



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Sijinių gelžbetoninių tiltų stiprinimo metodai ir jų analizė

Baigiamasis magistro projektas

Vilius Morkūnas

Projekto autorius

Lekt. dr. Saulius Zadlauskas

Vadovas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Sijinių gelžbetoninių tiltų stiprinimo metodai ir jų analizė

Baigiamasis magistro projektas

Statybos inžinerija (6211EX008)

Vilius Morkūnas

Projekto autorius

Lekt. dr. Saulius Zadlauskas

Vadovas

Doc. dr. Mindaugas Augonis

Recenzentas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Vilius Morkūnas

Sijinių gelžbetoninių tiltų stiprinimo metodai ir jų analizė

Akademinio sąžiningumo deklaracija

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

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GAMINIŲ INŽINERIJA

Baigiamojo projekto tema (lietuvių k.):
SIJINIŲ GELŽBETONINIŲ TILTŲ STIPRINIMO METODAI IR JŲ ANALIZĖ

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

(lietuvių k.):
SIJINIŲ GELŽBETONINIŲ TILTŲ STIPRINIMO METODAI IR JŲ ANALIZĖ

(anglų k.):
STRENGTHENING METHODS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS BRIDGES
AND THEIR ANALYSIS

Pradiniai duomenys darbui (pagal poreikį):

Probleminio gelžbetoninio tilto darbo projektas

Baigiamojo projekto dalys:

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

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

Su vadovu bendraujama elektroniniu paštu ir reguliariai (4 kartus per mėnesį) susitinkant sutartu laiku

Vadovas: Lekt. dr. Saulius Zadlauskas parašas
(indėlis 100 %) *pareigos, vardas, pavardė*

Konsultantas: _____ parašas
(indėlis _____ %) *pareigos, vardas, pavardė*

Konsultantas: _____ parašas
(indėlis _____ %) *pareigos, vardas, pavardė*

Studentas: Vilius Morkūnas parašas
vardas, pavardė

Morkūnas, Vilius. Sijinių gelžbetoninių tiltų stiprinimo metodai ir jų analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. dr. Saulius Zadlauskas; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): inžinerijos mokslai, Statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: stiprinimas, gelžbetoninis tiltas, T formos sija, skaitinis modeliavimas.

Kaunas, 2021. 54 p.

Santrauka

Visose pasaulio šalyse transporto infrastruktūra neįsivaizduojama be tiltų ir viadukų. Gelžbetonis yra viena iš pagrindinių medžiagų jų statyboje. Tiltų ir viadukų perdangos būna įvairios, o vienas iš galimų variantų yra gelžbetoninės T formos sijos. Tačiau laikui bėgant pastebimos atsirandančios problemos bei defektai, tai yra, didelis perdangos įlinkis ir atsiveriantys plyšiai. Šias problemas reikia spręsti, nes jos parodo, kad tilto ar viaduko eksploatacijos trukmė mažėja. Vienas iš galimų sprendimo variantų yra perdangos sijų stiprinimas.

Baigiamajame magistro projekte apžvelgiami įvairiose šalyse naudojami gelžbetoninių T formos sijų stiprinimo metodai. Iš jų pasirenkami trys stiprinimo būdai, kurie galėtų būti naudojami ir Lietuvoje. Jų lyginimas atliekamas pasirinkus tiltą, kurio perdanga yra sudaryta iš gelžbetoninių T formos sijų. Tai yra tiltas Šiaulių apskrityje, Pakruojo rajono pietvakariuose, Degučių kaime, 150 kelio 15,36 km ir veda per Kruojos upę. Baigtinių elementų programa „Sofistik“ sukuriama tiriamojo objekto skaitinis modelis, kuris atitinka realius tilto stebėjimo ir bandymų duomenis. Programoje įvertinama ne tik nuosavas konstrukcijų svoris, bet ir laikinos apkrovos, statybos stadijos, betono ilgalaikė elgsena (valkšnumas ir susitraukimas).

Atlikus trijų gelžbetoninių T formos sijinių tiltų stiprinimo būdų skaitinę analizę, buvo palyginti gauti rezultatai, tai yra tilto tarpatramio vidurio įlinkio ir betono įtempių reikšmės. Pateikti privalumai, trūkumai, išvados bei rekomendacijos taikymui praktikoje, ir tolimesnei tokio tipo tiltų perdangų stiprinimo metodų analizei.

Morkūnas, Vilius. Strengthening Methods Of Reinforced Concrete Beams Bridges And Their Analysis. Master's Final Degree Project / supervisor lect. dr. Saulius Zadlauskas; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering Sciences, Civil Engineering (E05).

Keywords: strengthening, reinforced concrete bridge, T-shaped beam, numerical modeling.

Kaunas, 2021. 54 pages.

Summary

Transport infrastructure is unimaginable without bridges and viaducts in all countries of the world. Reinforced concrete is one of the main materials in their construction. Bridge and viaduct decks are varied, and one of the possible options is reinforced concrete T-beams. However, over time, emerging problems and defects are observed, that is, large deflections in the deck and beams cracks. These problems need to be solved as they show that the service life of a bridge or viaduct is decreasing. One possible solution is to strengthen the deck beams.

The final master's project reviews the methods of strengthening reinforced concrete T-beams used in various countries. From these, three methods of strengthening are chosen, which could be used in Lithuania as well. Their comparison is performed by choosing a bridge, the deck of which is made of reinforced concrete T-beams. It is a bridge in Šiauliai county, southwest corner of Pakruojis district, Degučiai village, 15.36 km of 150 road and leads across the river Kruoja. A numerical model of the research object is created using the finite element program "Sofistik". Model corresponds to the real data of bridge observation and testing. The program evaluates not only the own weight of structures, but also the temporary loads, construction stages, long-term behavior of concrete (creep and shrinkage).

The results (the deflection of the middle of the bridge span and concrete stresses) obtained by numerical analysis of three strengthening methods of reinforced concrete T-shaped beams bridges were compared. Advantages, disadvantages, conclusions and recommendations for application in practice and for further analysis of this type of bridge deck strengthening methods are presented.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Įvadas.....	13
1. Baigiamojo projekto temos aktualumas, mokslinė problematika, tikslas ir uždaviniai.....	14
1.1. Baigiamojo projekto temos aktualumas ir mokslinė problematika	14
1.2. Baigiamojo projekto tikslas ir uždaviniai.....	14
2. Taikomi tiltų ir viadukų stiprinimo būdai	15
2.1. Stiprinimas fibromis armuotu polimeru	15
2.1.1. Stiprinimas fibromis armuoto polimero strypais.....	15
2.1.2. Stiprinimas iš anksto įtempiamomis fibromis armuoto polimero juostomis.....	17
2.1.3. Stiprinimas fibromis armuoto polimero juostomis.....	20
2.2. Stiprinimas padidinant sijos skerspjūvį.....	22
2.3. Literatūros apžvalgos išvados.....	24
3. Tiriama tilto skaitinis modelis	25
3.1. Tyrimo objektas.....	25
3.2. Duomenys naudojami skaičiavimams	27
3.2.1. Charakteristinės nuolatinės apkrovos	27
3.2.2. Betono susitraukimas ir valkšnumas	27
3.2.3. Pamatų sėdimai.....	27
3.2.4. Charakteristinės kintamos apkrovos.....	27
3.2.5. Temperatūriniai poveikiai	28
3.2.5.1. Tolygioji temperatūros komponentė.....	28
3.2.5.2. Vertikaliąji tiesinės komponentė	29
3.2.6. Naudojamas betonas	29
3.3. Visuminis tilto modelis.....	29
3.3.1. Statybos etapai.....	30
3.4. Gauti rezultatai visuminiame tilto modelyje	31
3.4.1. Perdagos sijų įlinkis.....	31
3.4.2. Perdagos sijose veikiančys betono įtempiai.....	32
3.4.3. Visuminio modelio palyginimas su realiais duomenimis.....	33
4. Nagrinėjami tilto stiprinimo būdai	35
4.1. Stiprinimas fibromis armuoto polimero juostomis.....	35
4.1.1. Teorinis aprašymas	35
4.1.2. Gauti rezultatai	36
4.1.2.1. Vienas fibromis armuoto polimerų juostų sluoksnis	36
4.1.2.2. Trys fibromis armuoto polimerų juostų sluoksniai.....	38
4.1.2.3. Stiprinimo fibromis armuoto polimero juostomis variantų palyginimas	40
4.2. Stiprinimas padidinant sijos skerspjūvį	41
4.2.1. Teorinis aprašymas	41
4.2.2. Gauti rezultatai	41
4.3. Stiprinimas iš anksto įtempiamais lynais	44
4.3.1. Teorinis aprašymas	44
4.3.2. Gauti rezultatai	45
4.4. Nagrinėtų tilto stiprinimo būdų palyginimas.....	48

Išvados	52
Literatūros sąrašas	53

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Maksimalus lenkimo momentas tarpatramio viduryje prieš ir po sustiprinimo [7]	22
2 lentelė. Charakteristinės nuolatinės apkrovos	27
3 lentelė. Galimi atramų nuosėdžiai	27
4 lentelė. LM1 modelio apkrovos	28
5 lentelė. GOST ir LST EN standartų betono klasių atitikmenys	29
6 lentelė. Įvertinamos tilto statybos stadijos	30
7 lentelė. Pirmas stiprinimo variantas (1 CFRP juostų sluoksnis). Betono įtempiai ir tilto įlinkiai .	37
8 lentelė. Pirmas stiprinimo variantas (3 CFRP juostų sluoksniai). Betono įtempiai ir tilto įlinkiai	39
9 lentelė. Pirmo stiprinimo būdo variantų palyginimas. Betono įtempiai ir tilto įlinkiai	40
10 lentelė. Antras sustiprinimo variantas. Betono įtempiai ir tilto įlinkiai	44
11 lentelė. Trečias sustiprinimo variantas. Betono įtempiai ir tilto įlinkiai	47
12 lentelė. Gautų rezultatų palyginimas. Betono įtempiai ir tilto įlinkiai	48

Paveikslų sąrašas

1 pav. Perdangos, sudarytos iš gelžbetonio sijų, skersinis pjūvis	13
2 pav. Tilto Pietų Korėjoje perdangos sija ir skersinis pjūvis [5]	15
3 pav. Stiprinimo CFRP strypais eiliškumas [5]	16
4 pav. Vertikalus poslinkis nuo statinės apkrovos [5]	17
5 pav. Vertikalus poslinkis nuo dinaminės apkrovos [5]	17
6 pav. Tiltas pietryčių Lenkijoje prieš rekonstrukciją [6]	18
7 pav. Tiltas pietryčių Lenkijoje po rekonstrukcijos [6]	18
8 pav. CFRP juostos tvirtinimo detalė [6]	19
9 pav. CFRP juostų išdėstymo schema [6]	19
10 pav. Deformacijų pokytis skerspjūvyje dėl sijų sustiprinimo CFRP juostomis (ϵ_{BG} , ϵ_S , ϵ_T – vidutinės deformacijų reikšmės betone, armatūroje ir CFRP juostoje) [6]	20
11 pav. Įtempių armatūroje pokytis dėl sijų sustiprinimo CFRP juostomis [6]	20
12 pav. Stiprinamas tiltas Jungtinėse Amerikos Valstijose [7]	21
13 pav. CFRP juostų išdėstymas [7]	21
14 pav. Armatūros įtempiai prieš ir po sustiprinimo [7]	22
15 pav. Sijų gabaritas ir armavimas [9]	23
16 pav. Sijų papildomas armavimas [9]	23
17 pav. Gauti bandymų rezultatai prieš ir po sustiprinimo [9]	24
18 pav. Tiriamojo tilto vieta	25
19 pav. Tilto bendras vaizdas	26
20 pav. Tilto fasado schema	26
21 pav. Tilto skersinis pjūvis	26
22 pav. Laikinių eismo apkrovų išdėstymas	28
23 pav. Visuminis tilto per Kruoją modelis	30
24 pav. Tilto per Kruoją skaičiuojamoji schema	30
25 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po sijų sumontavimo ir jų sumonolitavimo	31
26 pav. Tilto tarpatramio įlinkis praėjus 28 paroms po sijų įrengimo	31
27 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po pakloto įrengimo	31
28 pav. Tilto tarpatramio įlinkis praėjus 28 paroms po pakloto įrengimo	31
29 pav. Tilto tarpatramio įlinkis praėjus 47 metams po tilto atidarymo	31
30 pav. Tilto įlinkio kitimo kreivė per pirmuosius 47 metus	32
31 pav. Betonų įtempiai sijose išilgai tilto po sijų sumontavimo ir jų sumonolitavimo (laikinoji transporto apkrova nevertinama)	32
32 pav. Betonų įtempiai sijose išilgai tilto po pakloto įrengimo (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)	33
33 pav. Betonų įtempiai sijose išilgai tilto įvertinus laikinas transporto apkrovas	33
34 pav. Betonų tempimo įtempiai sijose išilgai tilto	33
35 pav. Tilto tarpatramio įlinkis tik nuo laikinių transporto apkrovų, kurių dydis pagal atliktus bandymus	34
36 pav. CFRP juostų išdėstymo ant sijų schema	35
37 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)	36
38 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo praėjus 53 metams (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)	36

39 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo praėjus 100 metų (laikinos transporto apkrovos nevertinamos).....	36
40 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo papildomai įvertinus laikinas transporto apkrovas.....	36
41 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo (laikinos transporto apkrovos nevertinamos).....	37
42 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo įvertinus laikinas transporto apkrovos	37
43 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)	38
44 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo praėjus 53 metams (laikinos transporto apkrovos nevertinamos).....	38
45 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo praėjus 100 metų (laikinos transporto apkrovos nevertinamos).....	38
46 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo papildomai įvertinus laikinas transporto apkrovas.....	38
47 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo (laikinos transporto apkrovos nevertinamos).....	39
48 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo įvertinus laikinas transporto apkrovos	39
49 pav. Papildomo gelžbetoninio apvalkalo schema	41
50 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)	42
51 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo praėjus 53 metams (laikinos transporto apkrovos nevertinamos).....	42
52 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo praėjus 100 metų (laikinos transporto apkrovos nevertinamos).....	42
53 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo papildomai įvertinus laikinas transporto apkrovas.....	42
54 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo (laikinos transporto apkrovos nevertinamos).....	43
55 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo praėjus 53 metams (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)	43
56 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo praėjus 100 metų (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)	43
57 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo įvertinus laikinas transporto apkrovos	43
58 pav. Iš anksto įtempiamų lynų išdėstymo schema	45
59 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)	45
60 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo praėjus 53 metams (laikinos transporto apkrovos nevertinamos).....	45
61 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo praėjus 100 metų (laikinos transporto apkrovos nevertinamos).....	46
62 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo papildomai įvertinus laikinas transporto apkrovas.....	46

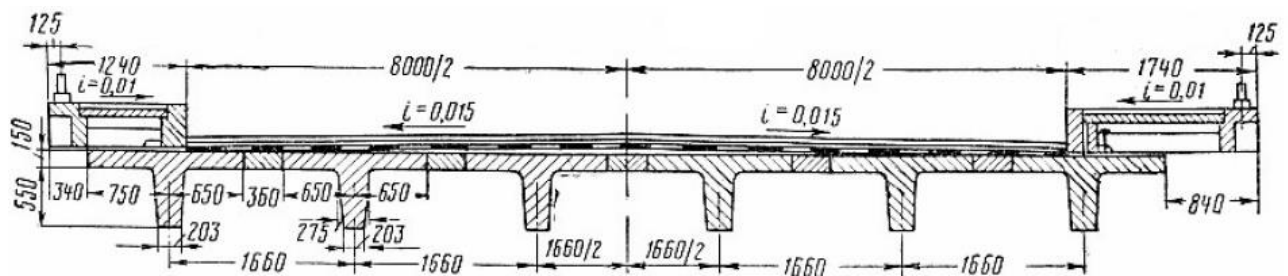
63 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo (laikinos transporto apkrovos nevertinamos).....	46
64 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo praėjus 53 metams (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)	46
65 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo praėjus 100 metų (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)	47
66 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo įvertinus laikinas transporto apkrovos	47
67 pav. Tilto įlinkio kitimas po sustiprinimo	49
68 pav. Betono įtempių kitimas po sustiprinimo	50

Įvadas

Lietuvos teritorijoje tiltų ir viadukų skaičius viršija 4000 [1]. Pagrindinė Lietuvos tiltų perdangų laikančioji medžiaga yra gelžbetonis. Net 95 % visų tiltų sudaro gelžbetoniniai [2]. Kadangi Lietuvoje medinių ir mūrinių tiltų yra labai nedaug, tai beveik visus likusius 5 % sudaro plieniniai arba plienbetoniniai tiltai.

Statinių ilgaamžiškumas yra vienas svarbiausių faktorių atliekant tiltų ir viadukų projektavimą, nes jų numatomas eksploatacinis laikotarpis lygus šimtui metų, o gelžbetoniniuose tiltuose atsiranda daugiausiai defektų ir pažeidimų. Jei problemos pradedamos pastebėti, tai jau yra vienas iš rodiklių, jog statinio eksploatacijos trukmė mažėja.

Lietuvoje yra daug tiltų (viadukų), kurių perdanga sudaryta iš paprastojo gelžbetonio sijų (žr. 1 pav.). Šiuo metu pradedamos pastebėti būtent šio tipo tiltams (viadukams) atsirandančios problemos.



1 pav. Perdangos, sudarytos iš gelžbetonio sijų, skersinis pjūvis

Pagrindinis pastebimas defektas, kuris atsiranda šio tipo tiltų (viadukų) perdangoje, yra plyšių atsivėrimas. O remiantis Europos standartais ir projektavimo normomis, šis reiškinys nėra toleruojamas tiltų ir viadukų konstrukcijose [3].

Plyšių atsiradimą skatina ir labai padidėjęs transporto srautas automobilių keliuose. Vadinasi transporto apkrova yra žymiai didesnė nei prieš 10, 20 ar dar daugiau metų [4]. Atsiradę plyšiai konstrukcijose sukelia kitą problemą – įlinkio didėjimą. Jei įlinkio reikšmė laikui bėgant vis didėja ir kitimas nesustoja, tai gali būti rodiklis, kuris parodo, jog tilto (viaduko) eksploatacijos trukmė mažėja. Kitas labai svarbus aspektas, prisidedantis prie eksploatacijos trukmės mažėjimo, yra aplinka. Ji prisotinta chloridų, o dėl jų vyksta armatūros korozija. Visi šie faktoriai parodo, kad objektui, kuriam pasireiškia plyšių atsivėrimas, bus reikalingas remontas, tai yra, pagrindinių perdangos konstrukcijų stiprinimas arba jų pakeitimas.

1. Baigiamojo projekto temos aktualumas, mokslinė problematika, tikslas ir uždaviniai

1.1. Baigiamojo projekto temos aktualumas ir mokslinė problematika

Šiuo laikotarpiu Lietuvoje pradedami pastebėti gelžbetoninių sijinių tiltų atsirandantys defektai ir pažeidimai, kurie turi įtakos statinio eksploatacinei trukmei. Vis labiau atsiranda poreikis labiau atkreipti dėmesį į tokio tipo statinius. Būtent tą ir daro atsakingos institucijos (VŠĮ „Transporto kompetencijų agentūra“ ir miestų, rajonų savivaldybės). Daromi tiltų rekonstrukcijų darbai, kurių metu sprendžiamas laikančiųjų konstrukcijų stiprinimo klausimas.

Pasaulyje sijinių gelžbetoninių tiltų stiprinimo būdų yra žinoma ir taikoma ne vienas (plieninėmis plokštėmis, fibromis armuotu polimeru, skerspjūvio didinimu ir kiti). Atlikdami statinio rekonstrukcijos projektą, inžinieriai naudoja skirtingus stiprinimo būdus. Bet jie nėra išsamiai išanalizuoti ir palyginti, kad būtų galima žinoti, kuris iš jų yra efektingiausias.

1.2. Baigiamojo projekto tikslas ir uždaviniai

Tyrimo objektu pasirinktas gelžbetoninės neįtempiamos sijinės perdangos tiltas (viadukas), esantis Lietuvos teritorijoje. Baigiamojo projekto metu modeliuojami trys tiriamojo tilto (viaduko) stiprinimo variantai. Darbo tikslas – rasti efektyviausią tiltų (viadukų), kurių paklotas sudarytas iš gelžbetoninių T formos sijų, stiprinimo būdą.

Baigiamojo projekto uždaviniai:

1. atlikti įvairiose šalyse naudojamų gelžbetoninių T formos sijinių tiltų (viadukų) stiprinimo būdų analizę;
2. sudaryti tiriamo tilto (viaduko) skaitinį modelį atitinkantį realius stebėjimo duomenis;
3. sumodeliuoti tris Lietuvoje galimai naudojamus gelžbetoninių T formos sijinių tiltų (viadukų) stiprinimo būdus ir atlikti jų skaitinę analizę, išskiriant privalumus ir trūkumus;
4. pateikti išvadas ir rekomendacijas taikymui praktikoje bei atliekant gilesnę tiltų (viadukų) stiprinimo būdų analizę.

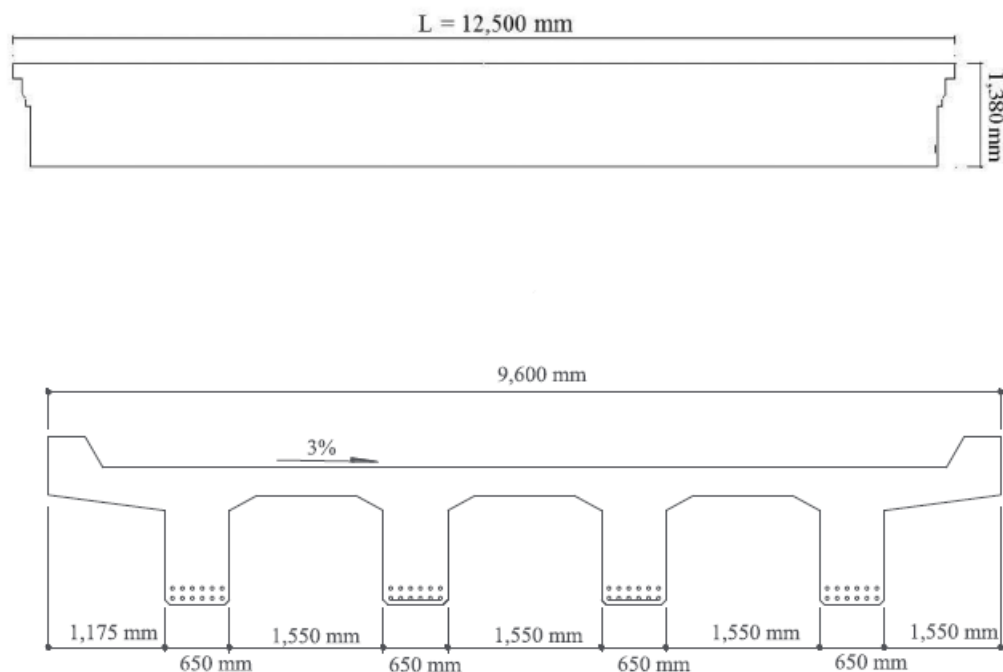
2. Taikomi tiltų ir viadukų stiprinimo būdai

2.1. Stiprinimas fibromis armuotu polimeru

Vienas iš populiariausių būdų sustiprinti tiltų ir viadukų gelžbetonines perdangos sijas yra naudojant fibromis armuotus polimerus (toliau FRP). Anglies fibromis armuotas polimeras (toliau CFRP) turi daug privalumų, o pagrindiniai yra didelis stiprumas, mažas svoris, atsparumas korozijos įtakai, be to, jam reikia mažiau priežiūros. Ši medžiaga populiarėja visame pasaulyje ir galime rasti jau atliktų stiprinimo darbų pavyzdžių su fibromis armuotais polimerais.

2.1.1. Stiprinimas fibromis armuoto polimero strypais

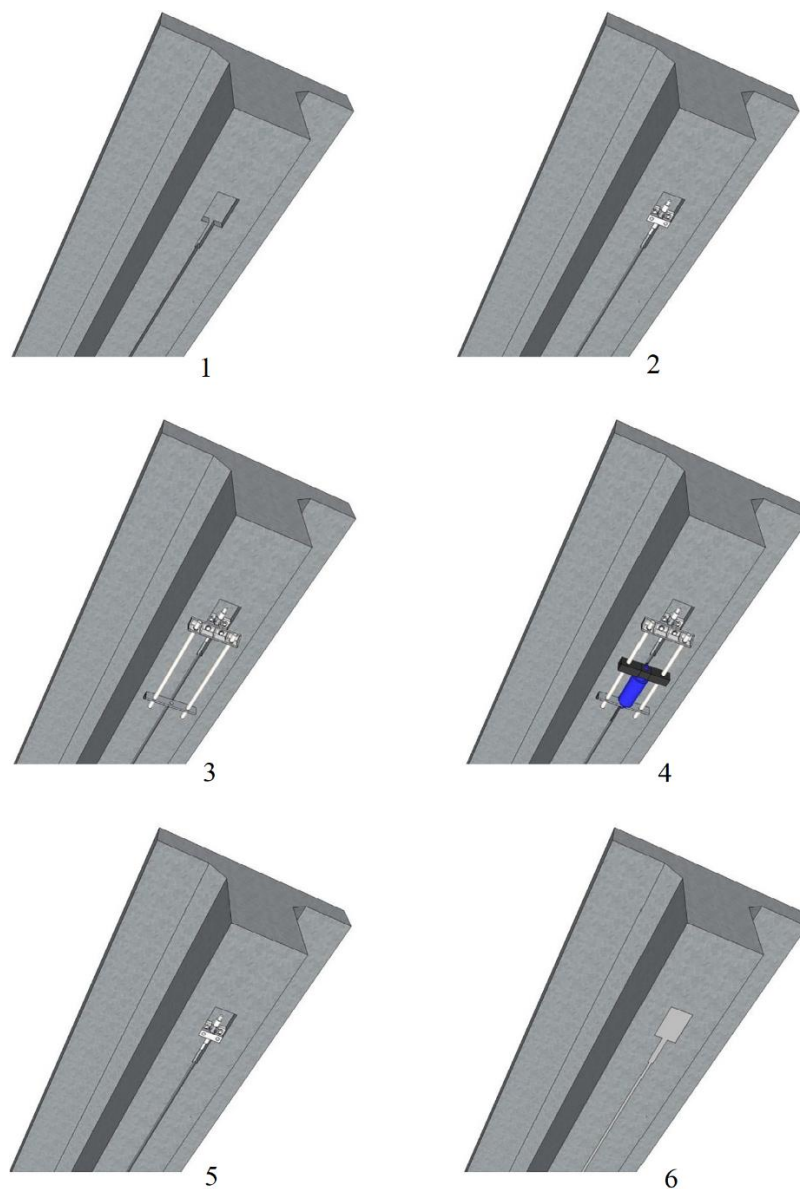
Pirmasis būdas yra naudoti anglies fibromis armuoto polimero strypus [5]. Taip sustiprintą tiltą galima rasti Pietų Korėjoje, Kiongi provincijoje. Jis buvo pastatytas 1960 metais. Tai keturių eismo juostų tiltas (žr. 2 pav.). Bendras objekto ilgis yra 50 m, o kiekvieno tarpatramio ilgis – 12,5 m. Perdangos plotis – 9,6 m. Sijos aukštis – 1,38 m. Kiekviena sija turi 12 armatūros strypų, apsauginio sluoksnio storis lygus 50 mm. Remiantis bandymais, atliktais Šmidto plaktuku, betono gniuždymo stipris yra 21,0 MPa. Projektavimo metu naudota 324 kN kintama apkrova.



2 pav. Tilto Pietų Korėjoje perdangos sija ir skersinis pjūvis [5]

Šio stiprinimo metodo procesas vyksta tokiu eiliškumu (žr. 3 pav.):

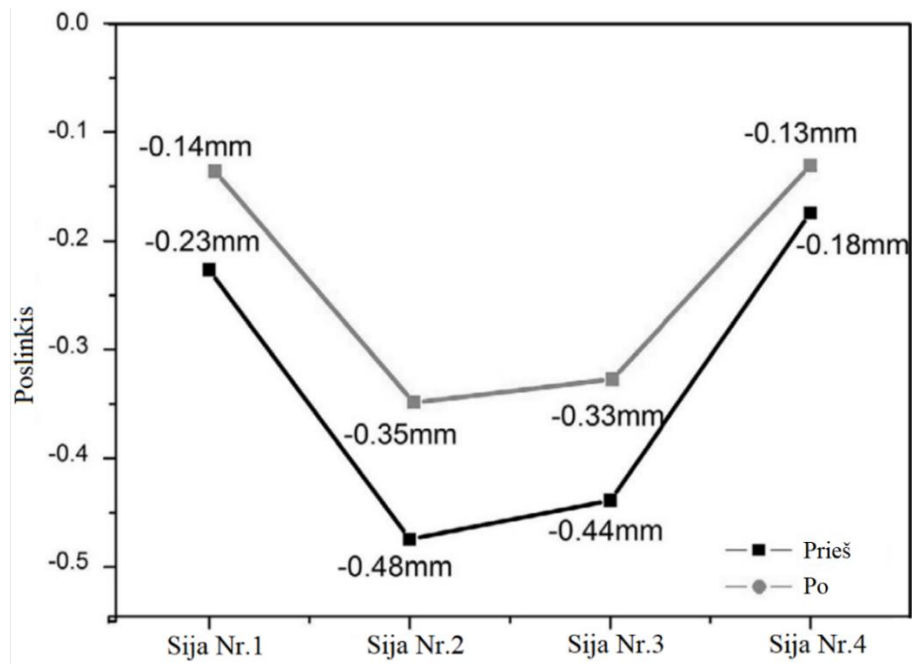
1. išilgai sijos išpjaunamas griovelis;
2. įdedami CFRP strypai ir tvirtinimo įtaisai;
3. sumontuojamas inkaravimo blokas;
4. sumontuojamas CFRP strypų įtempimo aparatas;
5. įtempus strypus, jėga užfiksuojama inkaravimo bloku;
6. griovelis su įtemptu strypu užbetonuojamas.



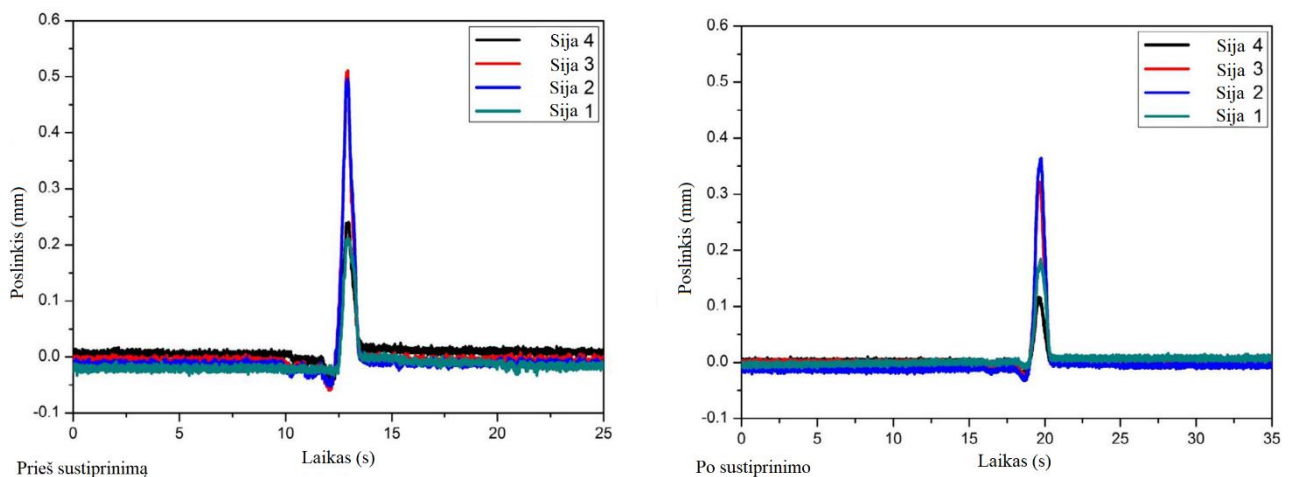
3 pav. Stiprinimo CFRP strypais eiliškumas [5]

Atlikus analizuojamo tilto stiprinimą CFRP iš anksto įtempiamais strypais, kai vidutinė įtempimo jėga buvo 102,86 kN, pastebėti tokie pakitimai:

- didžiausias vertikalus poslinkis nuo statinių apkrovų (žr. 4 pav.) prieš sustiprinimą buvo 0,48 mm, o sustiprinus konstrukciją – 0,35 mm. Pokytis 0,13 mm;
- didžiausias vertikalus poslinkis nuo dinaminių apkrovų (žr. 5 pav.) prieš sustiprinimą buvo 0,51 mm, o sustiprinus konstrukciją – 0,40 mm. Pokytis 0,11 mm;
- didžiausi sijos armatūros ir betono įtempimai viduryje tarpatramio nuo statinės apkrovos prieš sustiprinimą atitinkamai buvo 31,84 $\mu\epsilon$ ir 11,74 $\mu\epsilon$, o sustiprinus konstrukciją – 26,41 $\mu\epsilon$ ir 9,57 $\mu\epsilon$;
- didžiausi sijos armatūros ir betono įtempimai viduryje tarpatramio nuo dinaminės apkrovos prieš sustiprinimą atitinkamai buvo 35,06 $\mu\epsilon$ ir 19,81 $\mu\epsilon$, o sustiprinus konstrukciją – 26,53 $\mu\epsilon$ ir 15,77 $\mu\epsilon$.



4 pav. Vertikalus poslinkis nuo statinės apkrovos [5]

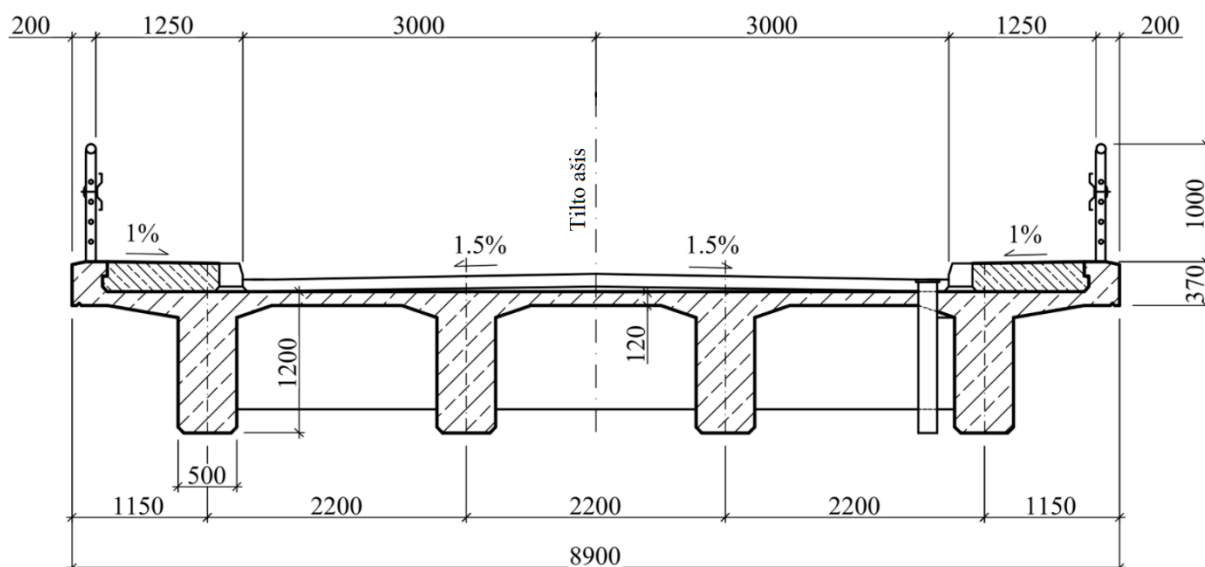


5 pav. Vertikalus poslinkis nuo dinaminės apkrovos [5]

Tilto stiprinimas CFRP iš anksto įtempiamais strypais pagerino esamą situaciją, įlinkis sumažėjo, įtempimai betone ir armatūroje taip pat.

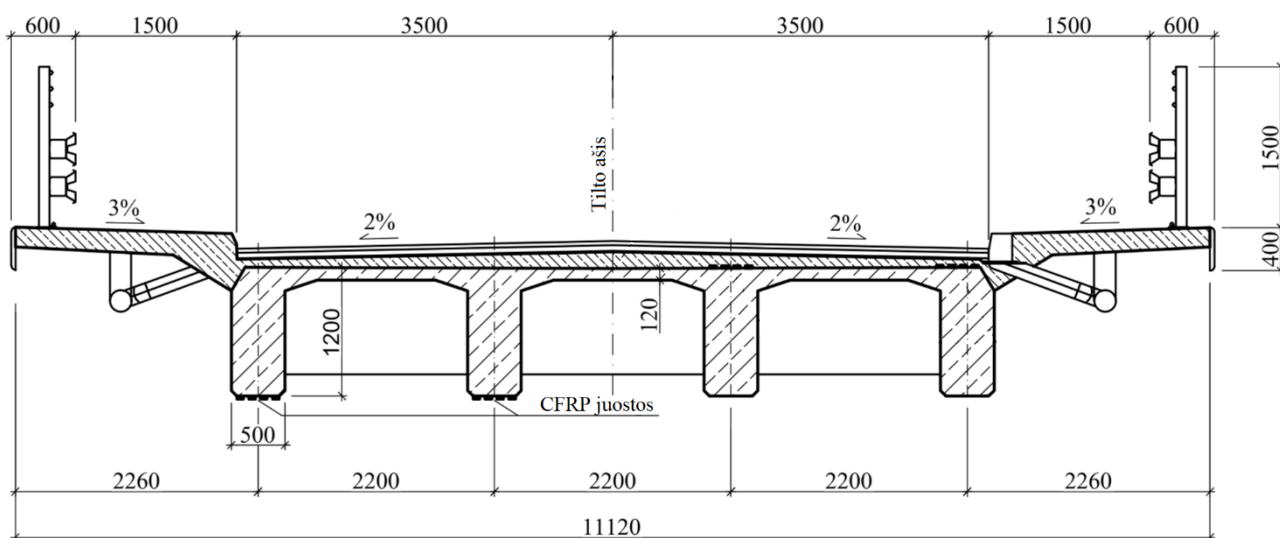
2.1.2. Stiprinimas iš anksto įtempiomis fibromis armuoto polimero juostomis

Dar vienas galimas būdas yra naudoti iš anksto įtempiamas anglies fibromis armuoto polimero (toliau CFRP) juostas. Tokiu metodu buvo sustiprintas tiltas pietryčių Lenkijoje [6]. Jis pastatytas 1965 metais. Tiltas yra trijų tarpatramių, kurių ilgiai yra 5,5 m – 16,0 m – 5,5 m. Jį sudaro 2 eismo juostos po 3,0 m, 2 šalitilčiai po 1,25 m ir 2 turėkliniai blokai po 0,2 m. Bendras tilto perdangos plotis – 8,9 m (žr. 6 pav.). Sijų aukštis 1,2 m. Remiantis paimtais medžiagų bandymais, betono stipris atitinka C16/20 klasę, o armatūrai gaminti buvo naudojamas S235 plienas.



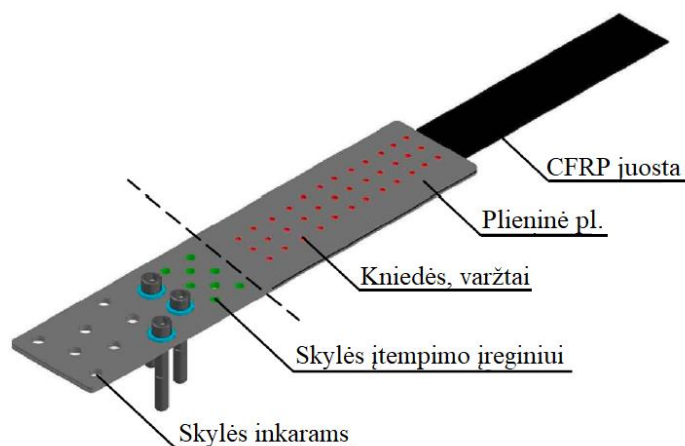
6 pav. Tiltas pietryčių Lenkijoje prieš rekonstrukciją [6]

Tiltui buvo atliekama rekonstrukcija, tai yra keičiami ir platinami šaltilčiai (bendras vieno šaltilčio plotis 2,1 m), keičiama kelio danga, platinamos eismo juostos (nuo 3,0 m iki 3,5 m). Bendras tilto plotis 11,12 m. (žr. 7 pav.) Taip tilto nuolatinė apkrova padidėjo, kas dar labiau paskatino stiprinti perdangos sijas.



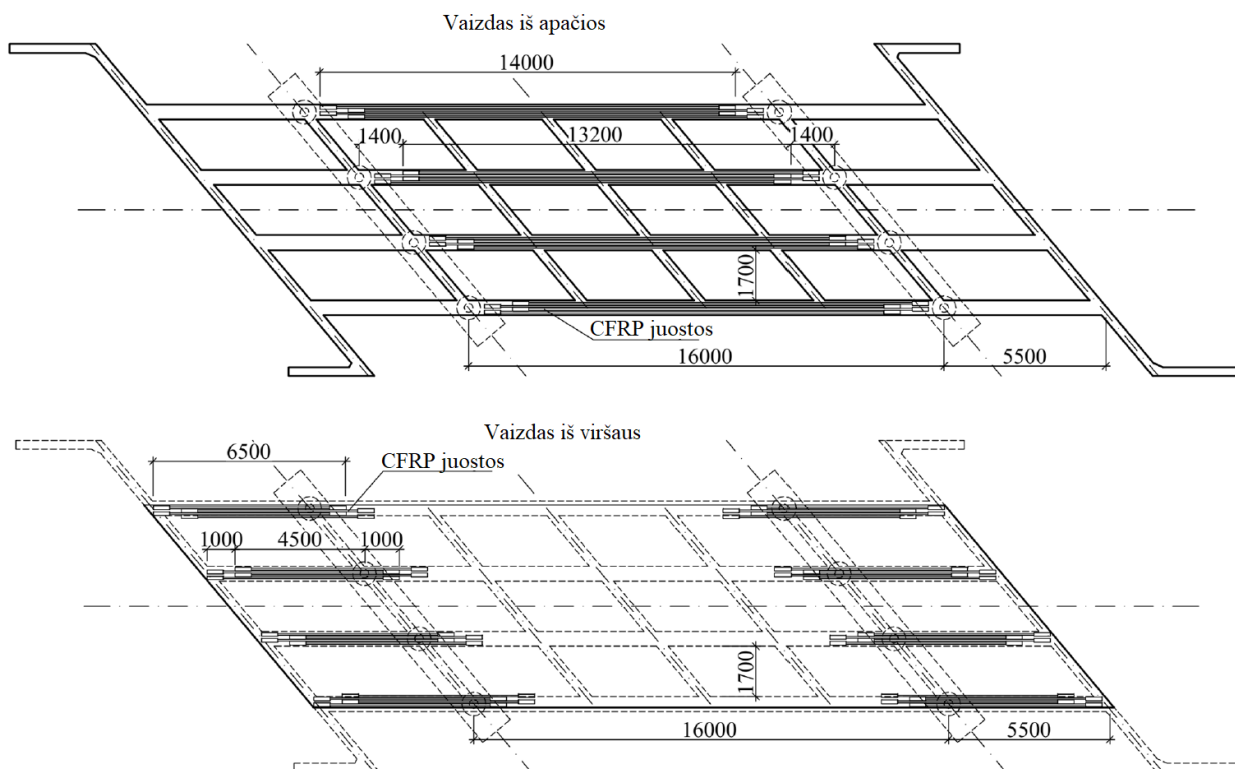
7 pav. Tiltas pietryčių Lenkijoje po rekonstrukcijos [6]

Gelžbetonines perdangos sijas stiprinama iš anksto įtempiamomis CFRP juostomis. Šiuo metodu, jos ne tik epoksidiniais klijais priklijuojamos prie sijos apačios, bet ir galuose pritvirtinamos ir įtempiamos detalėmis (žr. 8 pav.).



8 pav. CFRP juostos tvirtinimo detalė [6]

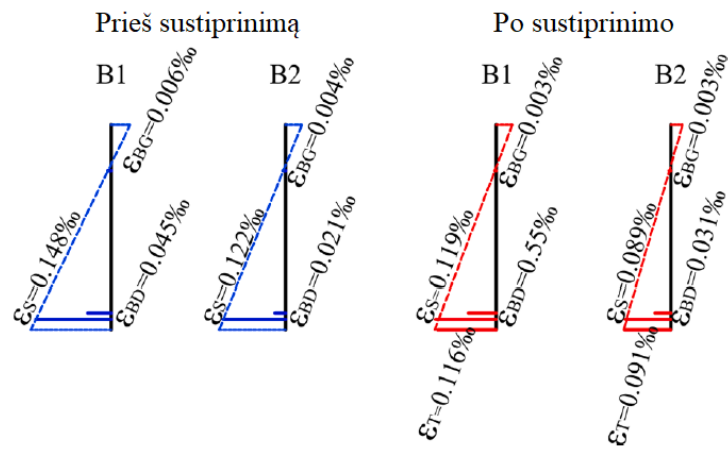
Nagrinėjamame tilte anglies fibromis armuoto polimero juostos išdėstomos viduriniame tarpatramyje apatinėje sijų dalyje, o kraštinuose tarpatramiuose viršutinėje sijų dalyje. Išdėstymas pavaizduotas 9 pav.



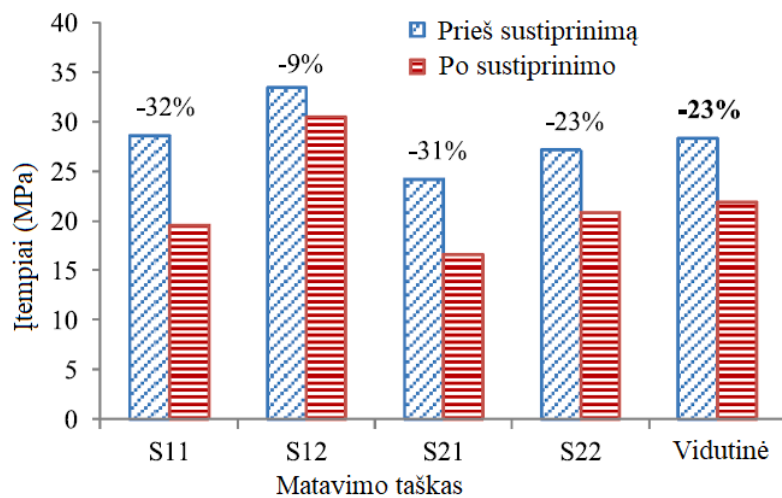
9 pav. CFRP juostų išdėstymo schema [6]

Buvo atlikti tilto bandymai prieš ir po sustiprinimo su tokiais pačiomis apkrovomis. Gavus duomenis pastebėti tokie pakitimai:

- deformacijos betone ir armatūroje sumažėjo (žr. 10 pav.);
- įtempiai armatūroje vidutiniškai sumažėjo apie 23% (žr. 11 pav.).



10 pav. Deformacijų pokytis skerspjūvyje dėl sijų sustiprinimo CFRP juostomis (ϵ_{BG} , ϵ_S , ϵ_T – vidutinės deformacijų reikšmės betone, armatūroje ir CFRP juostoje) [6]

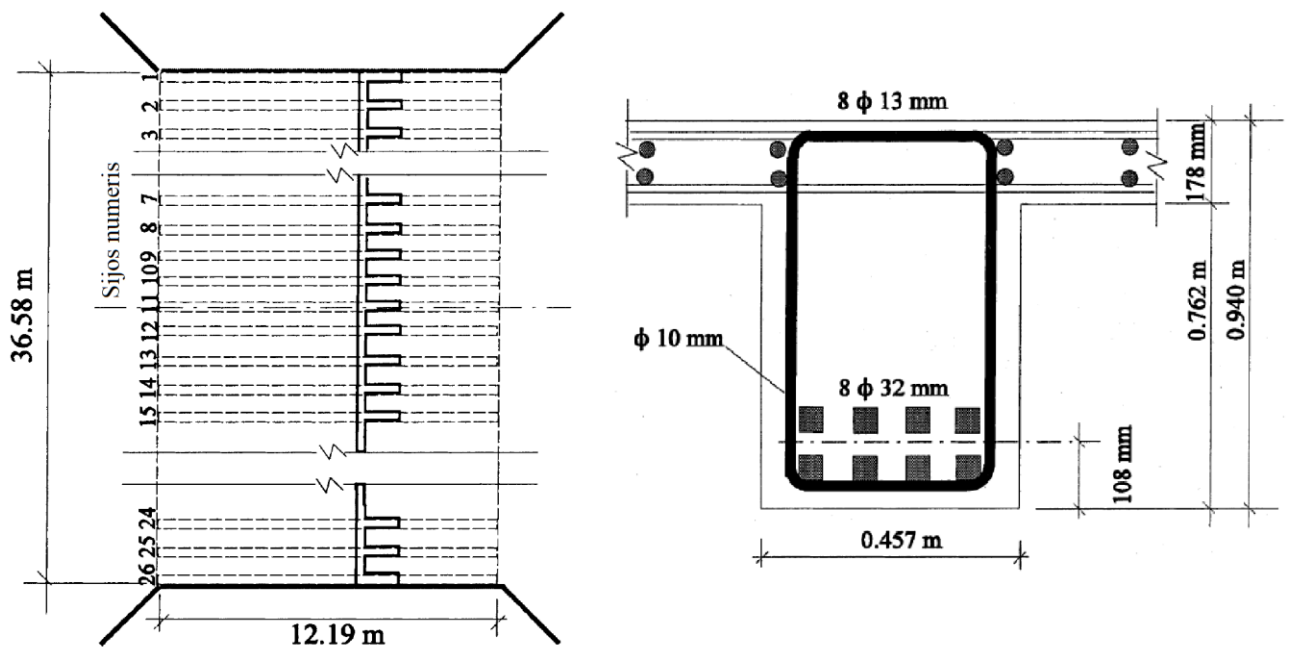


11 pav. Įtempių armatūroje pokytis dėl sijų sustiprinimo CFRP juostomis [6]

Tilto stiprinimas CFRP iš anksto įtempiamomis juostomis pagerino esamą situaciją, deformacijos betone ir armatūroje sumažėjo, įtempimai taip pat.

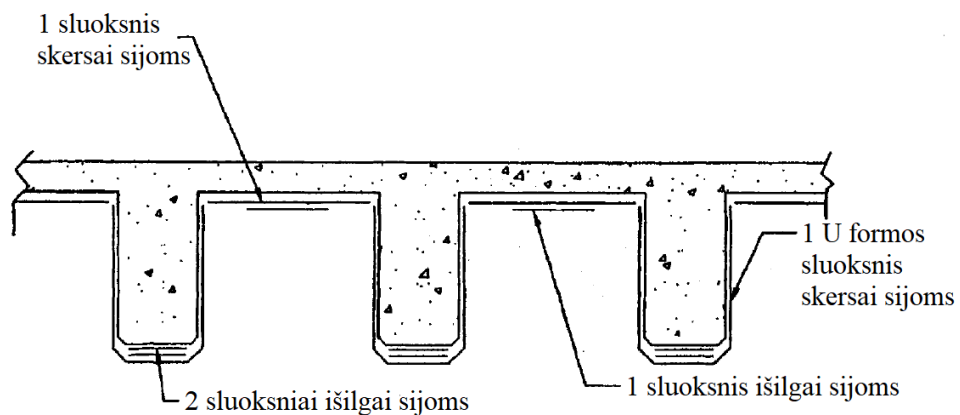
2.1.3. Stiprinimas fibromis armuoto polimero juostomis

Kitas panašus į anksčiau aptartą stiprinimo būdą yra naudoti fibromis armuoto polimero juostas. Jis yra paprastesnis, nes FRP juostos tik klijuojamos prie paviršiaus. Tokiu metodu sustiprintą tiltą galima rasti Jungtinėse Amerikos Valstijose, Niujorko valstijoje [7]. Tiltas pastatytas 1932 metais. Jis yra 12,19 m ilgio ir 36,58 m pločio. Jo perdangą sudaro 26 gelžbetoninės sijos, kurios išdėstytos 1,37 m žingsniu. Remiantis tilto projekto duomenimis sijų armavimas yra žinomas. Jis pavaizduotas 12 pav.



12 pav. Stiprinamas tiltas Jungtinėse Amerikos Valstijose [7]

Šiuo tiltu vyksta didelis transporto eismas, dėl to visai uždaryti tilto nebuvo galima. Tokiu atveju buvo pasirinktas anglies fibromis armuoto polimero juostos. Jų išdėstymas: 2 sluoksniai sijų apačioje išilgai joms, 1 sluoksnis tarp sijų išilgai joms (ant plokštės), 1 sluoksnis tarp sijų statmenai joms ir sijos apgaubiamos U formos juostomis statmenai sijoms (žr. 13 pav.).



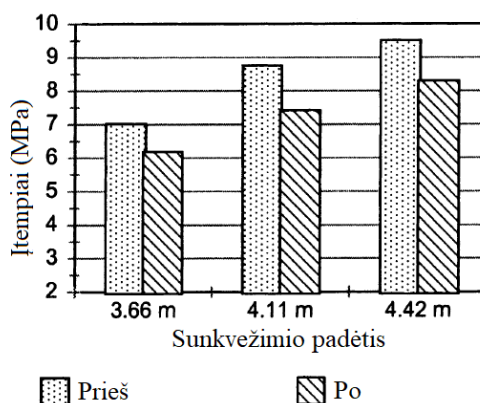
13 pav. CFRP juostų išdėstymas [7]

Sijų sustiprinimo darbų eiliškumas:

1. aštrūs sijų kampai išlyginami;
2. pašalinamas birus betonas;
3. užtaisomi atsiradę įtrūkimai ir nelygumai sijose;
4. sijų paviršius nuplaunamas smėliasrove ir vandeniu;
5. pilnai išdžiūvus paviršiui pažymimos tikslios CFRP juostų vietos;
6. paviršius nutepamas gruntu ir glaistu;
7. paviršius nutepamas epoksidine derva ir ant jo dedamos CFRP juostos;
8. džiūvimo metu temperatūros valdymui naudojami šildytuvai;
9. dėl apsaugos nuo ultravioletinės spinduliuotės visas paviršius kartu su laminatais nudažomas.

Po tilto sustiprinimo praėjus 10 dienų buvo atliekami tilto bandymai. Jiems naudoti 4 sunkvežimiai, vieno jų vidutinis svoris 196 kN. Sunkvežimiai buvo statomi 3 skirtingomis pozicijomis: 3,66 m, 4,11 m, 4,42 m po 2 sunkvežimius nuo kraštinių atramų. Gauti rezultatai buvo lyginami su analogiškais bandymais atliktais prieš tilto stiprinimą.

Pastebėta, kad armatūros įtempimai ir tuo pačiu deformacijos po sustiprinimo sumažėjo (žr. 14 pav.). Taip pat sumažėjo vieną siją veikiantis lenkimo momentas tarpatriamio viduryje, jis CFRP juostų dėka persiskirstė nuo labiau apkrautų sijų, mažiau apkrautoms sijoms (žr. 1 lent.).



14 pav. Armatūros įtempiai prieš ir po sustiprinimo [7]

1 lentelė. Maksimalus lenkimo momentas tarpatriamio viduryje prieš ir po sustiprinimo [7]

Sunkvežimių padėtis nuo kraštinių atramų (m)	Maksimalus lenkimo momentas tenkantis vienai sijai prieš sustiprinimą (kNm)	Maksimalus lenkimo momentas tenkantis vienai sijai po sustiprinimo (kNm)
3,66	220,5	204,7
4,11	278,3	259,1
4,42	321,1	299,0

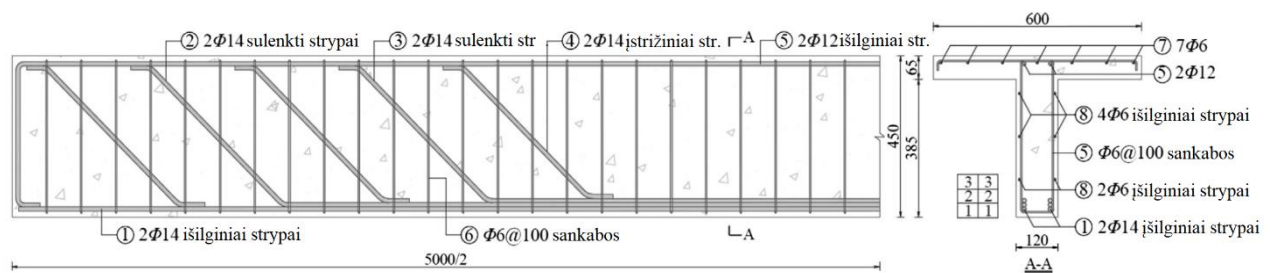
Konstrukcijos sustiprinimas CFRP juostomis pagerino esamą būklę, perdangos stiprumas padidėjo.

2.2. Stiprinimas padidinant sijos skerspjūvį

Visi stiprinimo metodai turi savo privalumų ir trūkumų. Fibromis armuoti kompozitai yra lengvi, didelio stiprio, jų neveikia korozija, bet jie yra brangūs, negalima naudoti žemoje temperatūroje, nepakankamai atsparūs ugniai. Šiais klausimais sijos skerspjūvio padidinimas papildomu gelžbetonio apvalkalu yra pranašesnis. Tačiau yra ir minusų, tokių kaip skerspjūvio ir masės padidėjimas, standumo ir konstrukcijų dinaminių charakteristikų pasikeitimas [8].

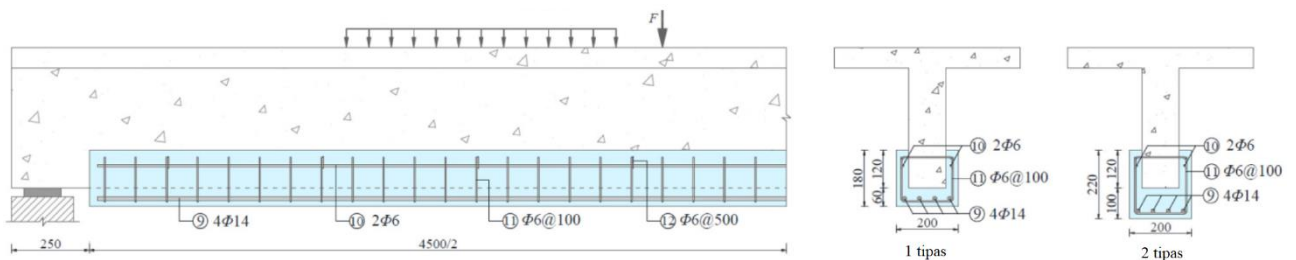
Vienas iš skerspjūvio padidinimo būdų yra naudoti neįtemptą armatūrą ir savaimę susitankinantį betoną (toliau SCC) [9]. SCC pasirenkamas, nes gelžbetonio apvalkalas projektuojamas su tankiu armavimu, o įprasto betono atveju sunku užtikrinti tolygų betono pasiskirstymą ir sutankėjimą konstrukcijoje [10].

Šio bandymo metu bus naudojamos aštuonios 5 m sijos. Jų aukštis – 0,45 m, sienelės plotis – 0,12 m, juostos storis – 0,065 m, juostos plotis – 0,6 m. Sijų armavimas pavaizduotas 15 pav. Šių sijų vidutinis gniuždymo stipris po 28 dienų lygus 34 MPa.



15 pav. Sijų gabaritas ir armavimas [9]

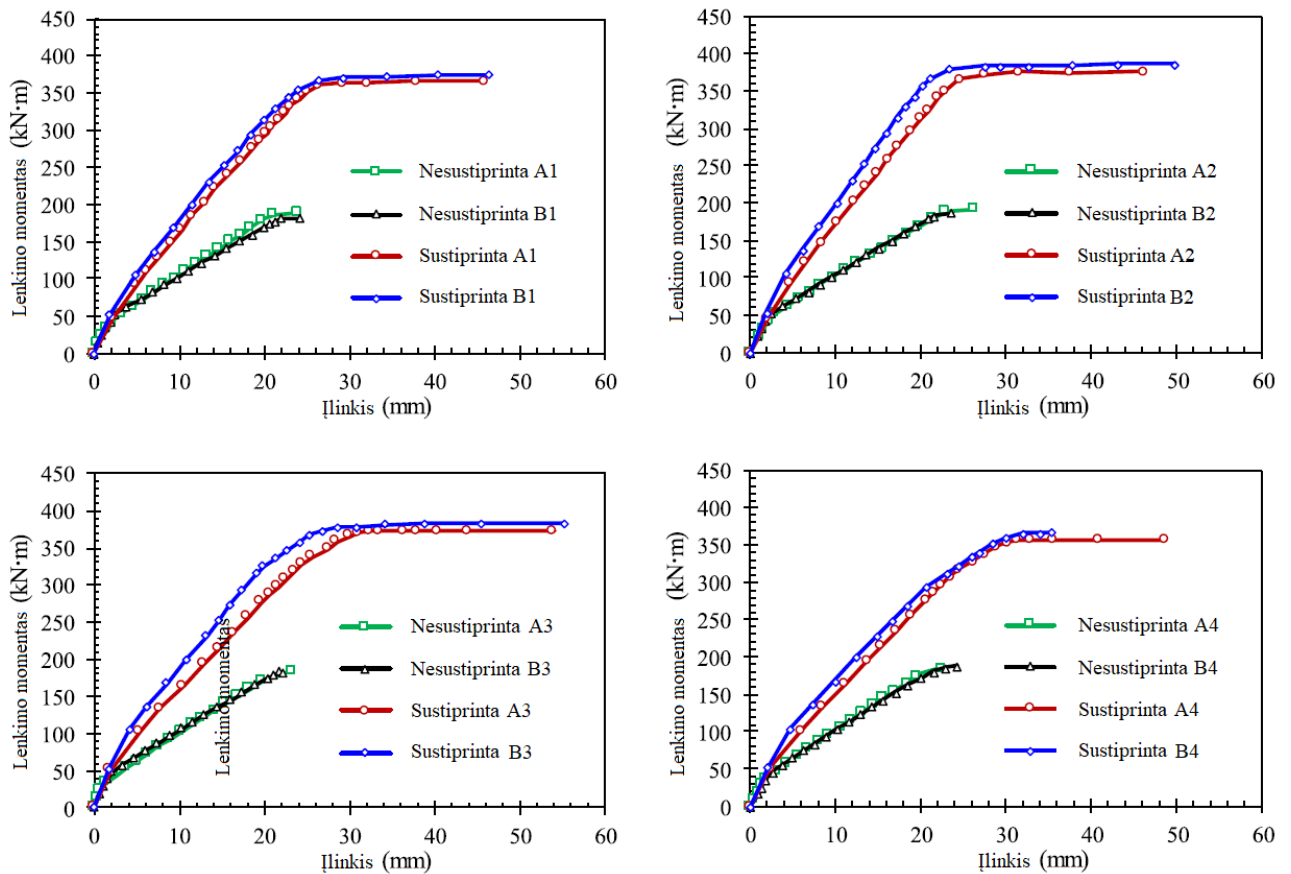
Ketrios sijos stiprinamos 60 mm (1 tipas) papildomu sluoksniu po sija, o kitos ketrios – 100 mm (2 tipas) papildomu sluoksniu po sija. Abiejų tipų papildomas armavimas vienodas, jis pavaizduotas 16 pav.



16 pav. Sijų papildomas armavimas [9]

Kiekviena sija stiprinama, kai ją veikia tam tikra skirtinga apkrova. Ji nustatoma pagal nesustiprintų sijų lenkimo momentą, kuris nustatytas jas apkrovus ir sekant deformacijų kreivę. Kai deformacijos pradeda augti greitai, fiksuojamas lenkimo momentas ir apkrovimas baigiamas. Eksperimento metu gauta, kad šis lenkimo momentas yra apie 185 kNm. Sustiprintos sijos apkraunamos atitinkamai tokiais lenkimo momentais: $0 M_{y,0}$ (A1 ir B1), $0,15 M_{y,0}$ (A2 ir B2), $0,30 M_{y,0}$ (A3 ir B3), $0,50 M_{y,0}$ (A4 ir B4).

Atlikus bandymus gauta, kad sustiprintų 1 tipo sijų atlaikantis lenkimo momentas, iki deformacijų labai staigaus augimo, padidėjo apie 1,93 karto. Sustiprintų 2 tipo sijų atlaikantis lenkimo momentas padidėjo 2,02 karto. (žr. 17 pav.)



17 pav. Gauti bandymų rezultatai prieš ir po sustiprinimo [9]

Iš šių duomenų galima teigti, kad sustiprinimas veiksmingai pagerino sijų lenkiamąją galią.

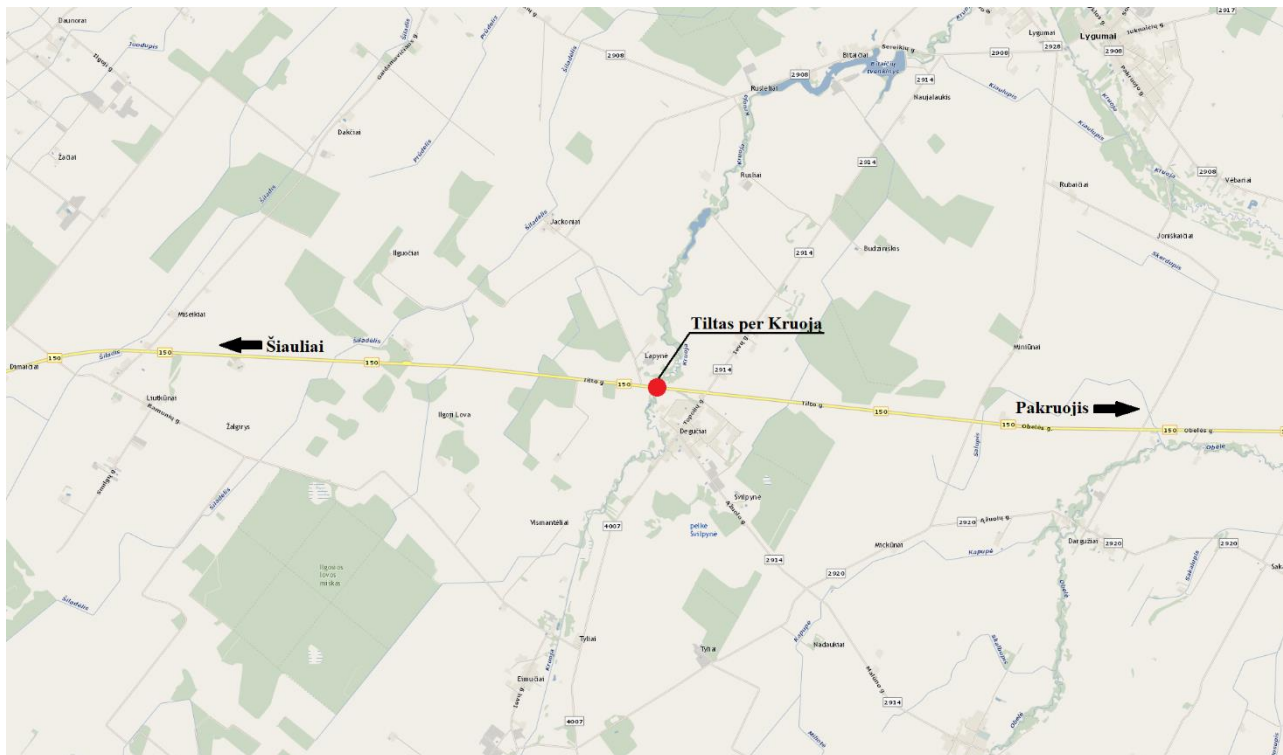
2.3. Literatūros apžvalgos išvados

- Pagrindinė gelžbetoninių sijinių tiltų problema yra plyšių atsivėrimas ir tuo pačiu įlinkio didėjimas.
- Visi stiprinimo būdai tilto stiprumą padidina.
- Kuris stiprinimo būdas yra efektyviausias tiksliai pasakyti negalima, nes bandymai atlikti skirtingų tiltų sijoms.

3. Tiriama tilto skaitinis modelis

3.1. Tyrimo objektas

Tiriamasis objektas yra Šiaulių apskrityje, Pakruojo rajono pietvakariuose, Degučių kaime. Tai yra 150 kelio Šiauliai – Pakruojis – Pasvalys 15,36 km. Tiltas veda per Kruojos upę.



18 pav. Tiriamojo tilto vieta

Tiriamojo tilto pagrindinės charakteristikos:

- tiltas pastatytas 1968 m.;
- tilto remontas atliktas 2008 m.;
- tarpatramio perdangos ilgis – 16,80 m;
- tilto bendras ilgis – 19,10 m;
- tilto bendras plotis – 12,30 m;
- plotis tarp atitvarų – 8,90 m;

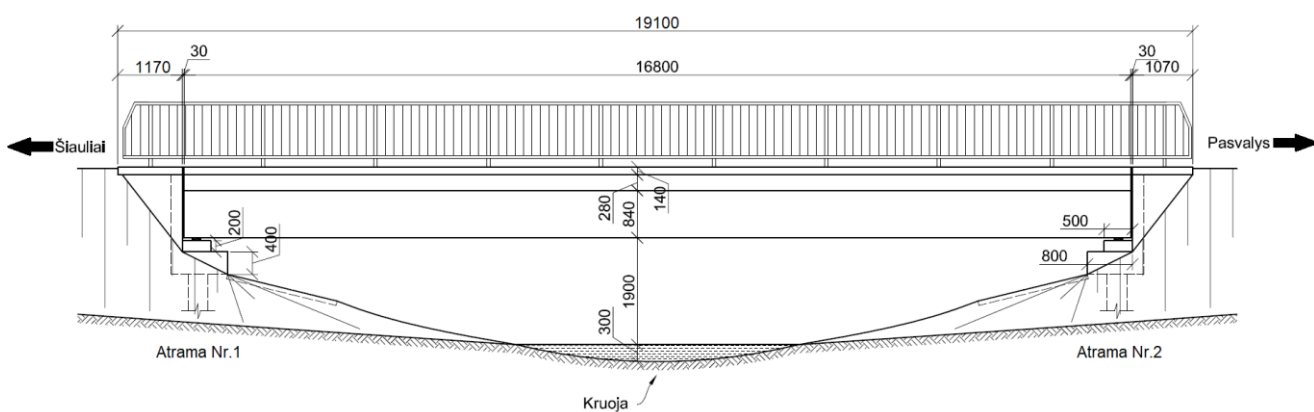
Statinė tilto schema yra dviatramės sijos galuose atremtos ant bituminių elastomerinių atraminių guolių, kurie įrengti ant krantinių atramų. Upę tiltas kerta 90° kampu, tai reiškia, jog visos sijos yra vienodos ir jų pradžia ir galas sutampa (nėra perslinkimo).

Skersiniame tilto pjūvyje yra septynios T formos gelžbetoninės sijos. Atstumas tarp jų – 1,65 m. Gelžbetoninių sijų aukštis lygus 1120 mm, lentynos aukštis – 280 mm, sienutės aukštis – 840 mm. Lentynos plotis apatinėje dalyje 180 mm.

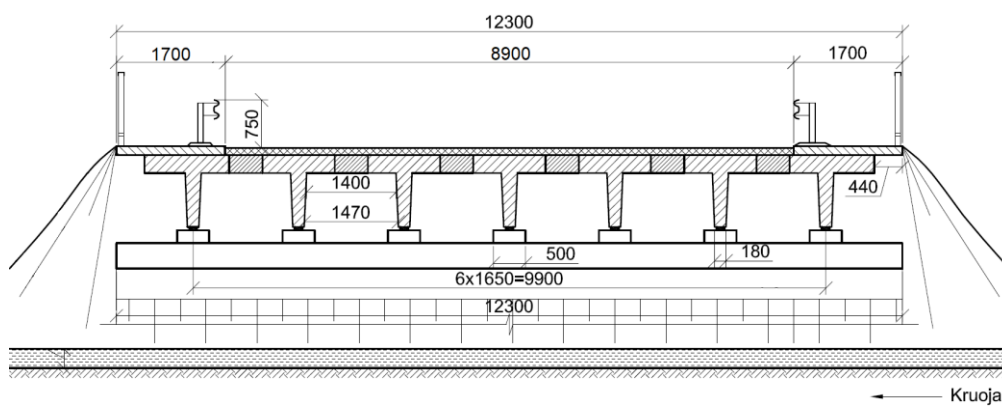
Gelžbetoninės T formos sijos išilgine kryptimi apatinėje dalyje suarmuotos 6xØ32 ir 4xØ16, vienoje horizontalioje eilėje išdėstyta po 2 strypus, pradedant nuo Ø32 strypų.



19 pav. Tilto bendras vaizdas



20 pav. Tilto fasado schema



21 pav. Tilto skersinis pjūvis

3.2. Duomenys naudojami skaičiavimams

3.2.1. Charakteristinės nuolatinės apkrovos

2 lentelė. Charakteristinės nuolatinės apkrovos

Eil. Nr.	Apkrovos pavadinimas	q_k [kN/m]	q_k [kN/m ²]	q_k [kN/m ³]
1	Asfaltbetonio danga	–	2,5	–
2	Išlyginamasis sluoksnis	–	0,75	–
3	Šalutėlčio savasis svoris	–	3,5	–
4	Apsauginiai atitvarai	0,5	–	–
5	Turėklai	0,5	–	–
6	Gelžbetoniniai elementai (sijos, sijų sumonolitinimas)	–	–	25,0

3.2.2. Betono susitraukimas ir valkšnumas

Duomenys betono susitraukimui ir valkšnumui skaičiuoti:

- Oro temperatūra 20°C;
- Santykinė oro drėgmė 70%;
- cementas N klasės.

3.2.3. Pamatų sėdimai

Skaičiavimuose priimti pamatų nuosėdžių skirtumai tarp gretimų atramų 1mm/1m.

3 lentelė. Galimi atramų nuosėdžiai

Atramos Nr.	1	2
Pamatų nuosėdis, mm	16,8	16,8

3.2.4. Charakteristinės kintamos apkrovos

Automobilinio eismo apkrovos konstrukcijoms LM1 modelis pagal [11]:

- dviašė koncentruota apkrova (tandeminė - TS), kurios vienos ašies svoris (kN) $\alpha_Q Q_k$;
- tolygiai išskirstyta apkrova (UDL), kurios svorio intensyvumas (kN/m²) $\alpha_q q_k$;

čia: α_Q ir α_q – apkrovos koeficientai.

Skaičiavimuose priimta apkrovos klasė: 1-asis apkrovos modelis [11]. Pagal šių normų NA.4.3 punktą. Apkrovos koeficientų α_{Q1} ir α_{q1} vertės:

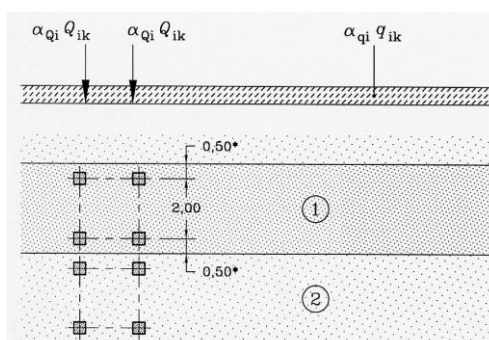
- pirmos apkrovų juostos apkrovoms – $\alpha_{Q1} = 0,80$, $\alpha_{q1} = 1,00$;
- antros apkrovų juostos apkrovoms – $\alpha_{Q2} = 1,00$, $\alpha_{q2} = 1,00$.

Vienoje eismo juostoje, per visą tilto ilgį pastatoma tik viena dviašė koncentruota apkrova (TS).

1-asis (pagrindinis) apkrovos modelis taikomas visoms eismo juostoms bei likusiems važiuojamosios dalies plotams. „i“ – oje eismo juostoje veikia apkrovos $\alpha_{iQ} Q_{ik}$, ir $\alpha_{iq} q_{ik}$, o likusiuose važiuojamosios dalies plotuose – apkrova $\alpha_{rq} q_{rk}$. Apkrovų $\alpha_{iQ} Q_{ik}$, $\alpha_{iq} q_{ik}$ ir $\alpha_{rq} q_{rk}$ reikšmės pateiktos lentelėje.

4 lentelė. LM1 modelio apkrovos

Vieta	Tandeminė apkrova TS Ašies apkrovos $\alpha_{iQ} Q_k$ [kN]	UDL apkrova Išskirstyta $\alpha_{iq} q_{ik}$ arba $\alpha_{rq} q_{rk}$ [kN/m ²]
1 – oji juosta	$0,8 \cdot 300 = 240$	$1,0 \cdot 9,0 = 9,0$
2 – oji juosta	$1,0 \cdot 200 = 200$	$1,0 \cdot 2,5 = 2,5$
Likęs plotas (q_{rk})	0	$1,0 \cdot 2,5 = 2,5$



22 pav. Laikinių eismo apkrovų išdėstymas

Stabdymo apkrova išilgai tilto (suminė): $Q_{Ik}=334$ kN, pagal [11].

Stabdymo apkrova skersai tilto (suminė): $Q_{tk}=84$ kN, pagal [11].

Šalitilčių pėsčiųjų apkrova: $q_{fk}=5,0$ kN/m²; [11].

Apskaičiuota šoninė vėjo jėga į perdangą: $F_{wk.x}=2,4$ kN/m; [12].

3.2.5. Temperatūriniai poveikiai

3.2.5.1. Tolygioji temperatūros komponentė

Šešėlinė oro temperatūra (didžiausia ir mažiausia vidutinė paros temperatūra, galima vieną kartą per 50 metų) pagal [13]:

- $T_{min} = -30,5$ °C;
- $T_{max} = 26,8$ °C.

Pakloto tipas: gelžbetoninis paklotas (gelžbetoninė sija) – 3 tipas pagal [13].

Tolygiosios temperatūros komponentė 3 tipo paklotui pagal [13]:

- $T_{E.min} = -22,5$ °C;
- $T_{E.max} = 28,8$ °C.

Priimama, kad statybos darbai vykdomi prie $T_0 = 10$ °C.

Tolygiosios temperatūros komponentės didžiausio susitraukimo/išsiplėtimo intervalo charakteristinės reikšmės pagal [13]:

- $T_{N.con} = 32,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- $T_{N.exp} = 18,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.2.5.2. Vertikaloji tiesinė komponentė

Taikomas pirmas metodas vertikaliai tiesinei komponentei nustatyti pagal [13]. Pakloto tipas 3, gelžbetoninis paklotas (gelžbetoninė sija); dangos storis 100 mm:

- $T_{M.heat} = 10,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- $T_{M.cool} = 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Temperatūrų komponentės tarpusavyje derinamos pagal [13] reikalavimus.

3.2.6. Naudojamas betonas

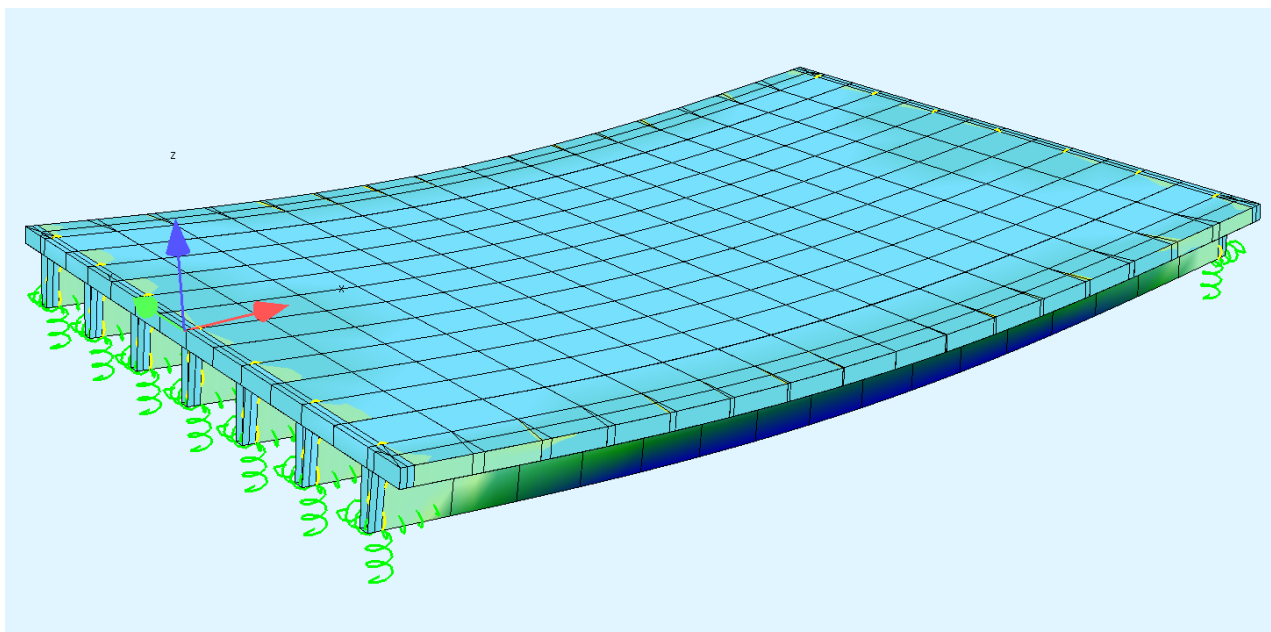
Tiltas baigtas statyti 1968 metais. Tuo metu galiojo GOST projektavimo normos. Taigi, naudojamų betono klasių žymėjimai buvo kitokie. Šio modelio skaičiavimuose betono klasės priiamamos pakeičiant jas į šiomis dienomis naudojamo betono standarto žymėjimus [14]. Atitikmenys pateikti 5 lentelėje. Gelžbetoninių T formos sijų betono klasė pagal GOST 5802-86 yra M300.

5 lentelė. GOST ir LST EN standartų betono klasių atitikmenys

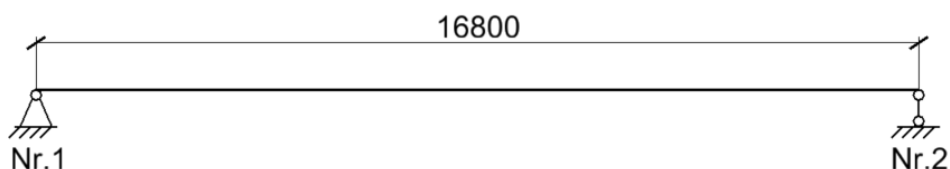
Betono klasės žymėjimas pagal GOST 5802-86	Betono klasės žymėjimas pagal LST EN 206:2013
M 150	C 8/10
M 200	C 12/15
M 250	C 16/20
M 300	C 20/25
M 350	C 25/30
M 400	C 30/37

3.3. Visuminis tilto modelis

Globali tiriamojo tilto konstrukcijų analizė atliekama baigtinių elementų programa „SOFiSTiK“. Programoje sukurtas perdangos modelis. Skaičiuojant atsižvelgiama į nuolatinės apkrovas, kintamas transporto apkrovas, galimą pamatų nuosėdį, betono ilgalaikę elgseną, vėjo apkrovas bei temperatūros įtaką. Baigtinių elementų programos pagalba gauname elementų įrašų gaubtines, įtempių reikšmes ir perdangos įlinkį.



23 pav. Visuminis tilto per Kruoją modelis



24 pav. Tilto per Kruoją skaičiuojamoji schema

3.3.1. Statybos etapai

Globali visuminio modelio analizė daroma atsižvelgiant į statybos darbų etapus ir eiliškumą. Pagrindiniai statybos etapai, nevertinant kratinių atramų įrengimo, yra perdangos sijų montavimas, jų sumonolitinis ir pakloto įrengimas (šaliteljio plokštės, išlyginamasis sluoksnis, asfaltbetonis, atitvarai, turėklai). Statybos stadijos įvertinamos visuriniame tilto modelyje pateiktos 6 lentelėje.

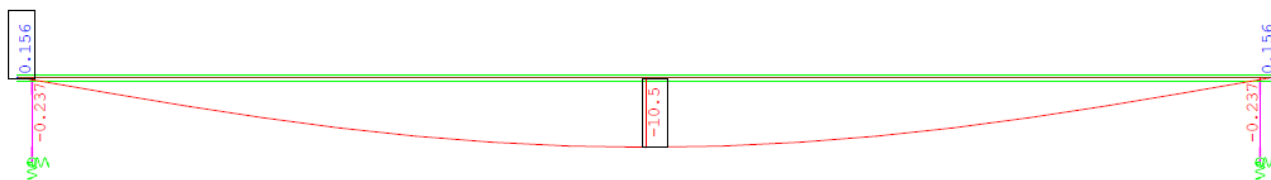
6 lentelė. Įvertinamos tilto statybos stadijos

Stadijos Nr.	Stadijos pavadinimas
1	Perdangos sijų montavimas ir jų sumonolitinis
2	Betono valkšnumo ir sustraikimo įtaka per 28 paras
3	Pakloto įrengimas (šaliteljio plokštės, išlyginamasis sluoksnis, asfaltbetonis, atitvarai, turėklai)
4	Betono valkšnumo ir sustraikimo įtaka prieš tilto atidarymą per 28 paras
5	Betono valkšnumo ir sustraikimo įtaka po tilto atidarymo per 47 eksploataavimo metus (iki atliktų bandymų 2015 metais)

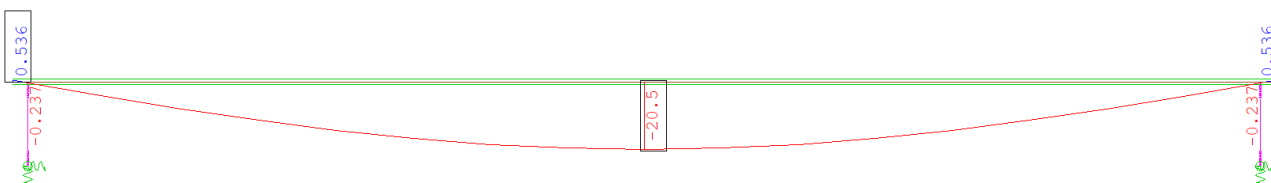
3.4. Gauti rezultatai visuminiame tilto modelyje

Šiame poskyryje pateikiami rezultatai skirtingais laiko momentais. Jie gauti atlikus globalią visuminio tilto modelio analizę baigtinių programoje „SOFiSTiK“.

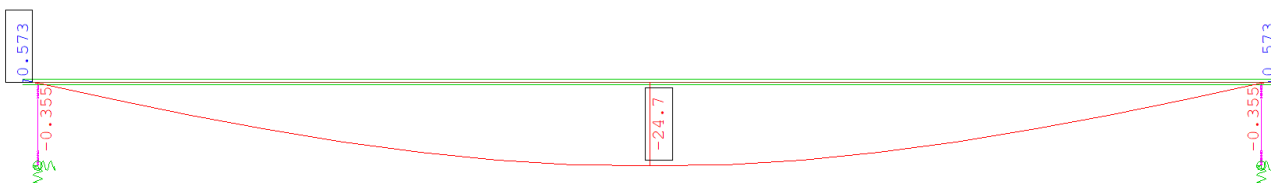
3.4.1. Perdagos sijų įlinkis



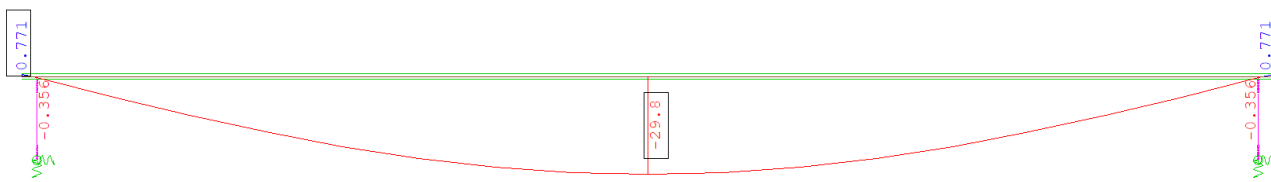
25 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po sijų sumontavimo ir jų sumonolitavimo



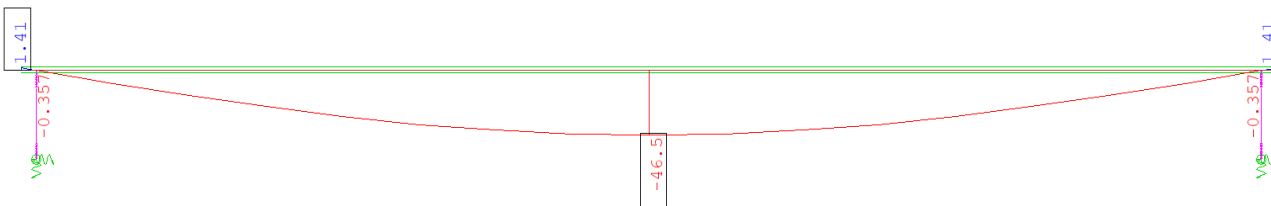
26 pav. Tilto tarpatramio įlinkis praėjus 28 paroms po sijų įrengimo



27 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po pakloto įrengimo



28 pav. Tilto tarpatramio įlinkis praėjus 28 paroms po pakloto įrengimo



29 pav. Tilto tarpatramio įlinkis praėjus 47 metams po tilto atidarymo

Įlinkis po perdangos sijų įrengimo ir jų sumonolitavimo gautas lygus 10,5 mm (žr. 25 pav.). Po darbų atlikimo praėjus 28 parom, įlinkis padidėjo iki 20,5 mm (žr. 26 pav.). Matomas padidėjimas lygus 10,0 mm.

Kitas tilto statybos etapas, įrengti pakloto elementus, tai yra šalitilčio plokštės, išlyginamasis sluoksnis, asfaltbetonio danga, turėklai bei atitvarai. Po šių darbų įlinkis padidėjo iki 24,7 mm (žr. 27 pav.). Pokytis dėl šio etapo yra 4,2 mm. Praėjus 28 parom po pakloto įrengimo stadijos, įlinkis dar padidėjo iki 29,8 mm (žr. 28 pav.). Pokytis – 5,1 mm. Tuomet tiltas buvo atidarytas ir juo paleistas transporto eismas.

Praėjus 47 metams (17155 dienoms) po tilto atidarymo (2015 metai), tilto įlinkis padidėjo iki 46,5 mm (žr. 29 pav.). Pokytis 16,7 mm.

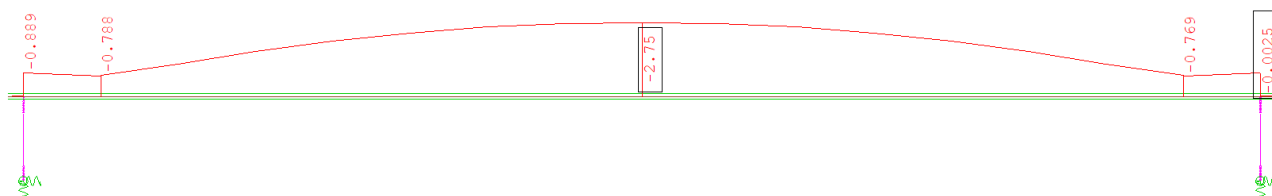
Ši įlinkio reikšmė gauta neįvertinant trumpalaikių transporto apkrovų.

Įlinkio kitimo kreivė pavaizduota 30 pav.

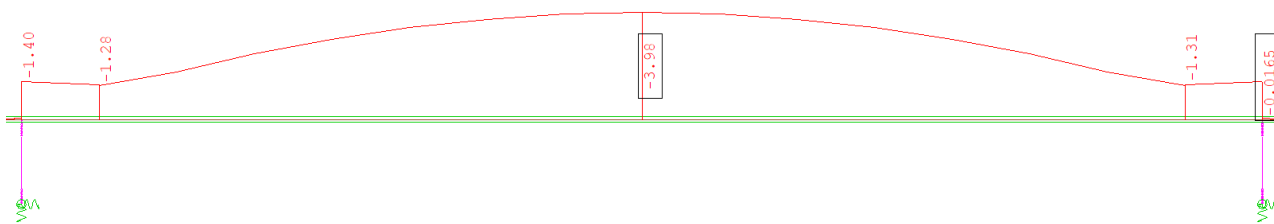


30 pav. Tilto įlinkio kitimo kreivė per pirmuosius 47 metus

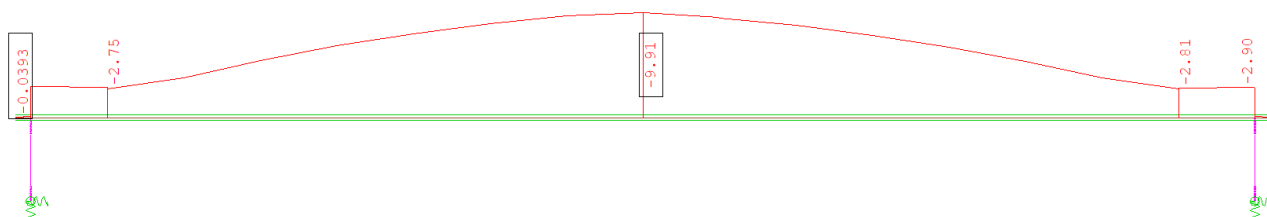
3.4.2. Perdangos sijose veikiantys betono įtempiai



31 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sijų sumontavimo ir jų sumonolitavimo (laikinoji transporto apkrova nevertinama)



32 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po pakloto įrengimo (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)

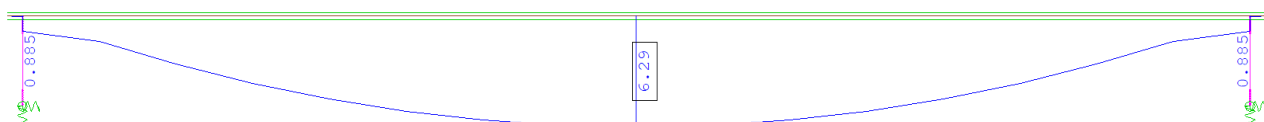


33 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto įvertinus laikinas transporto apkrovas

Įrengus tilto sijas ir jas sumonolitus, gniuždymo įtempiai betone maksimaliai pasiekia 2,75 MPa (žr. 31 pav.).

Kitas tilto statybos etapas, įrengti pakloto elementus, tai yra šaltilčio plokštės, išlyginamasis sluoksnis, asfaltbetonio danga, turėklai bei atitvarai. Po šių darbų gniuždymo įtempiai betone maksimaliai pasiekia 3,98 MPa (žr. 32 pav.). Matomas padidėjimas lygus 1,23 MPa.

Įvertinus laikinas transporto apkrovas, kurių dydis nustatomas pagal LST EN 1991-2 pasirenkant LM1 modelį, gniuždymo įtempiai betone maksimaliai pasiekia 9,91 MPa (žr. 33 pav.). Pastebimas 5,93 MPa gniuždymo įtempių laikinas padidėjimas.



34 pav. Betono tempimo įtempiai sijose išilgai tilto

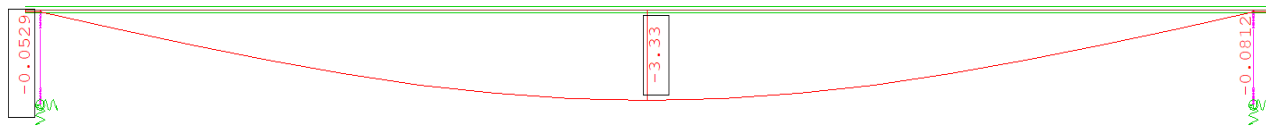
Norint sužinoti, ar tilto T formos gelžbetoninėse sijose yra atsivėrę plyšiai, patikriname betono tempimo įtempius sijose išilgai tilto. Kaip matome, veikiantys tempimo įtempiai betone viršija betono tempiamąjį stiprį, o tai reiškia, kad konstrukcijos tempiamajame zonoje, tai yra apatinėje sijos dalyje, pradėjusios pleišėti.

3.4.3. Visuminio modelio palyginimas su realiais duomenimis

Atliekant tolimesnę tilto analizę, pirmiausia norima įsitikinti sudaryto visuminio tilto modelio tikslumu ir atitiktumu su realiai atliktais bandymais. Šie bandymai atlikti 2015 metais gegužės 4d.

Remiantis turima nagrinėjamo tilto per Kruoją bandymų ataskaita, maksimalus įlinkis nuo laikinų transporto apkrovų lygus 3,32 mm. Bandymams naudotos transporto priemonės vienos ašies apkrova lygi 9,5 t.

Atsižvelgiant į atliktų bandymų charakteristikas, visuminiame tilto modelyje buvo pakoreguota laikinos transporto apkrovos. Atlikus skaičiavimus, gautas didžiausias tarpatramio įlinkis tik nuo laikinų transporto apkrovų lygus 3,33 mm (žr. 34 pav.).



35 pav. Tilto tarpatramio įlinkis tik nuo laikinų transporto apkrovų, kurių dydis pagal atliktus bandymus

Pagal gautus įlinkių duomenis iš visuminio tilto modelio, matyti, kad neatitikimas yra labai mažas, tik 0,01 mm. Šis minimalus neatitikimas galimai atsirado bandymų metu dėl netiksliai pritvirtintų matavimų prietaisų, jų minimalios paklaidos ar transporto priemonių svorio paklaidos. Tačiau remiantis šiais rezultatais, galime teigti, kad visuminis tilto modelis yra pakankamai tikslus ir jį galime naudoti tolimesniems baigiamojo magistro projekto etapams.

4. Nagrinėjami tilto stiprinimo būdai

Šio baigiamojo projekto metu pasirinktam tiltui bus modeliojami keli stiprinimo būdai. Pagrindinė priežastis, kodėl tiltas yra stiprinamas, nes norima sumažinti atsirandantį per didelį tilto įlinkį ir veikiančius betono įtempius. Dėl šių aspektų atsiveria plyšiai normaliniame sijų pjūvyje.

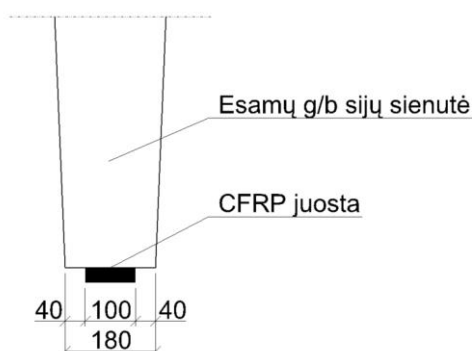
Kituose poskyriuose bus nagrinėjami trys pasirinkti tiltų stiprinimo būdai, kuriais siekiama sustiprinti normalinį sijų pjūvį.

4.1. Stiprinimas fibromis armuoto polimero juostomis

4.1.1. Teorinis aprašymas

Tiltų stiprinimo būdas su fibromis armuoto polimero juostomis pasaulyje yra gana plačiai naudojamas. Taikant šį būdą, skaičiuojamoji tilto schema išlieka nepatikusi. Taip pat juo galima sustiprinti tiek normalinį, tiek įstrižąjį pjūvius. Tinkamai parinkus jų reikiamą poziciją ir tinkamai įrengus fibromis armuoto polimero juostas, galima tikėtis sumažinti įtempimus tenkančius tilto gelžbetoninėms T formos sijoms, jų įlinkį, bei taip pat ir riziką dėl galimų plyšių atsivėrimo.

Modeliuojami 2 šio stiprinimo būdo variantai. Pirmasis būdas klijuojant tik 1-ą anglies fibromis armuoto polimero juostų sluoksnį. Antruoju atveju, klijuojama 3 tokių pačių charakteristikų anglies fibromis armuoto polimero juostos viena ant kitos.



36 pav. CFRP juostų išdėstymo ant sijų schema

Pastaba: anglies fibromis armuoto polimero juostos ant visų sijų išdėstomos vienodai.

Nagrinėjamas tiltas stiprinimas fibromis armuoto polimero juostomis, kurių charakteristikos (pagal [15]) yra:

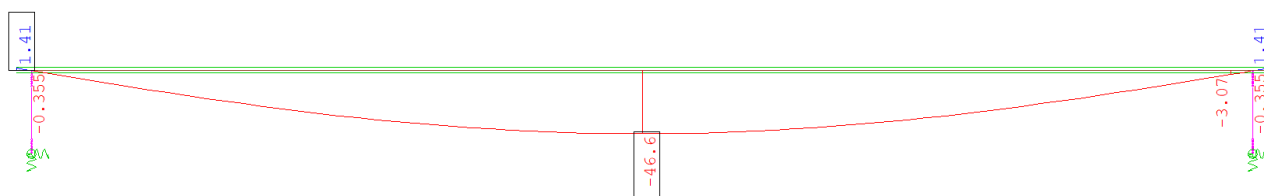
- matmenys – 100x1,4 mm;
- stiprumas – 1300,0 MPa;
- tamprumo modulis – 300,0 GPa;
- fibrų kiekis – 68 %;
- vienai sijai reikalingas juostos ilgis – 15,8 m.

4.1.2. Gauti rezultatai

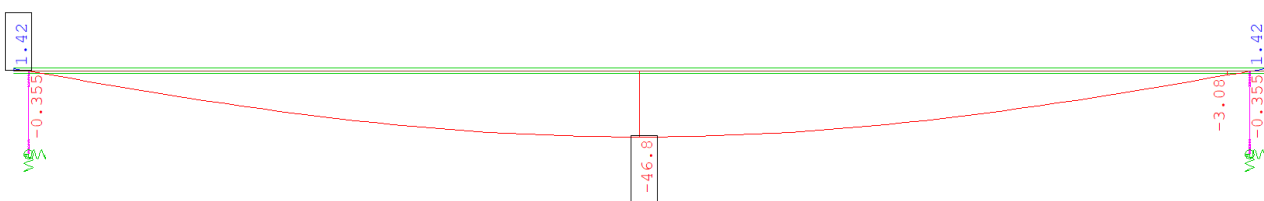
4.1.2.1. Vienas fibromis armuoto polimerų juostų sluoksnis

Betono įtempių ir tilto įlinkio reikšmės po nagrinėjamo tilto sustiprinimo 1 variantu (1 anglies fibromis armuoto polimerų juostų sluoksnis) yra pateikiamos 7 lentelėje. Pateiktos betono įtempių reikšmės yra veikiančios tilto tarpatramio viduryje.

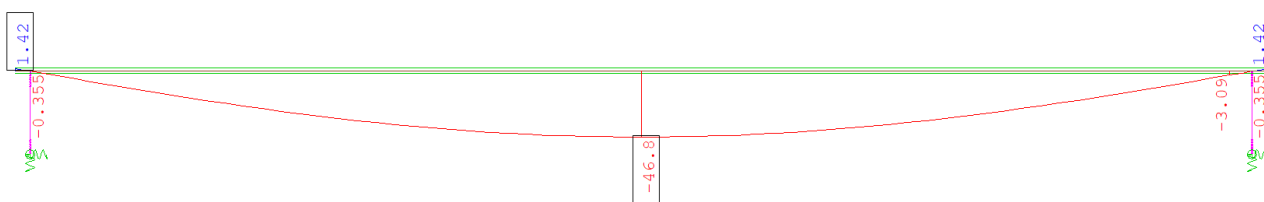
Pateikiamos betono įtempių ir tilto įlinkių diagramos:



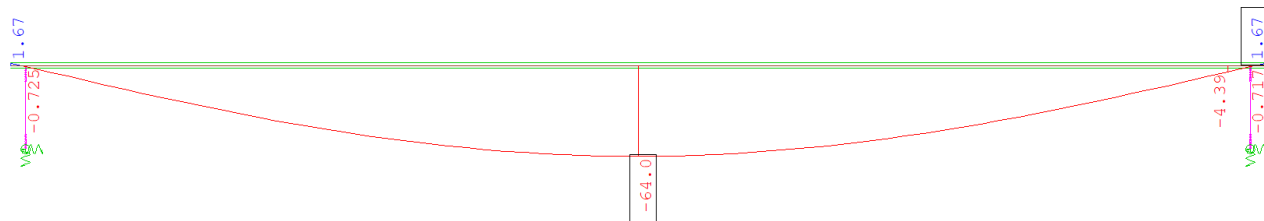
37 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)



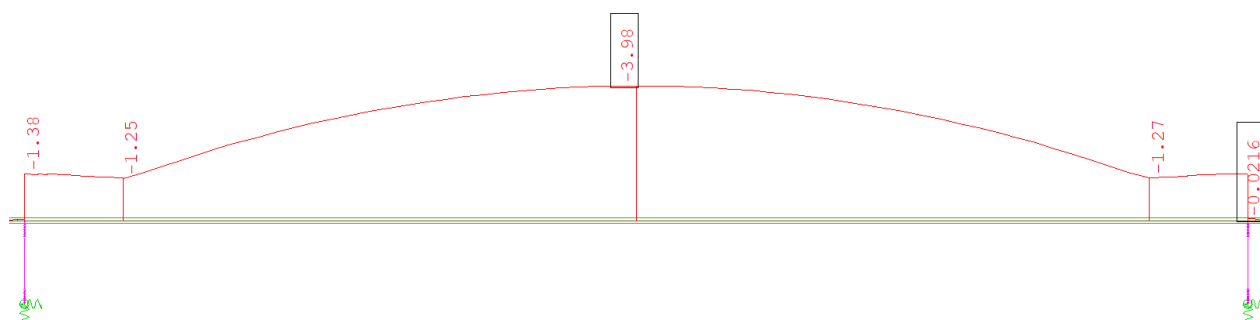
38 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo praėjus 53 metams (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)



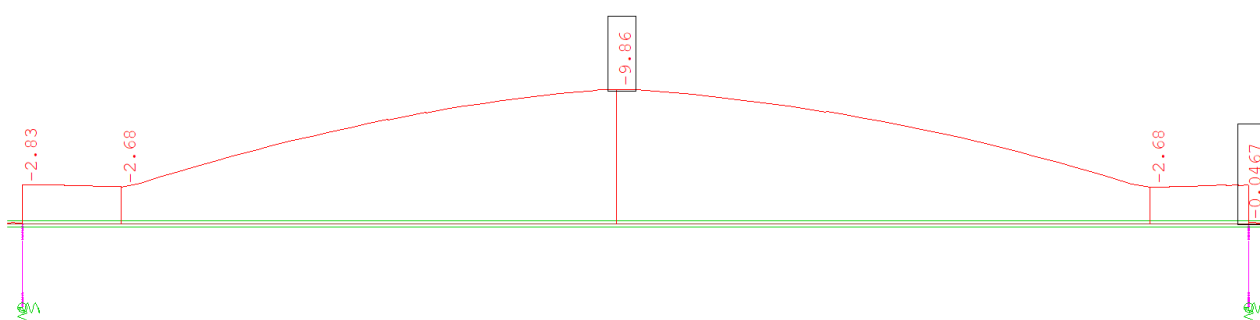
39 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo praėjus 100 metų (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)



40 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo papildomai įvertinus laikinas transporto apkrovas



41 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)



42 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo įvertinus laikinas transporto apkrovas

7 lentelė. Pirmas stiprinimo variantas (1 CFRP juostų sluoksnis). Betono įtempiai ir tilto įlinkiai

Tilto gyvavimo etapas	Įlinkis, mm	Įtempiai, MPa
Prieš sustiprinimą	46,5	-3,98
Sustiprinimas	46,6	-3,98
Praėjus 53 metams po sustiprinimo	46,8	-3,98
Praėjus 100 metų po sustiprinimo	46,8	-3,98
Įvertinus kintamas apkrovas	64,0	-9,86

Pastaba: betono įtempių reikšmės su „-“ ženklu reiškia giuždymą.

Nagrinėjamo tilto įlinkis bėgant laikui šiek tiek didėja, bet nebekinta didelėmis reikšmėmis. Prieš sustiprinimą jis buvo lygus 46,5 mm, o praėjus 100 metų po atliktų stiprinimo darbų, įlinkis padidėjo iki 46,8 mm. Pokytis 0,3 mm.

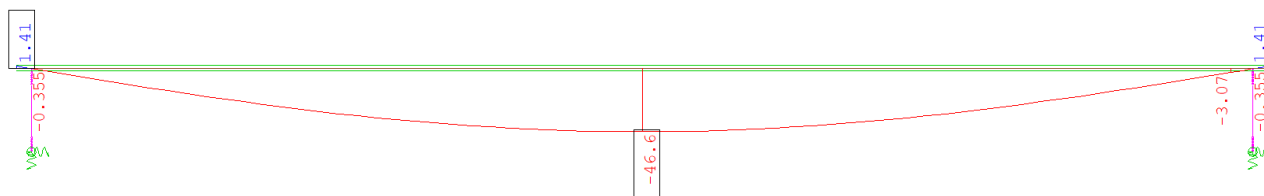
Tačiau įvertinus laikinas transporto apkrovas, kurių dydis nustatomas pagal LST EN 1991-2 pasirenkant LM1 modelį, įlinkis žymiai išauga. Pasiiekia net 64,0 mm. Pokytis lyginant su neapkrautos perdangos įlinkiu, lygus 17,2 mm.

Nagrinėjamo tilto gniuždymo įtempių betone reikšmės bėgant laikui žymiai nebekinta, išlieka apie 3,98 MPa. Papildomai įvertinus laikinas transporto apkrovas, kurių dydis nustatomas pagal LST EN 1991-2 pasirenkant LM1 modelį, įtempiai išauga iki 9,86 MPa. Pokytis lygus 5,88 MPa. Tai neviršija leistinų reikšmių šiam betonui.

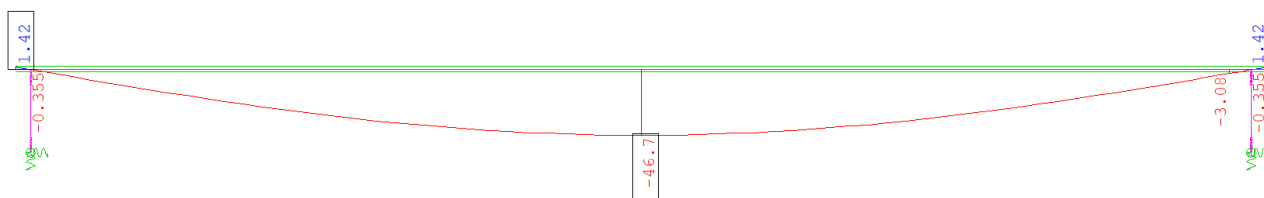
4.1.2.2. Trys fibromis armuoto polimerų juostų sluoksniai

Betono įtempių ir tilto įlinkio reikšmės po nagrinėjamo tilto sustiprinimo 2 variantu (3 vienas at kito anglies fibromis armuoto polimerų juostų sluoksniai) yra pateikiamos 8 lentelėje. Pateiktos betono įtempių reikšmės yra veikiančios tilto tarpatramio viduryje.

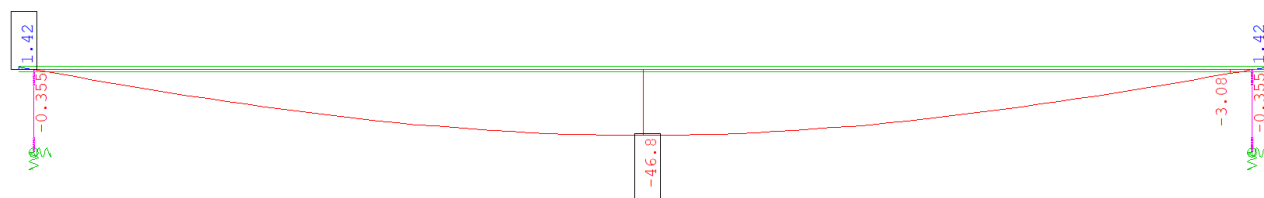
Pateikiamos betono įtempių ir tilto įlinkių diagramos:



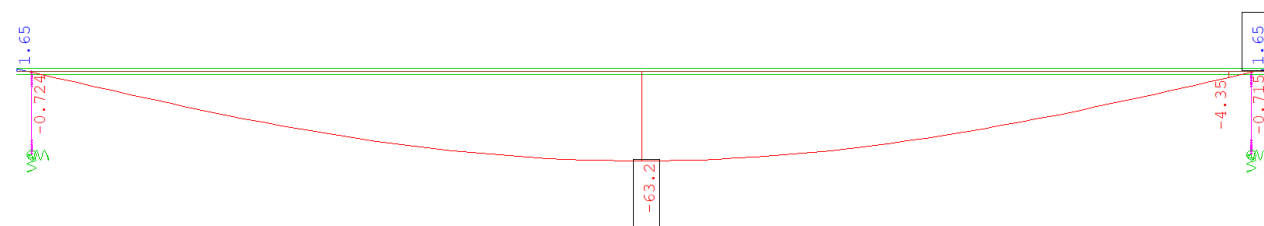
43 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)



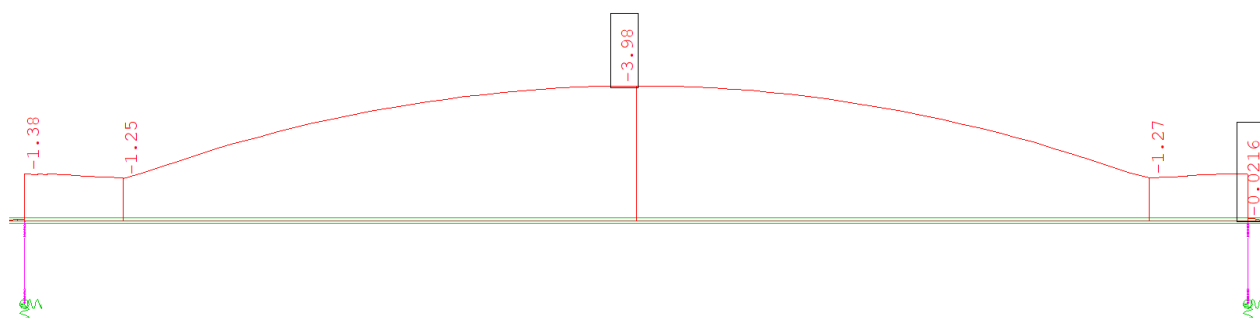
44 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo praėjus 53 metams (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)



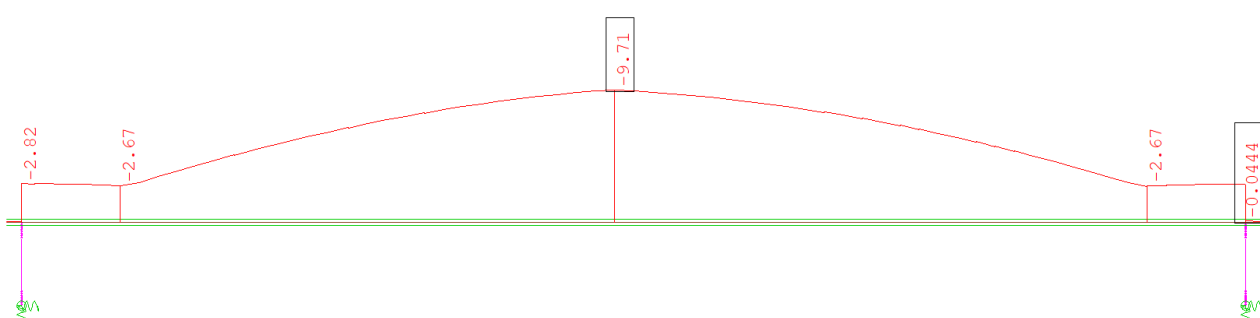
45 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo praėjus 100 metų (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)



46 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo papildomai įvertinus laikinas transporto apkrovas



47 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)



48 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo įvertinus laikinas transporto apkrovas

8 lentelė. Pirmas stiprinimo variantas (3 CFRP juostų sluoksniai). Betono įtempiai ir tilto įlinkiai

Tilto gyvavimo etapas	Įlinkis, mm	Įtempiai, MPa
Prieš sustiprinimą	46,5	-3,98
Sustiprinimas	46,6	-3,98
Praėjus 53 metams po sustiprinimo	46,7	-3,98
Praėjus 100 metų po sustiprinimo	46,8	-3,98
Įvertinus kintamas apkrovas	63,2	-9,71

Pastaba: betono įtempių reikšmės su „-“ ženklu reiškia giuždymą.

Nagrinėjamo tilto įlinkis bėgant laikui šiek tiek didėja, bet nebekinta didelėmis reikšmėmis. Prieš sustiprinimą jis buvo lygus 46,5 mm, o praėjus 100 metų po atliktų stiprinimo darbų, įlinkis padidėjo iki 46,8 mm. Pokytis 0,3 mm.

Tačiau įvertinus laikinas transporto apkrovas, kurių dydis nustatomas pagal LST EN 1991-2 pasirenkant LM1 modelį, įlinkis žymiai išauga. Pasiiekia net 63,2 mm. Pokytis lyginant su neapkrautos perdangos įlinkiu, lygus 16,4 mm.

Nagrinėjamo tilto gniuždymo įtempių betone reikšmės bėgant laikui žymiai nebekinta, išlieka apie 3,98 MPa. Papildomai įvertinus laikinas transporto apkrovas, kurių dydis nustatomas pagal LST EN 1991-2 pasirenkant LM1 modelį, įtempiai išauga iki 9,71 MPa. Pokytis lygus 5,73 MPa. Tai neviršija leistinų reikšmių šiam betonui.

4.1.2.3. Stiprinimo fibromis armuoto polimero juostomis variantų palyginimas

Atlikus nagrinėjamo tilto stiprinimą su vienu anglies fibromis armuoto polimero juostų sluoksniu, įlinkio reikšmės nežymiai, bet šiek tiek ir toliau didėja. Praėjus 100 metų po sustiprinimo darbų pasiekia 46,8 mm vertę. Papildomai tilto perdangą apkrovus laikinomis transporto apkrovomis, įlinkis žymiai padidėja, pokytis net 17,2 mm. Pasiekama 64,0 mm reikšmė.

Sustiprinus tilto T formos gelžbetonines sijas trimis anglies fibromis armuoto polimero juostų sluoksniais, įlinkis taip pat šiek tiek didėja. Po 100 metų eksploatavimo, pasiekama lygiai tokia pati reikšmė 46,8 mm. Papildomai nagrinėjamą tiltą apkrovus laikinomis transporto apkrovomis, įlinkis padidėja, pokytis 16,4 mm. Pasiekama 63,2 mm reikšmė.

Atlikus nagrinėjamo tilto stiprinimą su vienu anglies fibromis armuoto polimero juostų sluoksniu, betono gniuždymo įtempių reikšmė nesikeičia. Net praėjus 100 metų po sustiprinimo darbų reikšmė išlieka 3,98 MPa. Papildomai tilto perdangą apkrovus laikinomis transporto apkrovomis, betono gniuždymo įtempiai padidėja, pokytis 5,88 MPa. Pasiekama 9,86 MPa reikšmė.

Sustiprinus tilto T formos gelžbetonines sijas trimis anglies fibromis armuoto polimero juostų sluoksniais, betono gniuždymo įtempiai taip pat nesikeičia. Po 100 metų eksploatavimo išlieka 3,98 MPa. Papildomai nagrinėjamą tiltą apkrovus laikinomis transporto apkrovomis, betono gniuždymo įtempiai padidėja, pokytis 5,73 MPa. Pasiekama 9,71 MPa reikšmė.

Remiantis šiais duomenimis, galime teigti, kad nevertinant laikinų transporto apkrovų, anglies fibromis armuoto polimerų juostų sluoksnių skaičius didelės įtakos tilto įlinkio ir betono gniuždymo įtempių reikšmėms neturi. Didesnis skirtumas atsiranda tik perdangą apkrovus laikinomis transporto apkrovomis. Matome, kad geresni rezultatai pasiekiami panaudojus tris anglies fibromis armuoto polimero juostų sluoksnius. Įlinkio reikšmė mažesnė 0,8 mm, betono gniuždymo įtempių – 0,15 MPa.

Atsižvelgiant į šiuos aspektus, tolimesniems tilto perdangos stiprinimo variantų palyginimams, bus naudojamas tik stiprinimas trimis anglies fibromis armuoto polimero juostų sluoksniais.

9 lentelė. Pirmo stiprinimo būdo variantų palyginimas. Betono įtempiai ir tilto įlinkiai

Tilto gyvavimo etapas	Įlinkis, mm	Įtempiai, MPa
Prieš sustiprinimą	46,5	-3,98
1 anglies fibromis armuoto polimero juostų sluoksnis		
Sustiprinimas	46,6	-3,98
Praėjus 53 metams po sustiprinimo	46,8	-3,98
Praėjus 100 metų po sustiprinimo	46,8	-3,98
Įvertinus kintamas apkrovas	64,0	-9,86
3 anglies fibromis armuoto polimero juostų sluoksniai		
Sustiprinimas	46,6	-3,98
Praėjus 53 metams po sustiprinimo	46,7	-3,98
Praėjus 100 metų po sustiprinimo	46,8	-3,98
Įvertinus kintamas apkrovas	63,2	-9,71

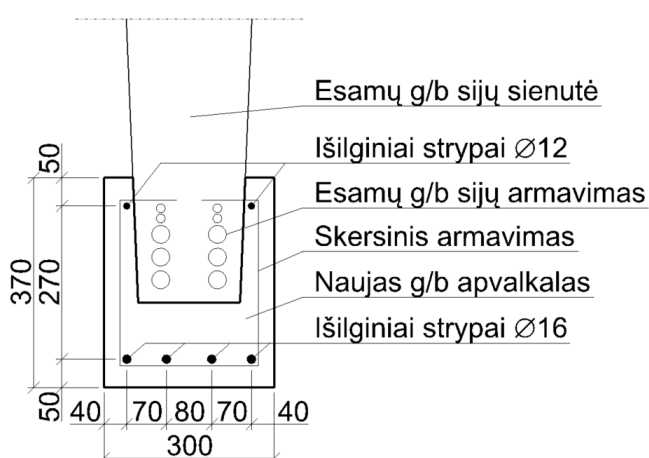
Pastaba: betono įtempių reikšmės su „-“ ženklu reiškia gniuždymą.

4.2. Stiprinimas padidinant sijos skerspjūvį

4.2.1. Teorinis aprašymas

Tiltų stiprinimo būdas padidinant sijos skerspjūvį pasaulyje yra šiek tiek naudojamas. Taikant šį būdą, skaičiuojamoji tilto schema išlieka nepatikusi. Tinkamai parinkus reikiamą papildomo gelžbetoninio apvalkalo skerspjūvį ir tinkamai jį įrengus, galima tikėtis sumažinti betono įtempimus tenkančius senosioms tilto gelžbetoninėms T formos sijoms, bei jų įlinkį. O taip pat sumažinti riziką dėl galimų plyšių atsivėrimo.

Naujo gelžbetoninio apvalkalo ir esamų T formos sijų bendras darbas, užtikrinamas inkaruojant strypus chemine mase.



49 pav. Papildomo gelžbetoninio apvalkalo schema

Pastaba: papildomas gelžbetoninis apvalkalas ant visų sijų išdėstomas vienodai.

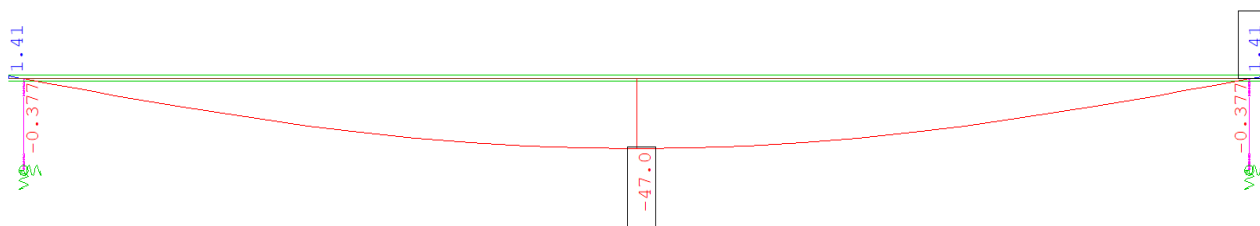
Nagrinėjamas tiltas stiprinamas papildomu gelžbetoniniu apvalkalu, kurio charakteristikos yra:

- betono klasė – C35/45;
- armatūros klasė – B500B;
- išoriniai matmenys – 300x370(h) mm;
- atstumas nuo esamos sijos apačios iki naujo apvalkalo apačios – 150 mm;
- papildomas g/b apvalkalas įrengiamas 0,5 m nuo sijų galų.

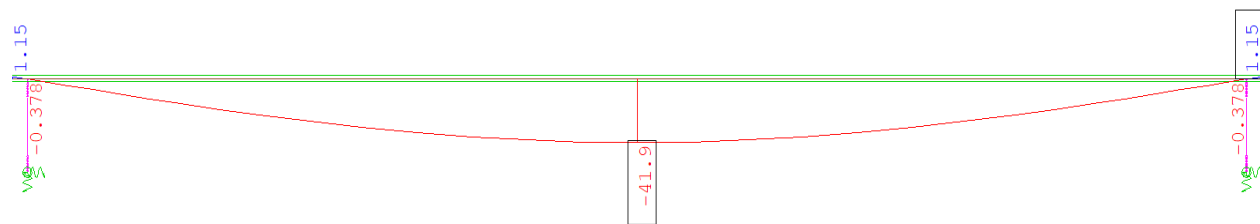
4.2.2. Gauti rezultatai

Betono įtempių ir tilto įlinkio reikšmės po nagrinėjamo tilto sustiprinimo yra pateikiamos 10 lentelėje. Pateiktos betono įtempių reikšmės yra veikiančios tilto tarpatramio viduryje.

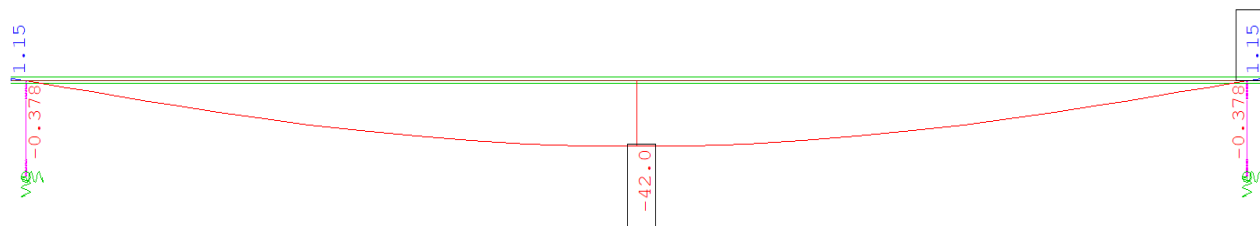
Pateikiamos betono įtempių ir tilto įlinkių diagramos:



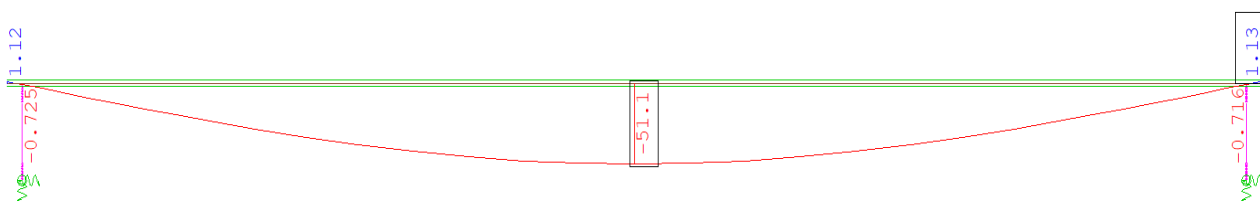
50 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)



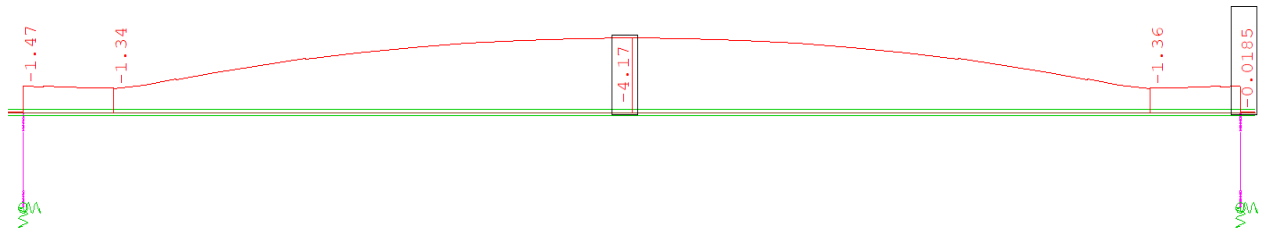
51 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo praėjus 53 metams (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)



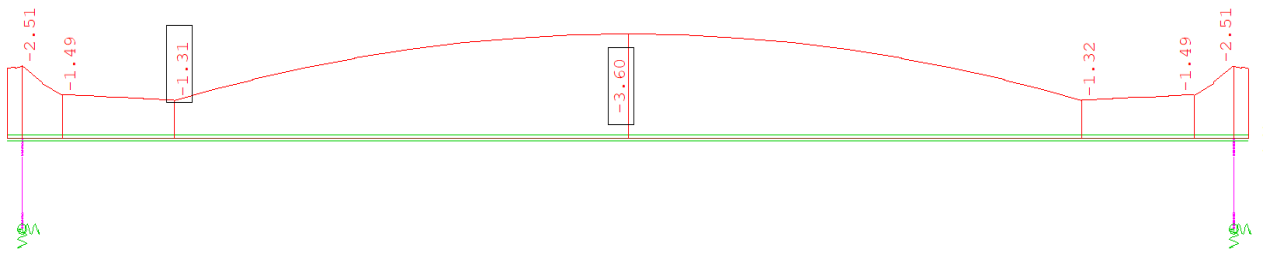
52 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo praėjus 100 metų (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)



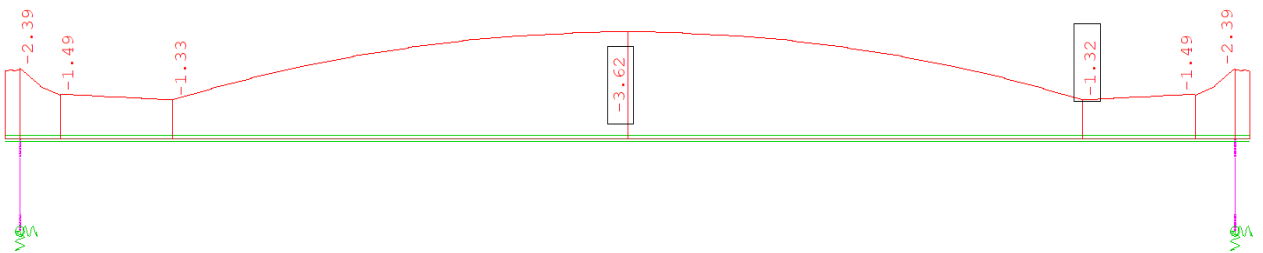
53 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo papildomai įvertinus laikinas transporto apkrovas



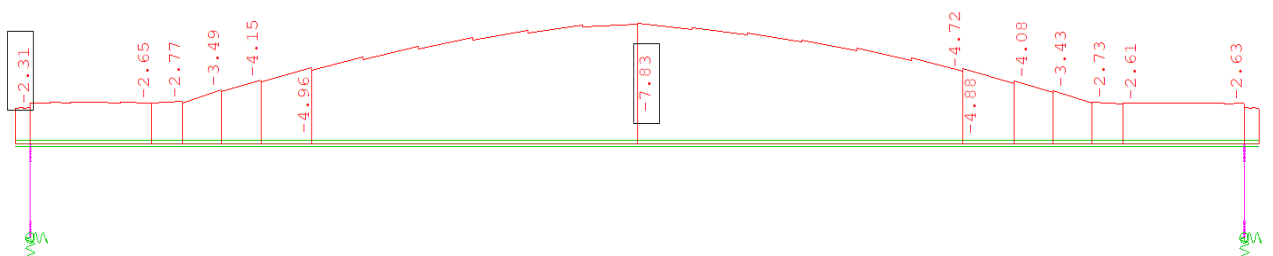
54 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)



55 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo praėjus 53 metams (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)



56 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo praėjus 100 metų (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)



57 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo įvertinus laikinas transporto apkrovos

10 lentelė. Antras sustiprinimo variantas. Betono įtempiai ir tilto įlinkiai

Tilto gyvavimo etapas	Įlinkis, mm	Įtempiai, MPa
Prieš sustiprinimą	46,5	-3,98
Sustiprinimas	47,0	-4,17
Praėjus 53 metams po sustiprinimo	41,9	-3,60
Praėjus 100 metų po sustiprinimo	42,0	-3,62
Įvertinus kintamas apkrovas	51,1	-7,83

Pastaba: betono įtempių reikšmės su „-“ ženklu reiškia gniuždymą.

Nagrinėjamo tilto įlinkis po tilto sustiprinimo, dėl atsiradusio papildomo gelžbetoninio apvalkalo svorio padidėjo iki 47,0 mm. Pokytis yra lygus 0,5 mm.

Praėjus 53 metams dėl betono ilgalaikės elgsenos nagrinėjamo tilto įlinkis sumažėja iki 41,9 mm. Pokytis -5,1 mm. O praėjus dar 47 metams (100 metų po sustiprinimo) tilto įlinkis pasiekia 42,0 mm. Matomas nedidelis padidėjimas, pokytis 0,1 mm.

Papildomai įvertinus laikinas transporto apkrovas, kurių dydis nustatomas pagal LST EN 1991-2 pasirenkant LM1 modelį, įlinkis išauga. Pasiekia 51,1 mm. Pokytis lyginant su neapkrautos perdangos įlinkiu, lygus 9,1 mm.

Nagrinėjamo tilto gniuždymo įtempių betone reikšmės po sustiprinimo padidėja iki 4,17 MPa. Matomas pokytis lygus 0,19 MPa. Vėlgi to priežastis yra atsiradęs papildomo gelžbetoninio apvalkalo svoris.

Laikui bėgant, per 53 metus po nagrinėjamo tilto sustiprinimo, gniuždymo įtempiai betone sumažėja iki 3,60 MPa. Pokytis lygus 0,57 MPa. Praėjus dar 47 metams (100 metų po sustiprinimo) nagrinėjamo tilto gniuždymo įtempiai betone šiek tiek pakinta, pasiekia 3,62 MPa. Matomas padidėjimas lygus 0,02 MPa.

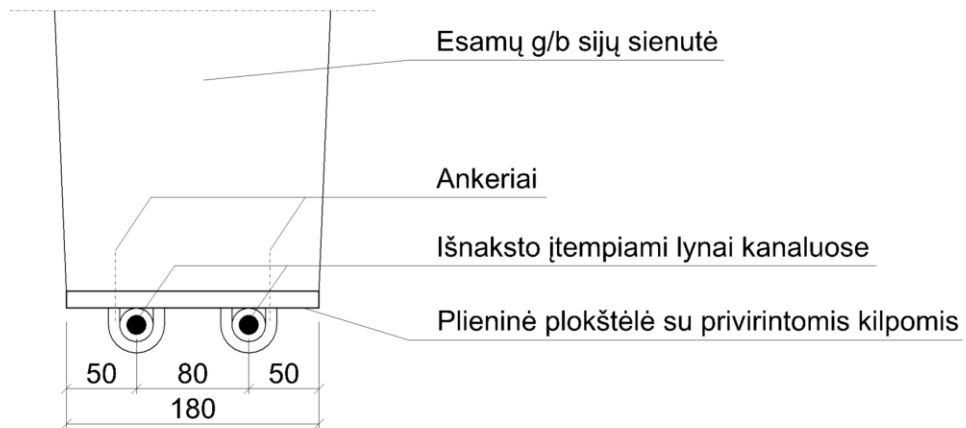
Papildomai įvertinus laikinas transporto apkrovas, kurių dydis nustatomas pagal LST EN 1991-2 pasirenkant LM1 modelį, gniuždymo įtempiai betone padidėja iki 7,83 MPa. Pokytis lyginant su neapkrautos perdangos betono įtempiais, lygus 4,21 MPa. Tačiau tai neviršija leistinų reikšmių šiam betonui.

4.3. Stiprinimas iš anksto įtempiamais lynais

4.3.1. Teorinis aprašymas

Tiltų stiprinimo būdas su iš anksto įtempiamais lynais pasaulyje yra gana plačiai naudojamas, tačiau daugiau taikomas dėžinio skrepsjūvio tiltams. Taikant šį būdą, skaičiuojamoji tilto schema išlieka nepatikusi. Tinkamai parinkus reikiamą kiekį lynų ir tinkamai įrengus juos įrengus, galima tikėtis ne tik sumažinti įtempimus tenkančius tilto gelžbetoninėms T formos sijoms, bet ir sumažinti jau esamą tilto perdangos įlinkį.

Iš anksto įtempiami lynai įrengiami kanaluose, kurie pritirtinami, gelžbetoninės T formos sijos apatinėje sienutės dalyje, plieninių įdėtinių detalių pagalba ir ankeriais. Išdėstymo schema pavaizduoda 57 pav.



58 pav. Iš anksto įtempiamų lynų išdėstymo schema

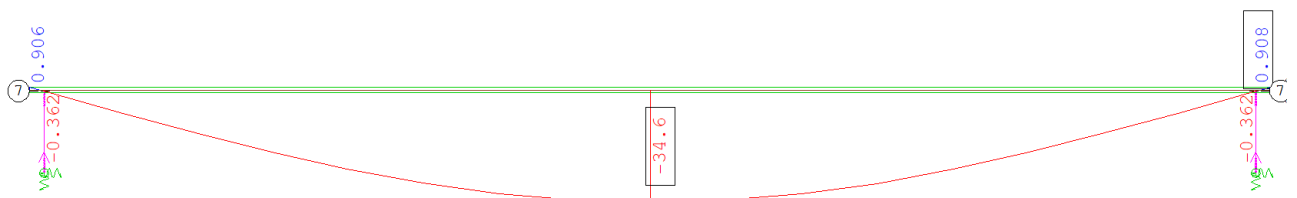
Nagrinėjamas tiltas stiprinimas fibromis armuoto polimero strypais, kurių charakteristikos yra:

- lynų klasė – Y1860S;
- vieno lyno skerspjūvio plotas – 150 mm²;
- iš anksto įtempiami lynai įrengiami 1 m atstumu nuo sijų pradžios.

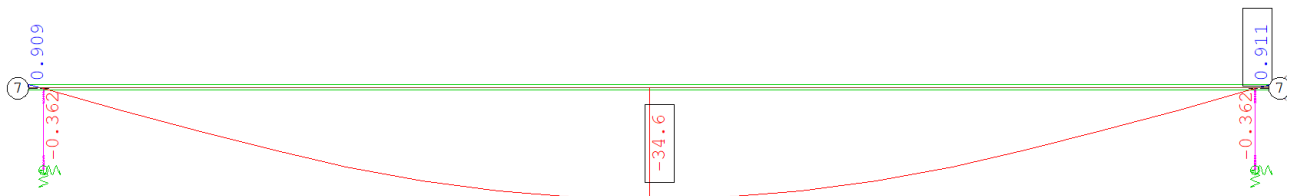
4.3.2. Gauti rezultatai

Betono įtempių ir tilto įlinkio reikšmės po nagrinėjamo tilto sustiprinimo yra pateikiamos 11 lentelėje. Pateiktos betono įtempių reikšmės yra veikiančios tilto tarpatramio viduryje.

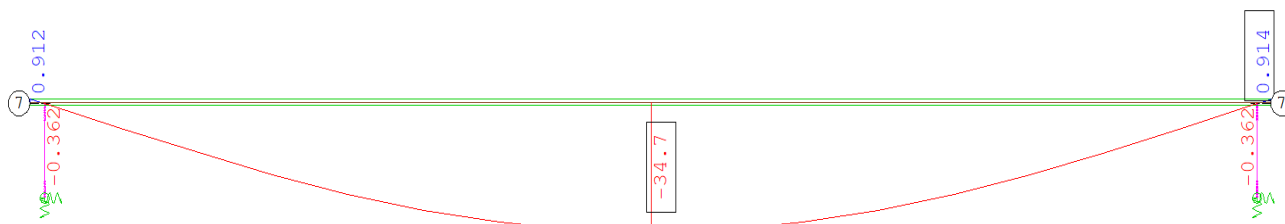
Pateikiamos betono įtempių ir tilto įlinkių diagramos:



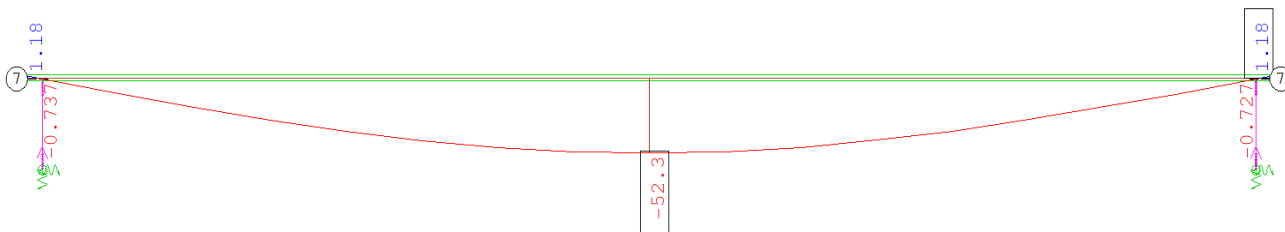
59 pav. Tiltro tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)



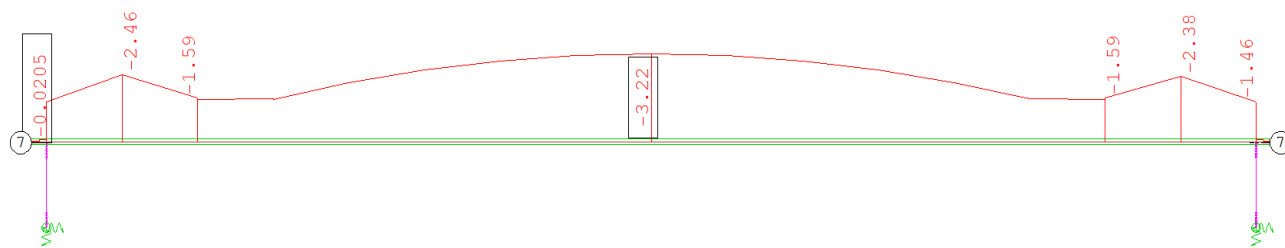
60 pav. Tiltro tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo praėjus 53 metams (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)



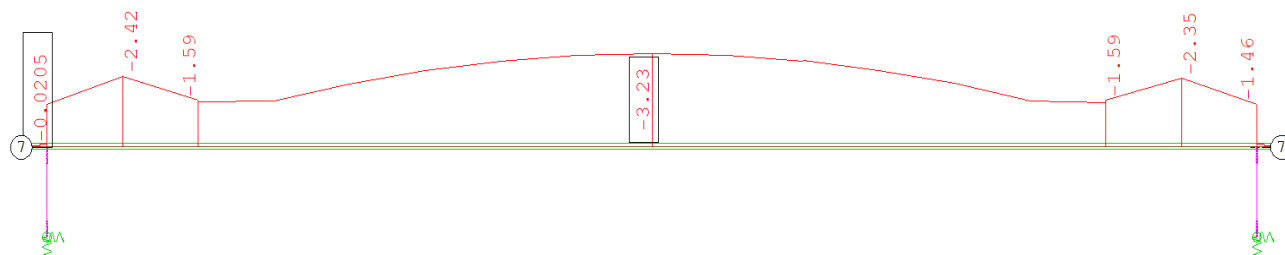
61 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo praėjus 100 metų (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)



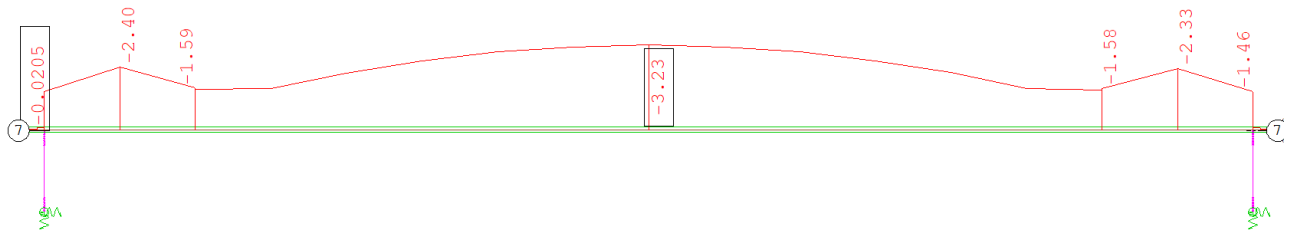
62 pav. Tilto tarpatramio įlinkis po stiprinimo darbų atlikimo papildomai įvertinus laikinas transporto apkrovas



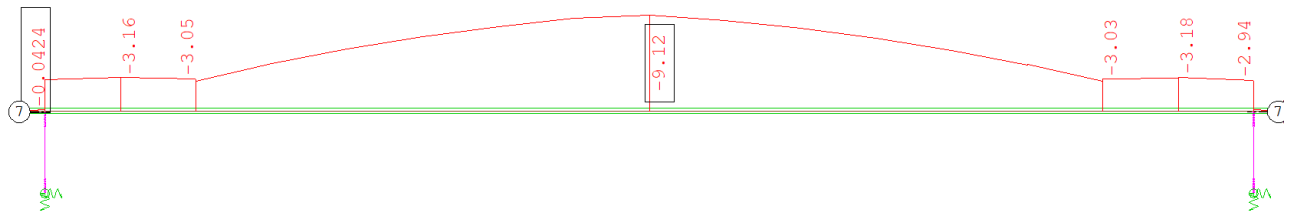
63 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)



64 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo praėjus 53 metams (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)



65 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo praėjus 100 metų (laikinos transporto apkrovos nevertinamos)



66 pav. Betono įtempiai sijose išilgai tilto po sustiprinimo darbų atlikimo įvertinus laikinas transporto apkrovos

11 lentelė. Trečias sustiprinimo variantas. Betono įtempiai ir tilto įlinkiai

Tilto gyvavimo etapas	Įlinkis, mm	Įtempiai, MPa
Prieš sustiprinimą	46,5	-3,98
Sustiprinimas	34,6	-3,22
Praėjus 53 metams po sustiprinimo	34,6	-3,23
Praėjus 100 metų po sustiprinimo	34,7	-3,23
Įvertinus kintamas apkrovas	52,3	-9,12

Pastaba: betono įtempių reikšmės su „-“ ženklu reiškia gniuždymą.

Nagrinėjamo tilto įlinkis po tilto sustiprinimo, dėl naujai įrengtų lynų iš anksto įtempimo, sumažėjo iki 34,6 mm. Pokytis yra lygus 11,9 mm.

Praėjus 53 metams tilto įlinkis dėl betono ilgalaikės elgsenos žymiai nebekinta, išlieka 34,6 mm. O praėjus dar 47 metams (100 metų po sustiprinimo) tilto įlinkis šiek tiek labai nežymiai padidėja, pasiekia 34,7 mm. Pokytis 0,1 mm.

Papildomai įvertinus laikinas transporto apkrovas, kurių dydis nustatomas pagal LST EN 1991-2 pasirenkant LM1 modelį, įlinkis išauga. Pasiekia 52,3 mm. Pokytis lyginant su neapkrautos perdangos įlinkiu, lygus 17,6 mm.

Nagrinėjamo tilto gniuždymo įtempių betone reikšmės po sustiprinimo, dėl naujai įrengtų lynų iš anksto įtempimo, sumažėja iki 3,22 MPa. Matomas pokytis lygus 0,76 MPa.

Laikui bėgant, per 53 metus po nagrinėjamo tilto sustiprinimo, gniuždymo įtempiai betone šiek tiek padidėja, pasiekia 3,23 MPa. Pokytis lygus 0,01 MPa. Praėjus dar 47 metams (100 metų po sustiprinimo) nagrinėjamo tilto gniuždymo įtempiai betone žymiai nebekinta, išlieka ta pati 3,23 MPa reikšmė.

Papildomai įvertinus laikinas transporto apkrovas, kurių dydis nustatomas pagal LST EN 1991-2 pasirenkant LM1 modelį, gniuždymo įtempiai betone padidėja iki 9,12 MPa. Pokytis lyginant su neapkrautos perdangos betono įtempiais, lygus 5,89 MPa. Tačiau tai neviršija leistinų reikšmių šiam betonui.

4.4. Nagrinėtų tilto stiprinimo būdų palyginimas

12 lentelė. Gautų rezultatų palyginimas. Betono įtempiai ir tilto įlinkiai

Tilto gyvavimo etapas	Įlinkis, mm	Įtempiai, MPa
Prieš sustiprinimą	46,5	-3,98
1 variantas (įrengiant anglies fibromis armuoto polimero juostas)		
Sustiprinimas	46,6	-3,98
Praėjus 53 metams po sustiprinimo	46,7	-3,98
Praėjus 100 metų po sustiprinimo	46,8	-3,98
Įvertinus kintamas apkrovas	63,2	-9,71
2 variantas (įrengiant papildomą gelžbetoninį apvaskalą)		
Sustiprinimas	47,0	-4,17
Praėjus 53 metams po sustiprinimo	41,9	-3,60
Praėjus 100 metų po sustiprinimo	42,0	-3,62
Įvertinus kintamas apkrovas	51,1	-7,83
3 variantas (įrengiant iš anksto įtempiamus lynus)		
Sustiprinimas	34,6	-3,22
Praėjus 53 metams po sustiprinimo	34,6	-3,23
Praėjus 100 metų po sustiprinimo	34,7	-3,23
Įvertinus kintamas apkrovas	52,3	-9,12

Pastaba: betono įtempių reikšmės su „-“ ženklu reiškia gniuždymą.

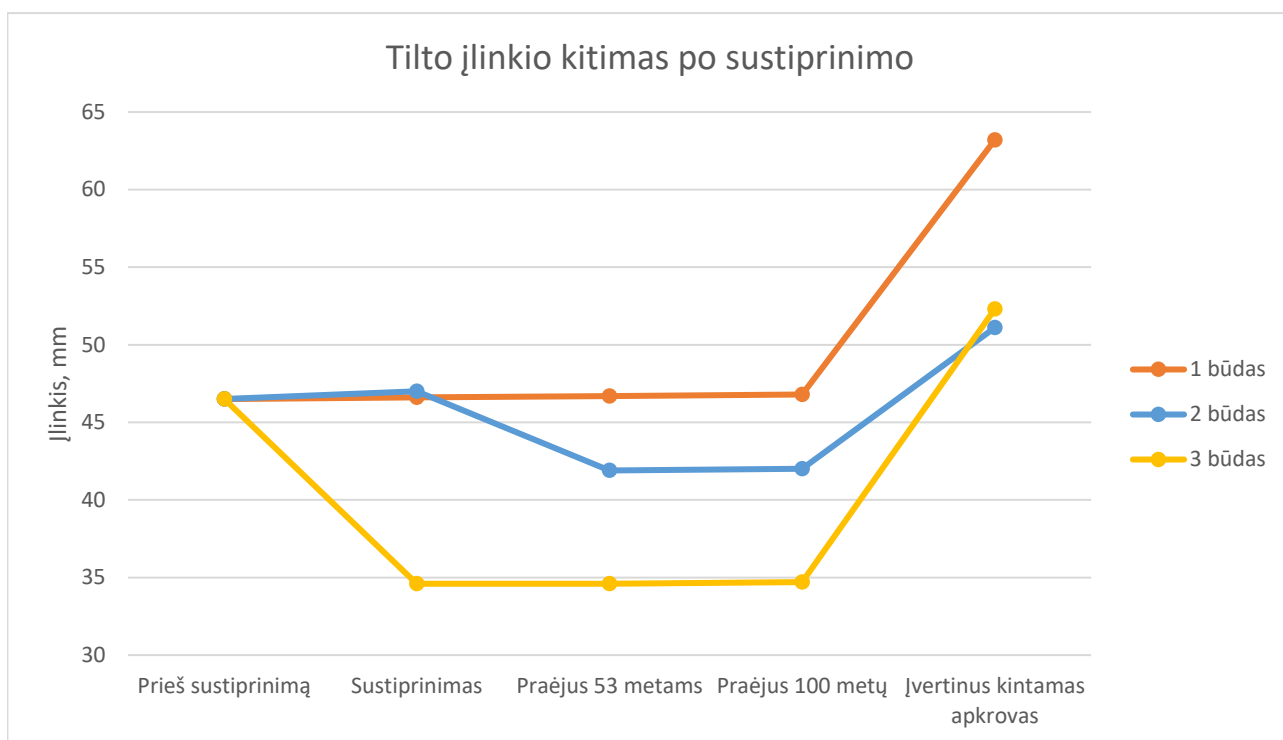
Atlikus nagrinėjamo tilto stiprinimą 1 būdu (įrengiant anglies fibromis armuoto polimero juostas), įlinkio reikšmės nežymiai, bet šiek tiek ir toliau didėja. O papildomai tilto perdangą apkrovus laikinomis transporto apkrovomis, įlinkis labai padidėja, pokytis net 16,4 mm. Pasiekama 63,2 mm reikšmė.

Sustiprinus tilto T formos gelžbetonines sijas 2 variantu (įrengiant papildomą gelžbetoninį apvaskalą), pradžioje įlinkis padidėja, bet per artimiausius 53 metus dėl betono ilgilaikės elgsenos, tarpatramio vidurio įlinkio reikšmė sumažėja. Papildomai nagrinėjamą tiltą apkrovus laikinomis transporto apkrovomis, įlinkis padidėja, pokytis 9,1 mm. Pasiekama 51,1 mm reikšmė.

Atlikus T formos gelžbetoninių sijų stiprinimą 3 būdu (įrengiant iš anksto įtempiamus lynus), tilto tarpatramio vidurio įlinkio reikšmė, dėl naujai įrengtų lynų iš anksto įtempimo, žymiai sumažėja. Laikui bėgant įlinkio reikšmė nežymiai didėja. Papildomai nagrinėjamo tilto perdangą apkrovus laikinomis transporto apkrovomis, tarpatramio įlinkis padidėja, pokytis 17,6 mm. Pasiekama 52,3 mm reikšmė.

Remiantis gautomis tilto tarpatramio vidurio įlinkio reikšmėmis, galime teigti, kad lyginant tris nagrinėjamus stiprinimo būdus, tačiau nevertinant laikinų transporto apkrovų, didžiausias teigiamas rezultatas gautas trečiu stiprinimo būdu, tai yra stiprinimas įrengiant iš anksto įtempiamus lynus. Skirtumas nuo reikšmės gautos pasirinkus antrą būdą (įrengiant papildomą gelžbetoninį apvaskalą) yra 7,3 mm, o lyginant su pirmu variantu (įrengiant anglies fibromis armuoto polimero juostas) – 12,1 mm.

Tačiau įvertinus papildomas laikinas transporto apkrovas, kurios nustatomos pagal LST EN 1991-2 pasirenkant LM1 modelį, pranašiausias stiprinimo variantas gaunamas įrengiant papildomą gelžbetoninį apvaskalą. Šiuo atveju, tarpatramio vidurio įlinkio skirtumas lyginant su trečiu variantu (įrengiant iš anksto įtempiamus lynus) yra 1,2 mm, o lyginant su pirmu būdu (įrengiant anglies fibromis armuoto polimero juostas) – 12,1 mm.



67 pav. Tilto įlinkio kitimas po sustiprinimo

Atlikus nagrinėjamo tilto stiprinimą 1 būdu (įrengiant anglies fibromis armuoto polimero juostas), betono gniuždymo įtempių reikšmės nesikeičia. Tik papildomai tilto perdangą apkrovus laikinomis transporto apkrovomis, įtempiai žymiai padidėja, pokytis net 5,73 MPa. Pasiekama 9,71 MPa reikšmė.

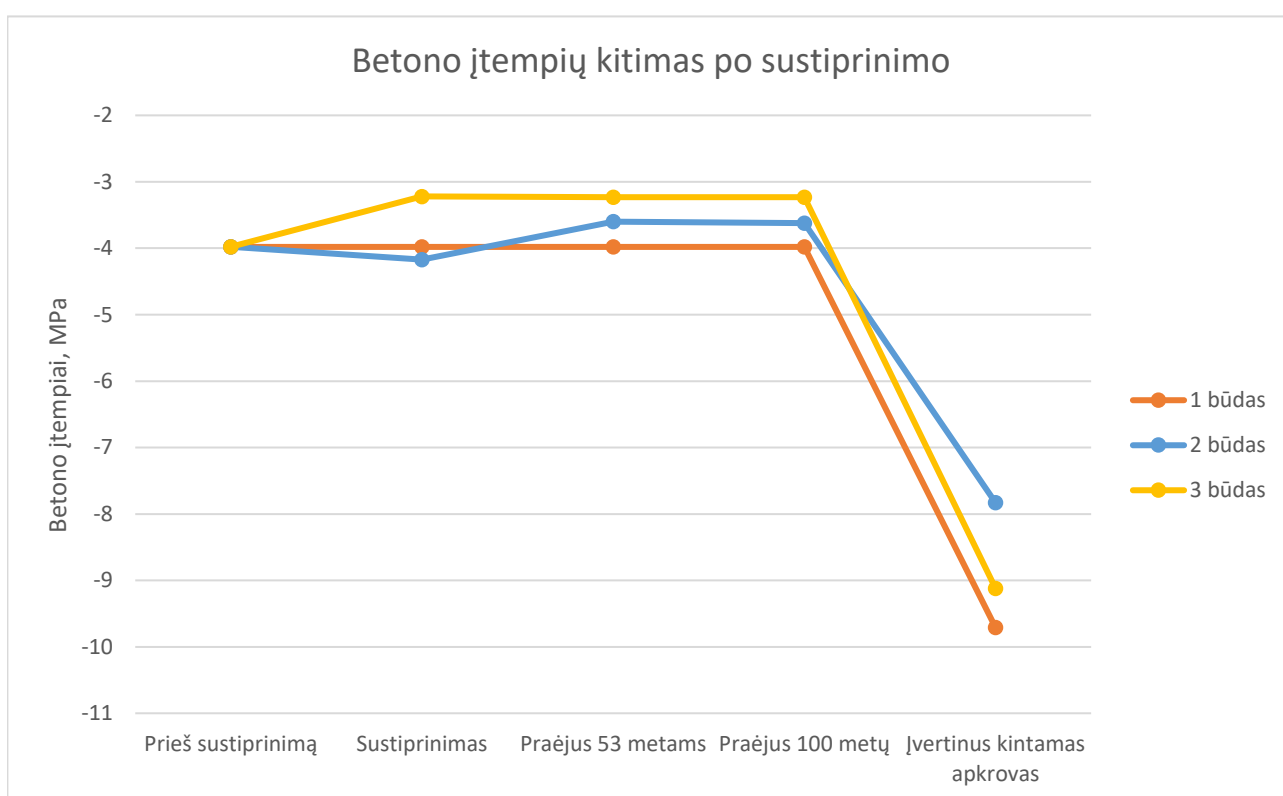
Sustiprinus tilto T formos gelžbetonines sijas 2 variantu (įrengiant papildomą gelžbetoninį apvaskalą), pradžioje betono įtempiai padidėja, bet per artimiausius 53 metus dėl betono ilgailaikės elgsenos, betono gniuždymo įtempių reikšmė sumažėja. Papildomai nagrinėjamą tiltą apkrovus laikinomis transporto apkrovomis, betono įtempiai padidėja, pokytis 4,23 MPa. Pasiekama 7,83 MPa reikšmė.

Atlikus T formos gelžbetoninių sijų stiprinimą 3 būdu (įrengiant iš anksto įtempiamus lynus), betono gniuždymo įtempių reikšmė, dėl naujai įrengtų lynų iš anksto įtempimo, žymiai sumažėja. Laikui bėgant betono gniuždymo įtempių reikšmė nežymiai didėja. Papildomai nagrinėjamo tilto perdangą

apkrovus laikinomis transporto apkrovomis, betono gniuždymo įtempiai padidėja, pokytis 5,89 MPa. Pasiekama 9,12 MPa reikšmė.

Remiantis gautomis betono gniuždymo įtempių reikšmėmis, galime teigti, kad lyginant tris nagrinėjamus stiprinimo būdus, tačiau nevertinant laikinų transporto apkrovų, didžiausias teigiamas rezultatas gautas trečiu stiprinimo būdu, tai yra stiprinimas įrengiant iš anksto įtempiamus lynus. Skirtumas nuo reikšmės gautos pasirinkus antrą būdą (įrengiant papildomą gelžbetoninį apvalkalą) yra 0,39 MPa, o lygiant su pirmu variantu (įrengiant anglies fibromis armuoto polimero juostas) – 0,75 MPa.

Tačiau įvertinus papildomas laikinas transporto apkrovas, kurios nustatomos pagal LST EN 1991-2 pasirenkant LM1 modelį, pranašiausias stiprinimo variantas gaunamas įrengiant papildomą gelžbetoninį apvalkalą. Šiuo atveju, betono gniuždymo įtempių skirtumas lyginant su trečiu variantu (įrengiant iš anksto įtempiamus lynus) yra 1,29 MPa, o lyginant su pirmu būdu (įrengiant anglies fibromis armuoto polimero juostas) – 1,88 MPa.



68 pav. Betono įtempių kitimas po sustiprinimo

Taigi, vertinant tiek tilto tarpatriamio vidurio įlinkio, tiek betono gniuždymo įtempių duomenis, geriausias stiprinimo variantas, iš nagrinėjamų būdų, yra įrengiant iš anksto įtempiamus lynus, tik jų kiekis arba skerspjūvio plotas, nagrinėjamu atveju, turi būti padidintas. Tai reiškia, kad šie lynų parametrai visada turi būti tiksliai parenkami kiekvienam nagrinėjamam objektui, atsižvelgiant į jo charakteristikas ir sijų stiprinimo skaičiavimo, skaitinio modeliavimo rezultatus.

Atliktuose skaičiavimuose gali būti tam tikros paklaidos ir netikslumai, atsirandantys dėl nepilnai tiksliai įvertintos betono ilgalaikės elgsenos poveikio, skaičiavimo atlikimo pagal tiesinį modelį

(nebuvo naudojamas plastiškasis modelis) ir gelžbetoninių konstrukcijų armatūros nukorodavimo nevertinimo.

Norint pasiekti dar geresnius rezultatus, ar norint surasti universalesnius gelžbetoninių T formos sijų, kurios naudojamos tiltų ir viadukų konstrukcijose, stiprinimo metodus, reikia atlikti papildomą kitų būdų skaitinį modeliavimą bei analizę. Tam gali būti naudojamos kitos medžiagos, kitoks jų išdėstymas, ar net stiprinimą atlikti panaudojant keletą skirtingų medžiagų ir būdų.

Išvados

1. Išanalizavus įvairiose šalyse naudojamų T formos sijinių tiltų/viadukų perdangų stiprinimo būdus, pastebėta, kad tokio tipo tiltus/viadukus stiprinama anglies fibromis armuoto polimero juostomis, kurios gali būti iš anksto įtempiamos arba naudojamos be įtempimo, įrengiant papildomą gelžbetoninį apvaskalą bei panaudojant iš anksto įtempiamus armatūros strypus ar lynus. Tačiau, kuris stiprinimo metodas yra geriausias ir efektyviausias, pasakyti negalima, nes nėra atlikta palyginamosios analizės.
2. Baigus tiriamojo tilto per Kruoją skaitinį modeliavimą, nustatyta, kad praėjus 47-iems metams po tilto pastatymo, jo tarpatramio vidurio įlinkio reikšmė atitinka realius duomenis, kurie gauti atlikus tilto bandymus.
3. Atlikus pasirinktų stiprinimo būdų (1 – stiprinimas anglies fibromis armuoto polimero juostomis, 2 – stiprinimas įrengiant papildomą gelžbetoninį apvaskalą, 3 – stiprinimas įrengiant iš anksto įtempiamus lynus) analizę ir įvertinus jų privalumus, bei trūkumus, pastebėta, kad geriausias stiprinimo variantas yra stiprinimas įrengiant iš anksto įtempiamus lynus, tik jų kiekis arba skerpsjūvio plotas, nagrinėjamu atveju, turi būti padidintas.
4. Baigus pasirinktų stiprinimo metodų analizavimą, galime teigti, kad geriausias stiprinimo būdas yra įrengiant iš anksto įtempiamus lynus. Tačiau įvertinus laikinas transporto apkrovas, tilto tarpatramio vidurio įlinkio reikšmė vis tiek yra didelė, dėl to gelžbetoninių T formos sijų apatinėje dalyje gali atsirasti plyšiai. Norint rasti dar efektyvesnį ir universalesnį tokio tipo tiltų ir viadukų stiprinimo metodą, reikalingas papildomas skaitinis modeliavimas ir tolimesnė analizė.

Literatūros sąrašas

1. NOTKUS, Algirdas Jonas. *Tiltų projektavimo pagrindai*. Vilnius: Technika, 2010. ISBN 9789955286707
2. ZADLAUSKAS, Saulius. *Statinių ir dinaminių apkrovų sukeltas gelžbetoninių tiltų pleišėtumas ir deformacijos: daktaro disertacija* [interaktyvus]. Kauno technologijos universitetas, 2013 [žiūrėta 2020-04-04]. Prieiga per: <http://talpykla.elaba.lt>
3. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1992-2:2006], *Eurokodas 2. Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 2 dalis. Gelžbetoniniai tiltai. Projektavimo ir konstravimo taisyklės*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2006.
4. ZHANG, Jianren, Hui PENG, C.S. CAI. Field Study of Overload Behavior of an Existing Reinforced Concrete Bridge under Simulated Vehicle Loads. *Bridge Engineering* [interaktyvus]. 2010, 16, [žiūrėta 2020-04-04]. ISSN 1084-0702. Prieiga per: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000140](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000140)
5. LEE, Heeyoung, Woo Tai JUNG, Wonseok CHUNG. Field test of an old RC bridge before and after NSM strengthening. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2018, 202, 793-801 [žiūrėta 2020-04-04]. ISSN 0263-8223. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.024>
6. SIWOWSKI, Tomasz, Bartosz PIĄTEK, Paulina SIWOWSKA, Agnieszka WIATER. Development and implementation of CFRP post-tensioning system for bridge strengthening. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2020, 207, 110266 [žiūrėta 2020-04-04]. ISSN 0141-0296. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110266>
7. HAG-ELSAFI, Osman, Sreenivas ALAMPALLI, Jonathan KUNIN. Application of FRP laminates for strengthening of a reinforced-concrete T-beam bridge structure. *Composite Structures* [interaktyvus]. 2001, 52, 453-466 [žiūrėta 2020-04-04]. ISSN 0263-8223. Prieiga per: [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(01\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00035-6)
8. KARAYANNIS, Chris, Constantin CHALIORIS, George SIRKELIS. Local retrofit of exterior RC beam-column joints using thin RC jackets—An experimental study. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* [interaktyvus]. 2008, 37, 727-746 [žiūrėta 2020-04-04]. ISSN 1096-9845. Prieiga per: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eqe.783>
9. ZHANG, Xuhui, Yuming LUO, Lei WANG, Jianren ZHANG, Wenpeng WU, Caiqian YANG. Flexural strengthening of damaged RC T-beams using self-compacting concrete jacketing under different sustaining load. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2018, 172, 185-195 [žiūrėta 2020-04-04]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.245>
10. KANELLOPOULOS, Antonios, Pericles SAVVA, Michael F. PETROU, Ioannis IOANNOU, Stavroula PANTAZOPOULOU. Assessing the quality of concrete – reinforcement interface in Self Compacting Concrete. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. 2020, 240, 117933 [žiūrėta 2020-04-04]. ISSN 0950-0618. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117933>
11. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1991-2:2006], *Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 2 dalis. Tiltų eismo apkrovos*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2006.
12. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1991-1-4:2005], *Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms 1-4 dalis. Bendrieji poveikiai. Vėjo poveikiai*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005.

13. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1992-1-5:2004], *Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 1-5 dalis. Bendrieji poveikiai. Temperatūros poveikiai*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2004.
14. *STATYBA JUMS: betonas, betono klasės*. 2013 [žiūrėta 2020-10-23]. Prieiga per: <http://www.statybajums.lt/temos/konstrukcijos-fasadai-medziagos/betonas-betonu-klases>
15. MOHEE, Faizul M., Adil AL-MAYAH, Alan PLUMTREE. Anchors for CFRP plates: State-of-the-art review and future potential. *Composites Part B* [interaktyvus]. 2016, 90, 432-442, [žiūrėta 2020-10-23]. ISSN 1359-8368. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.01.011>