \cdot 10^{-9} \end{pmatrix}.$$

Pastaba: programos aplinkoje po kabelio imamas didesnis kiekis skaičių dėl galutinio rezultato tikslumo.

A_7, A_9 ir kt. koeficientų neskaičiuojama, nes jos turi labai mažą įtaką sprendiniui. Apskaičiuojame įlinkį nuo priverstinių virpesių pagal formulę:

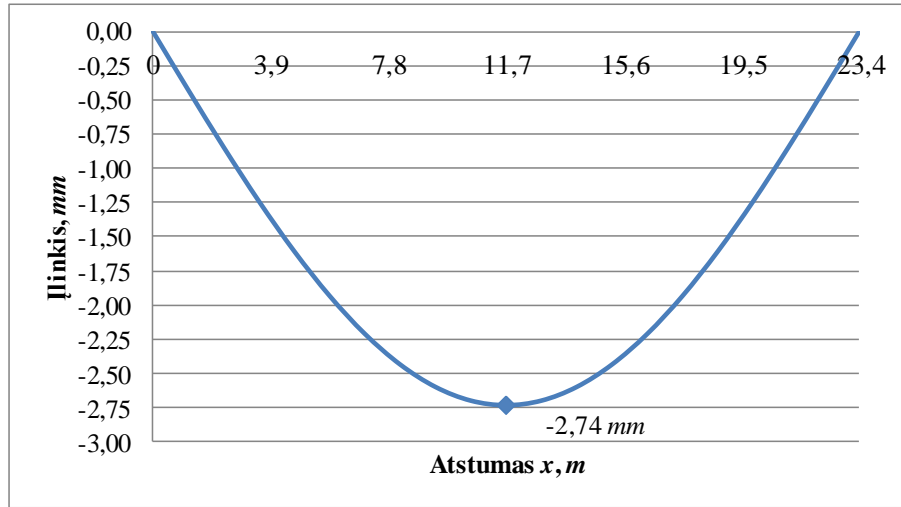
$$u_c = -\frac{W_v}{k_c} \sum_{1,3,5..} A_j \cdot \sin j\xi = \frac{W_v}{k_c} \cdot (A_1 \cdot \sin \xi + A_3 \cdot \sin 3\xi + A_5 \cdot \sin 5\xi); \quad (7.5.4)$$

čia $\xi = \frac{\pi \cdot x}{l}$;

x – transporto priemonė tam tikrame taške;

W_v – transporto priemonės svoris.

Gautas sijos įlinkis nuo priverstinių virpesių pateikiamas 7.4 paveiksle:



7.4 pav. Sijos įlinkis nuo priverstinių virpesių

Nehomogeninės diferencialinių lygčių sistemos bendrasis sprendinys:

Apskaičiuojame D_0 , D_2 , D_4 parametrus:

$$\begin{cases} D_0 = \frac{1}{2} \cdot A_1; & D_0 = 0,50012; \\ D_2 = \frac{1}{2(1-2^2 \cdot \mu_2)} \cdot (A_3 - A_1); & D_2 = -0,50049; \\ D_4 = \frac{1}{2(1-4^2 \cdot \mu_2)} \cdot (A_5 - A_3); & D_4 = 0,00002. \end{cases} \quad (7.5.5)$$

Tilto sijos dinaminis įlinkis nuo suminių krovinio priverstinių virpesių ir jos savųjų virpesių (bendrasis nehomogeninis sprendinys) apskaičiuojamas naudojant 7.5.6 ir 7.5.7 lygčių sistemas. Priimtos sąlygos, kad pradiniu laiko ($t=0$, $\xi=0$) momentu transporto priemonės ir tilto sijos vertikalūs poslinkiai ir greičiai yra lygūs nuliui. Kai parametras $\xi=0$ koeficientai B_0 ir B_1 taip pat lygūs nuliui.

$$\begin{cases} \frac{W_v}{k_c} \cdot (A_1 \cdot \sin \xi + A_3 \cdot \sin 3\xi + A_5 \cdot \sin 5\xi) + \hat{A}_1 \cdot \sin \xi + \hat{A}_2 \cdot \\ \cdot \sin 2\xi + B_0 + B_1 \cdot \cos \xi + B_0 \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot (1 - \mu_2)}{\mu_0}\right) \cdot \cos 2\xi = 0; \\ \frac{W_v}{k_c} \cdot (D_0 + D_2 \cdot \cos 2\xi + D_4 \cdot \cos 4\xi) + \frac{\hat{A}_1}{2} + \left(\frac{\hat{A}_2}{2(1 - \mu_2)}\right) \\ \cdot \cos \xi + B_0 \cdot \frac{2}{\mu_0} \cdot \sin \xi + B_1 \cdot \frac{1 - \mu_1}{2 \cdot \mu_0} \cdot \sin 2\xi = 0. \end{cases} \quad (7.5.6)$$

čia $\xi = \frac{\pi \cdot x}{l}$;

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\pi \cdot c}{l} \right)^2 \cdot \left(\frac{W_v}{k_c} \cdot (-A_1 \cdot \sin \xi - 9A_3 \cdot \sin 3\xi - 25A_5 \cdot \sin 5\xi) - \widehat{A}_1 \cdot \sin \xi - \right. \\ \left. - 4 \cdot \widehat{A}_2 \cdot \sin 2\xi - B_1 \cdot \cos \xi - 8B_0 \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot (1 - \mu_2)}{\mu_0} \right) \cdot \cos 2\xi \right) = 0; \\ \left(\frac{\pi \cdot c}{l} \right)^2 \cdot \left(\frac{W_v}{k_c} \cdot (-4D_2 \cdot \cos 2\xi + 16D_4 \cdot \cos 4\xi) - \left(\frac{\widehat{A}_2}{2(1 - \mu_2)} \right) \cos \xi - \right. \\ \left. - 2B_0 \cdot \frac{2}{\mu_0} \cdot \sin \xi - 2B_1 \cdot \frac{1 - \mu_1}{\mu_0} \cdot \sin 2\xi \right) = 0. \end{array} \right. \quad (7.5.7)$$

Apskaičiuojame likusius du koeficientus \widehat{A}_1 ir \widehat{A}_2 . Kaip jau minėta 7.3 skyriuje, nežinomuosius apskaičiuosime priartėjimo būdu kol paklaida taps minimali ir bus tenkinama pagrindinė lygčių sistema 7.5.8:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_1 \cdot \frac{k_c}{W_v} \cdot \ddot{u}_c + \frac{k_c}{W_v} \cdot u_c = \left(1 - \mu_0 \cdot \frac{k_c}{W_v} \cdot \ddot{w}_v \right) \cdot \sin \xi; \\ \mu_2 \cdot \frac{k_c}{W_v} \cdot \ddot{w}_v + \frac{k_c}{W_v} \cdot w_v = \frac{k_c}{W_v} \cdot u_c \cdot \sin \xi. \end{array} \right. \quad (7.5.8)$$

Tilto sijos ir transporto vertikalūs poslinkiai ir pagreičiai apskaičiuojami naudojant 7.3.23 ir 7.3.25 lygčių sistemas. Gauti rezultatai įstatomi į pagrindinę 7.5.8 lygčių sistemą.

Su programa, priartėjimo būdu, apskaičiuojami \widehat{A}_1 ir \widehat{A}_2 koeficientai, kurie (esant 10 km/h transporto judėjimo greičiui) lygūs:

$$(\widehat{A}_1, \widehat{A}_2) \rightarrow \begin{pmatrix} 9,60524 \cdot 10^{-7} \\ -1,36800 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_1 \cdot \frac{k_c}{W_v} \cdot \ddot{u}_c + \frac{k_c}{W_v} \cdot u_c = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{2332,02 \cdot 10^3}{63,77 \cdot 10^3} \cdot 4,2 \cdot 10^{-4} + \frac{2332,02 \cdot 10^3}{63,77 \cdot 10^3} \cdot (-2,74 \cdot 10^{-3}) = 1,0006; \\ \left(1 - \mu_0 \cdot \frac{k_c}{W_v} \cdot \ddot{w}_v \right) \cdot \sin \xi = \left(1 - 4 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{2332,02 \cdot 10^3}{63,77 \cdot 10^3} \cdot 8,4 \cdot 10^{-4} \right) \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot 2,925}{23,40} \cdot 4 \right) = 1,00001; \\ \mu_2 \cdot \frac{k_c}{W_v} \cdot \ddot{w}_v + \frac{k_c}{W_v} \cdot w_v = 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{2332,02 \cdot 10^3}{63,77 \cdot 10^3} \cdot 8,4 \cdot 10^{-4} + \frac{2332,02 \cdot 10^3}{63,77 \cdot 10^3} \cdot (-2,74 \cdot 10^{-3}) = 1,0007; \\ \frac{k_c}{W_v} \cdot u_c \cdot \sin \xi = \frac{2332,02 \cdot 10^3}{63,77 \cdot 10^3} \cdot (-2,74 \cdot 10^{-3}) \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot 2,925}{23,40} \cdot 4 \right) = 1,00063; \end{array} \right. \quad (7.5.9)$$

Absoliučioji paklaida pirmos ir antros lygties atitinkamai:

$$\begin{aligned} \Delta x_1 &= 1,0006 - 1,00001 = 0,00059; \\ \Delta x_2 &= 1,00070 - 1,00063 = 0,00012. \end{aligned} \quad (7.5.10)$$

Santykinė paklaida pirmos ir antros lygties atitinkamai:

$$\begin{aligned} \Delta x_1 / x_1 &= 0,00059 / 1,0006 = 5,9 \cdot 10^{-4}; \\ \Delta x_2 / x_2 &= 0,00012 / 1,0007 = 1,1 \cdot 10^{-4}. \end{aligned} \quad (7.5.11)$$

Tokiu pat būdu apskaičiuojami nedimensiniai parametrai: μ_0 , μ_1 , μ_2 (7.4 lentelė), koeficientai: A_1 , A_3 , A_5 , D_0 , D_2 , D_4 , \hat{A}_1 ir \hat{A}_2 (7.4 lentelė), esant 5, 20, 40, 50 km/h transporto greičiams. Gauti rezultatai pateikiami lentelėse:

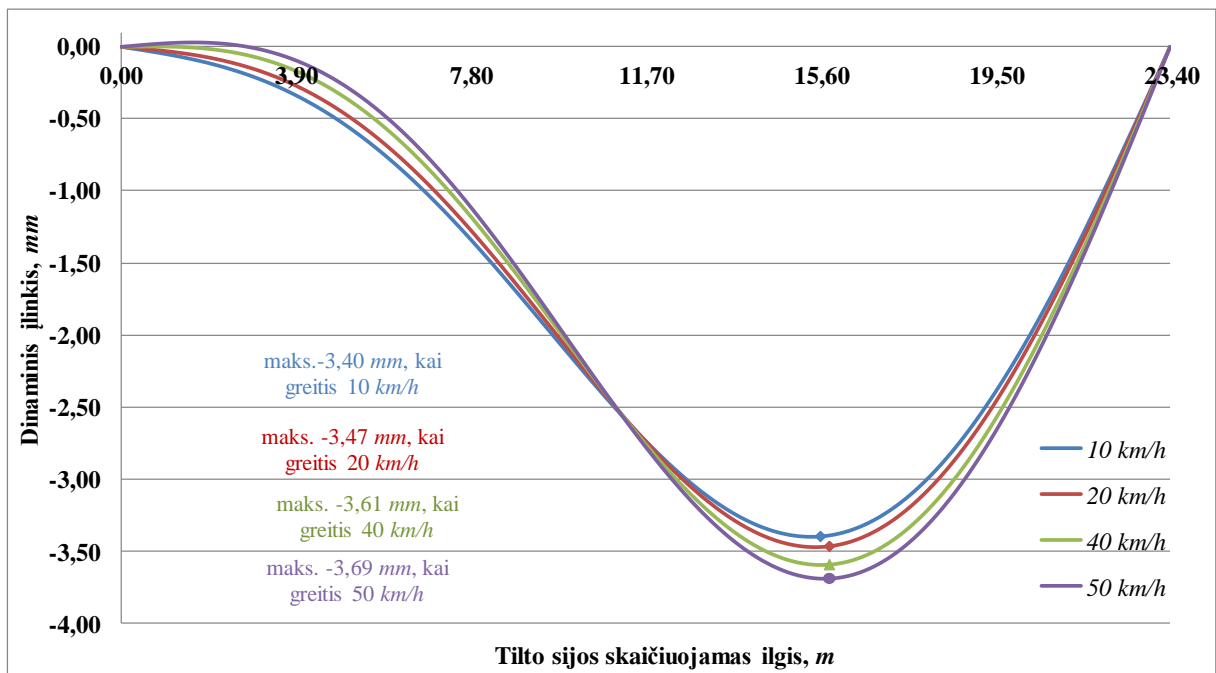
7.4 lentelė. Nedimensiniai parametrai skirtingiems greičiams

Transporto judėjimo greitis, km/h:	Koeficientai:		
	μ_0	μ_1	μ_2
5	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$
10	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$20,0 \cdot 10^{-5}$	$18,0 \cdot 10^{-5}$
20	$18,0 \cdot 10^{-5}$	$83,0 \cdot 10^{-5}$	$74,0 \cdot 10^{-5}$
40	$62,0 \cdot 10^{-5}$	$285,0 \cdot 10^{-5}$	$255,0 \cdot 10^{-5}$
50	$107,0 \cdot 10^{-5}$	$492,0 \cdot 10^{-5}$	$439,0 \cdot 10^{-5}$

7.5 lentelė. Apskaičiuoti koeficientai skirtingiems greičiams

Transporto judėjimo greitis, km/h:	Koeficientai:							
	A_1	A_3	A_5	D_0	D_2	D_4	\hat{A}_1	\hat{A}_2
5	1,00004	$-6,88161 \cdot 10^{-6}$	$1,89588 \cdot 10^{-10}$	0,50002	-0,50008	0,0	$1,89624 \cdot 10^{-7}$	$-1,16749 \cdot 10^{-3}$
10	1,00023	$-4,31160 \cdot 10^{-5}$	$7,47606 \cdot 10^{-9}$	0,50012	-0,50049	0,00002	$9,6052 \cdot 10^{-7}$	$-1,19000 \cdot 10^{-3}$
20	1,00096	$-1,73992 \cdot 10^{-4}$	$1,23755 \cdot 10^{-7}$	0,50048	-0,50198	0,00009	$3,85030 \cdot 10^{-6}$	$-1,26989 \cdot 10^{-3}$
40	1,00349	$-6,51009 \cdot 10^{-4}$	$1,84014 \cdot 10^{-7}$	0,50175	-0,50724	0,00034	$1,40656 \cdot 10^{-5}$	$-1,39652 \cdot 10^{-3}$
50	1,00605	$-1,15848 \cdot 10^{-3}$	$6,22128 \cdot 10^{-6}$	0,50302	-0,5126	0,00063	$2,44181 \cdot 10^{-5}$	$-1,48914 \cdot 10^{-3}$

Tilto vidurinės sijos dinaminio įlinkio grafikai skirtingiems transporto priemonės greičiams, pateikiami 7.5 paveiksle:



7.5 pav. Vidurinės sijos dinaminiai įlinkiai skirtingiems transporto priemonės greičiams

Toliau atliekame dinaminio įlinkio skaičiavimą įvertinus duobės parametrus pagal 7.1 lentelę. Bandymų metu tilto perdanga buvo suvirpinama sunkvežimio galine ašimi, todėl jėgos impulsą skaičiuosime priimdami galinės ašies standumą. Apskaičiuojame sijai tenkančią masę:

$$m_{vg} = \frac{m_b \cdot k_{\alpha Qi}}{n} = \frac{12350 \cdot 1,31}{4} \approx 4045 \text{ kg.} \quad (7.5.2)$$

Galinės ašies standumas:

$$k_v = 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot m_{vg} = 4 \cdot \pi^2 \cdot 2,7^2 \cdot 4045 = 1162962 \text{ N/m.} \quad (7.5.12)$$

Duobės poveikio impulsas 10 km/h greičiui:

$$S_s = k_v \cdot h_s \cdot \Delta_s / l = 1162962 \cdot 0,02 \cdot 0,05 / 2,925 = 397,60 \text{ N} \cdot \text{s.} \quad (7.4.2)$$

Pagal priimtą prielaidą duobė yra tilto tarpatriamio viduryje, todėl turėdami pradinis parametrus: sijos ir transporto vertikalios poslinkius u_c , w_v ir greičius \dot{u}_{g1} , \dot{w}_{g1} galime apskaičiuoti vertikalios greičius \dot{u}_{g2} , \dot{w}_{g2} po smūgio impulso. Turėdami impulsą S_s , apskaičiuojame greičius \dot{u}_{g2} , \dot{w}_{g2} , naudojant 7.4.3 ir 7.4.4 lygtis:

Apskaičiuoti pradiniai parametrai u_c , w_v , \dot{u}_{g1} , \dot{w}_{g1} ir greičiai pateikiami \dot{u}_{g2} , \dot{w}_{g2} 7.6 lentelėje:

7.6 lentelė. Pradiniai parametrai ir greičiai po jėgos impulso

Transporto judėjimo greitis, km/h:	Pradiniai parametrai					Greičiai po poveikio impulso	
	u_c, m	w_v, m	$\dot{u}_{g1}, m/s$	$\dot{w}_{g1}, m/s$	S_s, Ns	$\dot{u}_{g2}, m/s$	$\dot{w}_{g2}, m/s$
5	-0,002736	-0,002736	-0,00037	-0,00009	894,60	-0,01382	0,06144
10	-0,002740	-0,002740	-0,00092	-0,00023	397,60	-0,01359	0,05771
20	-0,002748	-0,002748	-0,00237	-0,00059	193,83	-0,00864	0,02839

Turėdami pradinis poslinkius u_c , w_v ir greičius \dot{u}_{g2} , \dot{w}_{g2} galima apskaičiuoti nežinomus koeficientus: B_0 , B_1 , \hat{A}_1 , \hat{A}_2 pagal 7.5.13 ir 7.5.14 lygčių sistemas:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{W_v}{k_c} \cdot (A_1 \cdot \sin \xi + A_3 \cdot \sin 3\xi + A_5 \cdot \sin 5\xi) + \hat{A}_1 \cdot \sin \xi + \hat{A}_2 \cdot \\ \cdot \sin 2\xi + B_0 + B_1 \cdot \cos \xi + B_0 \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot (1 - \mu_2)}{\mu_0} \right) \cdot \cos 2\xi = u_c; \\ \frac{W_v}{k_c} \cdot (D_0 + D_2 \cdot \cos 2\xi + D_4 \cdot \cos 4\xi) + \frac{\hat{A}_1}{2} + \left(\frac{\hat{A}_2}{2(1 - \mu_2)} \right) \\ \cdot \cos \xi + B_0 \cdot \frac{2}{\mu_0} \cdot \sin \xi + B_1 \cdot \frac{1 - \mu_1}{2 \cdot \mu_0} \cdot \sin 2\xi = w_v. \end{array} \right. \quad (7.5.13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\pi \cdot c}{l} \cdot \left(\frac{W_v}{k_c} \cdot (A_1 \cdot \cos \xi + 3A_3 \cdot \cos 3\xi + 5A_5 \cdot \cos 5\xi) + \widehat{A}_1 \cdot \cos \xi + \right. \\ \left. + 2\widehat{A}_2 \cdot \cos 2\xi - B_1 \cdot \sin \xi - 4B_0 \cdot \left(1 - \frac{2(1-\mu_2)}{\mu_0} \right) \cdot \sin 2\xi \right) = \dot{u}_{g2}; \\ \frac{\pi \cdot c}{l} \cdot \left(\frac{W_v}{k_c} \cdot (-2D_2 \cdot \sin 2\xi + 4D_4 \cdot \sin 4\xi) - \left(\frac{\widehat{A}_2}{2(1-\mu_2)} \right) \cdot \sin \xi + \right. \\ \left. + B_0 \cdot \frac{2}{\mu_0} \cdot \cos \xi + B_1 \cdot \frac{1-\mu_1}{\mu_0} \cdot \cos 2\xi \right) = \dot{w}_{g2}. \end{array} \right. \quad (7.5.14)$$

Gauti rezultatai pateikiami lentelėje:

7.7 lentelė. Apskaičiuoti koeficientai skirtingiems greičiams

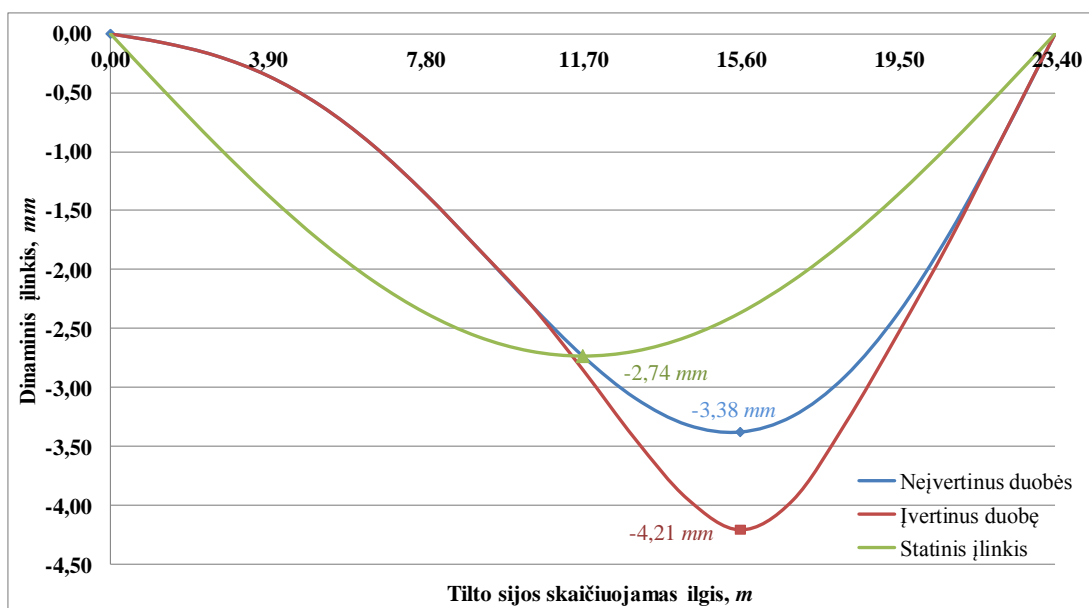
Transporto judėjimo greitis, km/h:	Koeficientai:			
	\widehat{A}_1	\widehat{A}_2	B_0	B_1
5	$-2,011343 \cdot 10^{-2}$	$-6,909650 \cdot 10^{-3}$	$3,458961 \cdot 10^{-8}$	$4,463798 \cdot 10^{-7}$
10	$-1,375933 \cdot 10^{-2}$	$-6,793962 \cdot 10^{-3}$	$1,479540 \cdot 10^{-7}$	$2,627708 \cdot 10^{-6}$
20	$-3,267272 \cdot 10^{-3}$	$-4,323953 \cdot 10^{-3}$	$1,410015 \cdot 10^{-7}$	$5,258469 \cdot 10^{-6}$

Rezultatams palyginti apskaičiuojamas sijos statinis įlinkis. Jis skaičiuojamas pagal įlinkio formą, kurią gauname sija veikiant koncentruota apkrova. Toks skaičiavimas nėra tikslus, lyginant su realiu sijos įlinkiu, tačiau bus galima efektyviau palyginti su sijos dinaminio įlinkiu. Taigi sijos statinis įlinkis:

$$u_{st} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E_{cm} \cdot I_{eff}} = \frac{63,77 \cdot 10^3 \cdot 23,40^3}{48 \cdot 40,82 \cdot 10^9 \cdot 0,1525} = 2,74 \cdot 10^{-3} m \approx 2,74 mm. \quad (7.5.15)$$

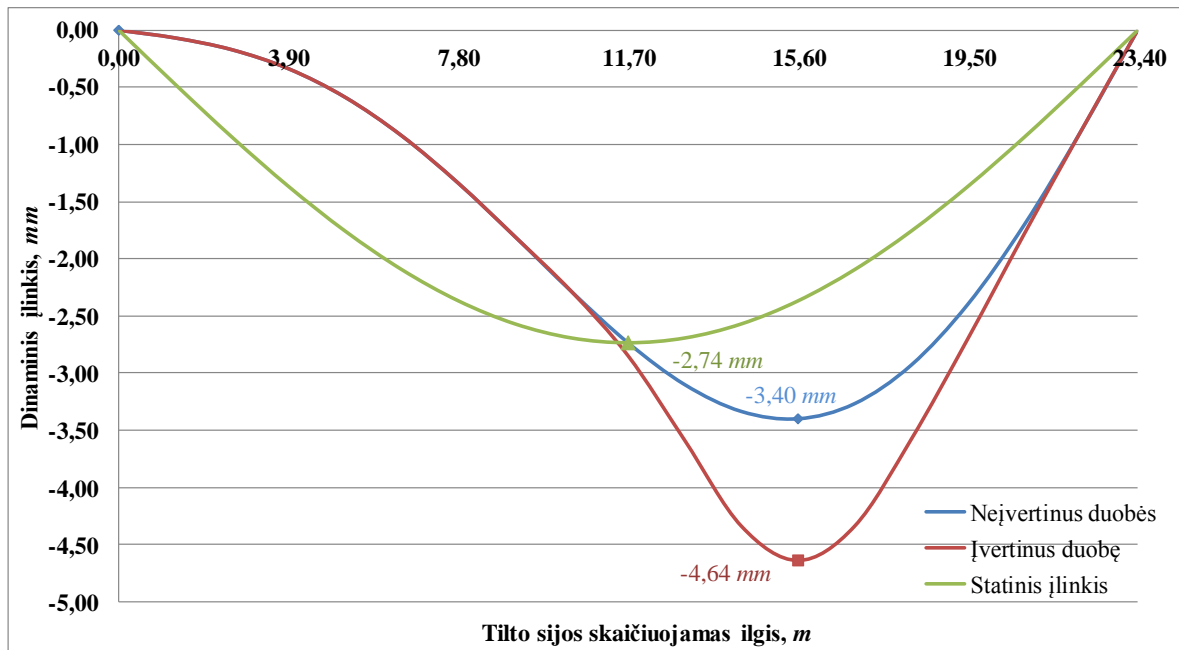
Tilto vidurinės sijos dinaminio įlinkio grafikai įvertinus duobę, kai transporto priemonės:

- 5 km/h greitis:



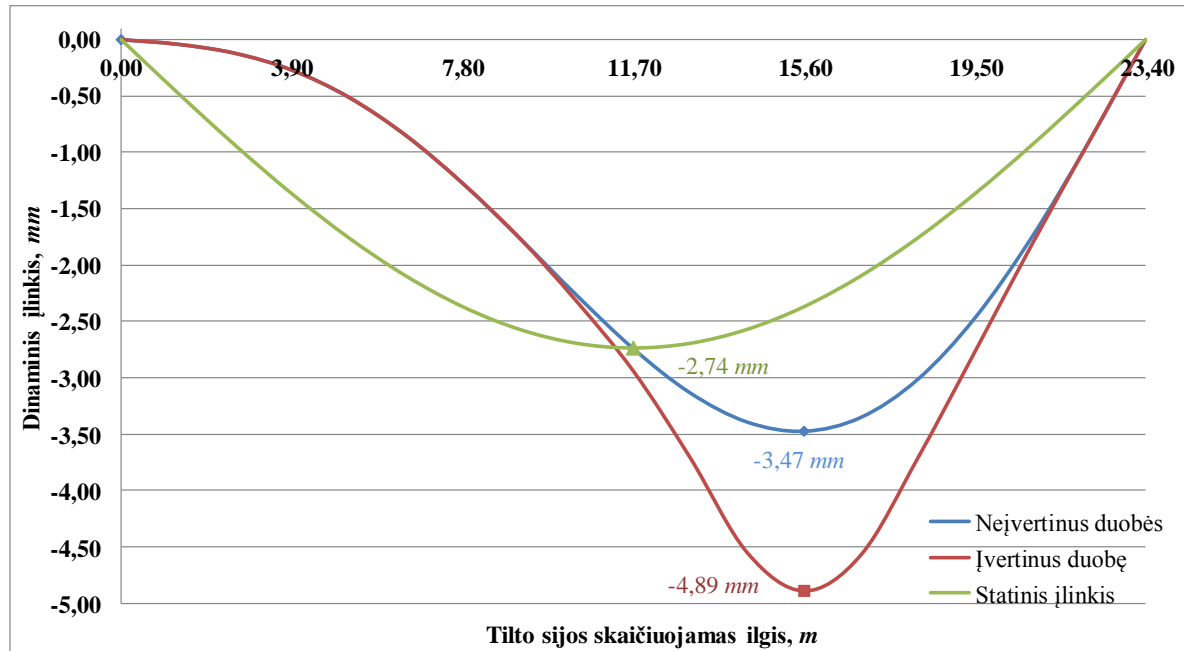
7.6 pav. Vidurinės sijos statinio ir dinaminio įlinkių grafikai, esant 5 km/h transporto priemonės greičiui

- 10 km/h greitis:



7.7 pav. Vidurinės sijos statinio ir dinaminio įlinkių grafikai, esant 10 km/h transporto priemonės greičiui

- 20 km/h greitis:



7.8 pav. Vidurinės sijos statinio ir dinaminio įlinkių grafikai, esant 20 km/h transporto priemonės greičiui

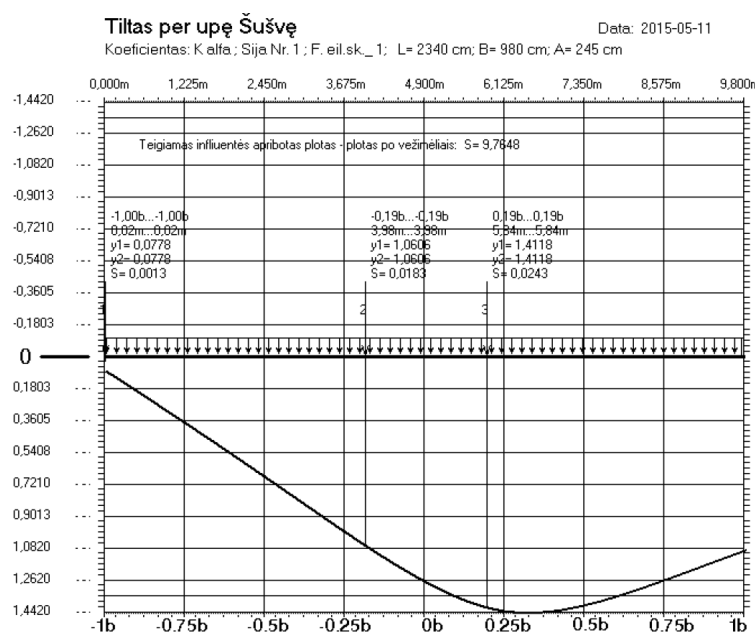
Skyriuje 6.2 minėjome, kad ant tilto sijų viršutinių lentynų yra užlietas gelžbetoninis sluoksnis suformuoti nuolydžiui. Šis sluoksnis taip pat turi įtakos ne tik statinio įlinkio skaičiavimui, bet ir dinaminiam, todėl palyginimui apskaičiuosime įvertindami šį pakloto sluoksnį.

Geometrinės charakteristikos:

7.8 lentelė. Sijos pjūvių geometrinės charakteristikos

Nr.	Rodiklis	Žymėjimas	Dydis	Matavimo vnt.
1.	Sijos skerspjūvio aukštis	h	1,23	m
2.	Sienelės plotis	b	0,16	m
3.	Viršutinės lentynos plotis	b'_f	2,19	m
4.	Viršutinės lentynos aukštis	h'_f	0,231	m
5.	Apatinės lentynos plotis	b_f	0,620	m
6.	Apatinės lentynos aukštis	h_f	0,333	m
7.	Viršutinės lentynos armatūros plotas	A'_s	7,92	cm^2
8.	Apatinės lentynos armatūros plotas	A_s	7,85	cm^2
9.	Įtemptosios armatūros skerspjūvio plotas	A_{sp1}	32,97	cm^2
10.	Įtemptosios armatūros skerspjūvio plotas	A_{sp2}	9,42	cm^2
11.	Redukuotas skerspjūvio plotas	A_{red}	0,9103	m^2
12.	Skerspjūvio statinis momentas	S_{red}	0,7391	m^3
14.	Redukuoto skerspjūvio inercijos momentas	$I_{red} (I_{eff})$	0,1551	m^4

Didesnį tilto perdangos standumą vertinsime ne tik išilgai, bet ir skersai, todėl perskaičiuosime skersinio pasiskirstymo koeficientą:



7.9 pav. Infliuentė $K_{\alpha Qi}$ skaičiavimui

Apkrovų pasiskirstymo koeficientas:

$$k_{\alpha Qi} = \frac{\sum y_i}{2} = \frac{1,0606 + 1,4118}{2} \approx 1,24. \quad (7.5.16)$$

Sijai tenkanti apkrova:

$$m_v = \frac{m_b \cdot k_{\alpha Qi}}{n} = \frac{19850 \cdot 1,24}{4} \approx 6154 kg. \quad (7.5.27)$$

Turėdami išilginį standumą apskaičiuojame nedimensinius parametrus: μ_0 , μ_1 , μ_2 (7.9 lentelė), koeficientus: A_1 , A_3 , A_5 , D_0 , D_2 , D_4 , \hat{A}_1 ir \hat{A}_2 (7.10 lentelė), esant 5, 20, 40, 50

km/h transporto greičiams. Gauti rezultatai pateikiami lentelėse:

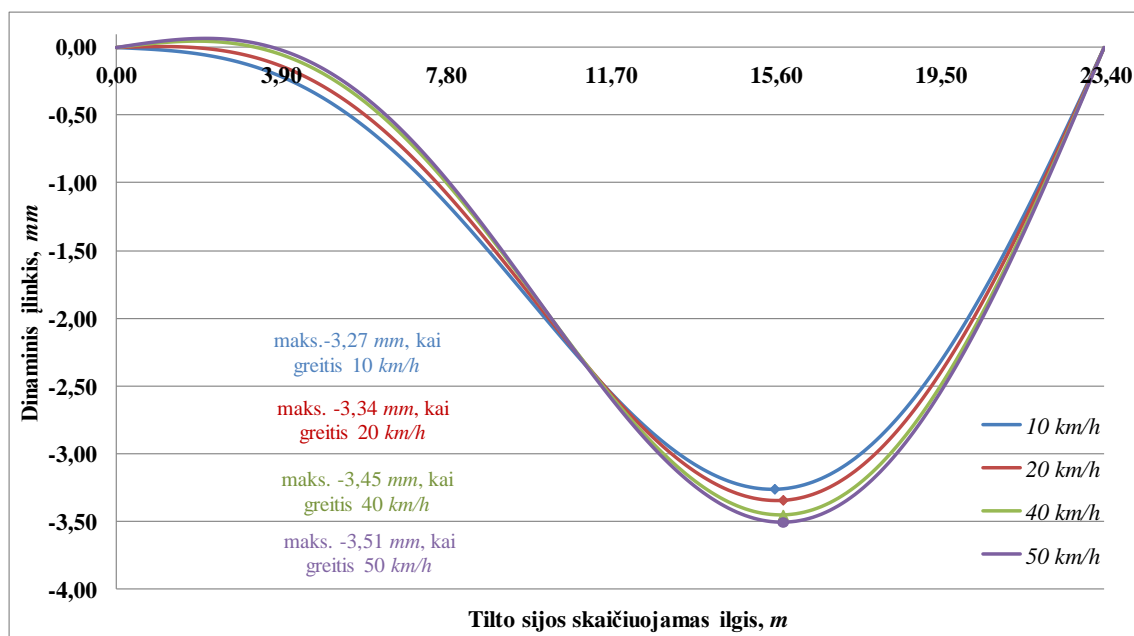
7.9 lentelė. Nedimensiniai parametrai skirtingiems greičiams (įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį)

Transporto judėjimo greitis, km/h:	Koeficientai:		
	μ_0	μ_1	μ_2
5	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$
10	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$19,0 \cdot 10^{-5}$	$17,0 \cdot 10^{-5}$
20	$16,0 \cdot 10^{-5}$	$77,0 \cdot 10^{-5}$	$66,0 \cdot 10^{-5}$
40	$58,0 \cdot 10^{-5}$	$281,0 \cdot 10^{-5}$	$241,0 \cdot 10^{-5}$
50	$100,0 \cdot 10^{-5}$	$483,0 \cdot 10^{-5}$	$415,0 \cdot 10^{-5}$

7.10 lentelė. Apskaičiuoti koeficientai skirtingiems greičiams (įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį)

Transporto judėjimo greitis, km/h:	Koeficientai:							
	A_1	A_3	A_5	D_0	D_2	D_4	\hat{A}_1	\hat{A}_2
5	1,00004	$-6,40514 \cdot 10^{-6}$	$1,64239 \cdot 10^{-10}$	0,50002	-0,50008	0,0	$1,35328 \cdot 10^{-7}$	$-1,17280 \cdot 10^{-3}$
10	1,00023	$-4,01278 \cdot 10^{-5}$	$6,47448 \cdot 10^{-9}$	0,50012	-0,50047	0,00002	$8,46286 \cdot 10^{-7}$	$-1,22328 \cdot 10^{-3}$
20	1,00093	$-1,61890 \cdot 10^{-4}$	$1,07057 \cdot 10^{-7}$	0,50047	-0,50188	0,00008	$3,39208 \cdot 10^{-6}$	$-1,31498 \cdot 10^{-3}$
40	1,00340	$-6,05143 \cdot 10^{-4}$	$1,58532 \cdot 10^{-7}$	0,50170	-0,50689	0,00032	$1,23881 \cdot 10^{-5}$	$-1,42094 \cdot 10^{-3}$
50	1,00589	$-1,07577 \cdot 10^{-3}$	$5,33518 \cdot 10^{-6}$	0,50294	-0,51199	0,00058	$2,14999 \cdot 10^{-5}$	$-1,46688 \cdot 10^{-3}$

Tilto vidurinės sijos dinaminio įlinkio grafikai skirtingiems greičiams, pateikiami 7.10 paveiksle:



7.10 pav. Vidurinės sijos dinaminiai įlinkiai skirtingiems transporto greičiams (įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį)

Sijos statinis įlinkis:

$$u_{st} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E_{cm} \cdot I_{eff}} = \frac{60,37 \cdot 10^3 \cdot 23,40^3}{48 \cdot 40,82 \cdot 10^9 \cdot 0,1551} = 2,54 \cdot 10^{-3} m \approx 2,54 mm. \quad (7.5.28)$$

Toliau atliekamas dinaminio įlinkio skaičiavimas įvertinus duobės parametrus pagal 7.1 lentelę. Apskaičiuoti pradiniai parametrai u_c , w_v , \dot{u}_{g1} , \dot{w}_{g1} ir greičiai pateikiami \dot{u}_{g2} , \dot{w}_{g2} 7.11 lentelėje:

7.11 lentelė. Pradiniai parametrai ir greičiai po jėgos impulso (įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį)

Transporto judėjimo greitis, km/h:	Pradiniai parametrai					Greičiai po poveikio impulso	
	u_c, m	w_v, m	$\dot{u}_{g1}, m/s$	$\dot{w}_{g1}, m/s$	S_s, Ns	$\dot{u}_{g2}, m/s$	$\dot{w}_{g2}, m/s$
5	-0,002546	-0,002546	-0,00037	-0,00009	894,60	-0,01382	0,06491
10	-0,002551	-0,002551	-0,00096	-0,00023	397,60	-0,01362	0,06098
20	-0,002557	-0,002557	-0,00207	-0,00052	193,83	-0,00840	0,03008

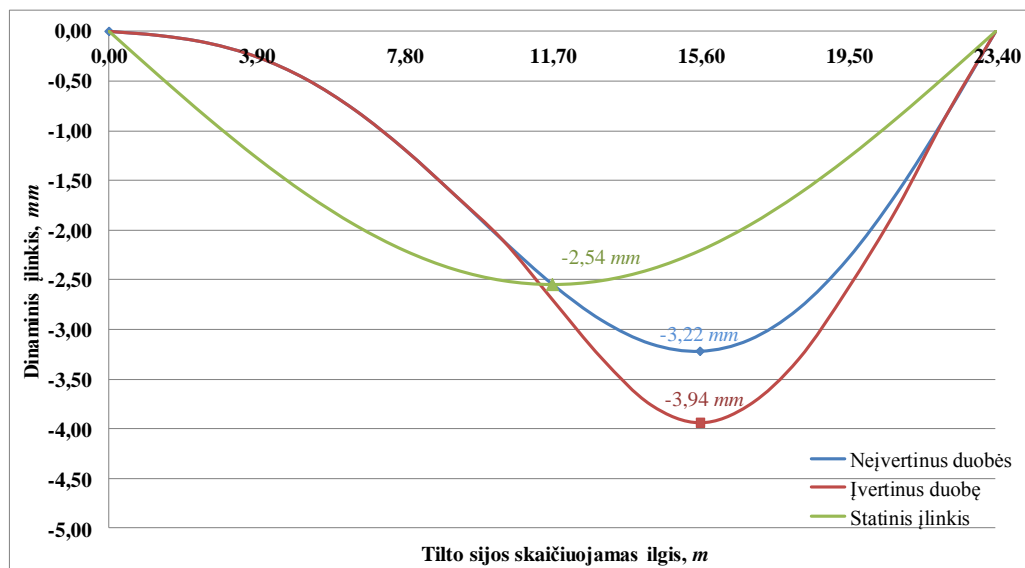
Turėdami pradinis poslinkius u_c , w_v ir greičius \dot{u}_{g2} , \dot{w}_{g2} galima apskaičiuoti nežinomus koeficientus: B_0 , B_1 , \hat{A}_1 , \hat{A}_2 pagal 7.5.13 ir 7.5.14 lygčių sistemas. Gauti rezultatai pateikiami lentelėje:

7.12 lentelė. Apskaičiuoti koeficientai skirtingiems greičiams (įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį)

Transporto judėjimo greitis, km/h:	Koeficientai:			
	\hat{A}_1	\hat{A}_2	B_0	B_1
5	$-2,099546 \cdot 10^{-2}$	$-6,909635 \cdot 10^{-3}$	$3,360676 \cdot 10^{-8}$	$4,154786 \cdot 10^{-7}$
10	$-1,523202 \cdot 10^{-2}$	$-6,813936 \cdot 10^{-3}$	$1,524439 \cdot 10^{-7}$	$2,576954 \cdot 10^{-6}$
20	$-3,517372 \cdot 10^{-3}$	$-4,203902 \cdot 10^{-3}$	$1,412148 \cdot 10^{-7}$	$5,156033 \cdot 10^{-6}$

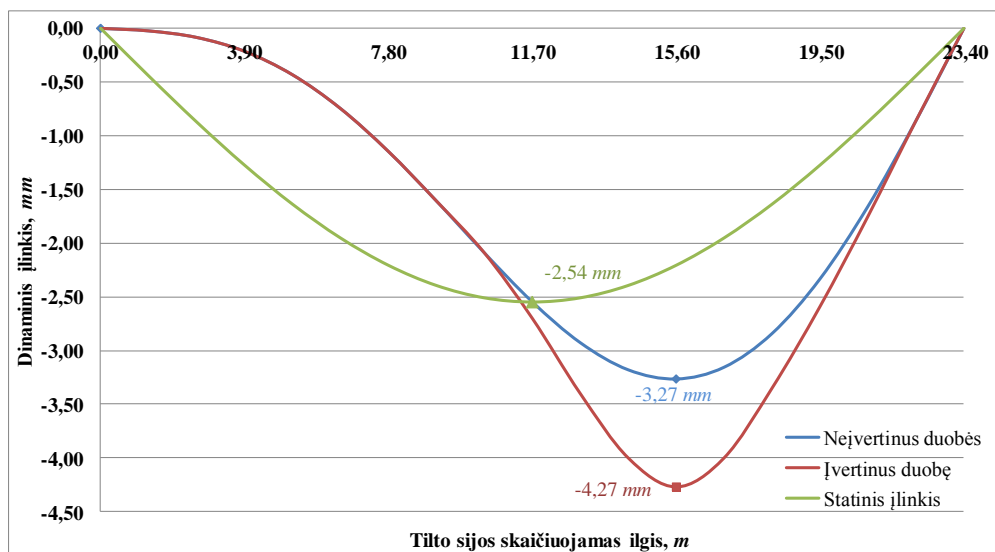
Tilto vidurinės sijos dinaminio įlinkio grafikai įvertinus duobę, kai transporto priemonės:

- 5 km/h greitis:



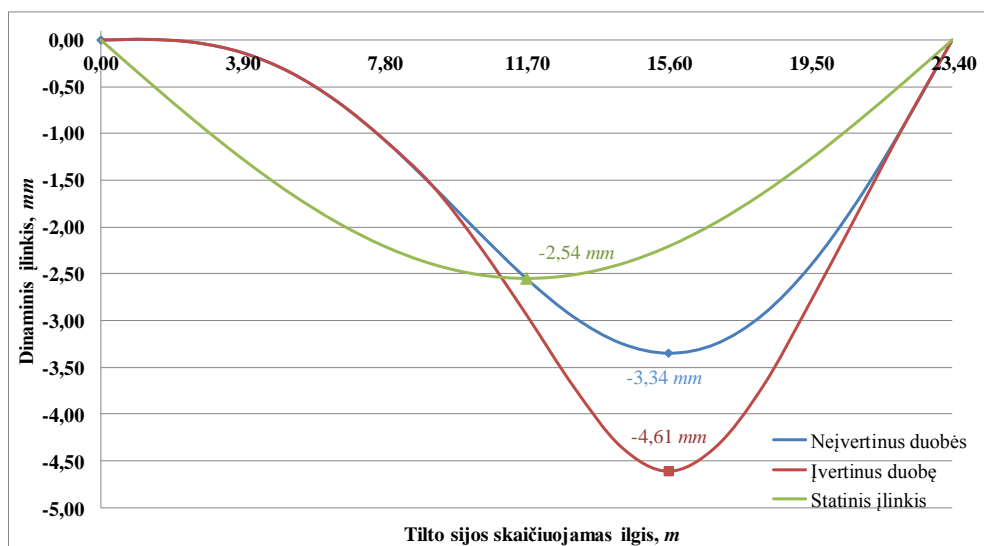
7.11 pav. Vidurinės sijos statinio ir dinaminio įlinkių grafikai, esant 5 km/h transporto priemonės greičiui (įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį)

- 10 km/h greitis:



7.12 pav. Vidurinės sijos statinio ir dinaminio įlinkių grafikai, esant 10 km/h transporto priemonės greičiui (įvertinus gelžbetoninę paklotą dalį)

- 20 km/h greitis:



7.13 pav. Vidurinės sijos statinio ir dinaminio įlinkių grafikai, esant 20 km/h transporto priemonės greičiui (įvertinus gelžbetoninę paklotą dalį)

7.6. Teorinių ir dinaminio bandymo metu gautų sijos įlinkių palyginimas

Gauti teoriniai rezultatai ir dinaminio bandymo duomenys suvedami į 7.13 lentelę:

7.13 lentelė. Rezultatai ir dinaminio bandymo duomenys

Var. Nr.	Automobilio greitis, km/h/ kliūtis buvimas	Bandymų metu nustatytas dinaminis įlinkis, mm	Teoriškai apskaičiuotas, mm	Teoriškai apskaičiuotas, įvertinus gelžbetoninę paklotą dalį, mm
1	10/nėra	2,02	3,40	3,27
2	20/nėra	2,28	3,47	3,34
3	40/nėra	2,28	3,61	3,45
4,5	50/nėra	2,20	3,69	3,51
6	5/yra	2,65	4,21	3,94
7	10/yra	2,77	4,64	4,27
8	20/yra	2,63	4,89	4,61

Teoriškai apskaičiuotų rezultatų santykinės paklaidos pateikiamos 7.14 lentelėje:

7.14 lentelė. Rezultatų santykinės paklaidos

Var. Nr.	Automobilio greitis, km/h/ kliuties būvimas	Santykinė paklaida, %	
		Teoriškai apskaičiuoto:	Teoriškai apskaičiuoto, kai buvo įvertinta gelžbetoninė pakloto dalis:
1	10/nėra	40,59	38,23
2	20/nėra	34,29	31,74
3	40/nėra	36,84	33,91
4,5	50/nėra	40,38	37,32
6	5/yra	37,05	32,74
7	10/yra	40,30	35,13
8	20/yra	46,22	42,95
Vidurkis:		39,40	36,0

Apskaičiuotų rezultatų santykinės paklaidos svyruoja nuo 31,74 iki 46,22 procentų. Teoriniai rezultatai, kai buvo įvertintas gelžbetoninis pakloto sluoksnis, gauti tikslesni (vid. paklaida 36,0). Rezultatų skirtumas tarp teoriškai apskaičiuotų ir išmatuotų dinaminių bandymų metu, atsiranda dėl priimtos prielaidos, kad automobilis juda, kaip koncentruota apkrova. Realioji transporto ir tilto sijos tarpusavio sąveika sudėtingesnė, nes automobilis turi mažiausiai dvi ašis ir jo perduodamos apkrovos išskirstomos į plotelius, kurių dydis priklauso nuo padangų išmatavimų. Įvertindami gelžbetoninį pakloto dalį, priėmėme mažiausią jo sluoksnį – 3,0 cm. Tačiau ties vidurinėmis sijomis jo aukščiausias sluoksnis apie 13,0 cm. Šio sluoksnio padidėjimas tiltui taip pat suteikia papildomą standumą ir turi įtakos galutiniams rezultatams.

7.7. Dinamiškumo koeficiento skaičiavimas ir jo palyginimas su įvairių šalių normomis

Dinamiškumo koeficientą skaičiuosime pagal 1.2 skyriuje pateiktą formulę:

$$DLA + 1 = D_{dyn} / D_{sta}. \quad (7.7.1)$$

Gauti teoriniai rezultatai ir dinaminio bandymo duomenys suvedami į 7.13 lentelę:

7.15 lentelė. Dinamiškumo koeficientai gauti bandymu metu ir teoriškai apskaičiuoti

Var. Nr.	Automobilio greitis, km/h/ kliuties būvimas	Bandymų metu nustatytas din. koeficientas	Teoriškai apskaičiuotas din. koeficientas	Teoriškai apskaičiuotas din. koeficientas, įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį
1	10/nėra	1,03	1,24	1,29
2	20/nėra	1,16	1,27	1,31
3	40/nėra	1,16	1,32	1,36
4,5	50/nėra	1,12	1,35	1,38
Vidurkis:		1,12	1,30	1,34
6	5/yra	1,35	1,54	1,55
7	10/yra	1,41	1,69	1,69
8	20/yra	1,34	1,78	1,81
Vidurkis:		1,37	1,67	1,68

Apskaičiuojame dinamiškumo koeficientus pagal įvairių šalių normas, kurie buvo

pateikti 1.2 skyriuje:

- Jungtinių Amerikos Valstijų 1992 AASHTO normų formulė:

$$DLA = \frac{15,25}{L(m) + 38,1} = \frac{15,25}{23,40 + 38,1} = 0,25, \quad DLA + 1 = 1,25. \quad (7.7.2)$$

- Japonų tiltų projektavimo normų:

$$DLA = \frac{20}{L(m) + 50} = \frac{20}{23,40 + 50} = 0,27, \quad DLA + 1 = 1,27. \quad (7.7.3)$$

- Irano tiltų projektavimo normų:

$$DLA = 0,3 - 0,005 \cdot L(m) - 0,15 = 0,3 - 0,005 \cdot 23,40 = 0,18, \quad DLA + 1 = 1,18. \quad (7.7.4)$$

- Vokietijos (DIN 1072-1976) projektavimo normų:

$$DLA = 0,4 - 0,008 \cdot L(m) - 0,1 \cdot h = 0,4 - 0,008 \cdot 23,40 - 0,1 \cdot 0,20 = 0,19, \quad DLA + 1 = 1,18. \quad (7.7.5)$$

- Prancūzijos normų (French cahier des Prescriptos Communes (1973)):

$$DLA = \frac{0,64}{0,2L(m) + 1} = \frac{0,64}{0,2 \cdot 23,40 + 1} = 0,11, \quad DLA + 1 = 1,11. \quad (7.7.6)$$

- Italijos projektavimo normų:

$$DLA = \frac{(100 - L(m))^2}{100 \cdot (250 - L(m))} = \frac{(100 - 23,40)^2}{100 \cdot (250 - 23,40)} = 0,26, \quad DLA + 1 = 1,26. \quad (7.7.7)$$

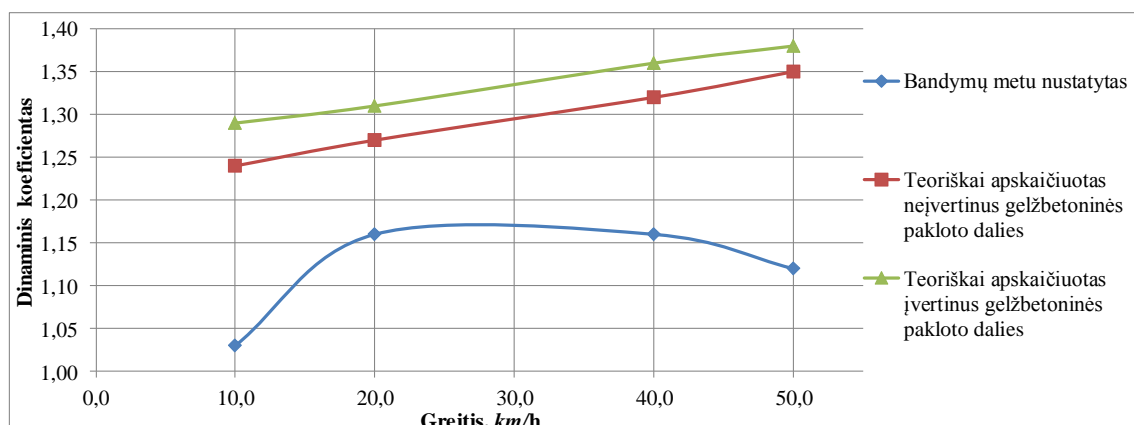
- Europinių projektavimo normų (Eurokodas) normaliai prižiūrimam keliui:

$$DLA + 1 = \Phi_3 = \frac{2,16}{\sqrt{L_\Phi} - 0,2} + 0,73 = \frac{2,16}{\sqrt{23,40} - 0,2} + 0,73 = 1,20. \quad (7.7.8)$$

- Rusiškos projektavimo normos:

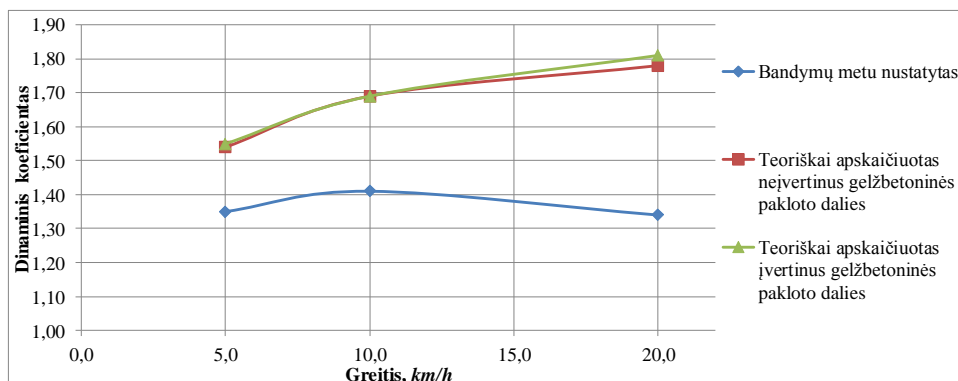
$$DLA + 1 = \mu_{din} = 1 + \frac{45 - \lambda}{135} = 1 + \frac{45 - 23,40}{135} = 1,16. \quad (7.7.9)$$

Dinamiškumo koeficientų palyginimas pateikiamas 7.14 – 7.16 paveiksluose:



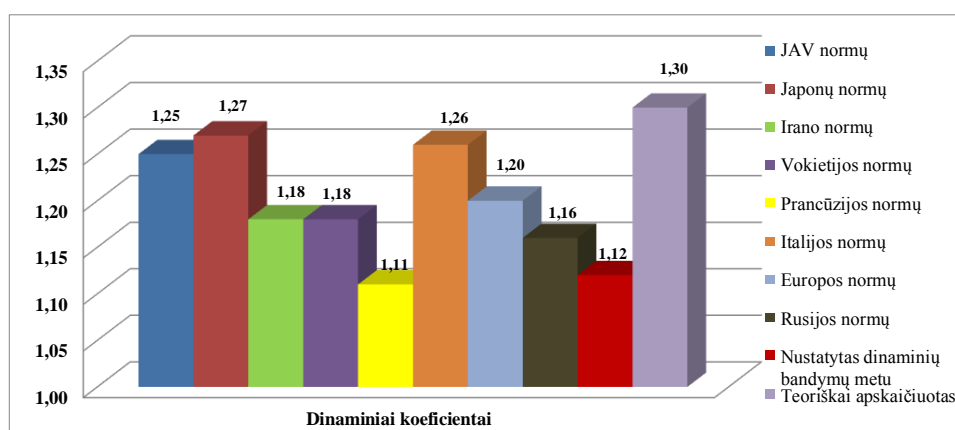
7.14 pav. Dinamiškumo koeficientų palyginimas skirtingiems transporto judėjimo greičiams

Dinamiškumo koeficientų palyginimas, esant skirtingiems transporto judėjimo greičiams, įvertinus duobę kelio dangoje:



7.15 pav. Dinamiškumo koeficientų palyginimas, esant skirtingiems transporto judėjimo greičiams, įvertinus duobę kelio dangoje

Įvairių šalių dinamiškumo koeficientų palyginimas su teoriniu ir dinaminių bandymu metu apskaičiuotu:



7.16 pav. Įvairių šalių dinamiškumo koeficientų palyginimas su teoriniu ir dinaminių bandymu metu apskaičiuotu

7.8. Septinto skyriaus išvados

Atlikus dinaminio įlinkių ir dinamiškumo koeficientų skaičiavimą pastebėta, kad:

- sudarytas dinaminio įlinkio skaičiavimo modelis leidžia įvertinti dinaminio įlinkio kitimą esant skirtingiems transporto priemonės greičiams. Greičiui kintant nuo 5 iki 50 km/h įlinkis kinta nuo 3,38 iki 3,69 mm, o įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį – nuo 3,22 iki 3,51 mm;
- įvertinus duobės parametrus, esant skirtingiems greičiams (5, 10, 20 km/h), dinaminis įlinkius padidėja vidutiniškai 1,32 karto;
- teoriškai apskaičiuotų dinaminių įlinkių paklaidų vidurkis – 37,0 %;
- tiltui su lygia kelio danga, pagal bandymų duomenis, vidutinis dinamiškumo koeficientas 1,12, teoriškai apskaičiuoto – 1,30, o įvertinus gelžbetoninę pakloto dalį – 1,34;
- Apskaičiuotas dinamiškumo koeficientas artimas Japonijos ir Italijos normoms.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Atlikus įrašų skaičiavimą pagal rusiškas (CH-200-62, 1962, CH-365-67, 1967) ir europines (Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 2 dalis. Tiltų eismo apkrovos) projektavimo normas pastebėta, kad apskaičiuotos tilto perdangos įrašos, pagal euronormų 1 – aji apkrovų modelį magistraliniams keliams, 2,17 karto viršija įrašas, apskaičiuotas pagal rusiškų normų apkrovas H-30, o 1,95 karto HK-80. Nagrinėjant euronormų 1 – aji apkrovų modelį krašto ir vietinės reikšmės keliams, apskaičiuotos įrašos atitinkamai viršija rusiškų normų apkrovas 1,65 ir 1,49 karto.
2. Suprojektuota įtemptojo gelžbetonio perdanga pagal rusiškas projektavimo normų apkrovas. Tikrinant labiausiai apkrautos perdangos sijos atsparumą normaliniams plyšiams esant 11 procentų atsargai, parinkti 9 įtemptosios armatūros vielapluoščiai, kurių skerspjūvio plotas $42,39 \text{ cm}^2$. Šis armatūros kiekis sutampa realiai esantį tilto perdangos sijose.
3. Atliktas tilto perdangos deformacijų skaičiavimas pagal statinio bandymo metu naudotas apkrovas. Deformacijos buvo skaičiuojamos ortotropinės plokštės metodu tiek rankomis, tiek programa „Scia Engineer“. Rezultatams palyginti, skaičiavimai buvo atlikti neįvertinant ir įvertinant gelžbetoninę pakloto dalį. Mažiausios rezultatų paklaidos gautos, kai buvo vertinama gelžbetoninė pakloto dalis, skaičiuojant rankomis gauta santykinė paklaida 2,14 %, o programa – 14,52 %.
4. Sudarytas dviejų laisvės laipsnių matematinis modelis, skirtas tilto perdangos dinaminei analizei atlikti. Šį modelį sudaro dviejų tiesinių diferencialinių judesio lygčių sistema su kintamais koeficientais. Bendrasis parametrinių virpesių sprendinys leidžia atsižvelgti į pradines tilto ir transporto priemonės sąlygas ir duobę tilto perdangos viduryje. Taikant šį matematinį modelį atlikta tyrimo objekto dinaminio įlinkio analizė, esant kelio nelygumams ir skirtingiems transporto priemonės greičiams. Gauti teoriniai skaičiavimai vidutiniškai 37 procentų santykinės paklaidos, lyginant su eksperimentiniais bandymais.
5. Išanalizavus tilto per Šušvės upę dinaminio bandymų rezultatus, esant skirtingiems greičiams ir skirtingiems greičiams įvertinus tą patį kelio dangos nelygumą, nustatyta, kad dinaminis įlinkis nuo greičio tiesiogiai nepriklauso. Tiltu su nelygia važiuojamąja kelio danga dinamiškumo koeficiento reikšmė apie 22 % (1,22 karto) didesnė nei su lygia danga.
6. Atlikus dinamiškumo koeficientų skaičiavimą tilto su lygia danga (neįvertinus duobės), pagal dinaminio bandymo duomenis, vidutinis dinamiškumo koeficientas 1,12, o teoriškai apskaičiuoto, pritaikius matematinį modelį, vidutinis 1,32. Tiltu su nelygia danga (įvertinus duobę), atitinkamai pagal bandymo duomenis, dinamiškumo koeficientas yra 1,37, o teorinis – 1,67.

NAUDOTA LITERATŪRA

Normatyviniai dokumentai:

1. STR 2.05.05:2005. Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. Valstybės žinios. 2005m. vasario 5d. Nr. D1-44. [Žiūrėta 2015-04-05]. Prieiga per internetą:<
<http://www3.lrs.lt/pls/inter3/oldsearch.preps2?Condition1=249853&Condition2=> >.
2. LST EN 1992-1-1:2005. Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės.
3. LST EN 1990:2004. Eurokodas. Konstrukcijų projektavimo pagrindai.
4. LST EN 1991-1-2:2003. Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 2 dalis. Tiltų eismo apkrovos.
5. Statybos taisyklės. Automobilinių kelių tiltų bandymas ST 188710638.10:2005. Vilnius. 2005.
6. CH 200-62. Technical design condintion of reinforced concrete motorway ant town bridges and overflows (Технические условия проектирования желез нодорожных автодорожных и городских мостов и труб) Moscow, 1962, 190 p. (rusų kalba).
7. CH 365-67. Design regulations for the structures of reinforced concrete and concrete bridges and overflows (Указания по проектированию железобетонных и бетонных консерукций мостов и труб) Moscow, 1967, 147 p. (rusų kalba).

Knygos:

8. Čižas A. Konstrukcijų elementų mechanika. Vilnius: Technika, 2012, 153 p.
9. Kargaudas V. Statybinės mechanikos pagrindai. Kaunas: Technologija, 2011, 77 p.
10. Kargaudas V., Vaičaitis R. Konstrukcijų virpesiai. Kaunas: Technologija, 2014, 221-227 p.
11. Kivilša J., Kamaitis Z., Stepanavičius A. Miesto transporto statiniai. Vilnius: Mokslas, 1981, 45-66 p.
12. Marčiukaitis G. Iš anksto įtemptas gelžbetonis. Vilnius: Technika, 2012, 254-262 p.
13. Mikuckis F. Medžiagų atsparumas. Kaunas: Ardiva, 2008, 12 p.
14. Notkus A. J. Tiltų apkrovos pagal euronormas. Vilnius: Technika, 2003, 78-81 p.
15. Notkus A. J. Tiltų projektavimo pagrindai. Vilnius: Technika, 2010, 23, 151-227 p.
16. Venckevičius V. Įtemptojo gelžbetonio sijų projektavimas. Kaunas: KTU, 1990, 5-39 p.
17. Bares R., Massonet R. Analysis of Beam Grids and Orthotropic Plates by the Guyon-Massonet-Bares Method. Paris: Dundod, 1966, 400-424 p. (anglų kalba).
18. Biggs J. Introduction to structural Dynamics. New York: McGraw-Hill, 1964, 315 p.

(anglų kalba).

19. Clough R. W., Penzien J. Dynamic of structures. McGraw-Hill, 1975, 634 p.(anglų kalba).
20. Fryba L. Vibration of Solids and Structures Under Moving Loads. England: Thomas telford, 1999, 485 p. (anglų kalba).
21. Saar O. S. Dynamics ir the practice of structural design. Gateshead: WIT Press, 2006, 101 p. (anglų kalba).
22. Zadlauskas S. The research on cracking and deformation of reinforced concrete bridges under static and dynamic loads. Summary of doctoral dissertation. Kaunas: KTU, 2013, 16-20 p. (anglų kalba).

Straipsniai iš žurnalų:

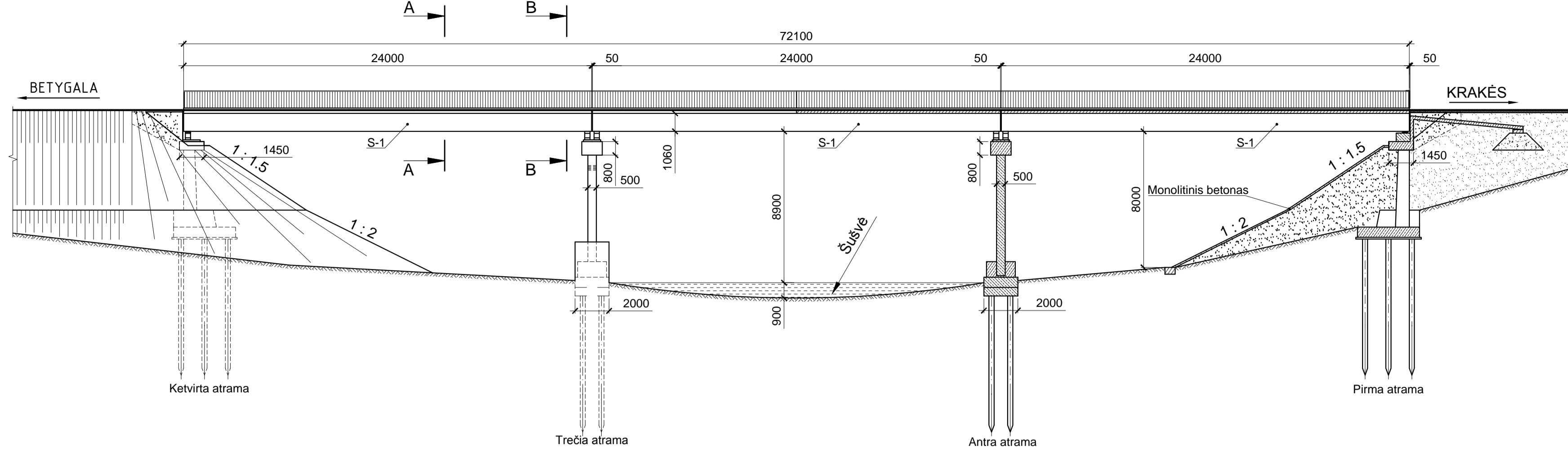
23. Cai C. S., Shi X. M., Araujo M., Chen S. R. Effect of approach span condition on vehicle – induced dynamic response of slab-on-girder road bridges. Journal of Engineering Structures, accepted 7 October 2007, vol. 29, 29 p. (anglų kalba).
24. Chan T. H. T., Yu L., Law S. S. Moving force indentification studies, I: Theory. Journal of sound and vibration, final form 17 January 2001, vol. 247, 59-76 p. (anglų kalba).
25. Chan T. H. T., Law S. S., Yung T. H. An interpretive method for moving force indentification. Journal of Sound and vibration, in final form 30 July 1999, vol. 219, 503-524 p. (anglų kalba).
26. Chan T. H. T., O'Connor C. Vehicle for highway bridge impact. Structural Engineering, published 1 July, 1990, vol. 116, 1772-1793 p. (anglų kalba).
27. Huang D., Wang T. L., Shahawy M. Impact studines of multigirder concrete bridges. Journal of Structural Engineering. 1993, 8 p. (anglų kalba).
28. Yang Y. B., Lin C.W. Vehicle-bridge interaction Dynamics and potential applications. Journal of sound and vibration, accepted 1 June 2004, vol 284, 205-226 p. (anglų kalba).
29. Yu L., Chan T. H. T. Moving force indentification based on the frequency – time domain method. Journal of sound and vibration, accepted 27 May 2002, vol. 261, 329-349 p. (anglų kalba).
30. Yu L., Chan T. H. T. Recent research on identification of moving loads on bridges. Journal of sound and vibration, accepted 2 March 2007, vol. 305, 3-21 p. (anglų kalba).
31. Yu L., Chan T. H. T., Xu D. Moving force identification: practice and review. [Žiūrėta 2015-04-22]. Prieiga per internetą: < <http://eprints.qut.edu.au/12766/1/ICWIM4.pdf> >, (anglų kalba).
32. Law S. S., Chan T. H. T., Chan Q. H. Moving force identification: a time domain method.

- Department of Civil and Structural Engineering. Journal of sound and vibration, in final form 12 August 1996, vol. 122, 1-22 p. (anglų kalba).
33. Law S. S., Chan T. H. T., Yung T. H. Moving force identification using an existing prestressed concrete bridge. Journal of Engineering Structures, accepted 16 August 1999, vol. 22, 1291-1270 p. (anglų kalba).
34. Law S. S., Zhu X. Q. Dynamic behavior of damaged concrete bridge structures under moving vehicular loads. Journal of Engineering Structures, accepted 6 April 2004. (anglų kalba).
35. Lee Y. S., Kim S. H., Skibniewski M. J. Analytical and experimental approach for assessing vibration serviceability of highway bridges due to heavy vehicle traffic. The Baltic journal of road and bridge engineering, 2009, vol. 4, 123-133 p. (anglų kalba).
36. Moghimi H., Ronagh H. R. Impact factors for a composite steel bridge using non-linear dynamic simulation. Impact Engineering, accepted 13 July 2007, vol. 35, 1228-1243 p. (anglų kalba).
37. Paultere P., Chaallai O., Proulx J. Bridge Dynamics and dynamic amplification factors – a review of analytical and experimental findings. Canadian Journal of Civil Engineering, 1992, Vol. 19. 260-278 p. (anglų kalba).
38. Tan G. H., Brameld G. H., Thambiratnam D. P. Development of an analytical model for treating bridge-vehicle interaction. Structural Engineering, available online 18 June 1998, vol. 20, 54-61 p. (anglų kalba).

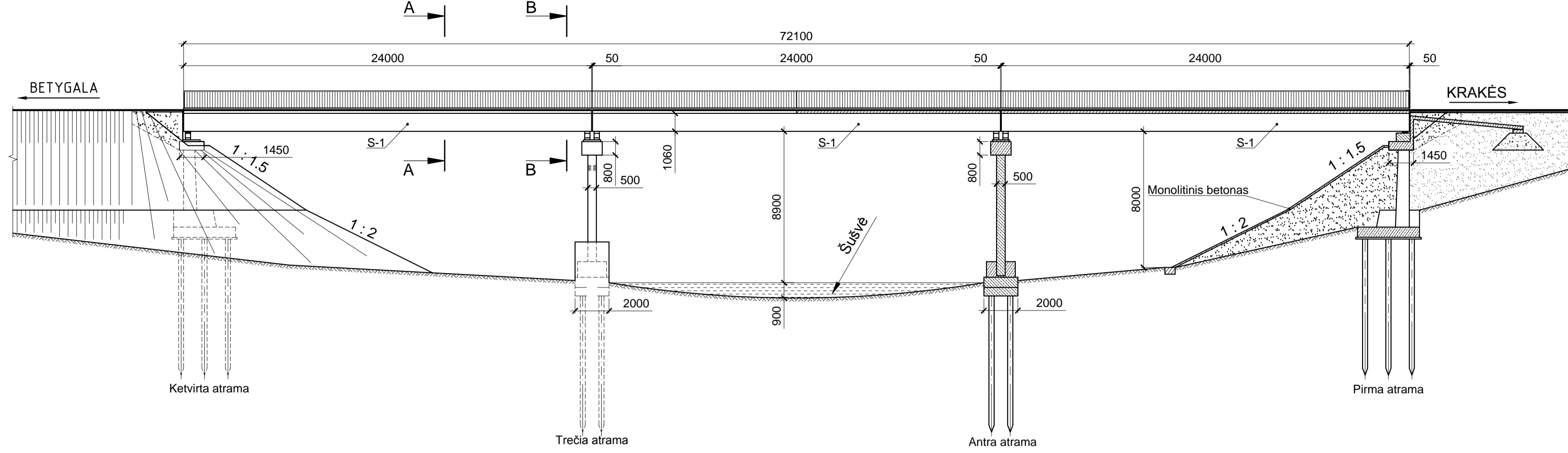
Kita literatūra:

39. Konstrukcijų projektavimo ir modeliavimo programa „Autodesk Robot Structural Analysis“.
40. Konstrukcijų projektavimo ir modeliavimo programa „Scia Engineer“.
41. Matematiniam skaičiavimams programa: „Mathcad Professional“.
42. Skersinio pasiskirstymo influencijų sudarymo programa „Tiltai -2000“.
43. VŠĮ Kelių ir transporto tyrimo instituto tilto per upę Šušvę tyrimo medžiaga, 2013.
44. Kolar V. Physical and shape orthotropy of plates. A guide to the definition of input physical data for bridge, floor and foundation slabs with different cross-sections in two perpendicular directions. Scia scientific software. 1993-2006, 4-35 p. (anglų kalba).

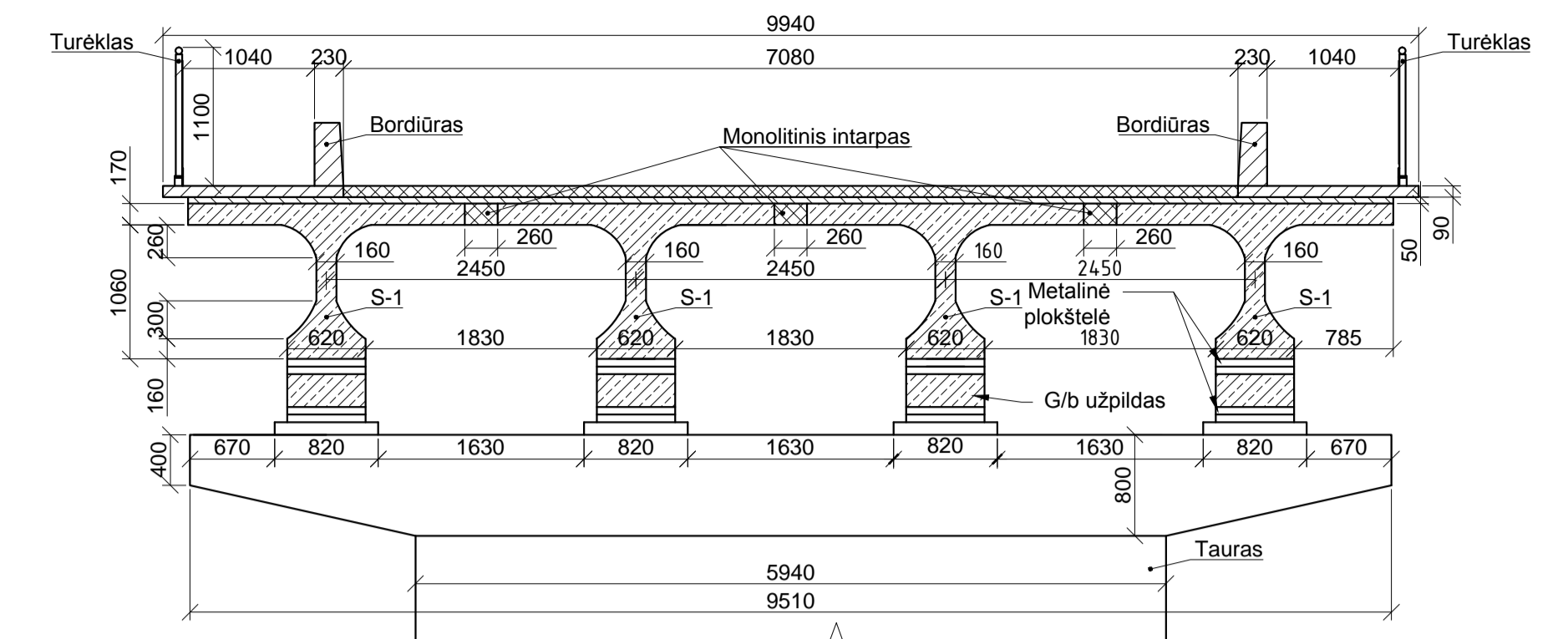
FASADO VAIZDAS M 1:200



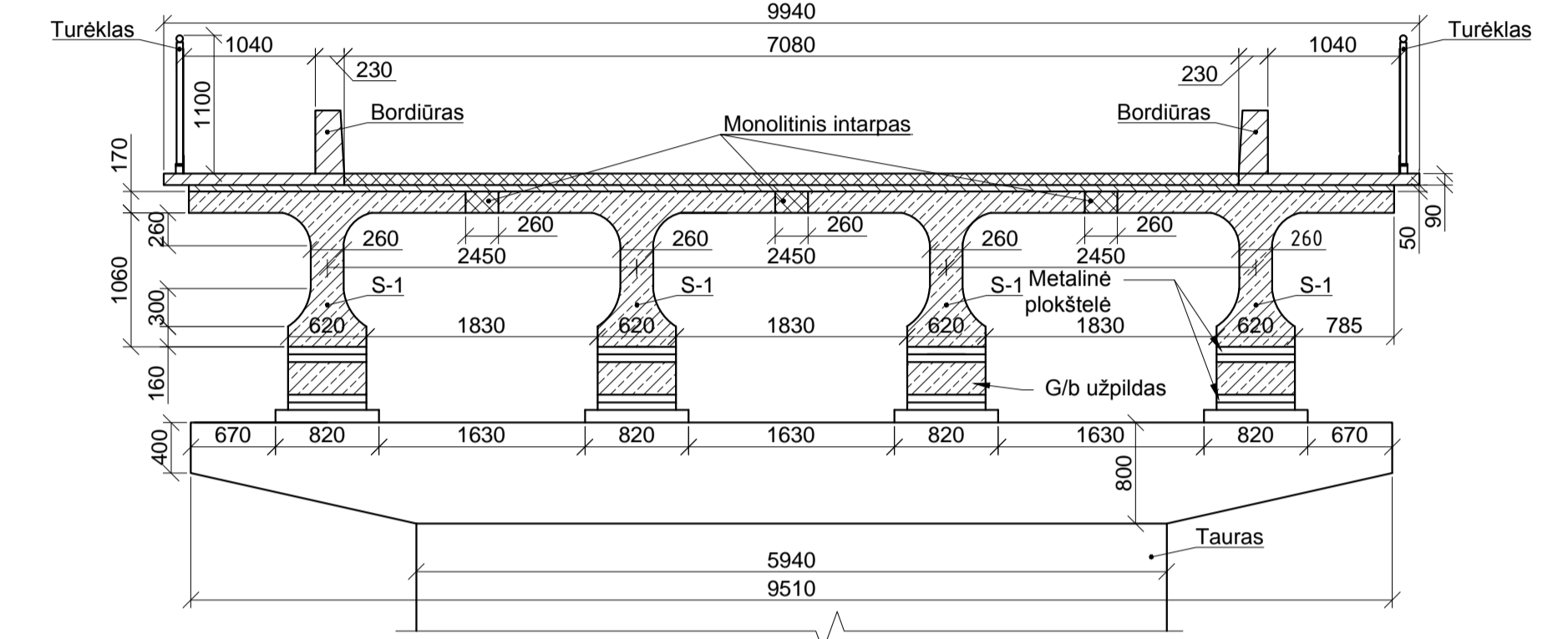
IŠILGINIS PJŪVIS M 1:200



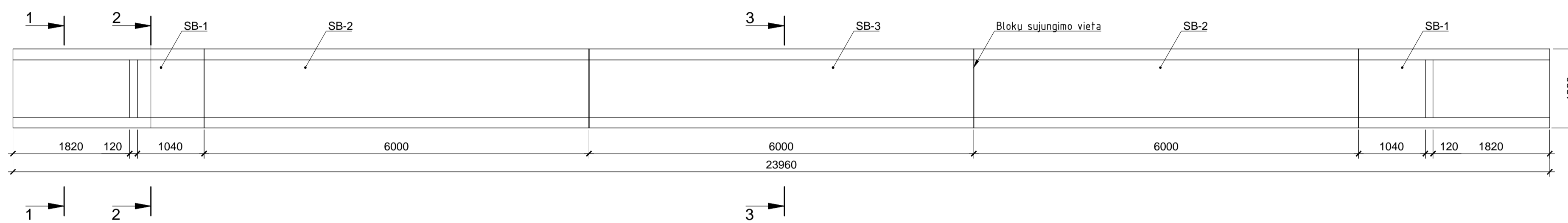
SKERSINIS PJŪVIS A-A M 1:50



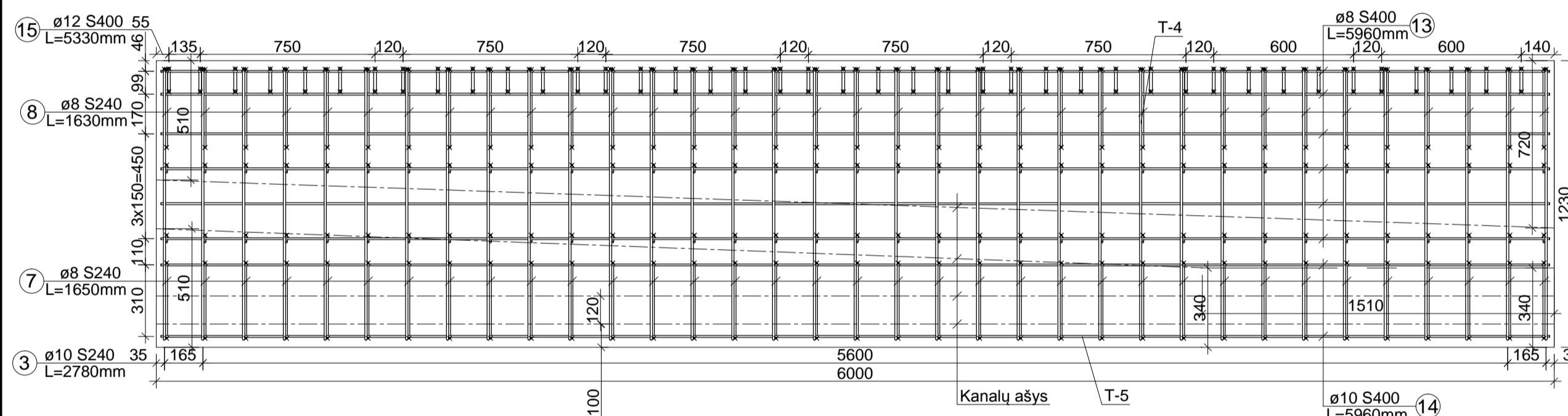
SKERSINIS PJŪVIS B-B M 1:50



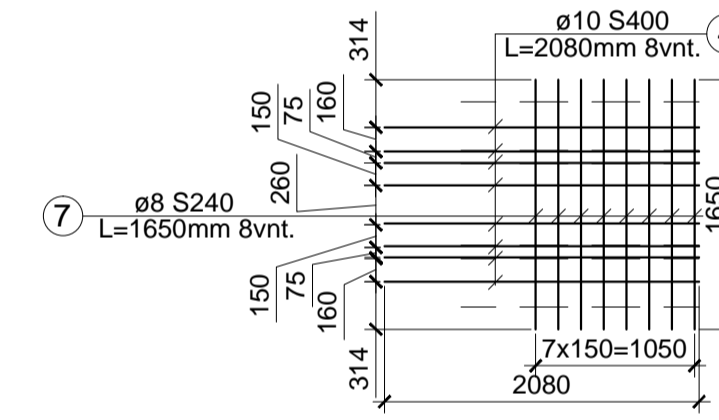
TILTO SIJA S-1 M1:50



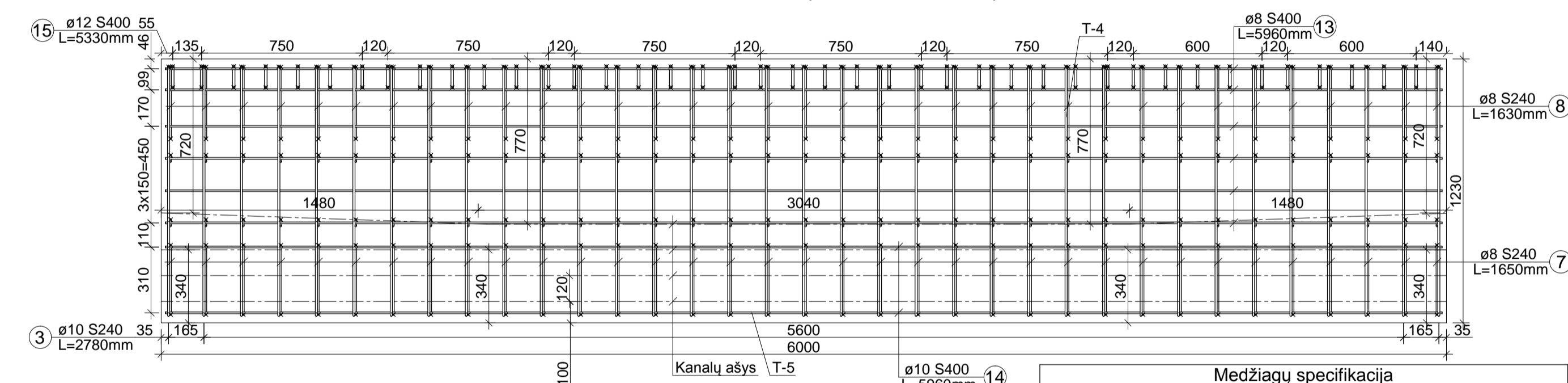
SIJOS BLOKAS SB-2 (ARMAVIMAS) M1:20



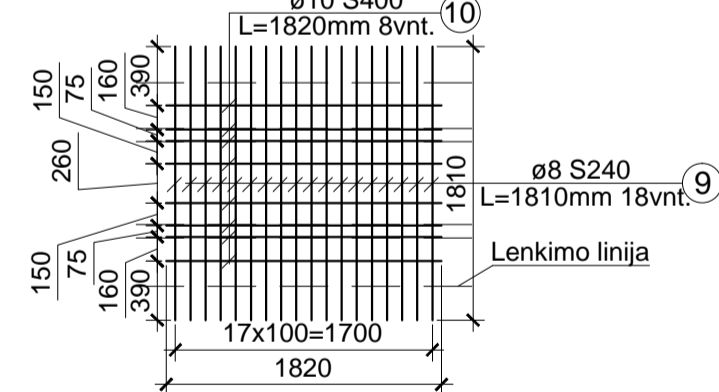
Tinklas T-1 M1:50



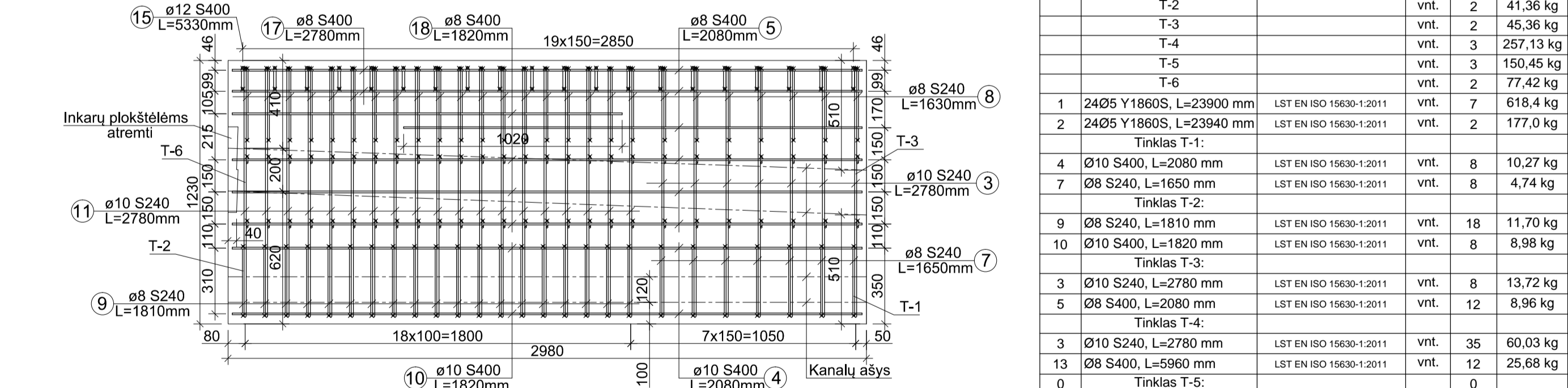
SIJOS BLOKAS SB-3 (ARMAVIMAS) M1:20



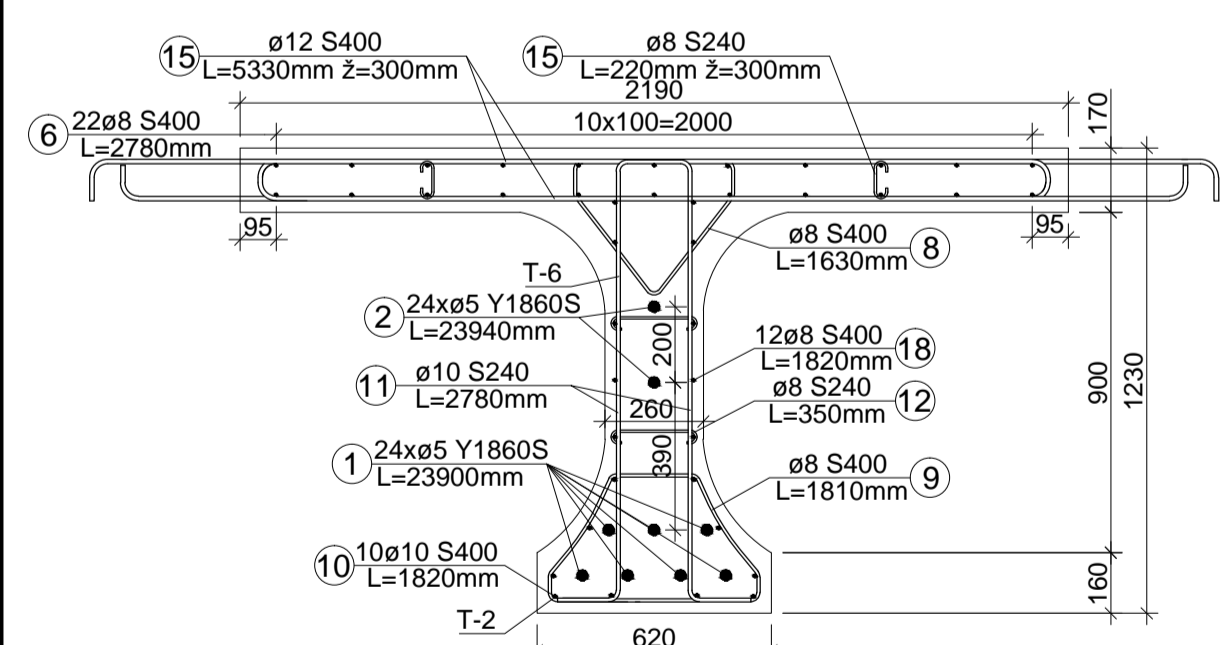
Tinklas T-2 M1:50



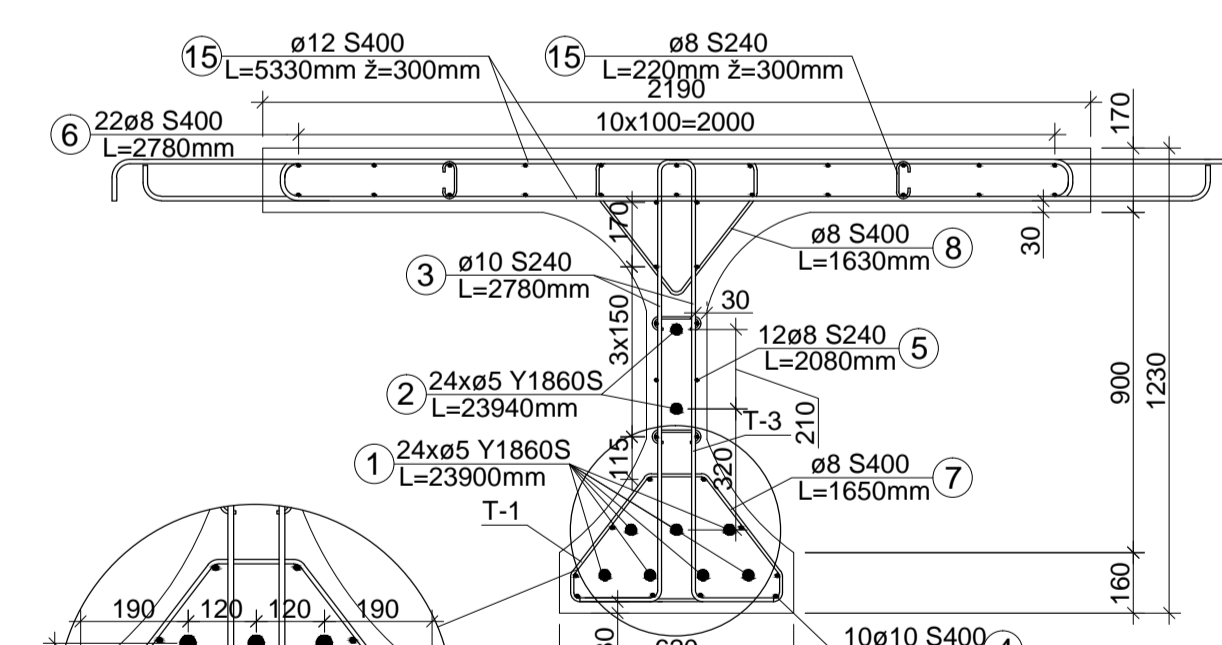
SIJOS BLOKAS SB-1 (ARMAVIMAS) M1:20



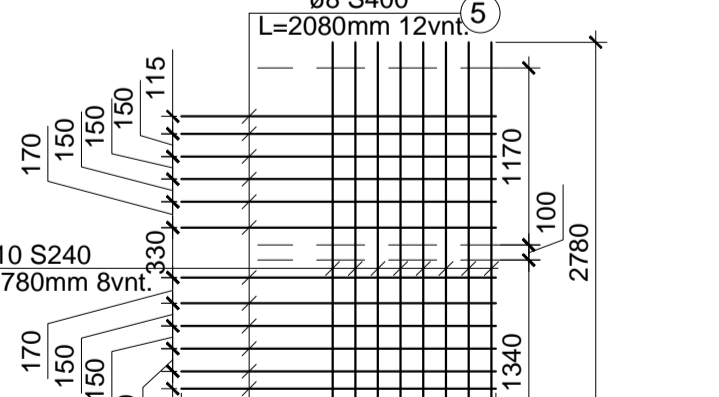
PJŪVIS 1-1 M1:20



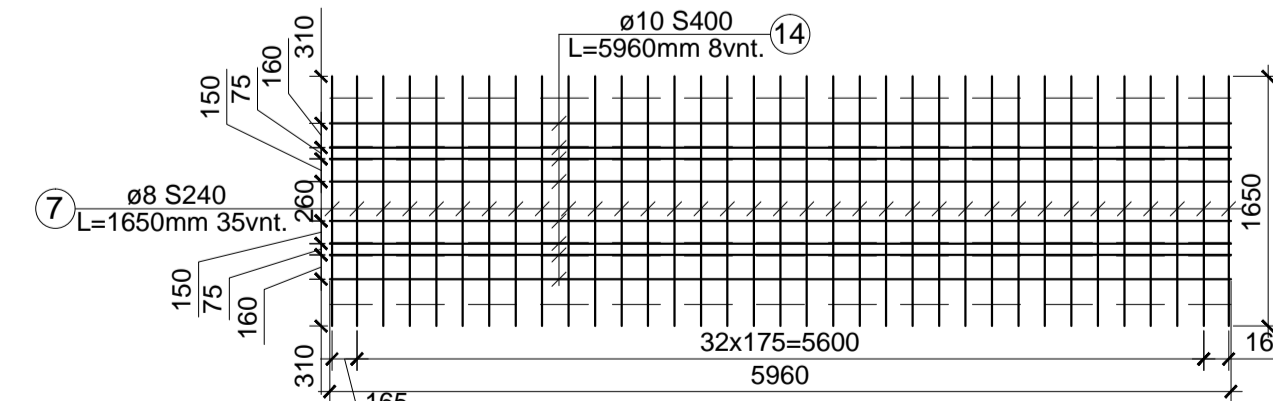
PJŪVIS 2-2 M1:20



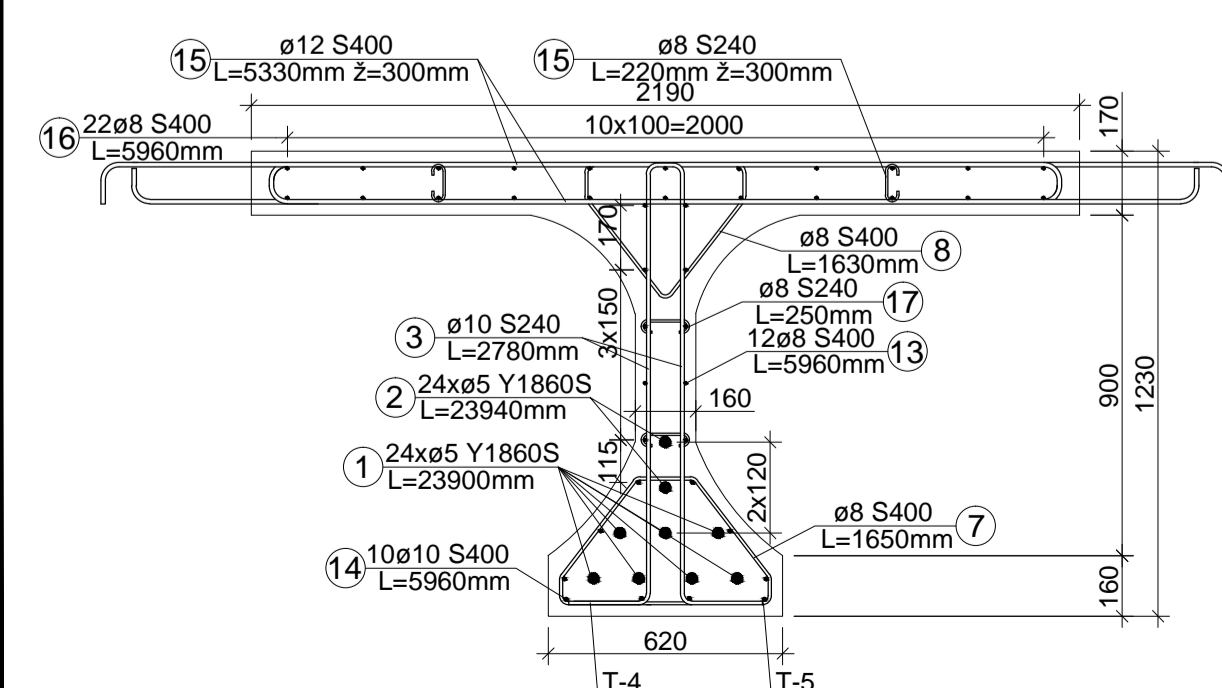
Tinklas T-3 M1:50



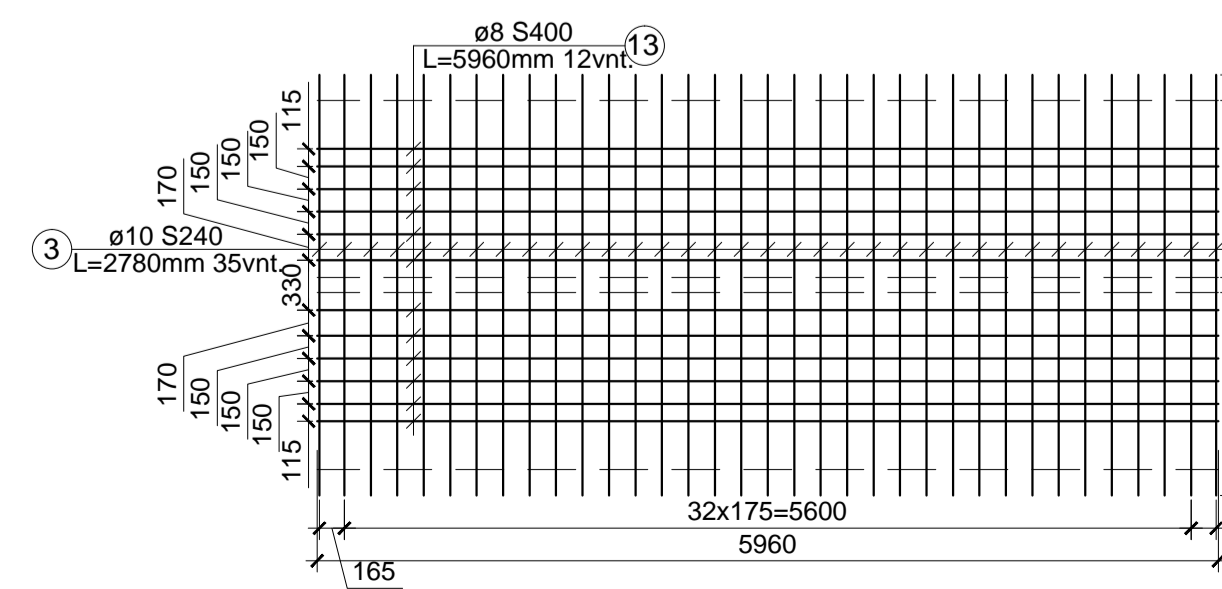
Tinklas T-5 M1:50



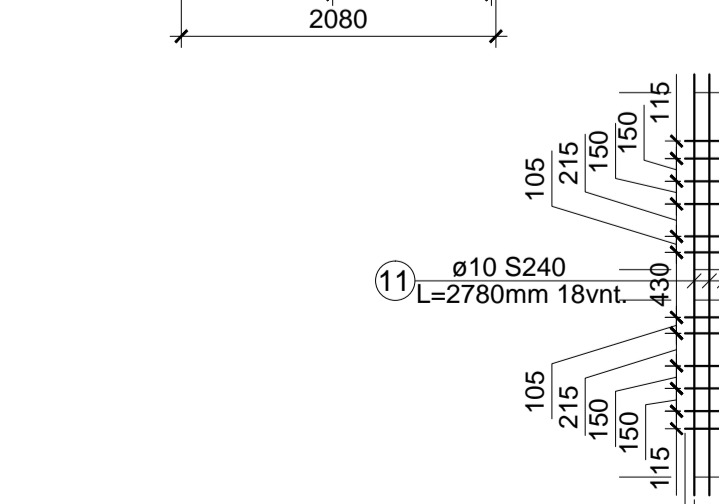
PJŪVIS 3-3 M1:20



Tinklas T-4 M1:50



Tinklas T-6 M1:50



Medžiagų specifikacija				
Pažymėjimas	Pavadinimas	Žymuo	Mato vnt.	Papildomi duomenys
Armatūros tinklai:				
T-1			vnt.	2 30,02 kg
T-2			vnt.	2 41,36 kg
T-3			vnt.	2 45,36 kg
T-4			vnt.	3 257,13 kg
T-5			vnt.	3 150,45 kg
T-6			vnt.	2 77,42 kg
1	2405 Y1860S, L=23900 mm	LST EN ISO 15630-1:2011	vnt.	7 618,4 kg
2	2405 Y1860S, L=23940 mm	LST EN ISO 15630-1:2011	vnt.	2 177,0 kg
Tinklas T-1:				
4	Ø10 S400, L=1810 mm	LST EN ISO 15630-1:2011	vnt.	8 10,27 kg
7	Ø8 S240, L=1650 mm	LST EN ISO 15630-1:2011	vnt.	8 4,74 kg
Tinklas T-2:				
9	Ø8 S240, L=1810 mm	LST EN ISO 15630-1:2011	vnt.	18 11,70 kg
10	Ø10 S400, L=1820 mm	LST EN ISO 15630-1:2011	vnt.	8 8,98 kg
Tinklas T-3:				
3	Ø10 S240, L=2780 mm	LST EN ISO 15630-1:2011	vnt.	8 13,72 kg
5	Ø8 S400, L=2080 mm	LST EN ISO 15630-1:2011	vnt.	12 8,96 kg
Tinklas T-4:				
3	Ø10 S240, L=2780 mm	LST EN ISO 15630-1:2011	vnt.	35 60,03 kg
13	Ø8 S400, L=5960 mm	LST EN ISO 15630-1:2011	vnt.	12 25,68 kg
0	Tinklas T-5:			0
7	Ø8 S240, L=1650 mm	LST EN ISO 15630-1:2011	vnt.	35 20,73 kg
14	Ø10 S400, L=5960 mm	LST EN ISO 15630-1:2011	vnt.	8 29,42 kg
0	Tinklas T-6:			0
11	Ø4 S240, L=2780 mm	LST EN ISO 15630-1:2011	vnt.	18 30,87 kg
18	Ø8 S400, L=1820 mm	LST EN ISO 15630-1:2011	vnt.	12 7,84 kg
Armatūra				
6	Ø8 S400, L=2960 mm	LST EN ISO 15630-1:2011	vnt.	22 23,78 kg
8	Ø8 S240, L=1630 mm	LST EN ISO 15630-1:2011	vnt.	157 91,87 kg
12	Ø8 S240, L=350 mm	LST EN ISO 15630-1:2011	vnt.	36 4,52 kg
15	Ø12 S400, L=5330 mm	LST EN ISO 15630-1:2011	vnt.	161 1036,6 kg
16	Ø8 S400, L=5960 mm	LST EN ISO 15630-1:2011	vnt.	22 47,07 kg
17	Ø8 S240, L=250 mm	LST EN ISO 15630-1:2011	vnt.	121 10,86 kg
Betonas:				
	C55/67 klasės betonas	LST EN 206:2014	m ³	17,16

Pastabos:

- Betonas sijai - C55/67.
- Tilto sijai armatūra: įtemptoji - Y1860S, išilginė - S400, skersinė - S240.
- Armatūros karkasas išamas viela arba virinamas kontaktiniu suvirinimu.
- Tilto sija armuojama viela, kuriuose yra 24 Ø5mm vielos.
- Sijos viela pluoščiai į betoną įtempiami 1100 MPa dydžiu.
- Tilto sija surenkama iš blokų SB-1 - SB-3.
- Įtempus armatūrą, kanalus reikia pripildyti cementiniu skiediniu.
- Tilto blokai turi būti įtempiami kol nėra sukietėję kliz blokų sandūrose.
- Sijos tarpusavyje jungiamos monolitiniu betono intarpu.
- Sijos tarpusavyje - armatūros strypų lenkimo linija.

Grupė	KTU Statybos ir Architektūros fakultetas	Magistro baigiamasis darbas
STM-3	Studentas O. Sleigvilas Vadovas S. Zadauskas	Geležbetoninių tiltų dinaminio įjinkio analizė
Pr. etapas	Statybos konstrukcijų katedra LT - 51367 Studentų 48, Kaunas	Tilto fasado vaizdas, išilginis ir skersiniai pjūviai, tilto sijos blokų armavimas, armatūros tinklai, specifikacija
MBD		2014-MBD-SK
		Laida Lapų
		1 1