



**VILNIUS
TECH**

Vilniaus Gedimino
technikos universitetas

Edmundas BEIVYDAS

INOVATYVIOS STYGINĖS KABAMOSIOS PLIENINIO TILTO KONSTRUKCIJOS ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ ANALIZĖ

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (T 002)

Vilnius, 2025

2025-035-M

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Edmundas BEIVYDAS

INOVATYVIOS STYGINĖS KABAMOSIOS
PLIENINIO TILTO KONSTRUKCIJOS
ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ ANALIZĖ

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (T 002)

Vilnius, 2025

Disertacija rengta 2018–2025 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. dr. Algirdas JUOZAPAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Statybos inžinerija – T 002).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. dr. Darius BAČINSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Statybos inžinerija – T 002).

Nariai:

prof. dr. Alfonsas DANIŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Statybos inžinerija – T 002),

prof. habil. dr. Gintautas DZEMYDA (Vilniaus universitetas, Informatikos inžinerija – T 007),

doc. dr. Tomas GEČYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Statybos inžinerija – T 002),

prof. habil. dr. Hartmut PASTERNAK (Brandenburgo technologijos universitetas, Vokietija, Statybos inžinerija – T 002).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2025 m. birželio 12 d. 14 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto *Aula Doctoralis* posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (0 5) 274 4956; faksas (0 5) 270 0112; el. paštas doktor@vilniustech.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2025 m. gegužės 9 d. Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto talpykloje <https://etalpykla.vilniustech.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto 2025-035-M mokslo literatūros knyga

<https://doi.org/10.20334/2025-035-M>

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2025

© Edmundas Beivydas, 2025

edmundas.beivydas@vilniustech.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Edmundas BEIVYDAS

STRESS AND STRAIN ANALYSIS OF AN
INNOVATIVE STRING CABLE SUSPENSION
STEEL BRIDGE STRUCTURE

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (T 002)

Vilnius, 2025

The doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2018–2025.

Supervisor

Prof. Dr Algirdas JUOZAPAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

The Dissertation Defence Council of the Scientific Field of Civil Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Darius BAČINSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

Members:

Prof. Dr Alfonsas DANIŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002),

Assoc. Prof. Dr Tomas GEČYS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002),

Prof. Dr Habil. Gintautas DZEMYDA (Vilnius University, Informatics Engineering – T 007),

Prof. Dr Habil. Hartmut PASTERNAK (Brandenburg University of Technology, Germany, Civil Engineering – T 002).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Civil Engineering in the *Aula Doctoralis* Meeting Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **2 p.m. on 12 June 2025**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vilniustech.lt

A notification on the intended defence of the dissertation was sent on 9 May 2025. A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Vilnius Gediminas Technical University repository <https://etalpykla.vilniustech.lt> and the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziomė

Darbe tiriama styginio kabamojo tilto konstrukcija. Styginė kabamoji sistema – tai vienajuosčio ir styginio tiltų derinys, kai šios abi konstrukcinės schemos sujungiamos į bendrą sistemą.

Tyrimo metu pristatyta nauja styginė kabamoji tilto konstrukcija ir jos komponavimo parametrai. Buvo parengtos inžinerinės apskaičiavimo metodikos stygos ir styginės kabamosios konstrukcijos poslinkiams ir įrašoms apskaičiuoti. Rezultatams pagrįsti buvo atlikti skaitiniai ir eksperimentiniai tyrimai.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai, priedai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai. Aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema paskelbtos autoriaus publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmame skyriuje pateikta kabamųjų ir styginių tiltų konstrukcijų ir jų apskaičiavimo metodų apžvalga. Skyriaus pabaigoje suformuluotos išvados ir pagrindiniai disertacijos uždaviniai.

Antrame skyriuje pristatoma nauja styginė kabamoji konstrukcija ir jos komponavimo parametrai. Skyriuje taip pat pateikiami styginės ir naujos styginės kabamosios tilto konstrukcijos poslinkių ir įrašų inžinerinė apskaičiavimo metodika. Atliekant konstrukcijos analizę skaitiniu metodu, detaliau išnagrinėjama konstrukcijos elgsena esant skirtingiems stygos įtempimams, įvairiems kintamosios ir nuolatinės apkrovos santykiams bei skirtingiems stygos ir apatinio lyno ašinių standžių santykiams.

Trečiame skyriuje pateikiami styginės ir styginės kabamosios tilto konstrukcijos modelių eksperimentiniai tyrimai. Skyriuje aprašoma eksperimento programa, naudotų medžiagų ir įrangos charakteristikos. Taip pat aprašomi gauti eksperimento rezultatai, kurie yra sugretinami su skaitiniu metodu gautais rezultatais.

Disertacijos tema yra paskelbti 6 moksliniai straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose, iš kurių du *Web of Science* duomenų bazės leidiniuose turinčiuose citavimo indeksą; du straipsniai kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose bei du straipsniai recenzuojamame *Mokslas – Lietuvos ateitis* žurnale. Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti dvejose tarptautinėse užsienio mokslinėse konferencijose.

Abstract

The research examines the structure of a string cable suspension bridge structure. The string cable suspension system is a hybrid of a stress-ribbon and a string bridge, where both structural schemes are integrated into a unified system.

During the research, a new string cable suspension bridge structure and its configuration parameters were introduced. Engineering calculation methodologies for displacements and strains in both string and string cable suspension structures were developed. Numerical and experimental studies were conducted to validate the results.

The dissertation consists of an introduction, three chapters, conclusions, references, a list of the author's publications on the dissertation topic, and appendices.

The introductory chapter discusses the research problem and the relevance of the research and describes the research object. It also formulates the research aim and objectives, describes the research methodology, the scientific novelty of the work, the practical significance of the results, and the main defended statements. At the end of the introduction, the author's publications and conference presentations on the topic of the dissertation, as well as the structure of the dissertation, are presented.

The First Chapter provides an overview of string cable suspension and stress-ribbon bridge structures and their calculation methods. The chapter concludes with formulated conclusions and the main research objectives of the dissertation.

The Second Chapter introduces the new string cable suspension structure and its configuration parameters. It also presents an engineering calculation methodology for the displacements and strains in string and new string cable suspension bridge structures. The numerical analysis of the structure examines its behaviour.

The Third Chapter presents experimental studies of string and string cable suspension bridge models. It describes the experimental program, the characteristics of the materials and equipment used in the experiments, and the equipment parameters. The obtained experimental results are also presented and compared with those obtained using numerical methods.

Six scientific articles were published on the topic of the dissertation in peer-reviewed scientific journals. Two of them are indexed in the *Web of Science* database, two are published in journals indexed in other international databases, and two are published in the peer-reviewed journal *Science – The Future of Lithuania*. The research results of the dissertation have also been presented at two international scientific conferences.

Žymėjimai

Žymėjimai

- AA – asimetrinė apkrova (angl. *asymmetrical load*);
- ALE-L – apatinis laikantysis elementas-lynas (angl. *lower support element-cable*);
- ET – eksperimentinis tyrimas (angl. *experimental research*);
- IA – išskirstyta apkrova (angl. *distributed load*);
- ISM – inžinerinė apskaičiavimo metodika (angl. *engineering calculation methodology*);
- KA – koncentruota apkrova (angl. *concentrated load*);
- SA – simetrinė apkrova (angl. *symmetrical load*);
- S-KK – styginė kabamoji konstrukcija (angl. *string cable suspension structure*);
- SM – skaitinis metodas (angl. *numerical method*);
- VLE-S – viršutinis laikantysis elementas-styga (angl. *upper support element-string*).

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai.....	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	5
1. STYGINIŲ IR KABAMŪJŲ TILTŲ KONSTRUKCIJŲ APŽVALGA.....	7
1.1. Kabamųjų ir styginių tiltų konstrukcijų schemas	7
1.2. Vienajuosčių ir styginių tiltų apskaičiavimo metodai.....	13
1.3. Kinematiniai kabamųjų tiltų lynų poslinkiai ir jų stabilizavimas	23
1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	25
2. STYGINĖ KABAMOJI KONSTRUKCIJA IR JOS POSLINKIŲ IR ĮRAŽŲ SKAIČIAVIMAS.....	27
2.1. Styginė kabamoji konstrukcija ir jos komponavimas	27
2.2. Tilto stygos skaičiavimas.....	29

2.3. Styginės kabamosios konstrukcijos poslinkių ir įrašų skaičiavimas.....	35
2.4. Styginė kabamosios konstrukcijos skaitinių ir inžinerinių skaičiavimų sugretinimas.....	49
2.5. Antrojo skyriaus išvados.....	64
3. STYGINĖS KABAMOSIOS KONSTRUKCIJOS EKSPERIMENTINIS TYRIMAS.....	69
3.1 Eksperimentinis styginės konstrukcijos modelio tyrimas ir skaitinių rezultatų sugretinimas.....	69
3.2 Eksperimentinis styginės kabamosios konstrukcijos modelio tyrimas ir skaitinių rezultatų sugretinimas.....	78
3.3 Styginės kabamosios konstrukcijos komponavimo ir projektavimo rekomendacijos.....	95
3.4 Trečiojo skyriaus išvados.....	97
BENDROSIOS IŠVADOS.....	99
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	101
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS .	111
SUMMARY IN ENGLISH.....	113
PRIEDAI.....	129
A priedas. Skaitinių ir analitinių rezultatų sugretinimas.....	129

Contents

INTRODUCTION	1
Problem formulation	1
Relevance of the research	2
Object of the research	2
Aim of the dissertation	3
Objectives of the dissertation	3
Research methodology	3
Scientific novelty of the dissertation	4
Practical value of the research findings	4
Defended statements	4
Approval of the research findings	5
1. OVERVIEW OF STRING AND SUSPENSION BRIDGE STRUCTURES	6
1.1. Structural schemes of suspension and string bridges	6
1.2. Calculation methods for stress-ribbon and string bridges	13
1.3. Kinematic displacements of suspension bridge cables and their stabilisation	23
1.4. Conclusions of the first chapter and formulation of the tasks of the dissertation	25

2. STRING CABLE SUSPENSION STRUCTURE AND CALCULATION OF ITS DISPLACEMENTS AND STRESSES	27
2.1. String cable suspension structure and its composition.....	27
2.2. Calculation of the bridge string	29
2.3. Calculation of displacements and stresses in a string cable suspension structure	35
2.4. Comparison of numerical and engineering calculations for the string cable suspension structure	49
2.5. Conclusions of the Second Chapter	64
3. EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE STRING CABLE SUSPENSION STRUCTURE.....	69
3.1 Experimental research of the string structure model and comparison of numerical results.....	69
3.2 Experimental research of the string cable suspension structure model and comparison of numerical results	78
3.3 Recommendations for the composition and design of string cable suspension structures	95
3.4 Conclusions of the third chapter	97
GENERAL CONCLUSIONS	99
REFERENCES	101
LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	111
SUMMARY IN ENGLISH.....	113
ANNEXES	129
Annex A. Comparison of numerical and analytical results	129

Įvadas

Problemos formulavimas

Kabamieji tiltai – tai inžineriniai statiniai, pasižymintys ne tik išskirtine architektūrine išvaizda, bet ir iššūkais, susijusiais su konstrukcijų elgesiu. Pastaraisiais dešimtmečiais vis didesnis dėmesys skiriamas vienajuosčiams pėsčiųjų kabamiesiems tiltams, dėl jų mažo statybinio aukščio ir ekonomiškumo. Vis dėlto, šios konstrukcijos pasižymi ir trūkumais: dėl mažo pradinio įsvyrio jos patiria dideles tempimo jėgas, konstrukcija itin deformuojasi, kai apkrova asimetrinė, o tilto forma ne visada užtikrina tinkamą eismo organizavimą.

Mokslinėje literatūroje dažnai nagrinėjami įvairūs kabamųjų pėsčiųjų tiltų konstrukciniai sprendiniai, skirti konstrukcijos poslinkiams mažinti. Vis dėlto, dar nepakankamai ištirta iš anksto įtemptų stygų integracija į dvijuostes kabamųjų tiltų sistemas. Toks konstrukcinis sprendinys – tai kombinuota sistema, sujungianti vienajuosčio ir styginio tilto privalumus. Pirminiai tyrimai rodo, kad stygos, kaip laikantieji elementai, neturi kinematinių poslinkių bei leidžia išlaikyti tiesią eismo trajektoriją, o jų išankstinis įtempimas padeda efektyviai pasipriešinti tiek simetrinėms, tiek asimetrinėms apkrovoms.

Problema kyla iš neatitikimo tarp pirminių šios sistemos efektyvumo požymių ir trūkstamų išsamių teorinių bei eksperimentinių tyrimų, pagrindžiančių šį konstrukcinį sprendinį.

Šios problemos nagrinėjimas leidžia ne tik papildyti tiltų konstrukcijų analizės sritį, bet ir prisideda prie pažangių, efektyvesnių konstrukcinių sprendimų kūrimo, kurie galėtų būti pritaikomi ne tik pėsčiųjų, bet ir kitos paskirties tiltuose.

Darbo aktualumas

Grakščiausia architektūra, didžiausiais tarpatramiais ir mažiausiomis medžiagų sąnaudomis pasižymi kabamosios konstrukcijos, kurios itin plačiai naudojamos visame pasaulyje. Visgi šios konstrukcijos turi esminį trūkumą – kinematinius poslinkius, kurie riboja jų taikymą, ypač tada, kai keliami aukšti eksploataciniai reikalavimai.

Plačiai yra naudojamos tilto konstrukcijos, kuriose laikantysis lynas atlieka pagrindinės sijos funkciją (vienajuosčiai tiltai). Tačiau dėl savo formos šie tiltai dažniau pritaikomi pėsčiųjų eismui organizuoti. Jų kinematiniai poslinkiai dažniausiai varžomi didinant konstrukcijos nuolatinę apkrovą bei mažinant pradinį kabamosios konstrukcijos išsvyrį. Tai didina ašinės jėgas konstrukcijoje, o šie veiksniai riboja tokių tiltų efektyvumą.

Atsižvelgiant į tai, darbe nagrinėjama inovatyvi styginė kabamoji tilto konstrukcija, jungianti vienajuosčio kabamojo ir styginio tilto privalumus į bendrą sistemą. Tokios konstrukcijos esmė – iš anksto įtempta styga, kuri reikšmingai sumažina konstrukcijos kinematinius poslinkius. Tokia sistema leidžia išplėsti kabamųjų tiltų taikymą ir atverti naujas galimybes projektavimui.

Darbo aktualumą taip pat lemia tai, kad iki šiol nėra sukurta inžinerinė apskaičiavimo metodika, skirta šios konstrukcijos įtempių ir poslinkių analizei. Todėl būtina atlikti išsamius šios konstrukcijos tyrimus – tiek teorinius, tiek eksperimentinius.

Disertacinis darbas aktualus ne tik sprendžiant konkrečius inžinerinius iššūkius, bet ir plėtojant mokslines žinias apie kabamųjų konstrukcijų elgseną, naujų konstrukcinių schemų kūrimą bei jų elgsenos savybių tyrimą.

Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – styginė kabamoji tilto konstrukcija ir jos įtempių ir deformacijų būseną tamprioje stadijoje, esant simetrinėms ir asimetrinėms apkrovoms, įvertinant koncentruotą ir išskirstytą apkrovimo būdą.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – sukurti naują inovatyvią tilto styginę kabamąją konstrukciją ir pateikti jos komponuojamuosius parametrus, ištirti šios konstrukcijos įtempių ir deformacijų būseną ir parengti jos poslinkių, įrašų inžinerinę apskaičiavimo metodiką.

Darbo uždaviniai

Tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

1. Apžvelgti kabamųjų vienajuosčių ir styginių plieno tiltų konstrukcijas bei jų poslinkių ir įrašų apskaičiavimo metodikas ir aptarti jų elgsenos ypatumus ir trūkumus.
2. Sukurti naują tilto styginę kabamąją konstrukciją ir pristatyti jos komponuojamuosius parametrus.
3. Parengti tilto stygos inžinerinę metodiką poslinkiams ir įrašoms skaičiuoti, veikiant asimetrinėms apkrovoms.
4. Parengti tilto styginės kabamosios konstrukcijos inžinerinę metodiką poslinkiams ir įrašoms apskaičiuoti.
5. Atlikti tilto styginės kabamosios konstrukcijos skaitinį tyrimą konstrukcijos elgsenai išanalizuoti bei gautiems analitiniams rezultatams pagrįsti.
6. Atlikti tilto styginės kabamosios konstrukcijos eksperimentinį tyrimą konstrukcijos elgsenai išanalizuoti bei gautiems skaitiniams rezultatams pagrįsti.
7. Pateikti tilto styginės kabamosios konstrukcijos komponavimo ir projektavimo rekomendacijas.

Tyrimų metodika

Darbe taikyti analitiniai statinės elgsenos analizės metodai, įvertinantys geometrinį netiesiškumą, skaitinis baigtinių elementų metodas bei eksperimentinis tyrimas.

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie statybos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Sukurta nauja styginė kabamoji plieno tilto konstrukcija ir pateikti jos komponuojamieji parametrai.
2. Parengta stygos, kaip laikančiosios tilto konstrukcijos, inžinerinė poslinkių ir įrašų apskaičiavimo metodika, atsižvelgiant į išankstinį jos įtempimą bei asimetrinį apkrovimą.
3. Parengta styginės kabamosios iš anksto įtemptosios tilto konstrukcijos inžinerinė poslinkių ir įrašų apskaičiavimo metodika, veikiant įvairiems apkrovimo variantams (simetrinis arba asimetrinis).
4. Įvertinta išankstinio tilto stygos įtempimo įtaka konstrukcijos elgsenai, atskleidžiant, kad išankstinis stygos įtempimas reikšmingai mažina asimetrinio apkrovimo sukeltus poslinkius styginėje kabamojoje konstrukcijoje.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Parengta inžinerinė styginio kabamojo tilto įrašų ir poslinkių apskaičiavimo metodika leidžia atlikti preliminarų šios naujos konstrukcijos projektavimą. Taikant šią metodiką galima parinkti preliminarinius laikančiųjų elementų skerspjūvius arba spręsti atvirkštinį uždavinį. Taip pat galima parinkti tinkamą stygos išankstinį įtempimą bei analizuoti konstrukcijos elgseną, keičiant jos parametrus.

Darbe pateiktos rekomendacijos styginei kabamajai tilto konstrukcijai komponuoti ir projektuoti. Šios rekomendacijos leis iš anksto numatyti pirminius konstrukcijos komponavimo parametrus, atsižvelgiant į eksploatacinius tilto reikalavimus.

Ginamieji teiginiai

1. Styginėje kabamojoje tilto konstrukcijoje galima kontroliuoti poslinkius, keičiant stygos išankstinį įtempimą, pradinį apatinio lyno įsvyrį ir stygos bei apatinio lyno ašinių standžių santykį.
2. Tinkamai parinktas išankstinis tilto stygos įtempimas mažina konstrukcijos poslinkius, veikiant asimetrinėms apkrovoms.
3. Tilto styginės kabamosios konstrukcijos apkrovimo būdas (apkrovas perduodant į statramsčius arba jas tolygiai išskirstant į stygą) lemia konstrukcijos elgseną.

4. Parengta stygos ir styginės kabamosios konstrukcijų inžinerinė apskaičiavimo metodika praplečia stygų taikymą kabamuosiuose tiltuose.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema yra paskelbti 6 moksliniai straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose, iš kurių du *Web of Science* duomenų bazėse, turinčiuose citavimo indeksą; du straipsniai kitų tarptautinių duomenų bazių bei du straipsniai recenzuojamame *Mokslas – Lietuvos ateitis* žurnale. Autoriaus publikacijų sąrašas pateiktas 112-113 puslapiuose.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti 2 tarptautinėse mokslinėse konferencijose:

- IABSE Simpoziumas 2020: *Synergy of culture and civil engineering – history and challenges*, 2020 m., Vroclave, Lenkijoje.
- EPSTEM 2022: 17-oje tarptautinėje konferencijoje *The Eurasia proceedings of science, technology, engineering and mathematics*, 2022 m. Baku, Azarбайдžane.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, rezultatų apibendrinimas, literatūros sąrašas, priedai. Darbo apimtis yra 141 puslapis be priedų, tekste panaudotos 82 numeruotos formulės, 60 paveikslų ir 29 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudota 103 literatūros šaltiniai.

1

Styginių ir kabamųjų tiltų konstrukcijų apžvalga

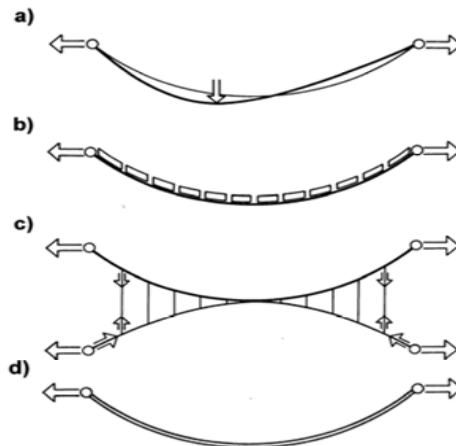
Skyriuje pristatoma kabamųjų ir styginių konstrukcijų apžvalga. Aptariamos kabamųjų tiltų schemas, jų pagrindiniai parametrai ir elgsenos ypatumai. Didesnis dėmesys yra skiriamas vienajuostėms konstrukcijoms. Skyriuje taip pat pristatomos tokių konstrukcijų apskaičiavimo metodikos ir apžvelgiama kinematinių poslinkių problema lynuose bei kabamuosiuose tiltuose. Taip pat apžvelgiami galimi kinematinių poslinkių suvaldymo būdai. Skyriuje pateikta medžiaga yra publikuota dvejuose autoriaus straipsniuose (Beivydas, 2019; Beivydas et al., 2023)

1.1. Kabamųjų ir styginių tiltų konstrukcijų schemas

Kabamieji tiltai

Kabamieji tiltai laikomi išskirtiniais inžineriniais statiniais – jie pasaulyje žinomi daugiau nei vieną šimtmetį ir garsėja net tik savo puikia architektūrine išraiška, bet ir vienais ilgiausių tarpatramių (Ahmadizadeh, 2013; Ai et al., 2023; Baldomir et al., 2010; Barni et al., 2024; Grigorjeva & Paeglitis, 2018; Spinelli et al., 2023; Ren et al., 2019; Ma et al., 2019; Huang et al., 2020; Tadeu et al., 2022; Troyano,

2003; Xue et al., 2025; Yin et al., 2023; Yu et al., 2019, 2023). Šie tiltai turi plačią taikymo sritį nuo efektyvių automobilinių ir geležinkelio tiltų (Au et al., 2002; Casciati et al., 2025; Gou et al., 2022; Jing et al., 2024; Shi et al., 2021, 2024; Wang et al., 2024, 2025; Wen et al., 2022; Xiao et al., 2024; Yao et al., 2021; Zhang et al., 2021) iki grakščių pėsčiųjų tiltų (Fujino et al., 2019; Jing et al., 2024; Morgenthal & Yamasaki, 2011; Wu & Wei, 2019; Zhang et al., 2024). Vystomi originalūs kabamųjų tiltų sprendiniai, taikant taip vadinamus standžius lynus (Hong et al., 2012; Juozapaitis et al., 2015). Tarp kabamųjų pėsčiųjų tiltų būtina išskirti vienajuosčius tiltus (angl. *stress-ribbon*), turinčius mažiausią statybinį (konstrukcinį) aukštį (Han et al., 2016; Hu et al., 2013; Salamak & Markocki, 2014; Strasky, 2011; Tarvydaitė & Juozapaitis, 2010, Lorenzi & Moser, 2022). Nors tokie tiltai yra žinomi ne vieną šimtmetį, bet platus jų taikymas prasidėjo nuo praeito amžiaus 6 dešimtmečio (Bleicher et al., 2011; Goldack et al., 2016). Buvo pristatomi ir sprendiniai taikyti vienajuosčių tiltų konstrukcijoms ir didelio tarpatramio automobiliniams tiltams (Strasky, 2011). Vienos populiariausių pėsčiųjų tiltų schemų yra pakabinamo lyno schema, kai laikantysis elementas tuo pačiu atlieka ir pagrindinės tilto sijos funkciją, kuria vyksta eismas (1.1 pav.).



1.1 pav. Kabamojo lyno tilto konstrukcija: a) vienajuostis su lanksčiu lynu, b) vienajuostis su balastu ant lyno, c) dvigubo pakabinamo lyno sistema, d) vienajuostis su standžiu lynu (Strasky, 2011)

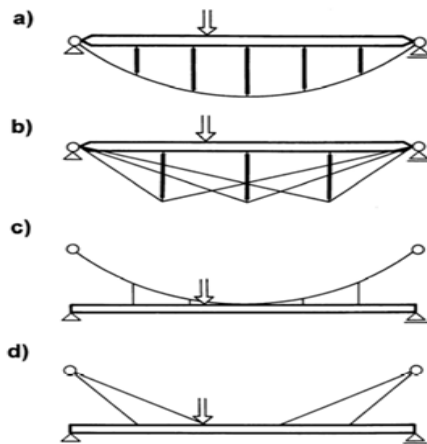
Fig. 1.1. Suspension cable bridge structure: a) stress-ribbon with flexible cable, b) stress-ribbon with ballast on the cable, c) double-suspended cable system, and d) stress-ribbon with rigid cable (Strasky, 2011)

Pastaruju metu dominuoja du vienajuosčių tiltų konstrukciniai sprendiniai: iš anksto įtempto gelžbetonio vienajuosčiai (Radnić et al., 2015) bei metalinių

juostų (lakštų) vienajuosčiai tiltai (Juozapaitis et al., 2006; Krivoshapko, 2017; Zhang et al., 2021). Šis sprendinys (vienajuostė konstrukcija) turi kelis trūkumus (neigiamus efektus) – dideles tempimo jėgas dėl santykinai mažo jų įsvyrio, kreivą formą, ne visada gerai tinkančią eismui realizuoti, bei tokia konstrukcija turi didelius poslinkius veikiant asimetrinėms apkrovoms (Strasky, 2011).

Būtina pastebėti, kad po grakščia vienajuosčių tiltų išvaizda slypi sudėtinga jų elgsena, galinti sukelti nepageidaujamų eksploataavimo problemų. Šie tiltai, visų pirma, yra jautrūs asimetrinių eismo apkrovų poveikiui. Tai sukelia kinematinės kilmės poslinkius (Juozapaitis & Norkus, 2004). Yra parengti išsamūs tokių vienajuosčių tiltų apskaičiavimo metodai, įvertinantys statinę ir dinaminę tokių konstrukcijų elgseną (Bleicher et al., 2011; Han et al., 2016; Liu et al., 2017; Tanaka et al., 2002). Tokiuose tiltuose pradėti taikyti taip vadinami „standūs“ lynai, savo lenkiamuoju standžiu stabilizuojantys tilto pradinę formą (Sandovic et al., 2017).

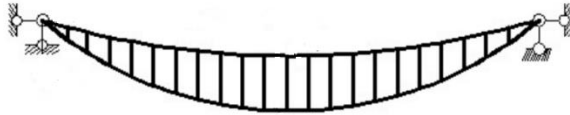
Siekiant suvaržyti tilto poslinkius, lynas gali būti naudojamas kaip palaikantysis elementas, kuris palaiko standumo sija, tiek stabilizuojančią kinematinės kilmės poslinkius, tiek atliekančią eismo organizavimo funkciją (1.2 pav.). Tokios konstrukcijos yra taikomos ne tik pėsčiųjų, bet ir automobilių tiltams. Pagrindinis tokių konstrukcijų trūkumas – sunki standumo sija, kuriai dažnai taikomi vertikalių poslinkių ir skerspjūvio kampinių deformacijų apribojimai.



1.2 pav. Kabamojo tilto konstrukcija su standumo sija: a) paspyrinė konstrukcija su kabančiu lynu, b) paspyrinė konstrukcija su vanta, c) kabanti konstrukcija su lynu, d) kabanti konstrukcija su vanta (Strasky, 2011)

Fig. 1.2. Suspension bridge structure with a stiffening beam: a) footbridge structure with a suspended cable, b) footbridge structure with cable stays, c) a suspension structure with a cable, and d) a suspension structure with cable stays (Strasky, 2011)

Yra taip pat žinomos dvijuostės kabamosios sistemos (1.3 pav.) (Sandovič & Juozapaitis, 2014), kai viršutinę juostą sudaro nedidelio kreivio arba tiesi standumo sija, atitinkanti tilto eksploataciniams reikalavimams, o apatinė juosta projektuojama iš lyno, kuris atlieka palaikančiąją funkciją (Lee et al., 2019). Abi juostos yra tempiamos ir tvirtinamos į inkarinius pamatus. Padidėjęs tokių tiltų statybinis aukštis sudaro sąlygas atsirasti mažesnėms suminėms tempimo jėgoms inkariniuose pamatuose.



1.3 pav. Dvijuostė kabamojo tilto konstrukcija (Sandovič & Juozapaitis, 2014)

Fig. 1.3. Double-span suspension bridge structure (Sandovič & Juozapaitis, 2014)

Visgi minima konstrukcija, nors ir perduoda kinematinčius poslinkius bei jėgas į pamatus, veikiant asimetrinėms apkrovoms patiria panašias problemas kaip ir vienajuosčiai tiltai.

Styginės konstrukcijos

Pastarąjį dešimtmetį pradėtos kurti ir tirti styginės tiltų konstrukcijos (Li & Wu, 2015; Unitsky et al., 2021, 2022). Visų pirma, toks konstrukcinis sprendimas pagerina tilto elgseną asimetrinių apkrovų atveju, nes styga efektyviai stabilizuoja asimetrinių eismo apkrovų poveikį. Nors tokie konstrukciniai sprendimai yra perspektyvūs, tačiau jų laikantieji styginiai elementai turi santykinai didelius skerspjuvius dėl atsirandančių labai didelių tempimo jėgų (Li et al., 2012, 2023). Todėl pradėtos kurti dvijuostės styginės konstrukcijos, kurių juostų elementuose skerspjuviuose nesukeliamos tokios didelės (ašinės jėgos gali būti didesnės daugiau nei 10 kartų, priklausomai tilto geometrinių parametru) ašinės jėgos (Beivydas, 2018), kaip pavienėje stygoje. Tokių konstrukcijų elgsenos analizės metodai taip pat nėra pakankami išvystyti. Literatūroje taip pat pateikiami keletas darbų, skirtų stygos kaip konstrukcinio laikinčiojo elemento elgsenos eksperimentiniams ir skaitiniams tyrimams (Beivydas, 2019; Beivydas et al., 2023; Beivydas & Juozapaitis, 2024; Li & Wu, 2015).

Pastatytų eksploatuojamų styginių tiltų kol kas nėra. Pirmasis styginių konstrukcijų bandymas atliktas 2001 m. Maskvos apylinkėse, Rusijoje. Čia kelių metrų aukštyje įtempta plieninė 24 m tarpatramio konstrukcija buvo apkrauta 15 t sunkvežimiu. Po poros metų 2003 m., toje pačioje vietoje, iš plieno konstrukcijų buvo pastatytas 150 m ilgio tiltas, kurio maksimalus vieno tarpatramio ilgis buvo 48 m. Savasis konstrukcijų svoris – 120 kg/m, strypai įtempti išankstine 450 kN jėga, o

kintamoji apkrova – tas pats 15 t sunkvežimius (1.4 ir 1.5 pav.). Šiuo bandymu buvo įrodyta, kad tinkamai suprojektuota lengva įtempta styginė konstrukcija gali atlaikyti ir didelę kintamąją apkrovą.



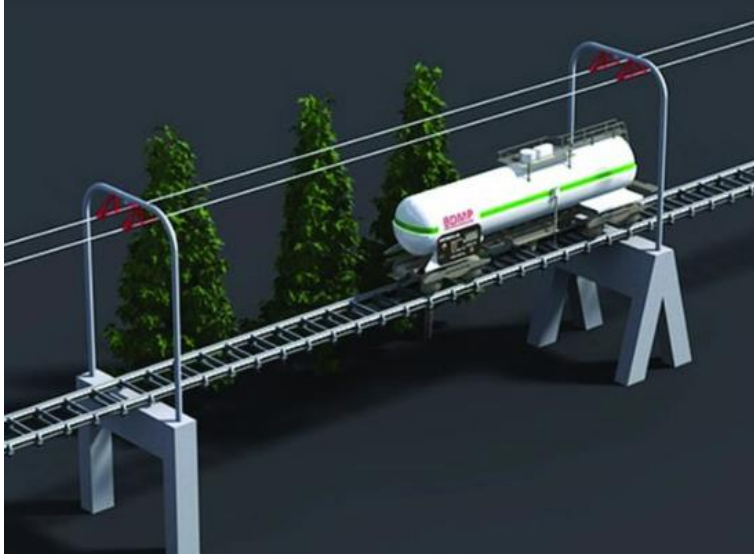
1.4 pav. Įtemptos styginės konstrukcijos bandymas (Unitsky, 2003)
Fig. 1.4. The test of the tensioned string structure (Unitsky, 2003)



1.5 pav. Styginio transporto bandomieji modeliai (Unitsky, 2008)
Fig. 1.5. String transport test models (Unitsky, 2008)

Panašius bandymus taip pat atliko ir Kinijos mokslininkai Fangyuan Li, Zhenwei Guo, Yunxuan Cui ir Peifeng Wu, kurie savo konstrukciją pavadino

AERORail, tačiau šie bandymai buvo daugiau orientuoti į dinaminės elgsenos tyrimus (1.6–1.7 pav.).



1.6 pav. AERORail modelis (Li et al., 2023)
Fig. 1.6. AERORail model (Li et al., 2023)



1.7 pav. Bandomasis AERORail modelis (Li et al., 2023)
Fig 1.7. Test of AERORail model (Li et al., 2023)

Suprojektuoti iš anksto įtemptą styginę konstrukciją esant racionaliems komponuojamiems parametrams yra labai sudėtingas inžinerinis uždavinys, kadangi konstrukcijos elgsena yra geometriškai netiesinė ir būtina įvertinti ne tik apkrovos pridėjimo vietą ar pobūdį, tačiau ir apkrovimo seką. Tikslios inžinerinės metodikos tokių konstrukcijų įrašoms ir poslinkiams apskaičiuoti – nėra. Tokių konstrukcijų analizei labai padeda šiuolaikinės baigtinių elementų metodų taikymu paremtos kompiuterinės programos, kurios leidžia simuliuoti, kaip apkrauta konstrukcija deformuojasi, kaip kinta įrašos joje. Visgi, norint tinkamai parinkti pradinius konstrukcijos parametrus, tam padeda inžinerinės metodikos, leidžiančios apskaičiuoti konstrukcijos įrašas ir poslinkius iš pagrindinių jos geometrinių ir mechaninių parametrų. Taip pat inžinerinė metodika supaprastina atvirkštinį uždavinį, kai pagal konstrukcijos poslinkių ar įrašų apribojimus gali būti parenkami konstrukcijos elementų skerspjūviai.

1.2. Vienajuosčių ir styginių tiltų analitiniai skaičiavimo metodai

Vienajuosčiai pėsčiųjų tiltai gali būti projektuojami ir skaičiuojami kaip lankstūs arba baigtinio lenkiamojo standumo lynai. Atlikta daug tyrimų ir pateikta įvairių metodikų kabamojo lyno ir jo sistemoms analizuoti bei skaičiuoti.

Lynas ir styga gali būti analizuojami taikant skaitinius skaičiavimo metodus (Crusells-Girona et al., 2017; Battini, 2018; Foti et al., 2017; Niero et al., 2024; Wei et al., 2024; Yang et al., 2024), matematinės analizės metodus (An et al., 2016; Beghini et al., 2013; Hui et al., 2018; Kiisa et al., 2012; Shah et al., 2024; Sun et al., 2022; Tian et al., 2023; Zhang et al., 2022, 2024; Zhao et al., 2013), eksperimentinius metodus (Arnautov et al., 2016; Chen et al., 2015; Dederichs et al., 2024; Gu et al., 2021; Li et al., 2024) ar taikant klasikinius matematinius ir fizikiniais modeliais paremtus skaičiavimus (Bacci et al., 2024; Bleicher et al., 2011; Foti & Martinelli, 2016; Grigorjeva et al., 2010; Juozapaitis et al., 2021; Madrazo-Aguirre et al., 2015; Strasky, 2011; Moskalev, 1980). Apžvalgoje yra pristatomi klasikiniai skaičiavimo metodai, kurie leidžia gauti tiesioginius analitinius sprendinius stygos ir lyno poslinkiams bei įrašoms apskaičiuoti, kadangi šie metodai supaprastinta analizės ir projektavimo uždavinius. Čia būtina paminėti ir skaitinį baigtinių elementų metodą, kadangi dažniausiai jis naudojamas kartu su analitiniais metodais (Bendalla et al., 2023; Chai et al., 2024; Chen et al., 2010; de Menezes et al., 2023; Impollonia et al., 2011; Kmet et al., 2019; Ménard et al., 2023; Mozos & Aparicio, 2011; Sandovič & Juozapaitis, 2012; Salehi Ahmad Abad et al., 2013; Srimontriphakdi et al., 2023; Wu & Wei, 2019; Zhu et al., 2021). BEM (baigtinių elementų metodas) leidžia spręsti itin sudėtingus uždavinius ir analizuoti konstrukcijos įtempių ir deformacijų būseną kompleksiskai.

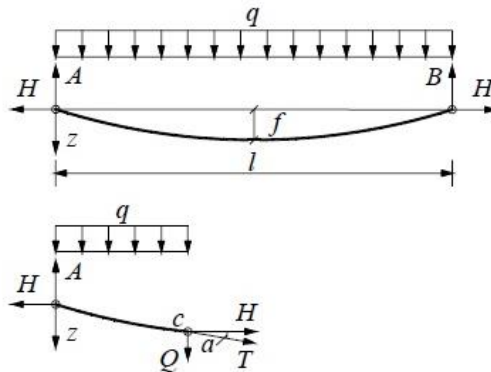
Absoliučiai lankstaus lyno analitinis skaičiavimas

Skaičiuojant vienajuostes tilto konstrukcijas priimama prielaida, kad pagrindinis laikantysis elementas yra visiškai lankstus, t. y. jo lenkiamasis standis $EI = 0$, o visa konstrukcijos elgsena yra geometriškai netiesinė.

1.8 pav. pateikta lankstaus lyno skaičiuojamoji schema. Lyno atramos yra viename lygyje, o, neatsižvelgiant į lyno lenkiamąjį standumą, jo lenkimo momentą taške c prilyginus nuliui, gaunama elemente veikianti skėtimo jėga H (Moskalev, 1980).

$$H = \frac{ql^2}{8f}, \quad (1.1)$$

čia q – konstrukciją veikianti apkrova; l – tarpatramio ilgis; f – pradinis lyno įsvyris.



1.8 pav. Lankstaus lyno skaičiuojamoji schema, kai atramos viename lygyje (Moskalev, 1980)

Fig. 1.8. Calculation scheme of a flexible cable when the supports are at one level (Moskalev, 1980)

Veikiant išorinei apkrovai lynas pailgėja dydžiu Δs , o lyno ilgį po deformacijos galima užrašyti taip (Moskalev, 1980).

$$s + \Delta s = \int_0^{l-\Delta l} \sqrt{1 + \frac{Q^2}{H^2}} dx, \quad (1.2)$$

čia s – pradinis lyno ilgis.

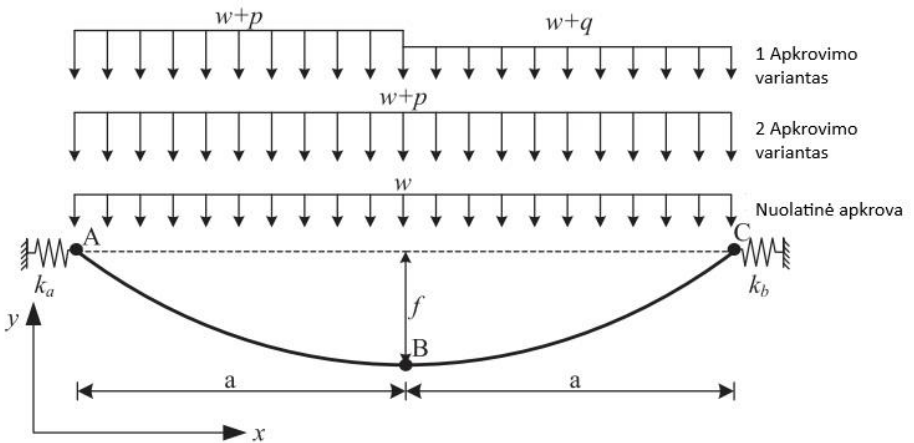
Apytikslis lyno vidurinio taško poslinkis apskaičiuojamas (Moskalev, 1980):

$$\Delta f_{el.lyn.} \cong \frac{3}{128} \cdot \frac{g_{lyn} \cdot L^4}{E_{lyn} \cdot A_{lyn} \cdot f_0^2} \tag{1.3}$$

čia $\Delta f_{el.lyn.}$ – lyno vertikalus poslinkis tarpatramio viduryje; g_{lyn} – apkrova, kurią perima lynas; L – tarpatramio ilgis; E_{lyn} – lyno tamprumo modululis; A_{lyn} – lyno skerspjūvio plotas; f_0 – lyno pradinis išsvyris.

Pateiktos metodikos privalumas, kad poslinkio ir įrašos apskaičiavimas yra labai paprastas, tuo pačiu labai lengva apskaičiuoti visus skaičiuojamuosius parametrus. Visgi ši metodika įvertina tik simetrinį apkrovimą bei yra apytikslė. Asimetrinio apkrovimo sukeltiems kinematiniams poslinkiams skaičiuoti pasitelkiamos kitos metodikos (Juozapaitis & Norkus, 2004).

Taip pat literatūroje yra pristatoma ir analitinė lyno poslinkių ir įrašų skaičiavimo metodika, įvertinanti asimetrinį poveikį (Chen et al., 2014). 1.9 pav. pateikta tokios metodikos skaičiavimo schema.



1.9 pav. Lyno skaičiuojamoji schema, kai atramos yra viename lygyje, su trimis apkrovimo variantais (Chen et al., 2014)

Fig. 1.9. Calculation scheme of a rigid cable when the supports are at one level with three loading variants (Chen et al., 2014)

Lygtis pirmajam apkrovimo variantui aprašoma taip (1.4 lygis):

$$a \cdot \left[1 + \frac{2}{3} \left(\frac{f_1}{a} \right)^2 \right] - \frac{(w+p)a^2}{EA} \left(\frac{a}{2f_1} + \frac{2f_1}{3a} \right) = a \cdot \left[1 + \frac{2}{3} \left(\frac{f}{a} \right)^2 \right] - \frac{wa^2}{EA} \left(\frac{a}{2f} + \frac{2f}{3a} \right), \tag{1.4}$$

čia p, q, w – kintamoji ir nuolatinės apkrovos; EA – lyno ašinis standis; a – atstumas nuo atramos iki viduriniojo tarpatramio pjūvio; f – pradinis lyno įsvyris.

Darant prielaidą, kad sistema yra pusiausvyra, kintamuosius ir nežinomuosius perkėlus į vieną pusę ir sutraukus narius, gauname kubinę lygtį (1.5):

$$\left(\frac{f_1}{a}\right)^3 - \frac{(w+p)a}{EA} \left(\frac{f_1}{a}\right)^2 + \left[\frac{wa}{EA} \left(\frac{f}{a} + \frac{3a}{4f}\right) - \left(\frac{f}{a}\right)^2\right] \left(\frac{f_1}{a}\right) - \frac{3(w+p)a}{4EA} = 0. \quad (1.5)$$

Antrajam apkrovimo variantui aprašoma lygtis (1.6):

$$\frac{1}{3} \cdot \frac{16w^2 + 16wp + 16wq + 6pq + 5p^2 + 5q^2}{a(p+q+2w)^2} f_2^2 - \frac{1}{6} \cdot \frac{(16w^2 + 16wp + 16wq + 6pq + 5p^2 + 5q^2)a}{EA(p+q+2w)} f_2 - \frac{(p+q+2w)a^3}{2EAf_2} = \frac{4a}{3} \left(\frac{f}{a}\right)^2 - \frac{2wa^2}{EA} \left(\frac{a}{2f} + \frac{2f}{3a}\right). \quad (1.6)$$

Sutraukus visus kintamuosius ir konstantas į vieną pusę, gaunama lygtis:

$$\frac{1}{3} \cdot \frac{16w^2 + 16wp + 16wq + 6pq + 5p^2 + 5q^2}{a(p+q+2w)^2} f_2^2 - \frac{1}{6} \cdot \frac{(16w^2 + 16wp + 16wq + 6pq + 5p^2 + 5q^2)a}{EA(p+q+2w)} f_2 - \frac{(p+q+2w)a^3}{2EAf_2} - \frac{4a}{3} \left(\frac{f}{a}\right)^2 + \frac{2wa^2}{EA} \left(\frac{a}{2f} + \frac{2f}{3a}\right) = 0. \quad (1.6a)$$

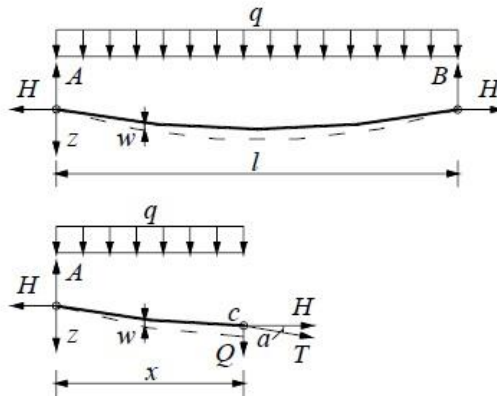
Pagal 1.5 ir 1.6 lygtis gali būti apskaičiuojamas poslinkis tarpatramio viduriniame pjūvyje (1.9 pav., taškas B).

Šios skaičiavimo metodikos pagrindinis privalumas, palyginti su kitomis pateiktomis lyno skaičiavimo metodikomis, kad metodika įvertina tiek simetrinį, tiek asimetrinį apkrovimą. Visgi, metodikos trūkumas, kad ji iškarto pateikia suminių poslinkių sprendinį, tačiau nėra išskiriami kinematiniai poslinkiai, kurių pagal šią pateiktą metodiką nepavyktų atskirai išanalizuoti.

Standaus lyno analitinis skaičiavimas

Standus lynas – tai baigtinio lenkiamojo standumo elementas, kurio forma atitinka kabančio lyno (dažniausiai parabolės) formą. Toks lynas vadinamas apversta arka. Nuo arkinės konstrukcijos jis skiriasi tuo, kad lyne išorinės apkrovos sukelia tempimo įtempius.

Kai baigtinio lenkiamojo standumo lyno atramos yra viename lygyje, dėl veikiančių apkrovų ir savojo svorio lynas deformuosis ir įgis vertikalų poslinkį w (1.10 pav.).



1.10 pav. Standaus lyno skaičiuojamoji schema, kai atramos viename lygyje (Moskalev, 1980)

Fig. 1.10. Calculation scheme of a rigid cable when the supports are at one level (Moskalev, 1980)

Vertikalios standaus lyno atraminės reakcijos A ir B yra lygios analogiškai apkrautoms ir atremtoms sijos reakcijoms ir apskaičiuojamos pagal formules:

$$A = \frac{\int_0^l q \cdot (l - x) \cdot dx}{l}; \quad (1.7)$$

$$B = \frac{\int_0^l q \cdot x \cdot dx}{l}, \quad (1.8)$$

čia x – apkrautos dalies ilgis.

Suprojektavus visas jėgas į x ašį gaunama konstrukcijos skėtimo jėga H , kaip ir absoliučiai lanksčiame lyne, yra pastovi per visą tilto ilgį ir apskaičiuojama pagal formulę:

$$H(x) = \frac{M(x) - m(x)}{z + w}, \quad (1.9)$$

čia $M(x)$ – išorinės apkrovos sukeltas lenkimo momentas, kuris lygus lenkimo momentui analogiškai apkrautoje dvitramėje sijoje, $M = Ax - \int_0^x qx dx$; $m(x)$ – vidinių jėgų sukeltas lenkimo momentas; w – vertikalus apkrautos konstrukcijos poslinkis.

Vidinių jėgų sukeltas lenkimo momentas apskaičiuojamas remiantis tiesaus strypo lenkimo teorija:

$$m = -EI \cdot w'', \quad (1.10)$$

čia EI – lenkiamasis lyno standis; w'' – antroji įsvyrio išvestinė.

Žemiau pateiktos lyno ilgio po deformacijos pusiausvyros lygtis ir laikančiose juostose atsirandančios skėtimo jėgos (Moskalev, 1980):

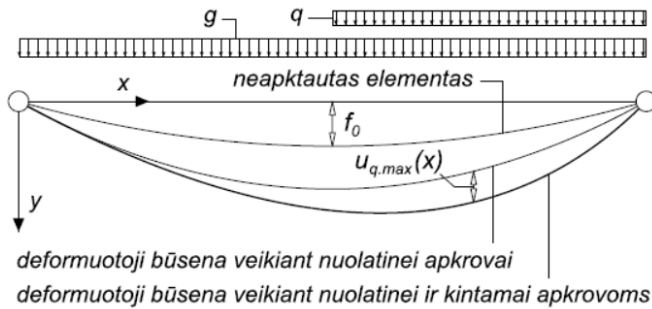
$$S + \Delta S = \int_0^{l-\Delta l} \sqrt{1 + \frac{(Q + EI \cdot w'')^2}{H^2}} dx; \quad (1.11)$$

$$H = \sqrt{\frac{\int_0^{l-\Delta l} (Q + EI w'')^2 dx}{2(S + \Delta S - l + \Delta l)}}. \quad (1.12)$$

Apkrovus tiltą išorine apkrova, šis deformuojasi pagal standžiam lyne atsirandančią lenkimo momentų diagramą. Kuo lyno poslinkių pasiskirstymas bus panašesnis į lenkimo momentų diagramą – tuo laikančiąjame elemente atsiras mažesni poslinkiai.

Pagal aptartas analitines išraiškas galima apskaičiuoti teoriškai absoliučiai lankstaus ir baigtinio lenkiamojo standumo lynų pailgėjimus, elementų įrąžas bei atramines reakcijas.

Naujesnę ir tikslesnę standaus lyno apskaičiavimo metodiką yra pasiūlę Grigorjeva et al. (2010). Schema pateikta 1.11 pav.



1.11 pav. Standaus lyno skaičiuojamoji schema (Juozapaitis et al., 2021)

Fig. 1.11. Calculation scheme of a rigid cable (Juozapaitis et al., 2021)

Maksimalus vertikalus poslinkis apskaičiuojamas pagal 1.11 formulę:

$$u_q(x) = \Phi\left(\gamma, \frac{x}{l}, (kl)^{-1}, \Omega[kl, kx]\right) \leq u_{q.lim}; \quad (1.13)$$

$$u_{q.max}(x) \leq u_{q.lim}; \quad k = \sqrt{\frac{H}{EI'}} \quad (1.14)$$

čia l – tarpatramis; k – liaunis; EI' – lenkiamasis standis; $u_{q.lim}$ – numatomas ribinis įlinkis; $\gamma = q/g$ – kintamosios ir nuolatinės apkrovų santykis; $\Omega[kl, kx]$ – hiperbolinė funkcija, atsižvelgianti į parametrus skliaustuose.

Norint apskaičiuoti maksimalų galimą poslinkį, reikalinga apskaičiuoti visus reikiamus dėmenis. Visų pirma, apskaičiuojami laikančiojo standaus lyno elemento skerspjūvio parametrai, kai veikia asimetrinė kintamoji apkrova, paskirstyta vienoje tarpatramio pusėje:

$$I_y \geq \frac{1}{156} \cdot \frac{q \cdot l_q^4}{u_{q.lim} \cdot E}; \quad l_q = \frac{l}{2}. \quad (1.15)$$

Racionalus standžialynio elemento skerspjūvio aukštis apskaičiuojamas:

$$h_c = \left(\left(\frac{12 \cdot u_{q.lim}}{5 \cdot l_q^2 \cdot k^2 \cdot \alpha_c^2} \right) + \frac{f_d}{k^2 \cdot E \cdot \alpha_c^2} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{12 \cdot u_{q.lim}}{5 \cdot l_q^2 \cdot k^2 \cdot \alpha_c^2} \quad (1.16)$$

čia f_d – skaičiuotinas medžiagos stipris; α_c – skerspjūvio formos koeficientas.

Minimalus standžialynio elemento skerspjūvio plotas:

$$A \geq \frac{H}{f_d} \cdot \left(1 + \frac{24 \cdot u_{q.lim} \cdot E}{5 \cdot \alpha_c^2 \cdot h_c \cdot k^2 \cdot l_q} \right). \quad (1.17)$$

Didėjant lenkiamajam standumui laikančiajame elemente gali susidaryti gniuždymo įtempiai nes atsiranda lenkimo komponentas.

Kad normaliniai įtempiai skerspjūvyje būtų teigiami (nekiltų gniuždymo įtempių $\sigma > 0$), standaus lyno elementų skerspjūvio aukštis turi tenkinti sąlygą:

$$h_c \leq \frac{M}{2 \cdot H \cdot \alpha_c^2}, \quad (1.18)$$

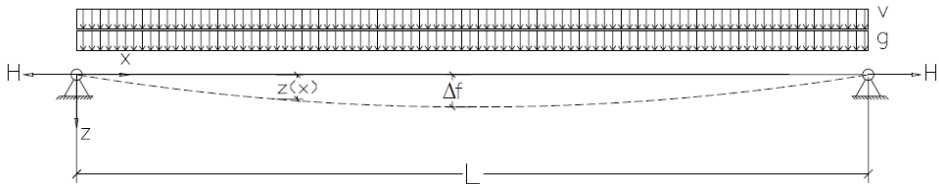
Skerspjūvio formos koeficientas skaičiuojamas taip:

$$\alpha_c = \sqrt{I_y / A \cdot h_c^2}. \quad (1.19)$$

čia M – lenkimo momentas, A – skerspjūvio plotas.

Styginės sistemos įrašų ir poslinkių skaičiavimas, kai styga lanksti, apkrovimas simetris, o styga be papildomo išankstinio įtempimo

Lanksti ir tampri styga gali būti tiek iš anksto įtemptoji, tiek ir be išankstinio įtempimo. Simetriškai apkrautos nuolatine g ir laikinąja (eismo) v simetriškai apkrovomis laikančiosios neįtemptos stygos schema pateikta 1.12 pav.



1.12 pav. Simetriškai apkrautos iš anksto neįtemptos stygos schema. Čia v – kintamoji (eismo) apkrova, g – nuolatinė apkrova

Fig. 1.12. Scheme of a symmetrically loaded string without pre-tensioning.

Here: v – variable (traffic) load and g – constant load

Tokios lanksčios konstrukcijos pusiausvyros sąlygą tarpatriamio vidurio atžvilgiu galima užrašyti taip (Bleicher et al., 2011).

$$H = \frac{M(x)}{\Delta f}, \quad (1.20)$$

čia

$$M(x) = \frac{(g + v)l^2}{8} \left(\frac{4x}{l} + \frac{4x^2}{l^2} \right),$$

H – stygos tempimo jėga; Δf – tamprusis stygos poslinkis tarpatramio viduryje; g – nuolatinė apkrova; v – kintamoji (eismo) apkrova; l – tarpatramio ilgis; x – horizontalios ašies koordinatė.

Iš (1.20) lygties matyti, kad turime du tarpusavyje susietus nežinomuosius (H ir Δf) ir jiems nustatyti nepakanka (kaip ir visoms kabamosioms konstrukcijoms) vien statikos pusiausvyros lygčių. Reikalinga panaudoti deformacijų darnos lytį:

$$\Delta s_{el} = \Delta s_g, \quad (1.21)$$

čia $\Delta s_{el} = \frac{HL}{EA}$ – tamprusis stygos pailgėjimas; $\Delta s_{el} = (s_1 - s_0)$ – geometrinis stygos pailgėjimas; s_1 – stygos ilgis po deformavimo; s_0 – stygos ilgis prieš deformavimą; E – stygos tamprumo modulis; A – stygos skerspjūvio plotas.

Atsižvelgiant į (1.20) lygtį, galima gauti simetriškai apkrautos stygos deformuotos ašies kreivę:

$$z(x) = \Delta f \left(\frac{4x}{l} + \frac{4x^2}{l^2} \right). \quad (1.22)$$

Tada stygos ilgis po deformavimo bus lygus:

$$s_1 = l + \frac{8}{3} \frac{\Delta f^2}{l}. \quad (1.23)$$

Pasitelkę (1.20), (1.21) ir (1.23) lygtis gausime žinomą sprendinį simetriškai apkrautos stygos poslinkiui tarpatramio viduriniame pjūvyje apskaičiuoti (Bleicheret al., 2011):

$$\Delta f = \sqrt[3]{\frac{3(g + v)l^4}{64EA}}. \quad (1.24)$$

Analogiškai iš (1.17), (1.19) ir (1.20) gauname tiesioginį sprendinį tempimo jėgai apskaičiuoti:

$$H = \sqrt[3]{\frac{(g+v)^2 l^2 EA}{24}}. \quad (1.25)$$

Formulės (1.25) išraiška yra identiška pateiktai (Bleicher et al., 2011). Iš formulių (1.24) ir (1.25) matyti, kad galima be iteracijų apskaičiuoti neįtemptos stygos poslinkį tarpatramio viduryje ir jos tempimo jėgą, jei yra žinomos stygos apkrovos, tarpatramio ilgis bei jos ašinis standis. Jei žinomas stygos tamprusis poslinkis Δf , tai galima apskaičiuoti tempimo jėgą ir pasitelkiant (1.20) formulę $H = \frac{(g+v)l^2}{8\Delta f}$. Akivaizdu, kad stygos tempimo jėga priklauso nuo poslinkio reikšmių ir bus ženkliai didesnė nei analogiškų parametrų kabamojo lyno, kuris turi pradinį įsvyrį.

Styginės sistemos įrašų ir poslinkių skaičiavimas, kai styga lanksti, apkrovimas simetrinis, styga iš anksto įtempta

Styga gali būti papildomai iš anksto įtempta, taip sumažinant jos poslinkius. Išankstinio įtempimo jėgos reikšmės parenkamos pagal eksploatacinius reikalavimus bei veikiančias apkrovas. Laikoma, kad styga gali būti iš anksto įtempta prieš įrengiant nuolatinę apkrovą. Tokios iš anksto įtemptos stygos poslinkiai tarpatramio viduryje apskaičiuojami analogiškai neįtemptai stygai taikant (1.17–1.21) formules. Šiuo atveju tamprusis pailgėjimas apskaičiuojamas $\Delta s_{el} = \frac{(H_{pr}-N_0)l}{EA}$, kur N_0 – išankstinio įtempimo jėga. Tada galima gauti išraišką iš anksto įtemptos stygos poslinkiui apskaičiuoti (Beivydas et al., 2023):

$$\Delta f_{pr} = \sqrt[3]{\frac{3 p l^4 (1-n)}{64 EA}}, \quad (1.23)$$

čia:

$$n = \frac{N_0}{H_{pr}}$$

n – išankstinės įtempimo jėgos ir tempimo jėgos santykis; N_0 – išankstinio įtempimo jėga; H_{pr} – tempimo jėga po apkrovimo.

Analogiškai galima gauti formulę iš anksto įtemptos stygos galutinei tempimo jėgai apskaičiuoti (Beivydas et al., 2023):

$$H_{pr} = \sqrt[3]{\frac{p^2 l^2 EA}{24 (1-n)}}. \quad (1.24)$$

Būtina pastebėti, kad (1.23) ir (1.24) formulės yra analogiškos neįtemptos stygos formulėms poslinkiui bei tempimo jėgai apskaičiuoti. Analizuojant (1.23) ir (1.24) formules matyti, kad išankstinis įtempimas mažina tamprųjį stygos poslinkį, bet tuo pačiu didina tempimo jėgą. Būtina pažymėti, kad santykio n reikšmės turėtų būti parenkamos pagal eksploatacinius reikalavimus, kurie gali būti:

- laikančioji geba – tiltas turi atlaikyti visas statines ir dinamines apkrovas (transporto, pėsčiųjų, vėjo, sniego ir kt.);
- ilgaamžiškumas – konstrukcija turi būti atspari korozijai, atmosferos poveikiui, vandeniui, druskoms, šalčiui ir pan.;
- naudojimo patogumas ir saugumas – turi būti užtikrintas saugus eismas – tinkama važiuojamosios dalies plotis, turėklai, šaligatviai ir pan.;
- eksploatacinis patikimumas ir priežiūra – tiltas turi būti suprojektuotas taip, kad būtų lengva: apžiūrėti konstrukcinius elementus, atlikti priežiūrą ir remontą;
- pritaikymas klimatinėms sąlygoms – atsparumas temperatūros svyravimams (šiluminis plėtimasis, susitraukimas);
- ekonominis efektyvumas – eksploatacijos kaštai (priežiūra, remontai) turi būti pagrįsti. Turi būti optimizuojami konstrukciniai sprendimai, kad būtų pasiektas geras kainos ir kokybės santykis.

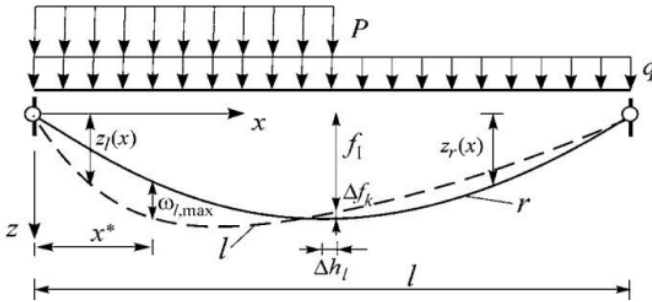
1.3. Kinematiniai kabamųjų tiltų lynų poslinkiai ir jų stabilizavimas

Asimetriškai apkrautame kabamajame lyne atsiranda ne tiek tamprieji, tačiau ir kinematiniai poslinkiai. Tyrimais yra įrodyta, kad kinematinų poslinkių dydis priklauso ne tik nuo apkrauto elemento geometrinių ir fizinių parametru, tačiau ir nuo kintamosios ir nuolatinės apkrovos dydžio. Didėjant kintamosios ir nuolatinės apkrovos santykiui, didėja apkrauto lino kinematiniai poslinkiai (Juozapaitis et al., 2010; Juozapaitis & Norkus, 2004). Apkrauto lino schema matoma 1.13 pav.

Kinematiniai poslinkiai lyne nesukelia įtempių, tačiau daro itin neigiamą poveikį bendrai konstrukcijos deformacijai, kuri tiltuose yra ribojama dėl eksploatacinių reikalavimų.

Tokių poslinkių problema gali būti sprendžiama pridėjus masės balastą ant lino, tačiau tai didina konstrukcijos nuosavą svorį, kadangi tokiu būdu yra mažinamas kintamosios ir nuolatinės apkrovos santykis.

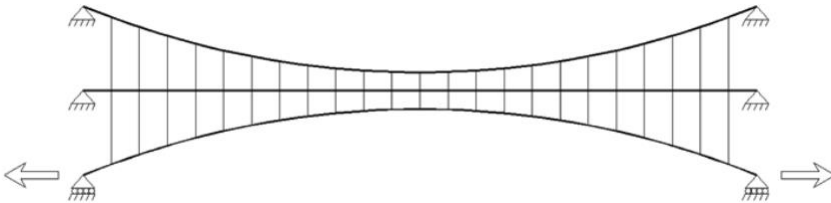
Kinematiniai poslinkiai taip pat gali būt mažinami projektuojant lyną iš baigtinio lenkiamojo standumo elemento (Juozapaitis & Norkus, 2004).



1.13 pav. Asimetriškai apkrauto lyno deformavimosi schema
(Juozapaitis & Norkus, 2004)

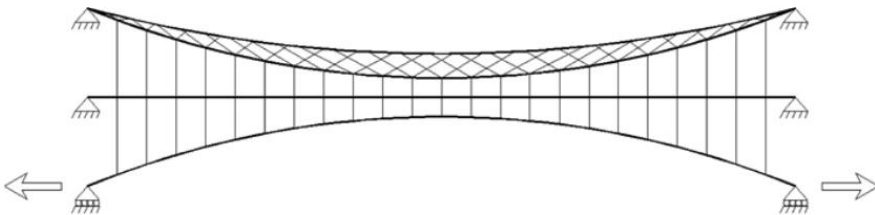
Fig. 1.13. Scheme of the deformation of an asymmetrically loaded cable
(Juozapaitis & Norkus, 2004)

Visgi daug efektyvesnis būdas yra lyną, kuris turi kinematinčius poslinkius, kombinuoti su kitomis konstrukcinėmis sistemomis, kurios neturi arba turi daug mažesnius kinematinčius poslinkius (1.14 ir 1.15 pav.) (Bai et al., 2024; Goremikins et al., 2012; Hong et al., 2010; Kang et al., 2013; Pan et al., 2018; Phocas et al., 2019; Tanaka et al., 2002). Kinematinčius poslinkius tokiose konstrukcijose mažina ir lynų išankstinis įtempimas.



1.14 pav. Iš anksto įtemptas lynas su palaikomaisiais lynais (Goremikins et al., 2012)

Fig. 1.14. Pretensioned cable with support cables (Goremikins et al., 2012)



1.15 pav. Iš anksto įtemptas lynas su palaikomaisiais lynais ir papildomu tinkleliu
(Goremikins et al., 2012)

Fig. 1.15. Pretensioned cable with support cables and additional netting
(Goremikins et al., 2012)

Toks komponavimo metodas leidžia suvaržyti bendruosius poslinkius, kadangi vidurinis elementas neturi kinematinės kilmės poslinkių, o iš anksto įtempti apatinis ir viršutinis kabamieji elementai suteikia papildomą standumą konstrukcijai (1.14 pav.). Pridedant ir papildomą tinklelį (1.15 pav.) šis dar labiau mažina kinematinius konstrukcijos poslinkius, kadangi įstriži tinklelio elementai dirba tarsi ryšiai, kurie priešinasi deformacijai visomis kryptimis. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Atlikus kabamųjų konstrukcijų ir jų skaičiavimo metodų apžvalgą, suformuluotos šios išvados:

1. Iš anksto įtemptos kabamosios konstrukcijos iš plieninių lynų yra vienos efektyviausių konstrukcijų, siekiant perdengti didelius tarpatramius.
2. Siekiant suvaržyti kinematinius kabamųjų konstrukcijų poslinkius, lyną galima konstruoti kartu su elementais, kurie priešinasi kinematiniams poslinkiams. Šie elementai sukuria papildomą standumą konstrukcijai bei atstoja pagrindinę kabamojo tilto siją, kuria vyksta eismas.
3. Projektuojant laikantį kabamąjį lyną kaip pagrindinį laikantį elementą, tilto pritaikymo galimybės labai sumažėja dėl lyno kreivos formos, kadangi tokia forma dažniausiai galime projektuoti tik pėsčiųjų tiltus, o kito tipo transportui tokia tilto forma netenkina eksploatacinių reikalavimų.
4. Stygų inžinerinė metodika poslinkiams ir įrašoms skaičiuoti yra apribota ir neapima atvejo, kai apkrovimas yra asimetris.

Atlikus kabamųjų konstrukcijų ir jų skaičiavimo metodų apžvalgą, suformuluoti šie disertacijos uždaviniai:

1. Sukurti naują styginę kabamąją konstrukciją ir pristatyti jos komponuojamuosius parametrus.
2. Parengti stygos inžinerinę metodiką poslinkiams ir įrašoms skaičiuoti, veikiant asimetrinėms apkrovoms.
3. Parengti styginės kabamosios konstrukcijos inžinerinę metodiką poslinkiams ir įrašoms apskaičiuoti.
4. Atlikti styginės kabamosios konstrukcijos skaitinį tyrimą konstrukcijos elgsenai išanalizuoti bei gautiems analitiniams rezultatams pagrįsti.
5. Atlikti styginės kabamosios konstrukcijos eksperimentinį tyrimą konstrukcijos elgsenai išanalizuoti bei gautiems skaitiniams rezultatams pagrįsti.
6. Pateikti kombinuotos styginės kabamosios konstrukcijos komponavimo ir projektavimo rekomendacijas.

Styginė kabamoji konstrukcija ir jos poslinkių ir įrašų skaičiavimas

Šiame skyriuje pristatoma nauja styginė kabamoji konstrukcija. Pateikiami naujos konstrukcijos pagrindiniai geometriniai bei mechaniniai parametrai ir komponavimo principai. Taip pat pristatoma nauja styginės ir styginės kabamosios konstrukcijos poslinkių ir įtempių inžinerinė apskaičiavimo metodika. Gautiems rezultatams pagrįsti yra atliekami skaitiniai konstrukcijos tyrimai, taikant baigtinių elementų metodą ir geometriškai netiesinį skaičiavimą. Tyrimo metu buvo analizuojama konstrukcijos poslinkių ir įrašų priklausomybė nuo konstrukcijos geometriniais ir mechaniniais parametrais, apkrovos pridėjimo vietos (simetrinė arba asimetrinė apkrova) ir pridėjimo būdo (koncentruotas arba išskirstytas apkrovimas). Skyriuje pristatoma medžiaga publikuota trijuose autoriaus straipsniuose (Beivydas, 2018, 2019; Beivydas et al., 2023)

2.1. Styginė kabamoji konstrukcija ir jos komponavimas

Styginė kabamoji sistema – tai vienajuosčio ir styginio tiltų derinys, kai šios abi konstrukcinės schemos sujungiamos į bendrą sistemą. Ši konstrukcija yra panaši

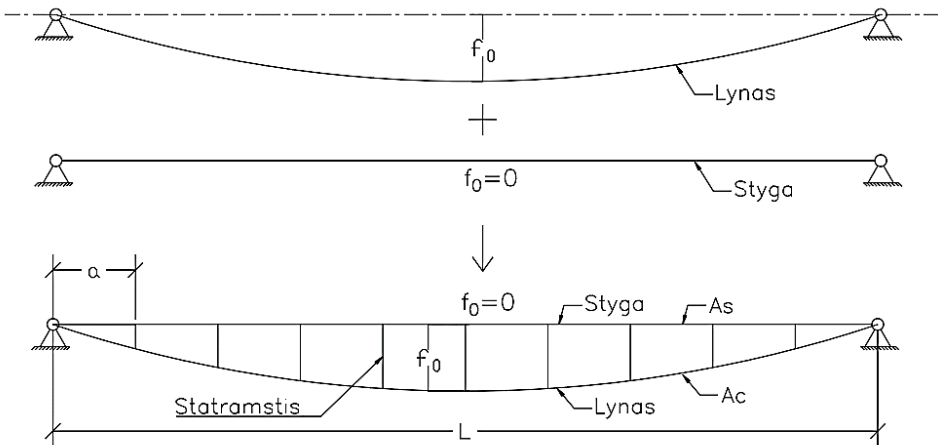
į dvijuostę konstrukciją, kai tiek apatinis, tiek viršutiniai lynai turi pradinis išsvyrius (Sandovič & Juozapaitis, 2014), tačiau vietoj lyno su išsvyriu, viršutinėje juostoje naudojama styga.

Dvijuostė konstrukcija yra gerokai pranašesnė už vienajuostę. Dvijuostės konstrukcijos skėtimo jėga yra daugiau nei du kartus mažesnė už vienajuostės, o poslinkis viduriniame taške – tris kartus (Sandovič & Juozapaitis, 2014). Visgi ši konstrukcija, kaip ir dauguma kabamųjų konstrukcijų, yra jautri asimetriniams poveikiams, kas sukelia didelius kinematinis poslinkius.

Kinematinių poslinkių suvaržymui yra panaudojamas viršutinis lynas be pradinio išsvyrio – styga. Styga, kitaip nei pradinį išsvyrį turintis lynas, nėra jautri asimetrinei apkrovai, nes joje neatsiranda kinematinų poslinkių. Jai suteikiamas išankstinis įtempimas dar labiau suvaržo asimetrinės apkrovos sukeltus poslinkius. Taip pat vienas iš tokios konstrukcijos privalumų – galimybė konstrukciją pritaikyti ne tik pėsčiųjų, bet ir kitokio transporto tiltams, kadangi styga sudaro tiesią liniją.

Konstruojant styginę kabamąją konstrukciją, palaikantysis lynas su styga per statramsčius sujungiamas į bendrą konstrukcinę sistemą (2.1 pav.). Ši konstrukcinė sistema apjungia savyje teigiamas abiejų sudaromųjų elementų (stygos ir lyno) savybes ir suteikia naujai tilto sistemai neabejotinų privalumų, ypač veikiant asimetrinei apkrovai.

Pagrindiniai parametrai, lemiantys styginės kabamosios konstrukcijos elgseną ir apibrėžiantys konstrukcijos geometriją, yra pradinis apatinio lyno išsvyris f_0 , ašiniai stygos $A_S E_S$ ir apatinio lyno $A_C E_C$ standžiai bei jų santykis $n = \frac{A_S E_S}{A_C E_C}$, taip pat atstumas tarp statramsčių a ir tarpatramio ilgis L .



2.1 pav. Styginės kabamosios konstrukcijos komponavimas
Fig. 2.1. Composition of the string cable suspension structure

Keičiant skirtingus konstrukcijos parametrus, keičiasi ir konstrukcijos elgsena. Apatinio lyno išsvyris turi didelę įtaką kinematiniams poslinkiams, dėl ko didėja ir bendrieji poslinkiai. Stygos ir apatinio lyno ašinių standžių santykis lemia stygos ir apatinio lyno pailgėjimus, o nuo to priklauso, kokia apkrovos dalis tenka stygai arba apatiniam lynui. Atstumas tarp statramsčių turi didelę įtaką, jei styga yra apkraunama išskirstyta apkrova, dėl ko atsiranda vietiniai įlinkiai, o tai sukelia ir papildomus įtempius stygoje, kas taip pat daro įtaką konstrukcijos poslinkiams.

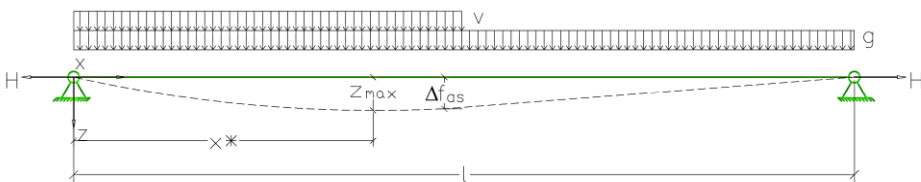
Antro skyriaus 2.2, 2.3, 2.4 poskyriuose yra pateikiami styginės kabamosios konstrukcijos skaičiavimai ir analizė, atskleidžianti visų minėtų parametrų įtaką konstrukcijos elgsenai. 2.2 ir 2.3 poskyriuose yra pateikiamos inžinerinės apskaičiavimo metodikos poslinkiams ir įrąžoms skaičiuoti, o 2.4 skyriuje – skaitinis tyrimas, taikant baigtinių elementų apskaičiavimo metodą.

2.2. Tilto stygos skaičiavimas

Stygos analitinio apskaičiavimo metodika parengta, kai apkrova paskirstoma per visą stygos tarpatramį (metodika, kai apkrova simetrinė, jau žinoma, žr. 1.2 poskyrį) ir kai apkrova paskirstoma pusėje tarpatramio (asimetrinė (2.2 pav.)). Kadangi metodikos, kai apkrovimas yra simetrinis, yra žinomos, šiame skyriuje pristatomos tik naujos poslinkių ir įrąžų skaičiavimo metodikos, kai apkrovimas yra asimetrinis. Visais atvejais buvo vertinamas geometrinis netiesiškumas.

Lanksti styga be papildomo išankstinio įtempimo. Asimetrinis apkrovimas

Žinoma, kad asimetriškai apkrautame kabamajame lyne atsiranda kinematinės kilmės poslinkiai, kurie ne retai viršija tampruosius poslinkius (Juozapaitis ir Norkus, 2004), tuo tarpu stygoje, tokie poslinkiai neatsiranda. Nagrinėjama styga, veikiamas asimetrinės kintamosios (eismo) ir simetrinės nuolatinės apkrovos (2.2 pav.).



2.2 Pav. Asimetriškai apkrautos neįtemptos stygos skaičiuojamoji schema

Fig. 2.2. Scheme of an asymmetrically loaded unstressed string

Būtina pažymėti, kad lanksti styga, kaip kabamasis elementas, yra suformuotas be pradinio išsvyrio ($f_0 = 0$), todėl, palyginti su kabamoju lynu, veikiant asimetrinei apkrovai, joje neatsiranda kinematinių poslinkių. Taip apkrautoje stygoje veiks tik tamprieji poslinkiai, o jos deformuotos ašies kreivė apibūdinama dviejų tampriųjų poslinkių kreivių suma (analogiškai veikiantiems momentams) (Beivvydas et al., 2023):

$$z_l(x) = \frac{\Delta f_{as}}{1 + 0,5 \gamma} \left[\left(\frac{4x}{l} - \frac{4x^2}{l^2} \right) + \frac{\gamma}{2} \left(\frac{6x}{l} - \frac{6x^2}{l^2} \right) \right], \quad (2.1)$$

kai $0 \leq x \leq \frac{l}{2}$;

$$z_r(x) = \frac{\Delta f_{as}}{1 + 0,5 \gamma} \left[\left(\frac{4x}{l} - \frac{4x^2}{l^2} \right) + \frac{\gamma}{2} \left(\frac{2x}{l} - 2 \right) \right], \quad (2.2)$$

kai $\frac{l}{2} \leq x \leq l$,

čia $z_l(x)$ – apkrautosios (kairios) asimetrine apkrova stygos dalies poslinkiai; $z_r(x)$ – apkrautosios tik simetrine apkrova stygos dalies (kairios) poslinkiai; $\gamma = \frac{v}{g}$ – laikinosios ir nuolatinės apkrovų santykis; Δf_{as} – asimetriškai apkrautos stygos poslinkis tarpatramio viduryje.

Kaip matyti iš (2.1) ir (2.2) lygčių, kairiosios apkrautosios asimetrine apkrova dalies deformuotos ašies kreivę sudaro dviejų kvadratinų parabolų suma, o dešinėsios – kvadratinės parabolės ir tiesės suma.

Pasitelkdami, kaip ir simetrinio apkrovimo atveju, statikos pusiausvyros lygtis gausime išraišką tempimo jėgai apskaičiuoti:

$$H_{as} = \frac{M_{as}(x)}{\Delta f_{as}} = \frac{\frac{g l^2}{8} + \frac{v l^2}{16}}{\Delta f_{as}} = \frac{g l^2}{8 \Delta f_{as}} \left(1 + \frac{\gamma}{2} \right). \quad (2.3)$$

Asimetriškai apkrautos stygos bendras ilgis po deformavimo apskaičiuojamas pasitelkiant atskirų jos dalių geometrinių ilgių sumą:

$$s_{as} = s_l + s_r = l + \frac{8 \Delta f_{as}^2}{3 l^2} \cdot \frac{\left(1 + \gamma + \frac{5\gamma^2}{16} \right)}{\left(1 + \gamma + \frac{\gamma^2}{4} \right)} \quad (2.4)$$

arba

$$s_{as} = l + \frac{8 \Delta f_{as}^2}{3 l^2} \cdot \Psi \quad (2.4a)$$

$$\text{čia } \Psi = \frac{\left(1 + \gamma + \frac{5\gamma^2}{16}\right)}{\left(1 + \gamma + \frac{\gamma^2}{4}\right)}.$$

Tada, pasitelkiant deformacijų darnos lygtį, asimetriškai apkrautos stygos poslinkis tarpatramio viduryje ir jos tempimo jėga apskaičiuojami taip:

$$\Delta f_{as} = \sqrt[3]{\frac{3 g (1 + 0,5\gamma) l^4}{64 EA \Psi}}, \quad (2.5)$$

$$H_{as} = \sqrt[3]{\frac{g^2 l^2 EA (1 + 0,5 \gamma)^2 \Psi}{24}}. \quad (2.6)$$

Prie vienodų pradinių sąlygų asimetriškai apkrautos stygos poslinkis ir tempimo jėga bus mažesnių reikšmių nei simetriškai apkrautos stygos.

Iš anksto įtempta lanksti styga. Asimetrinis apkrovimas

Esant asimetriniam iš anksto įtemptos stygos apkrovimui, jos poslinkis tarpatramio viduryje, atsižvelgiant į (2.1–2.6) formules, bus lygus:

$$\Delta f_{as,pr} = \sqrt[3]{\frac{3 g (1 + 0,5\gamma) l^4 (1 - n)}{64 EA \Psi}} \quad (2.7)$$

Analogiškai galima gauti formulę tokios stygos tempimo jėgai apskaičiuoti:

$$H_{as,pr} = \sqrt[3]{\frac{g^2 l^2 EA (1 + 0,5 \gamma)^2 \Psi}{24 (1 - n)}}. \quad (2.8)$$

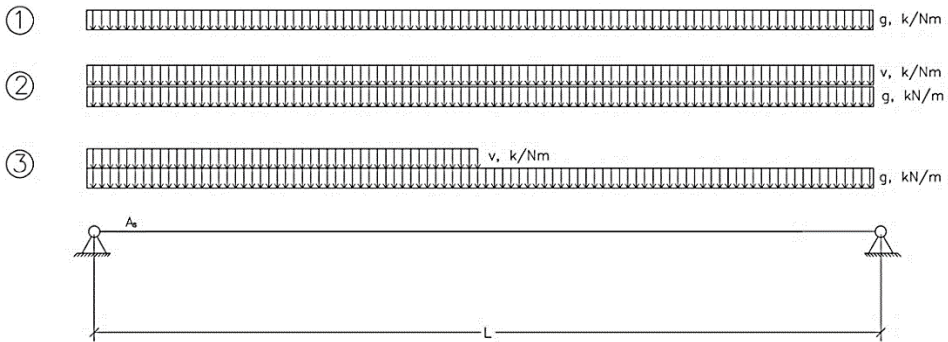
Formulės (2.7) ir (2.8) parodo, kad, kaip ir simetrinio apkrovimo atveju, išankstinis įtempimas mažina stygos poslinkius, bet didina tempimo jėgą.

Skaitinio ir analitinio apskaičiavimo metodų rezultatų sugretinimas

Siekiant nustatyti analitiškai gautų apskaičiavimo formulių tikslumą, buvo atlikta skaitinė tamprios stygos analizė esant simetriniam ir asimetriniam apkrovimui. Konstrukcija buvo sumodeliuota baigtinių elementų apskaičiavimo programa *Autodesk Robot Structural Analysis* (2024 metų versija), kuria buvo atlikti konstrukcijos poslinkių ir įrašų skaičiavimai. Styga buvo modeliuota kaip lankstus, iš

anksto įtemptas *cablė* elementas. Stygos geometriniai parametrai parinkti pagal stygos eksperimentinio modelio matmenis, kurie aprašyti 3 skyriuje.

Nagrinėti 3 pagrindiniai apkrovimo variantai esant skirtingoms stygos išankstinio įtempimo reikšmėms (analogiškai 3 skyriuje aprašytam eksperimentui). Analizės metu apskaičiuoti konstrukcijos poslinkiai ir įrašos tarpatriamiai viduriniajame pjūvyje. Analizės rezultatai, gauti tiek skaitiniu, tiek analitiniu metodu, pateikti 2.1 ir 2.2 lentelėse. Verta pastebėti, kad skirtumas (paklaidos) tarp analitinių ir skaitinių rezultatų nėra didelis, jis neviršija 3 %. Visais atvejais, analitiškai gauti rezultatai yra kiek didesni nei BEM (skaitiškai) gauti rezultatai. 2.3 pav. pateikta stygos apkrovimo schema, o skaitines apkrovų reikšmės pateiktos 2.1–2.4 lentelėse.



2.3 pav. Stygos apkrovimo variantai: 1 – nuolatinė simetrinė apkrova, 2 – kintamoji simetrinė ir nuolatinė apkrovos, 3 – asimetrinė kintamoji apkrova per pusę tarpatriamio

Fig. 2.3. String loading variants: 1 – constant symmetrical load; 2 – variable and constant symmetrical load; 3 – asymmetric variable load at half span

Gauti įtempių bei tempimo jėgų rezultatai pateikti 2.1 ir 2.2 lentelėse, o poslinkių 2.3 ir 2.4 lentelėse, atsižvelgiant į išankstinio stygos įtempimo jėgas bei apkrovimo variantus. Styga buvo apkraunama 5 skirtingais variantais: 2 kartus simetrine apkrova (nuolatinė ir kintamoji apkrova) ir 3 kartus asimetrine kintamąja apkrova.

Lentelėse pateikiami įtempiai ir jėgos, kai išankstinio įtempimo jėga N_0 stygoje lygi 5,25 kN ir 6,625 kN (šios jėgos paimtos pagal eksperimentinio tyrimo metu, kuris aprašytas 3 skyriuje, gautas realias išankstinio įtempimo jėgas). Kairiosiose lentelių stulpeliuose pateikiami apkrovimo variantai, dešiniuosiuose stulpeliuose skaitiškai ir analitiškai gauti rezultatai bei skaitinių ir analitinių rezultatų santykiniai skirtumai, išreikšti procentais.

Stygos išankstinio tempimo jėgos bei apkrovos parinktos pagal atlikto eksperimento metu gautus ir išmatuotus duomenis bei naudotas apkrovas. Detaliau eksperimentinė dalis aptariama 3 skyriuje.

2.1 lentelė. Įtempiai ir tempimo jėgos, kai stygos išankstinio įtempimo jėga $N_0 = 5,25$ kN

Table 2.1. Stresses and tensile forces under the prestressing force of the string $N_0 = 5.25$ kN

Apkrovimo variantas	Apkrova		Analitinis metodas		Skaitinis metodas		Skaitinių ir analitinių rezultatų skirtumas
	g , kN/m	p , kN/m	σ_a , MPa	F_a , kN	σ_s , MPa	F_s , kN	
Simetrinė apkrova	0,17		246,56	6,97	247,35	7,00	0,4 %
Simetrinė apkrova	0,17	0,17	366,45	10,36	361,31	10,23	1,3 %
Asimetrinė apkrova, $\gamma = 1$	0,17	0,17	312,67	8,84	308,42	8,73	1,2 %
Asimetrinė apkrova, $\gamma = 2$	0,17	0,34	373,00	10,54	365,91	10,36	1,7 %
Asimetrinė apkrova, $\gamma = 3$	0,17	0,51	428,61	12,11	419,80	11,88	1,9 %

2.2 lentelė. Įtempiai ir tempimo jėgos, kai stygos išankstinio įtempimo jėga $N_0 = 6,625$ kN

Table 2.2. Stresses and tensile forces under the prestressing force of the string $N_0 = 6.625$ kN

Apkrovimo variantas	Apkrova		Analitinis metodas		Skaitinis metodas		Skaitinių ir analitinių rezultatų skirtumas
	g , kN/m	p , kN/m	σ_a , MPa	g , kN/m	p , kN/m	σ_a , MPa	
Simetrinė apkrova	0,17		256,57	7,25	257,00	7,26	0,1 %
Simetrinė apkrova	0,17	0,17	377,97	10,68	369,34	10,45	2,2 %
Asimetrinė apkrova, $\gamma = 1$	0,17	0,17	323,62	9,15	316,88	8,97	2,0 %
Asimetrinė apkrova, $\gamma = 2$	0,17	0,34	384,59	10,87	373,91	10,58	2,7 %
Asimetrinė apkrova, $\gamma = 3$	0,17	0,51	440,67	12,45	427,52	12,10	2,8 %

2.3 lentelė. Stygos vertikalūs poslinkiai tarpatramio viduryje, kai $N_0 = 5,25$ kN

Table 2.3. Vertical displacements of the string in the middle span when $N_0 = 5.25$ kN

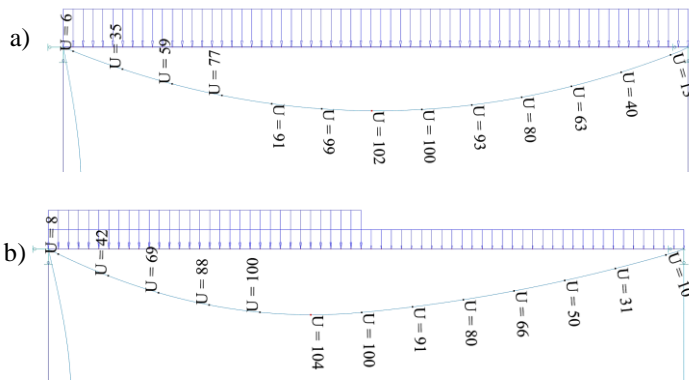
Apkrovimo variantas	Apkrova		Analitinis metodas	Skaitinis metodas	Skaitinių ir analitinių rezultatų skirtumas
	g , kN/m	p , kN/m	Δf , cm		
Simetrinė apkrova	0,17		-76,24	-76,50	0,3 %
Simetrinė apkrova	0,17	0,17	-102,60	-104,53	1,9 %
Asimetrinė apkrova, $\gamma = 1$	0,17	0,17	-90,18	-91,51	1,5 %
Asimetrinė apkrova, $\gamma = 2$	0,17	0,34	-100,80	-102,61	1,8 %
Asimetrinė apkrova, $\gamma = 3$	0,17	0,51	-109,65	-111,68	1,9 %

2.4 lentelė. Stygos vertikalūs poslinkiai tarpatramio viduryje, kai $N_0 = 6,625$ kN

Table 2.4. Vertical displacements of the string in the middle span when $N_0 = 6.625$ kN

Apkrovimo variantas	Apkrova		Analitinis metodas	Skaitinis metodas	Skaitinių ir analitinių rezultatų skirtumas
	g , kN/m	p , kN/m	Δf , cm		
Simetrinė apkrova	0,17		-73,27	-73,51	0,3 %
Simetrinė apkrova	0,17	0,17	-99,47	-102,07	2,6 %
Asimetrinė apkrova, $\gamma = 1$	0,17	0,17	-87,13	-88,86	2,0 %
Asimetrinė apkrova, $\gamma = 2$	0,17	0,34	-97,76	-100,22	2,5 %
Asimetrinė apkrova, $\gamma = 3$	0,17	0,51	-106,65	-109,49	2,7 %

Stygos poslinkių grafikai, esant simetriniam ir asimetriniam apkrovimui, pateikti 2.4 pav. Iš šių grafikų matyti, kad asimetriškai apkrautos stygos (kai $\gamma = 2$) poslinkiai yra apie 1,8 % didesni nei esant simetriniam apkrovimui. Būtina pažymėti, kad asimetriškai apkrautos stygos maksimalus poslinkis yra nedaug nutolęs nuo stygos tarpatramio vidurio. Iš analizinių išraiškų galima nustatyti maksimalaus poslinkio koordinatę (2.3 lygtis). Iš šios išraiškos matyti, kad kuo didesnis apkrovų santykio γ reikšmė, tuo labiau maksimalaus poslinkio vieta / koordinatė tolsta nuo tarpatramio vidurio. Be to, galima nustatyti prie kokios γ reikšmės asimetriškai apkrautos stygos poslinkiai tampa didesni už simetriškai apkrautos stygos poslinkius.



2.4 pav. Poslinkiai gauti skaitiškai: a) simetrinis apkrovimas, kai $N_0 = 6,625$ kN;

b) asimetrinis apkrovimas, kai $N_0 = 6,625$ kN, $\gamma = 2$, čia U – poslinkis mm.

Fig. 2.4. Displacements obtained numerically: a) symmetric loading, when $N_0 = 6.625$ kN and b) asymmetric loading, when $N_0 = 6.625$ kN, $\gamma = 2$, where U – displacement in mm

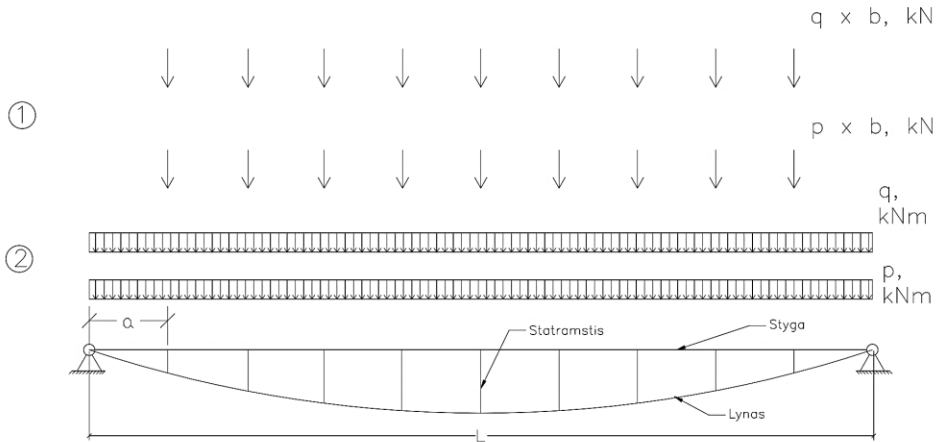
Apibendrinus gautus analizės rezultatus, galima pasakyti, kad skirtumai tarp skaitinių ir analizinių skaičiavimų neviršija 3 %. Todėl galima teigti, kad gautos analizinės stygos apskaičiavimo formulės yra pakankamai tikslios.

2.3. Styginės kabamosios konstrukcijos poslinkių ir įrašų skaičiavimas

Perduodant apkrovą tilto konstrukcijai, ją galime užkrauti į statramsčius arba išskirstyti per laikantį elementą – stygą (2.5 pav.). Kai tilto konstrukcija apkraunama į statramsčius, galima įvesti skersines sijas, kurioms yra perduodama visa išorės apkrova, o skersinės sijos perduoda apkrovą statramsčiams. Norint išvengti papildomų laikančių elementų, apkrovą galime išskirstyti tiesiai ant stygos.

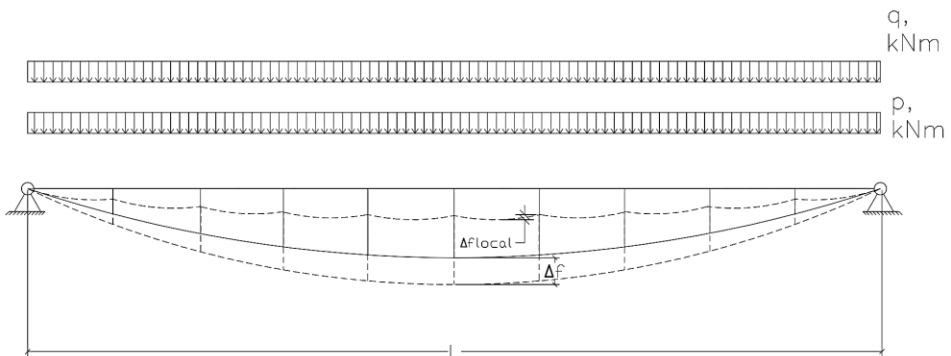
Pagrindinis skirtumas tarp šių apkrovimo variantų, kad išskirsčius apkrovą ant stygos, joje atsiranda papildoma ašinė jėga dėl atsiradusių vietinių įlinkų stygoje tarp statramsčių (2.6 pav.).

Taip pat, skaičiuojant styginės kabamosios konstrukcijos poslinkius ir įrašus, turi būti įvertinamas stygos išankstinis įtempimas bei geometrinis netiesiškumas. Kituose poskyriuose yra pateikiami inžineriniai styginės kabamosios konstrukcijos skaičiavimai, atsižvelgiant į skirtingus apkrovos perdavimo variantus (koncentruotas arba išskirstytas apkrovimas į stygą), skirtingas apkrovos pridėjimo vietas (simetrinis arba asimetrinis apkrovimas), taip pat – kai stygai suteiktas papildomas išankstinis įtempimas.



2.5 pav. Styginės kabamosios konstrukcijos apkrovimo variantai: 1 – apkrovimas koncentruotomis apkrovomis, 2 – apkrovimas išskirstyta apkrova

Fig. 2.5. Structural loading options for string cable suspension structure: 1 – loading with concentrated loads and 2 – loading with distributed load



2.6 pav. Styginės kabamosios konstrukcijos deformavimosi schema, veikiant išskirstytai apkrovai

Fig. 2.6. Deformation scheme of the string cable suspension structure under the distributed load

Visais apskaičiavimo atvejais buvo priimtos tokios pagrindinės prielaidos:

1. Viršutinio ir apatinio lyno vertikalūs poslinkis po apkrovimo ties statramsčiais yra lygus – ši prielaida leidžia sulyginti stygos ir apatinio lyno skaičiavimo lygtis ir taip išvesti vieną bendrą lygtį;

2. Kraštinės atramos yra nepaslankios linijiniams poslinkiams, t. y. laikoma, kad kraštinės atramos visiškai nejuda ir neturi papildomos įtakos konstrukcijos poslinkiams ir įrąžoms;
3. Tiek viršutinis elementas (styga), tiek apatinis elementas (lynas), laikomi absoliučiai lanksčiais elementais ($EI = 0$). Skaičiuojant konstrukciją, vertinama, kad stygoje ir lynė atsiranda tik ašinės tempimo jėgos;
4. Visa konstrukcinė sistema deformuojasi tik tamptariai (medžiagų mechaninės ir geometrinės savybės nekinta, nepriklausomai nuo apkrovos dydžio).

Simetrinis apkrovimas. Koncentruotomis jėgomis į statramsčius. Styga be papildomo išankstinio įtempimo

Žinant stygos ir lyno apskaičiavimo metodikas (žr. 1 skyrių), galima išvesti ir styginės kabamosios konstrukcijos inžinerinę apskaičiavimo metodiką. Kai yra apkraunama tilto viršutinė juosta (styga), per statramsčius apkrova perduodama ir apatiniam lynui.

Laikantis šios prielaidos, pagrindinis uždavinys yra apskaičiuoti, kokią apkrovos dalį perima styga ir kokią dalį perimą lynas.

Yra žinomas stygos vidurinio taško poslinkis (2.6 pav.):

$$\Delta f_s = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot g_s \cdot L^4}{64 \cdot E_s \cdot A_s}}, \quad (2.9)$$

čia Δf_s – stygos vertikalus poslinkis viduriniame taške; g_s – apkrovos dalis, kurią perima styga; L – tilto ilgis; E_s – stygos tamprumo modulis; A_s – stygos skerspjūvio plotas.

Galime apytiksliai apskaičiuoti apatinio lyno poslinkį, taikant žinomą (žr. 1.2 skyrių, 1.3 lygtį) apytikslę išraišką, kai apkrova laikoma tolygiai išskirstyta:

$$\Delta f_c \cong \frac{3}{128} \cdot \frac{g_c \cdot L^4}{E_c \cdot A_c \cdot f_0^2}, \quad (2.10)$$

čia Δf_c – lyno vertikalus poslinkis viduriniame taške, g_c – apkrovos dalis, kurią perima lynas.

Pasitelkdami (2.9) ir (2.10) formules ir taikydami stygos ir lyno poslinkių lygybės sąlygą, gauname:

$$\sqrt[3]{\frac{3 \cdot g_s \cdot L^4}{64 \cdot E_s \cdot A_s}} = \frac{3}{128} \cdot \frac{g_c \cdot L^4}{E_c \cdot A_c \cdot f_0^2} \quad (2.11)$$

Lygtyje turime du nežinomuosius – apkrovą, tenkančią lynui g_c , ir apkrovą, tenkančią stygai g_s .

Žinant, kad styga ir lynas perima bendrą apkrovą g_{total} , galima teigti, kad:

$$g_{total} = g_s + g_c \quad (2.12)$$

Laikantis šios prielaidos, taikomas keitinys:

$$g_s = g_{total} - g_c \quad (2.13)$$

Į (2.11) įrašę (2.13), gauname lygtį:

$$\sqrt[3]{\frac{3 \cdot (g_{total} - g_c) \cdot L^4}{64 \cdot E_s \cdot A_s}} = \frac{3}{128} \cdot \frac{g_c \cdot L^4}{E_c \cdot A_c \cdot f_0^2} \quad (2.14)$$

Padarius tokį keitinį, lygtyje lieka vienas kintamasis g_c – apkrova, kurią perima apatinis lynas. Pakėlus abi puses trečiuoju laipsniu ir pertvarkius, gauname (2.15) lygtį:

$$(g_{total} - g_c) \frac{3 \cdot L^4}{64 \cdot E_s \cdot A_s} - \left(g_c \frac{3}{128} \cdot \frac{L^4}{E_c \cdot A_c \cdot f_0^2} \right)^3 = 0 \quad (2.15)$$

Atskyrę kintamąjį ir konstantas, gauname (2.16) lygtį:

$$g_c^3 \cdot \left(\frac{3}{128} \cdot \frac{L^4}{E_c \cdot A_c \cdot f_0^2} \right)^3 + g_c \cdot \frac{3 \cdot L^4}{64 \cdot E_s \cdot A_s} - g_{total} \cdot \frac{3 \cdot L^4}{64 \cdot E_s \cdot A_s} = 0 \quad (2.16)$$

Konstantas apibrėžiame (2.17) ir (2.18) išraiškomis:

$$\left(\frac{3}{128} \cdot \frac{L^4}{E_c \cdot A_c \cdot f_0^2} \right)^3 = A, \quad (2.17)$$

$$\frac{3 \cdot L^4}{64 \cdot E_s \cdot A_s} = B. \quad (2.18)$$

Sutvarkius (2.16) lygtį ir įrašius (2.17) ir (2.18) išraiškas, gaunama (2.19) nepilnoji kubinė lygtis:

$$g_c^3 \cdot A + g_c \cdot B - g_{total} \cdot B = 0 \quad (2.19)$$

Lygtį (2.19) padalinę iš A (2.17) lygtis, gauname (2.20):

$$g_c^3 + g_c \cdot \frac{B}{A} - g_{total} \cdot \frac{B}{A} = 0. \quad (2.20)$$

Padarę dar vieną keitinį, $B/A = C$, gauname lygtį:

$$g_c^3 + g_c \cdot C - g_{total} \cdot C = 0. \quad (2.21)$$

Įvedamas keitinys:

$$g_{total} \cdot C = D. \quad (2.22)$$

Taigi gaunama nepilnoji kubinė (2.23) lygtis, kuri turi 1 sprendinį:

$$g_c^3 + g_c \cdot C - D = 0. \quad (2.23)$$

Pritaikę Kordano kubinės lygties sprendinį, gauname:

$$g_c = \sqrt[3]{\sqrt{\frac{1}{27} \cdot C^3 + \frac{1}{4} \cdot D^2} - \frac{1}{2} \cdot D} + \sqrt[3]{-\sqrt{\frac{1}{27} \cdot C^3 + \frac{1}{4} \cdot D^2} - \frac{1}{2} \cdot D}. \quad (2.24)$$

Taigi įvedus kitokius žymėjimus (2.10) lygčiai, turime styginės kabamosios konstrukcijos tarpatrio vidurio vertikalaus poslinkio apskaičiavimo lygtį:

$$\Delta f_{comb} \cong \frac{3}{128} \cdot \frac{g_c \cdot L^4}{E_c \cdot A_c \cdot f_0^2}. \quad (2.25)$$

Šiuo atveju vienintelis kintamasis – apkrova tenkanti lynui.

Simetrinis apkrovimas. Koncentruotomis jėgomis į statramsčius. Styga iš anksto įtempta

Pritaikius tą pačią metodiką, kaip iš anksto neįtemptai stygai, galima apskaičiuoti ir tilto vertikalus poslinkį, kai viršutinei stygai yra suteikiamas išankstinis įtempimas. Pasinaudojus jau žinoma (1.23) formule, galima parašyti iš anksto įtemptos stygos vertikalaus poslinkio išraišką, tik su kitais žymėjimais:

$$\Delta f_{s.t} = \sqrt[3]{\frac{3}{64} \cdot \frac{g_s L^4 (1 - \beta)}{E_s A_s}}, \quad (2.26)$$

$$\beta = \frac{T}{H_1}, \quad (2.27)$$

$$\beta = \frac{T}{T + H}, \quad (2.28)$$

čia T – išankstinio įtempimo jėga; H – skėtimo jėga stygoje, kai styga be išankstinio įtempimo.

Taigi į (2.25) įrašę (2.28), gauname iš anksto įtemptos stygos vertikalaus poslinkio apskaičiavimo formulę (2.29):

$$\Delta f_{s,t} = \sqrt[3]{\frac{3}{64} \cdot \frac{g_s L^4 \left(1 - \frac{T}{T + H}\right)}{E_s A_s}}. \quad (2.29)$$

Atlikus tam tikrus pakeitimus ir supaprastinimus, styginės kabamosios konstrukcijos vertikalus poslinkis vienu etapu gali būti apskaičiuojamas pagal (2.30) lygtį:

$$\Delta f_{s,t} = \sqrt[3]{\frac{3}{64} \cdot \frac{\left(g_s L^4 - \frac{L^2 \cdot T}{T + \frac{1}{8 \cdot \Delta f_{comb}}}\right)}{E_s A_s}}. \quad (2.30)$$

Δf_{comb} yra apskaičiuojama pagal (2.25) išraišką, tik perimama lyno apkrova g_c perskaičiuojama, kadangi pasikeičia C ir D konstantos, vietoj jų gauname (2.31) ir (2.32):

$$C = \frac{32768}{9} \cdot \frac{E_c^3 \cdot A_c^3 \cdot f_0^6}{E_s \cdot A_s \cdot L^8} \cdot (1 - \beta), \quad (2.31)$$

$$D = g_{total} \cdot \frac{32768}{9} \cdot \frac{E_c^3 \cdot A_c^3 \cdot f_0^6}{E_s \cdot A_s \cdot L^8} \cdot (1 - \beta). \quad (2.32)$$

Skėtimo jėga atramosė styginei kabamajai konstrukcijai, pritaikius superpozicijos principą, apskaičiuojama pagal (2.34):

$$H_c = \frac{g_c \cdot L^2}{8(f_0 + \Delta f_c)}, \quad (2.33)$$

$$H_{total} = H_s + H_c. \quad (2.34)$$

Gavus analitines išraiškas, skaičiuojant poslinkius, galima jas palyginti su skaitiniais metodais gautais rezultatais. Rezultatai yra pateikti 2.5 poskyryje.

Simetrinis apkrovimas. Išskirstyta apkrova per stygą

Skaičiavimas, kai apkrova yra tolygiai išskirstyta per stygą, yra visiškai analogiškas koncentruotos apkrovos atvejui, tačiau šiuo atveju būtina įvertinti vietinių poslinkių tarp statramsčių įtaką.

Pagal žemiau pateiktas lygtis yra apskaičiuojami vietiniai stygos įlinkiai (t. y. įlinkiai, atsiradę stygoje tarp statramsčių) ir jų sukkeliamos papildomos ašinės jėgos:

$$H_{s.loc} = \sqrt[3]{\frac{1}{24} \cdot \left[g_{total}^2 \cdot \left(\frac{L}{c+1} \right)^2 \cdot E_s \cdot A_s \right]}, \quad (2.35)$$

$$\Delta f_{s.loc} = \sqrt[3]{\frac{3}{64} \cdot \frac{g_{total} \left(\frac{L}{c+1} \right)^4}{E_s A_s}}, \quad (2.36)$$

čia $H_{s.loc}$ – vietinių stygos įlinkių sukelta ašinė jėga; $\Delta f_{s.loc}$ – vietinis stygos įlinkis; c – statramsčių skaičius; g_{total} – suminė nuolatinė išorės apkrova; A_s – stygos skerspjūvio plotas; E_s – stygos tamprumo modulis.

Pasinaudojus (2.35) lygtimi, galime apskaičiuoti vietinių stygos įlinkių sukeltas ašines jėgas.

Skaičiuojant konstrukcijos poslinkius ir įrašas viskas atliekama analogiškai, kaip iš anksto įtemptos stygos atveju. Įvertinant vietinių įtempių sukeltą papildoma įtempimą stygoje, tiesiog apskaičiuojame išankstinio įtempimo dedamąją T , pasitelkus 2.35 lygtį.

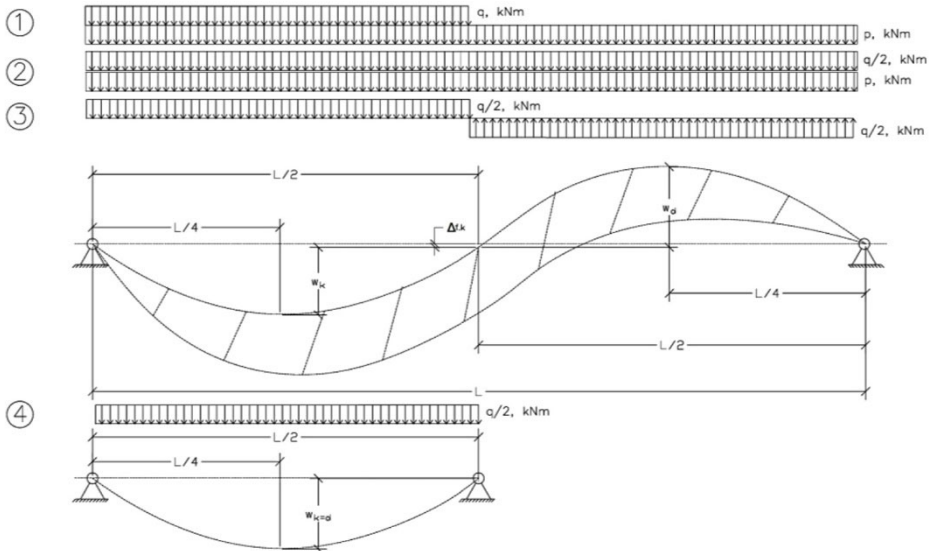
$$T = H_{s.loc} = \sqrt[3]{\frac{1}{24} \cdot \left[g_{total}^2 \cdot \left(\frac{L}{c+1} \right)^2 \cdot E_s \cdot A_s \right]}. \quad (2.37)$$

čia c – statramsčių skaičius.

Asimetrinis apkrovimas. Koncentruotos apkrovos. Styga be išankstinio įtempimo

Asimetrinio apkrovimo atveju yra pasitelkiami lynų apskaičiavimo metodikos principai (Grigorjeva & Juozapaitis, 2013). Pagal lynų skaičiavimo metodiką, kai konstrukcija apkrauta asimetrine apkrova, yra nagrinėjama tik pusė konstrukcijos, laikant, kad stygos vidurinis taškas turi tik vertikalus poslinkį.

Skaičiavimai atliekami pagal 2.7 pav. schemą.



2.7 pav. Styginės kabamosios konstrukcijos apskaičiavimo schema, kai apkrovimas asimetris

Fig. 2.7. Calculation scheme of string cable suspension structure when the load is asymmetric

Čia 1 – pirminė apkrovimo schema. Konstrukcija apkrauta simetrine nuolatine p ir asimetrine kintamąja q apkrova per pusę tilto tarpatramio; 2 – konstrukcija apkraunama tariama simetrine apkrova. Kintamoji apkrova išskirstoma per visą tarpatramį, laikant, kad suminė apkrova lieka ta pati, o jos dydis yra $q/2$; 3 – kadangi asimetrinė apkrova sukelia konstrukcijos kinematinius poslinkius, konstrukcija apkraunama priešingos krypties antimetrine apkrova dešinėje tarpatramio pusėje, kad konstrukcija taptų pusiausvyra; 4 – taikant prielaidą, kad tarpatramio vidurio taškas juda tik vertikaliai, o beveik visą priešingą asimetrinę apkrovą perima styga, nagrinėjamas pusės apkrautos stygos variantas, kadangi tiek kairėje, tiek dešinėje tarpatramio pusėje poslinkiai nuo priešingos asimetrinės apkrovos sutaps, tik bus priešingo ženklo.

Laikantis šios schemos (2.7 pav.), poslinkiai yra apskaičiuojami taikant superpozicijos principą (sudedant tampriuosius ir kinematinius poslinkius). Šiuo atveju tamprieji poslinkiai yra apskaičiuojami pagal 2-ąją schemą, o kinematiniai poslinkiai, kurie atsiranda lynė, pagal 4-tąją schemą. Skaičiuojant kinematinius poslinkius yra įvertinama, kad stygai perimant kinematinius poslinkius, ji perima ne visą kintamąją apkrovą, kadangi dalis apkrovos tenka lynui bei dalis apkrovos

perimama simetrinės apkrovos atveju. Uždavinio tikslas yra apskaičiuoti visas šias apkrovas, kurių pagrindu apskaičiuojami kinematiniai ir tamprieji poslinkiai.

Stygos poslinkių lygtis jau yra žinoma (1.14), tiesiog ji pakeičiama į atvejį, kai nagrinėjama pusė tarpatramio:

$$\Delta f_s = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot (g_{total}) \cdot L^4}{64 \cdot E_s \cdot A_s}}, \quad (2.38)$$

čia

$$g_{total} = p + q/2.$$

Skaičiuojant poslinkius ketvirtyje, taikant prielaidą, kad visą apkrovą perima tik styga, įvedame naujus žymėjimus ir įvertiname sumažintą tarpatramį. (2.39) lygtis įvertinta stygos poslinkį nuo antimetrisinės apkrovos:

$$w_{k,d} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \left(\frac{q}{2} - q_{s.sym}\right) \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^4}{64 \cdot E_s \cdot A_s}}, \quad (2.39)$$

čia q – kintamoji išorinė apkrova; $q_{s.sym}$ – kintamoji išorinė apkrova, kurią perima styga.

Visgi, keičiant apatinio lyno geometrinius ir mechaninius parametrus (pradinis išvyris, ašinis standis), dalis apkrovos tenka ir apatiniam lynui, ką būtina įvertinti.

Analizuojant konstrukciją, gauta lygtis, kuri įvertinta apatinio lyno perimamą apkrovą:

$$w_{k,d} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \left(\frac{q}{2} - q_{s.sym}\right) \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^4}{64 \cdot E_s \cdot A_s}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta f_{pseudo}}{\Delta f_{pseudo \frac{L}{10}}}}, \quad (2.40)$$

kur

$$\Delta f_{pseudo \frac{L}{10}} \cong \frac{3}{128} \cdot \frac{L^3}{E_c \cdot A_c \cdot \frac{1}{100}} \cdot g_c \cdot \frac{1}{1 + \frac{3}{128} \cdot \frac{L}{E_c \cdot A_c \cdot \frac{1}{1000}} \cdot g_c};$$

$$g_c = p_c + \frac{q_c}{2},$$

čia g_c – nuolatinės ir kintamosios apkrovos suma, kurią perima lynas.

Norint gauti tikslesnius rezultatus, skaičiuojant konstrukcijos poslinkius nuo simetrinės apkrovos, pseudosimetrinė apkrova yra skaičiuojama pagal žemiau pateiktą išraišką:

$$\Delta f_{pseudo} \cong \left(\frac{3}{128} \cdot \frac{L^4}{E_c \cdot A_c \cdot \frac{L}{100}} \cdot g_c \cdot \frac{1}{1 + \frac{3}{128} \cdot \frac{L^4}{E_c \cdot A_c \cdot \frac{L^3}{1000}} \cdot g_c} + \sqrt[3]{\frac{3}{64} \cdot \frac{g_s L^4}{E_s A_s}} \right) \frac{1}{2}, \quad (2.41)$$

kur

$$g_{st} = g_{total} - g_c,$$

čia g_{st} – suminė (nuolatinė ir kintamoji) stygos perimama apkrova; g_{total} – suminė (nuolatinė ir kintamoji) išorės apkrova; Δf_{pseudo} – konstrukcijos poslinkis nuo pseudosimetrinės apkrovos tarpatramio viduryje; $\Delta f_{pseudo, \frac{L}{10}}$ – konstrukcijos poslinkis nuo pseudosimetrinės apkrovos apatinio lyno pradinis įsvyris $L/10$, naudojamas kaip konstanta, nepriklausomai nuo nagrinėjamos konstrukcijos apatinio lyno įsvyrio.

Stygos perimamos apkrovos nuo pseudosimetrinės apkrovos yra apskaičiuojamos pagal simetriškai apkrautos styginės kabamosios konstrukcijos supaprastintą apskaičiavimo metodiką:

$$q_{s.sym} = q - q_{c.sym}, \quad (2.42)$$

$$q_{c.sym} = \sqrt[3]{\sqrt{\frac{1}{27} \cdot C^3 + \frac{1}{4} \cdot D^2 - \frac{1}{2} \cdot D} + \sqrt{\frac{1}{27} \cdot C^3 + \frac{1}{4} \cdot D^2 - \frac{1}{2} \cdot D}} \quad (2.43)$$

Apskaičiavus visas dedamąsias ir supaprastinus baigtinę lygtį, turime:

$$w_{k,d} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \left(\frac{q}{2} - q_{s.sym}\right) \cdot L^4}{1024 \cdot E_s \cdot A_s}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta f_{pseudo}}{\Delta f_{pseudo, \frac{L}{10}}}} \quad (2.44)$$

Įvedame keitinį

$$\Delta_w = \sqrt{\frac{\Delta f_{pseudo}}{\Delta f_{pseudo} \frac{L}{10}}}. \quad (2.45)$$

Taigi turime baigtinę suvartymo poslinkių apskaičiavimo lygtį:

$$w_{k,d} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \left(\frac{q}{2} - q_{s, sym}\right) \cdot L^4}{1024 \cdot E_s \cdot A_s}} \cdot \Delta_w. \quad (2.46)$$

Norint apskaičiuoti suminius poslinkius, būtina įvertinti: kinematinius poslinkius tarpatramio ketvirtyje, tampriuosius poslinkius tarpatramio viduryje ir lyno kinematinius poslinkius tarpatramio viduryje. Todėl suminiai poslinkiai apskaičiuojami taikant šią lygtį:

$$W_{k,d} = K \cdot \Delta f_{asy} \cdot 0,75 \mp w_{k,d}, \quad (2.47)$$

čia $W_{k,d}$ – suminis poslinkis tarpatramio ketvirtyje; Δf_{asy} – vidurinio taško vertikalus poslinkis po apkrovimo nuo pseudosimetrinės apkrovos; $w_{k,d}$ – kinematiniai poslinkiai ketvirtyje; K – pataisos koeficientas, įvertinantis lyno kinematinius poslinkius tarpatramio viduryje, kadangi kinematiniai poslinkiai atsiranda ne tik ketvirčiuose, tačiau nedidelis poslinkis atsiranda ir tarpatramio viduryje; K koeficientas gaunamas sulyginus poslinkius, gautus skaitiniu būdu nuo pseudosimetrinės apkrovos ir nuo tikrosios antimetrinės apkrovos. Tai yra empiriškai išvestas dydis, kadangi norint analitiškai išreikšti kinematinį poslinkį konstrukcijos viduryje ir tiksliai įvertinti jo įtaką bendriesiems konstrukcijos poslinkiams, analitinis skaičiavimas būtų per daug išplėstas ir per sudėtingas, kad būtų patogus naudoti.

Koeficientų reikšmės pateikiamos 2.5 lentelėje. 2.8 pav. pateikiamos jau vidutinės reikšmės. Norint gauti K reikšmes prie kitų parametų, reikmės interpoluojamos.

$$K = \frac{\Delta f_{pseudo,n}}{\Delta f_n},$$

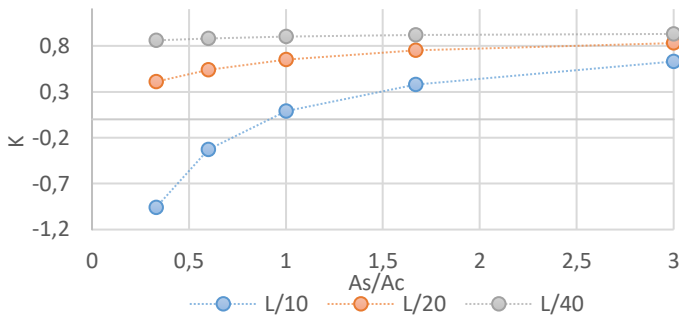
čia $\Delta f_{pseudo,n}$ – vidurinio taško poslinkis nuo pseudosimetrinės apkrovos, gauto skaitiniu metodu; $\Delta f_{pseudo,n}$ – viduriniojo taško poslinkis nuo asimetrinės apkrovos, gautas skaitiniu metodu.

Kalbant apie ašinės jėgas, susidaranti apatiniame lyne ir stygoje, apatiniame lyne jos apskaičiuojamos analogiškai kaip ir simetrinio apkrovimo atveju, kadangi laikoma, kad lyne atsirandantys kinematiniai poslinkiai nesukelia papildomų ašinių jėgų.

2.5 lentelė. Koeficiento K reikšmės

Table 2.5. Values of coefficient K

A_{st}/A_{cable}	K
L/10	
0,6	-0,33
1,0	0,09
1,67	0,38
L/20	
0,6	0,54
1,0	0,65
1,67	0,75
L/40	
0,6	0,88
1,0	0,90
1,67	0,92



2.8 pav. K koeficiento reikšmių grafikas

Fig. 2.8. Graphic of K coefficient values

$$H_{c.asy} = \frac{g_c \cdot L^2}{8(\Delta f_{asy})} \quad (2.48)$$

Norint apskaičiuoti ašines jėgas stygoje, turime apskaičiuoti kinematinis poslinkius ir vidurinio tarpatriamo taško vertikalųjį poslinkį. Ašinės jėgos apskaičiuojamos pagal žemiau pateiktą išraišką:

$$H_{s.asy} = \frac{\left(w_{k,d} \mp \frac{1}{2} \Delta f_{asy}\right)^2 \cdot 64 \cdot E_s \cdot A_s}{6 \cdot L^2}. \quad (2.49)$$

Apibendrinus visus skaičiavimus (2.38–2.49) lygtys, galime nuosekliai sudėlioti, kaip apskaičiuoti konstrukcijos poslinkius ir ašines jėgas, esant asimetriniam apkrovimui.

Tarpatramio vidurio vertikalus poslinkis nuo pseudosimetrinės apkrovos apskaičiuojamas pagal (2.41) lygtį. Apkrovos, kurias perima styga veikiant pseudosimetrinei apkrovai, nustatomos taikant simetriškai apkrautos styginės kabamosios konstrukcijos supaprastintą apskaičiavimo lygtį (2.43).

Kinematiniai poslinkiai apskaičiuoji pagal 2.50 lygtį:

$$w_{k,d} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \left(\frac{q}{2} - q_{s.sym}\right) \cdot L^4}{1024 \cdot E_s \cdot A_s}} \cdot \Delta_w. \quad (2.50)$$

Stygos perimamos apkrovos nuo pseudosimetrinės apkrovos $p_{st.sym}$, ir $q_{st.sym}$ – apskaičiuojamos pagal simetriškai apkrautos styginės kabamosios konstrukcijos lygtis (2.12–2.24).

Apskaičiuojamas suminis poslinkis tarpatramio ketvirtyje:

$$W_{k,d} = K \cdot \Delta f_{asy} \cdot 0,75 \mp w_{k,d}. \quad (2.51)$$

Apskaičiuojama ašinė jėga apatiniame lyne:

$$H_{c.asy} = \frac{g_c \cdot L^2}{8(\Delta f_{asy})}. \quad (2.52)$$

Apskaičiuojama ašinė jėga stygoje:

$$H_{s.asy} = \frac{\left(w_{k,d} \mp \frac{1}{2} \Delta f_{asy}\right)^2 \cdot 64 \cdot E_s \cdot A_s}{6 \cdot L^2}. \quad (2.53)$$

Apskaičiuojama skėtimo jėga atramose:

$$H = H_{s.asy} + H_{c.asy}. \quad (2.54)$$

Pasitelkus šį algoritmą, nesudėtingai apskaičiuojami konstrukcijos poslinkiai ir įrašos.

Asimetrinis apkrovimas. Koncentruotas apkrovimas. Styga iš anksto įtempta

Skaičiavimai yra atliekami analogiškai kaip ir iš anksto neįtemptai stygai, tik šiuo atveju privalo būti įvertintas stygos išankstinis įtempimas. Žemiau pateikta lygtis yra analogiška skaičiavimams, kai styga neįtempta, tik atsiranda išankstinį įtempimą įvertinantis koeficientas β (2.24 lygtis):

$$w_{k,d} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \left(\frac{q}{2} - q_{s.sym}\right) \cdot L^4 (1 - \beta)}{1024 \cdot E_s A_s}} \cdot \Delta_w. \quad (2.55)$$

$p_{st.sym}$, $q_{st.sym}$ yra apskaičiuojamos pagal simetriškai apkrautos styginės kabamosios konstrukcijos supaprastintą apskaičiavimo metodiką, kai styga yra iš anksto įtempta. Koeficientai C ir D apskaičiuojami pagal (2.31–2.32) lygtis. Poslinkis nuo simetrinės apkrovos taip pat apskaičiuojamas įvertinant stygos išankstinį įtempimą:

$$\Delta f_{pseudo} \cong \left(\frac{3}{128} \cdot \frac{L^4}{E_c \cdot A_c \cdot \frac{L^2}{100}} \cdot g_c \cdot \frac{1}{1 + \frac{3}{128} \cdot \frac{L^4}{E_c \cdot A_c \cdot \frac{L^3}{1000}} \cdot g_c} \right. \\ \left. + \sqrt[3]{\frac{3}{64} \cdot \frac{g_s (1 - \beta) L^4}{E_s A_s}} \right) \frac{1}{2}. \quad (2.56)$$

Suminiai poslinkiai ir skėtimosi jėgos apskaičiuojamos pagal (2.52–2.54) lygtis.

Suminius poslinkius ketvirtyje apskaičiuojame pagal (2.51) lygtį, ašines jėgas apatiniam lyne pagal (2.52) lygtį, ašines jėgas stygoje pagal (2.53) lygtį. Skėtimo jėgos atramos apskaičiuojame pagal:

$$H = H_{s.asy} + H_{c.asy} + T. \quad (2.57)$$

Pasitelkus šią metodiką, yra įvertinamas stygos išankstinis įtempimas, kuris daro didelę įtaką kinematiniam poslinkiams.

Asimetrinis apkrovimas. Išskirstyta apkrova

Skaičiavimas, kai apkrova yra išskirstyta, yra visiškai analogiškas, kai apkrova yra koncentruota su išankstiniu stygos įtempimu. Šiuo atveju privalome įvertinti vietinių poslinkių stygoje sukeltus įtempimus.

Pagal lygtis (2.55–2.56) ir ašinių jėgų apskaičiavimo lygtį (2.58), kuri yra analogiška (2.38) lygčiai, tik įvertinta, kad nagrinėjama pusė tarpatriamo, yra apskaičiuojami vietiniai įlinkių sukeltos papildomos ašinės jėgos:

$$T = H_{s.loc} = \sqrt{\frac{1}{24} \left[g_{total}^2 \left(\frac{L}{c+1} \cdot \frac{1}{2} \right)^2 \cdot E_s \cdot A_s \right]}, \quad (2.58)$$

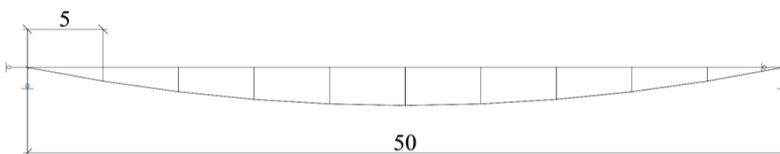
kur n – statramsčių skaičius.

Skaičiuojant konstrukcijos poslinkius ir įrąžas, viskas atliekama analogiškai kaip iš anksto įtemptos stygos atveju.

2.4. Styginės-kabamosios konstrukcijos skaitinių ir inžinerinių skaičiavimų sugretinimas

Naudojantis baigtinių elementų apskaičiavimo programa *Autodesk Robot Structural Analysis* (2024 metų versija), buvo sumodeliuota styginė kabamoji konstrukcija. Konstrukcija nagrinėta esant trimis skirtingiems apatinio lyno pradiniais įsvyriams ir ašiniams standžiams. Visi konstrukcijos geometriniai parametrai pateikti 2.6–2.7 lentelėse.

Tiek apatinis, tiek viršutinis elementai modeliuoti kaip *cable* elementai. Statramsčiai modeliuoti kaip *truss* elementai, kurie perima tik tempimo arba gniuždymo jėgas. Kraštinės atramos nepaslankios linijiniams poslinkiams.



2.9 pav. Tiriamos konstrukcijos schema

Fig. 2.9. The scheme of the investigated structure.

2.6 lentelė. Stygos ir apatinio lyno skerspjūvio plotai

Table 2.6. Cross-sectional areas of string and lower cable

Parametras $n = \frac{A_s}{A_c}$	Stygos skerspjūvio plotas A_s, cm^2	Apatinio lyno skerspjūvio plotas A_c, cm^2
0,6	75	125
1,0	100	100
1,67	125	75

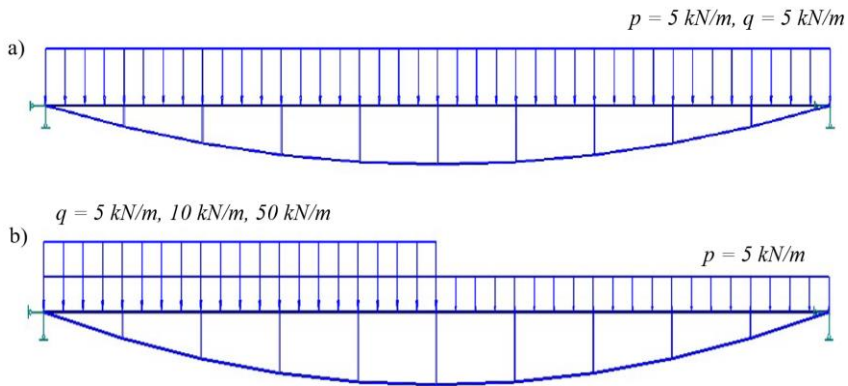
2.7 lentelė. Apatinio lyno pradinis išsvyris

Table 2.7. The initial sag of the lower cable

Parametras $k = \frac{L}{f_0}$	Tarpatramio ilgis L, m	Pradinis apatinio lyno išsvyris $f_0 = \frac{L}{k}, m$
10	50,0	5,0
20	50,0	2,5
40	50,0	1,25

Nagrinėjama konstrukcija buvo apkrauta nuolatine simetrine apkrova (p), kintamąja simetrine apkrova (q) ir kintamosiomis asimetrinėmis apkrovomis (q). Apkrovimo variantai pateikti 2.8 lentelėje. Kintamosios simetrinės apkrovos dydis priimtas pagal pėsčiųjų tiltų apkrovimo normines vertes (5 kPa), laikant, kad nagrinėjama 1 m pločio konstrukcija. Atitinkamai didinant kintamosios ir nuolatinės apkrovos santykį, buvo didinama kintamoji apkrova. Kintamosios ir nuolatinės apkrovos santykis pasirinktas pagal praktikoje dažniausiai pasitaikančius santykius. Šie santykiai įprastai neviršija daugiau 5, tačiau siekiant apimti platesnį tyrimų diapazoną, buvo pasirinktas ir didesnis – 10 santykis.

Simetrinio apkrovimo atveju konstrukcija buvo apkrauta laikinąja eismo apkrova per visą tarpatramio ilgį, asimetrinio apkrovimo, per pusę tarpatramio ilgį (2.10 pav.).



2.10 pav. Styginės kabamosios konstrukcijos apkrovimo variantai:

a) simetrinis apkrovimas, b) asimetrinis apkrovimas

Fig. 2.10. Load variants of the string cable suspension structure, where:

a – symmetric load and b – asymmetric load

2.8 lentelė. Konstrukcijos apkrovimo variantai**Table 2.8.** Variants of structural loading

Apkrovos tipas	$\gamma = \frac{q}{p}$;	q, kN/m	Parametras n
Nuolatinė apkrova, p	-	5,0	n ₁ = 0,6 n ₂ = 1,0 n ₃ = 1,67
Simetrinė apkrova, q	-	5,0	n ₁ = 0,6 n ₂ = 1,0 n ₃ = 1,67
Asimetrinė apkrova, q	$\gamma = 1$	5,0	n ₁ = 0,6 n ₂ = 1,0 n ₃ = 1,67
	$\gamma = 2$	10,0	n ₁ = 0,6 n ₂ = 1,0 n ₃ = 1,67
	$\gamma = 10$	50,0	n ₁ = 0,6 n ₂ = 1,0 n ₃ = 1,67

Taip pat, atsižvelgiant į tai, kad konstrukcijos poslinkiams ir įrašoms didelę įtaką daro vietiniai stygos įlinkiai, konstrukcija buvo nagrinėta dviem atvejais: kai apkrova perduodama per statramsčius ir kai ji tolygiai paskirstoma tiesiogiai ant stygos. Apkrovimo į statramsčius atveju išskirstyta apkrova buvo perskaičiuota į koncentruotas apkrovas.

Siekiant nustatyti išankstinio įtempimo jėgos įtaką, buvo pasirinktos 3 skirtingos išankstinio stygos įtempimo reikšmės. Reikšmės parinktos priklausomai nuo stygos ašinio standumo ir stygos pradinių įtempių (pasirinktos tokio išankstinio įtempimo jėgos, kad ašinė jėga stygoje būtų 10 kartu didesnė nei atveju, kai papildomas išankstinis įtempimas stygai nėra suteikiamas), kai konstrukcija apkrauta tik nuolatine apkrova. Išankstinio įtempimo reikšmės pateiktos 2.9 lentelėje.

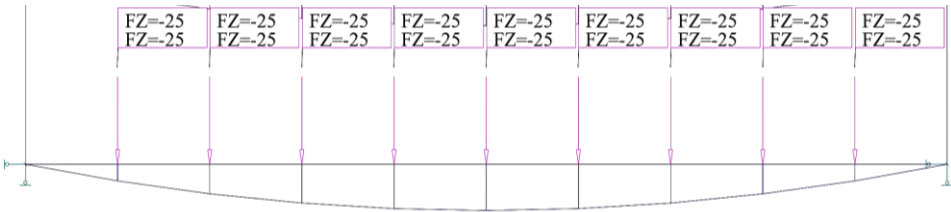
2.9 lentelė. Stygos išankstinio įtempimo reikšmės**Table 2.9.** String pretension values

Stygos skerspjūvio plotas As, cm ²	Ašinė jėga stygoje H _s nuo nuolatinės apkrovos (gautos skaitiškai)	Išankstinio įtempimo jėga T, kN	Parametras, n
75	3,32	29,88	n ₁ = 0,6
100	6,85	61,65	n ₂ = 1,0
125	14,91	134,19	n ₃ = 1,67

Modeliuojant styginę kabamąją konstrukciją, ji buvo iškart modeliuojama su trimis skirtingais ašinių standžių santykiais, nurodytais 2.6 lentelėje. Sumodeliuota konstrukcija pateikta 2.9 pav.

Rezultatų sugretinimas. Simetrinis apkrovimas. Apkrovimas koncentruotas į statramsčius. Styga be papildomo išankstinio įtempimo

Simetrinio apkrovimo atveju (2.11 pav.) pateikiamos tik maksimalios poslinkių reikšmės, kurios yra viduriniame tarpstramsčio taške. Taškas ir poslinkiai, gauti BEM, pateikti 2.12 pav. Visų nagrinėtų atvejų maksimalūs poslinkiai pateikti A priedo 1.1 lentelėje. Lentelėje taip pat pateikiamas sulyginimas su analitiniu metodu gautais rezultatais.



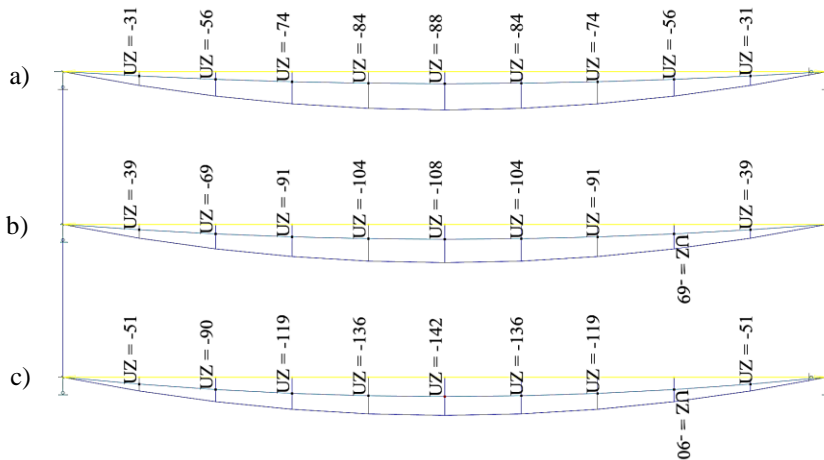
2.11 pav. Simetriškai į statramsčius apkrauta styginė kabamoji konstrukcija, kai $n_1 = 0,6$, $n_2 = 1,0$, $n_3 = 1,67$. Čia FZ – konstruota apkrova, kN

Fig. 2.11. String cable suspension structure loaded symmetrically to the struts, when $n_1 = 0,6$, $n_2 = 1,0$, $n_3 = 1,67$. Here: FZ – concentrated load, kN

A priedo 1.1–1.3 lentelėse pateikiami poslinkių ir ašinių jėgų rezultatai, gauti skaitiškai ir analitiškai, kai apkrovimas simetrinis, bei pateikiami gautų rezultatų skirtumai. Atskirai, poskyrio gale, yra pateikiami palyginamieji grafikai (poslinkių ir ašinių jėgų). 2.11 pav. matomas koncentruotomis apkrovomis apkrautas modelis BEM aplinkoje. Koncentruotų apkrovų vertės buvo gautos, išskirstytą apkrovą perskaičiuojant į koncentruotą apkrovą į statramsčius, t. y. išskirstyta apkrova padauginta iš atstumo tarp statramsčių.

Iš A priede pateiktų 1.1–1.3 lentelių matyti, kad gauti poslinkių apskaičiavimo skirtumai tarp skaitiškai ir analitiškai gautų rezultatų, skiriasi iki 10 %. Didžiausi skirtumai gaunami, kai apatinio lyno įsvyris yra pats didžiausias.

Ašinių jėgų stygoje rezultatai, kai skaičiuojame skaitiškai ir analitiškai, skiriasi iki 15 %. Verta paminėti, kad didžiausios paklaidos gaunamos tada, kai ašinės jėgos stygoje yra labai mažos. Didėjant ašinių jėgų reikšmėms – paklaidos mažėja.



2.12 pav. Konstrukcijos poslinkių schema, kai apkrovimas simetrinis, esant skirtingiems stygos ir lyno ašinių standžių santykiams: a) $n = 0,6$, b) $n = 1,0$, c) $n = 1,6$

Fig. 2.12. Scheme of displacements of the structure when the load is symmetrical under different ratios of axial stiffness between the string and the lower cable: a) $n = 0.6$, b) $n = 1.0$, and c) $n = 1.6$

Panašūs skirtumai gaunami ir kalbant apie apatinio lyno ašines jėgas, kur gauti skirtumai iki 14 %. Čia didžiausios paklaidos gaunamos esant mažiausiam apatinio lyno pradiniam išvyriui (kai apatinio lyno pradinis išvyris $L/40$) ir esant didžiausiam ašinių standžių santykiui (kai stygos ašinio standžio santykis 1,67 karto didesnis už apatinio lyno).

Paklaidų dydį lemia supaprastinta inžinerinė apskaičiavimo metodika (metodikai buvo panaudotos apytikslė lyno poslinkių apskaičiavimo ir tiksli stygos poslinkių apskaičiavimo lygtys) ir taikytos supaprastinto apskaičiavimo prielaidos. Kadangi konstrukcija yra labai jautri poslinkiams (mažo dydžio poslinkiai sukuria dideles papildomas ašines jėgas konstrukcijoje), bet koks apytikslis skaičiavimas sukuria ir didesnes paklaidas visai sistemai.

Rezultatų sugretinimas. Simetrinis apkrovimas. Apkrovimas koncentruotas į statramsčius. Styga iš anksto įtempta

Rezultatai, kai styga iš anksto įtempta, pateikiami analogiškai, kaip ir iš anksto neįtemptai stygai. Visų nagrinėtų atvejų maksimalius poslinkius ir ašines jėgas stygoje ir apatiniame lyme, kai apkrovimas simetrinis, styga iš anksto įtempta, pateikti A priedo 2.1–2.3 lentelėse. Stygos išankstinio įtempimo reikšmės pateiktos 2.9 lentelėje.

Iš 2.1–2.3 lentelių duomenų matyti, kad poslinkių apskaičiavimo skirtumai skiriasi iki 14 %. Didžiausi skirtumai gaunami tada, kai apatinio lyno įsvyris yra pats mažiausias.

Ašinių jėgų stygoje skirtumai skiriasi iki 10 %. Didėjant ašinių jėgų reikšmėms – paklaidos mažėja.

Apatinio lyno ašinių jėgų skirtumai tarp skaitiškai ir analitiškai gautų rezultatų neviršija 10 %. Čia didžiausios paklaidos gaunamos esant mažiausiam apatinio lyno pradiniam įsvyriui (kai apatinio lyno pradinis įsvyris $L/40$) ir esant didžiausiam ašinių standžių santykiui (kai stygos ašinio standžio santykis 1,67 karto didesnis už apatinio lyno).

Rezultatų sugretinimas. Simetrinis apkrovimas. Apkrova išskirstyta

Rezultatai, kai apkrova išskirstyta, pateikiami analogiškai, kaip ir kitais simetrinio apkrovimo atvejais. Visų nagrinėtų atvejų, kai apkrovimas simetrinis ir styga iš anksto įtempta, maksimalūs poslinkiai pateikti A priedo 3.2 lentelėje, o ašinės jėgos stygoje ir apatiniame lyne – 3.3 ir 3.4 lentelėse. Šiuo atveju, poslinkiai analitiniu metodu yra skaičiuojami analogiškai, kaip iš anksto įtemptai stygai. 2.10 lentelėje yra pateikiamos ašinės jėgos, kurios atsirado dėl vietinių stygos įlinkių. Būtina paminėti, kad apskaičiuojant papildomas ašinės jėgas stygoje, taikant analitinį metodą, įvertinama ne tik nuolatinės apkrovos sukelta ašinė jėga, tačiau ir kintamosios apkrovos, kurios taip pat sukelia papildomas ašinės stygoje.

2.10 lentelė. Stygos išankstinio įtempimo reikšmės, sukeltos vietinių stygos įlinkių nuo nuolatinės apkrovos

Table 2.10. String prestress values caused by local string deflections under constant load

Stygos skerspjūvio plotas A_s , cm^2	Ašinė jėga stygoje H_s nuo nuolatinės apkrovos	Vietinių įtempių sukeltas išankstinis įtempimas T , kN	Parametras, n
75	3,32	448,3	$n_1 = 0,6$
100	6,85	493,4	$n_2 = 1,0$
125	14,91	531,5	$n_3 = 1,67$

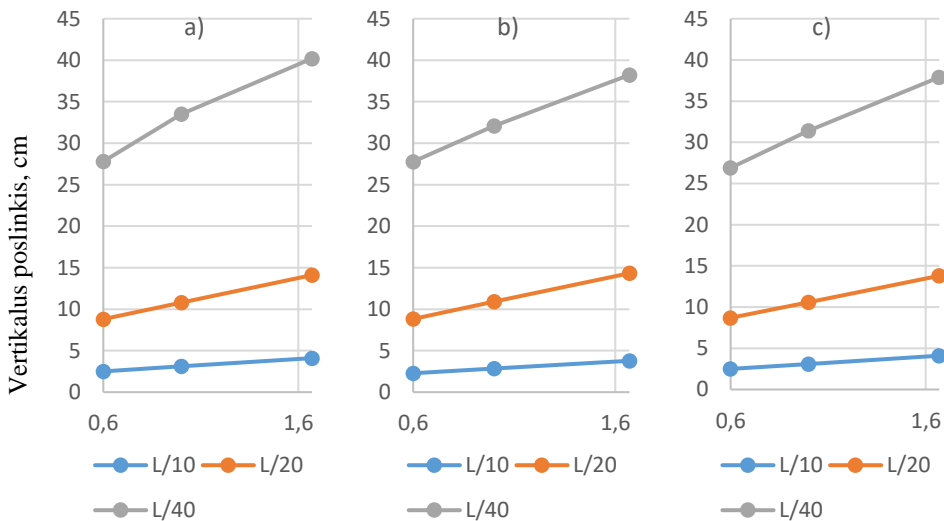
Iš A priedo 3.2 lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad poslinkių apskaičiavimo skirtumai skiriasi iki 14 %.

Skaitiškai ir analitiškai apskaičiuotų ašinių jėgų stygoje skirtumai neviršija 14 %, o apatinio lyno – 13 %. Didžiausi skirtumai gaunami, kai apatinio lyno pradinis įsvyris yra didžiausias, o stygos ašinis standis – didžiausias.

Styginės kabamosios konstrukcijos elgsenos analizė esant simetriniam apkrovimui

Nagrinėjant simetriškai apkrautos styginės kabamosios konstrukcijos elgseną, pagrindinis dėmesys skiriamas kintančių parametru (stygos ir apatinio lyno ašinių standžių santykis ir apatinio lyno pradinis įsvyris) įtakai konstrukcijos poslinkiams ir įrašoms. Rezultatai pateikiami grafiškai.

Iš poslinkių grafikų (2.13 pav.) matyti, kad esant simetriniam apkrovimui didžiausią įtaką turi apatinio lyno pradinis įsvyris. Esant mažiausiam apatinio lyno įsvyriui ($L/40$), turime 9-10 kartų didesnius poslinkius nei lyginant atvejį, kai apatinio lyno įsvyris yra pats didžiausias ($L/10$).



Stygos ir apatinio lyno ašinių standžių santykis, n

2.13 pav. BE metodu gauti styginės kabamosios konstrukcijos maksimalių (tarpatramio viduryje) poslinkių priklausomybė nuo stygos ir apatinio lyno ašinių standžio santykio:

- simetrinis apkrovimas, apkrovos koncentruotos, styga be išankstinio įtempimo,
- simetrinis apkrovimas, apkrovos koncentruotos, styga su išankstiniu įtempimu,
- simetrinis apkrovimas, apkrova išskirstyta

Fig. 2.13. Dependence of the maximum displacements (in the middle of the span) of the string cable suspension structure on the ratio of the axial stiffness of the string and the lower cable calculated using the FE method. Here: a – symmetric loading, loads concentrated, string without pretension, b – symmetric loading, loads concentrated, string with pretension, and c – symmetric loading, load distributed

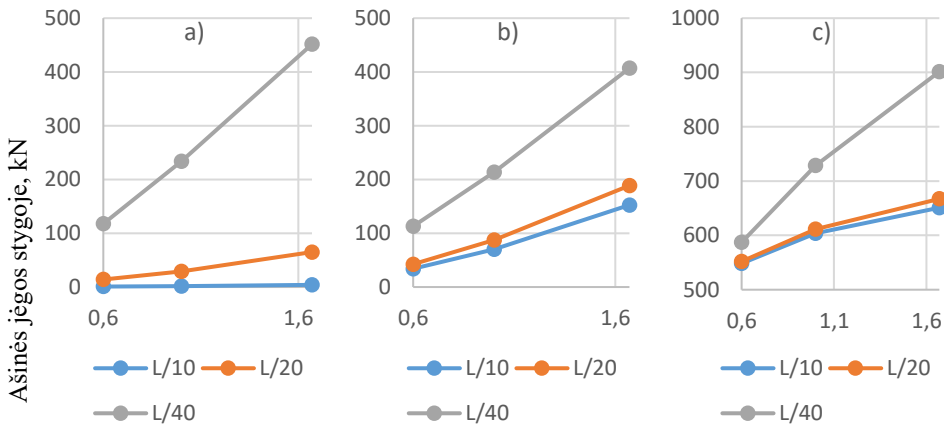
Iš grafikų taip pat matyti ašinių standžių santykio įtaką poslinkiams. Esant apatinio lyno įsvyriui $L/10$, didinant ašinių standžių santykį nuo 0,6 iki 1,67,

konstrukcijos poslinkiai padidėja 1,6–1,7 karto, o, kai apatinio lyno įsvyris $L/40$, poslinkiai padidėja apie 1,4–1,5 karto.

Žiūrint į išankstinio stygos įtempimo įtaką, kai apkrova simetrinė, konstrukcijos poslinkiai nekinta arba kinta nereikšmingai. Minimali įtaką yra matoma, tačiau poslinkių sumažinimo kaina – daug didesni įtempiai ir ašinės jėgos stygoje.

Vertinant gautus rezultatus, galima daryti išvadą, kad esant tik simetriniam konstrukcijos apkrovimui, išankstinis įtempimas nėra būtinas, kadangi didžiausią įtaką poslinkiams turi apatinio lyno pradinis įsvyris. Didinant apatinio lyno pradinį įsvyrį, poslinkiai mažėja, kadangi lynas perima didžiausią apkrovos dalį.

Analizuojant ašinės jėgas stygoje (2.14 pav.), matoma, kad didžiausias ašinės jėgas stygoje turime, kai apatinio lyno įsvyris yra pats mažiausias ($L/40$) ir mažiausias ašinės jėgas, kai pradinis apatinio lyno įsvyris yra pats didžiausias ($L/10$). Taip pat, didinant ašinių standžių santykį, didėja ašinės jėgos stygoje, nes didėja ir poslinkiai.



Stygos ir apatinio lyno ašinių standžių santykis, n

2.14 pav. Stygos ašinės jėgos priklausomybė nuo stygos ir apatinio lyno ašinių standžio santykio, gautos skaitiniu (baigtinių elementų metodu): a) simetrinis apkrovimas, apkrovos koncentruotos, styga be išankstinio įtempimo, b) simetrinis apkrovimas, apkrovos koncentruotos, styga su išankstiniu įtempimu, c) simetrinis apkrovimas, apkrova išskirstyta

Fig. 2.14. Dependence of the axial force of the string on the ratio of the axial stiffness of the string and the lower cable obtained numerically (using the finite element method):

Here: a) – symmetric loading, loads concentrated, string without prestress,

b) – symmetric loading, loads concentrated, string with prestress, and

c) – symmetric loading, load distributed

Rezultatų sugretinimas. Asimetrinis apkrovimas. Apkrovimas koncentruotas į statramsčius. Styga be papildomo išankstinio įtempimo

Asimetrinio apkrovimo atveju aktualūs (maksimalūs poslinkiai ir poslinkiai tarpatramio viduryje) poslinkiai yra keliuose taškuose. Asimetrinio apkrovimo atveju, dėl apatinio lyno kinematinųjų poslinkių, maksimalūs konstrukcijos poslinkiai yra apytiksliai tarpatramio ketvirtyje ($L/4$) arba 12,5 metro nuo kairiosios atramos. Konstrukcijos apkrovimo schema, kai konstrukcija apkrauta asimetriškai, pateikta 2.15 pav.



2.15 pav. Konstrukcijos apkrovimo schema, kai apkrovimas asimetrinis.

Čia FZ – konstruota apkrova, kN

Fig. 2.15. Structural loading scheme when the loading is asymmetric.

Here: FZ – concentrated load, kN

Asimetriškai apkrautos konstrukcijos poslinkiams didelę įtaką turi kintamosios ir nuolatinės apkrovos santykis γ , todėl, nagrinėjami trys skirtingi santykio γ variantai. Kai $\gamma = 1, 2, 10$. Realiomis sąlygomis šis santykis dažniausiai svyruoja nuo 1 iki 5, tačiau siekiant apimti platesnį tyrimo diapazoną, buvo pasirinktas ir didesnis kintamosios bei nuolatinės apkrovų santykis.

Iš A priede pateiktų 4.1–4.3 lentelių duomenų matyti, kad poslinkių apskaičiavimo skirtumai tarp analitiškai ir skaitiškai gautų rezultatų neviršija 11 %. Galime pastebėti, kad didžiausias paklaidas turime tada, kai stygos ašinis standis mažiausias.

Vertinant ašines jėgas stygoje, skirtumas tarp skaitiniu ir analitiniu būdu gautų rezultatų neviršija 12 %, o apatiniame linyje – neviršija 11 %.

Rezultatų sugretinimas. Asimetrinis apkrovimas. Apkrovimas koncentruotas į statramsčius. Styga iš anksto įtempta

Iš A priede pateiktų 5.1–5.3 lentelių duomenų matyti, kad poslinkių apskaičiavimo skirtumai, apskaičiuoti skaitiškai ir analitiškai, skiriasi iki 15 %. Didžiausios paklaidos, panašiai kaip ir atveju, kai styga nėra iš anksto įtempta, atsiranda,

kai turime mažiausią apatinio lyno pradinį įsvyrį. Kalbant apie ašines jėgas stygoje ir apatiniame lyne, skaitinių ir analitinių rezultatų skirtumai taip pat neviršija 15 %.

Rezultatų sugretinimas. Asimetrinis apkrovimas. Apkrova išskirstyta į stygą

Iš A priede pateiktų 6.1–6.3 lentelių duomenų matyti, kad poslinkių apskaičiavimo skirtumai, skaičiuojant skaitiškai ir analitiškai, skiriasi iki 14 %. Didžiausios paklaidos, panašiai kaip ir atveju, kai styga nėra iš anksto įtempta, atsiranda, kai turime mažiausią apatinio lyno pradinį įsvyrį. Analizuojant ašines jėgas stygoje, paklaidos neviršija 13 %, o apatiniame lyne –10 %.

Kalbant apie visas atsirandančias paklaidas, jų dydį lemia supaprastinta inžinerinė apskaičiavimo metodika (metodikai buvo panaudotos apytikslė lyno poslinkių apskaičiavimo ir tiksli stygos poslinkių apskaičiavimo lygtys) ir taikytos supaprastinto apskaičiavimo prielaidos bei supaprastinta lynų skaičiavimo teorija, kurios pagrindu buvo sudarytas asimetrinio apkrovimo modelis. Asimetrinio apkrovimo atveju buvo nagrinėjama tik pusė konstrukcijos, laikant, kad vidurinis tarpatriamo taškas nejuda horizontaliai. Vertikalus poslinkis įvertintas naudojant superpozicijos principą, kuris taip pat yra paklaidų priežastis. Bet kuriuo atveju tokios paklaidos priimtinos, siekiant, kad metodika būtų kuo paprastesnė ir lengviau panaudojama projektavimo metu.

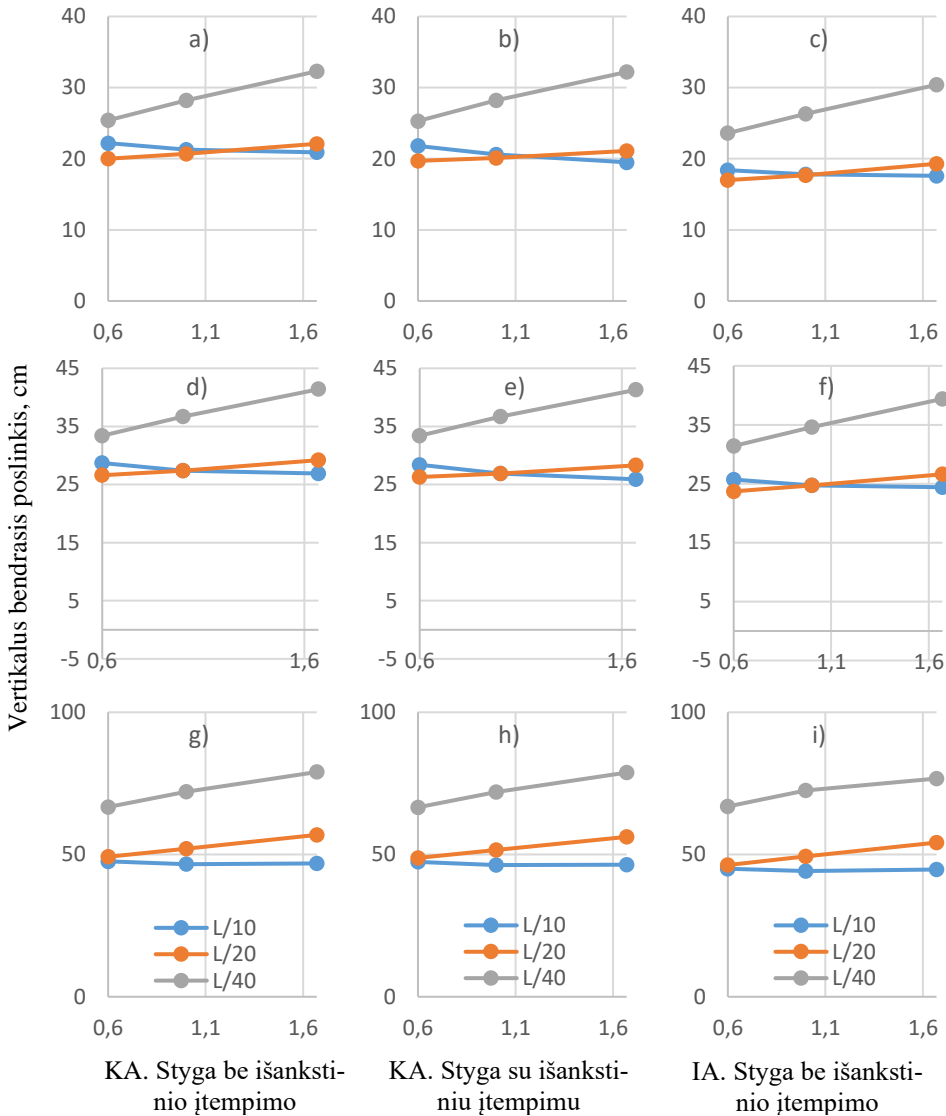
Styginės kabamosios konstrukcijos elgsenos analizė esant asimetriniam apkrovimui

Nagrinėjant simetriškai apkrautos styginės kabamosios konstrukcijos elgseną, pagrindinis dėmesys skiriamas kintančių parametru (stygos ir apatinio lyno ašinių standžių santykis ir apatinio lyno pradinis įsvyris) įtakai konstrukcijos poslinkiams ir įrašoms. Čia didelę įtaką turi kintamosios ir nuolatinės apkrovos santykis bei apatinio lyno kinematiniai poslinkiai. Rezultatai pateikiami grafiškai.

2.16 pav. yra pateikiami bendrieji poslinkiai, kai apkrova yra asimetrinė, o 2.17 pav. pateikiami tik kinematiniai poslinkiai, kurie yra gauti analitiškai. Čia KA – koncentruotas į statramsčius apkrovimas, IA – išskirstytas per stygą apkrovimas. Atskirai nagrinėjami bendrieji ir kinematiniai poslinkiai, siekiant atskleisti konstrukcijos geometrinių parametru ir kinematinų poslinkių įtaką konstrukcijos bendriesiems poslinkiams.

2.16 pav. galima matyti, kad didžiausią įtaką bendriesiems poslinkiams turi apatinio lyno pradinis įsvyris. Kai kintamosios ir nuolatinės apkrovos santykis $\gamma = 1$, matomas ir ryškesnis išankstinio įtempimo jėgos efektas. Poslinkiai, iš anksto įtempus stygą ar ją apkrovus išskirstyta apkrova, sumažėja apie 17 %.

Stygos ir apatinio lyno ašinių standžių santykis, n



2.16 pav. Styginės kabamosios konstrukcijos maksimalių ($L/4$) poslinkių priklausomybė nuo stygos ir apatinio lyno ašinių standžių santykio.

Čia a, b, c – $\gamma = 1$; d, e, f – $\gamma = 2$; g, h, i – $\gamma = 10$

Fig. 2.16. Dependence of the maximum ($L/4$) displacements of the string cable suspension structure on the ratio of the axial stiffness of the string and the lower cable.

Here: a, b, c – $\gamma = 1$; d, e, f – $\gamma = 2$; and g, h, i – $\gamma = 10$

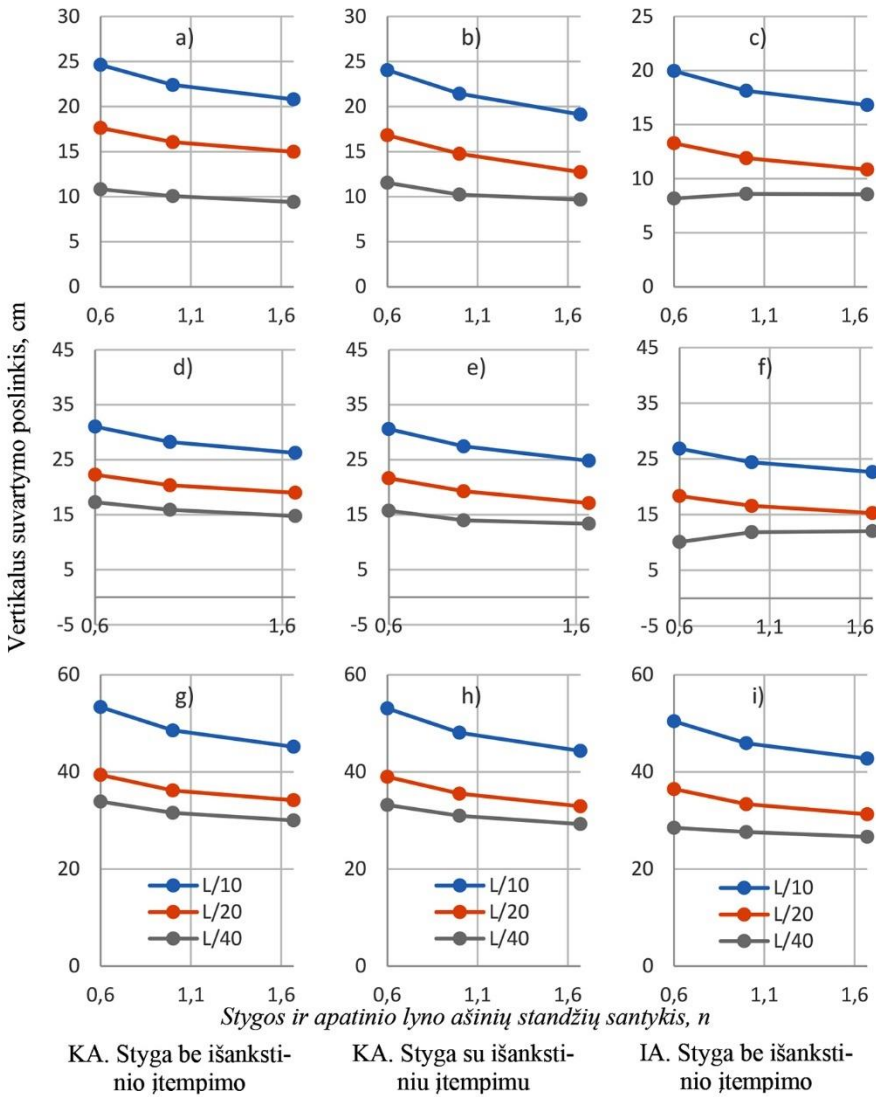
Didėjant kintamajai apkrovai ir santykiui γ , išankstinio įtempimo efektas bendriesiems poslinkiams mažėja. Tai lengvai paaiškinama tuo, kad didėjant suminei apkrovai, didėja ir tamprieji poslinkiai, kurie sudaro vis didesnę dalį bendrųjų poslinkių.

Taip pat iš bendrųjų poslinkių priklausomybių grafikų matoma, kad esant apatinio lyno įsvyriui $L/10$, didėjant stygos ir apatinio lyno ašinių standžių santykiui poslinkiai mažėja. Tokia elgsena yra visiškai priešinga atvejams, kai apatinio lyno pradinis įsvyris yra $L/20$ ar $L/40$. Tokia elgsena atsiranda dėl to, kad esant pradiniam lyno įsvyriui $L/10$, apatiniame lyne yra didžiausia kinematiniai poslinkiai. Tuo pačiu, didinant stygos ašinį standį, vis didesnę apkrovos dalį perima styga, dėl ko konstrukcijoje mažėja kinematiniai poslinkiai, o tai mažina ir bendruosius poslinkius.

Kai turime apatinio lyno pradinius įsvyrius $L/20$ ir $L/40$, dominuojantys poslinkiai yra tamprieji, kadangi mažesnis apatinio lyno pradinis įsvyris sukelia ir mažesnius kinematinis poslinkius. Dominuojant tampriesiems poslinkiams, kai turime pačią didžiausią suminę apkrovą, išankstinis stygos įtempimas taip pat turi mažą efektą konstrukcijų poslinkiams. Visais atvejais, didžiausią efektą išankstinis įtempimas duoda tada, kai turime didžiausius kinematinis poslinkius. Didėjant kintamosios apkrovos reikšmei ir tampriesiems poslinkiams, mažiausiai poslinkiai konstrukcijoje yra tada, kai turime didžiausią apatinio lyno pradinį įsvyrį ($L/10$), nors šiuo atveju kinematiniai poslinkiai pasiekia didžiausią reikšmę. Visgi, kinematinis poslinkius nesudėtinga suvaldyti didinant stygos ašinį standį arba jos išankstinį įtempimą.

Didesnė kinematinųjų poslinkių įtaka matoma 2.17 pav., kur pateikti tik kinematiniai poslinkiai, gauti analitiniu metodu. Atskirai nagrinėjant kinematinis poslinkius matyti, kad jų priklausomybė nuo apatinio lyno įsvyrio yra priešinga bendriesiems poslinkiams (2.16 pav.). Didžiausi kinematiniai poslinkiai gaunami, kai apatinio lyno įsvyris $L/10$, o mažiausi – esant įsvyriui $L/40$. Tuo tarpu bendrieji poslinkiai rodo priešingą tendenciją – mažiausi poslinkiai gaunami esant didesniai įsvyriui ($L/10$).

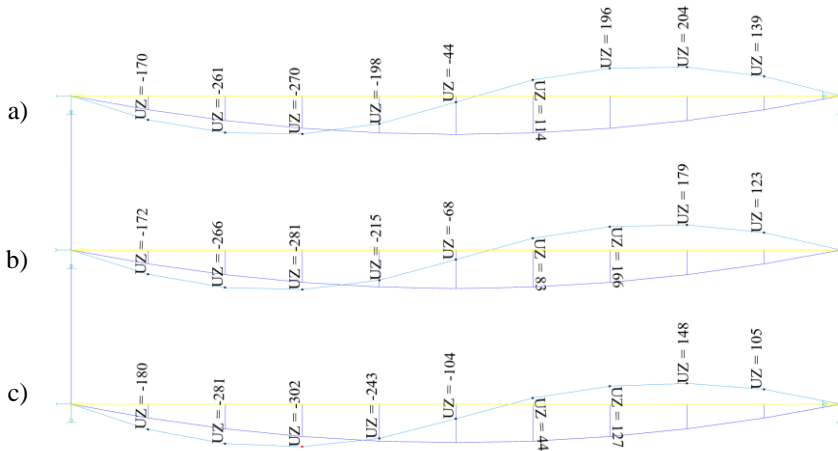
2.17 pav. taip pat matoma įtaka kinematinis poslinkiams kintamosios ir nuolatinės apkrovos santykio γ . Didinant apkrovos santykį γ , didėja ir kinematiniai poslinkiai. Santykiui didėjant nuo 1 iki 2, kinematiniai poslinkiai didėja apie 26 %, kai apatinio lyno įsvyris $L/10$, ašinių standžių santykis $n = 0,6$. Kai apatinio lyno įsvyris $L/40$, o ašinių standžių santykis $n = 0,6$, kinematiniai poslinkiai padidėja 60 %. Tai parodo, kokią didelę įtaką kinematinis poslinkiams turi kintamosios ir nuolatinės apkrovos santykis bei apatinio lyno įsvyris.



2.17 pav. Styginės kabamosios konstrukcijos maksimalių ($L/4$) kinematinių poslinkių priklausomybė nuo stygos ir apatinio lyno ašinių standžio santykio.

Čia a, b, c – $\gamma = 1$; d, e, f – $\gamma = 2$; g, h, i – $\gamma = 10$

Fig. 2.17. Dependence of the maximum ($L/4$) kinematic displacements of the string cable suspension structure on the ratio of the axial stiffness of the string and the lower cable. Here: a, b, c – $\gamma = 1$; d, e, f – $\gamma = 2$; and g, h, i – $\gamma = 10$



2.18 pav. Styginės kabamosios konstrukcijos poslinkių schema, kai apkrovimas asimetrišnis, esant stygos ir lyno ašinių standžių santykiams: a) $n = 0,6$, b) $n = 1,0$, c) $n = 1,6$.

Čia UZ – vertikalus poslinkis, mm

Fig. 2.18. Deformation scheme of the string cable suspension structure when the load is asymmetric and axial stiffness ratio (a) $n = 0.6$, (b) $n = 1.0$, and (c) $n = 1.6$.

Here: UZ – vertical displacement in mm

Ašinių standžių santykio įtaką bendriesiems ir kinematiniams poslinkiams matoma 2.16–2.17 pav. pateiktuose grafikuose bei 2.18 pav., kuriame matomi aiškūs poslinkių skirtumai. Nors iš kinematinėms poslinkių grafikų matome, kad didėjantis stygos ašinis standis mažina šiuos poslinkius, tačiau 2.17 pav. pavaizduotoje poslinkių schemoje matoma, kad didėjantis stygos ašinis standis bendruosius poslinkius taip pat padidina.

Taigi, kalbant apie styginės kabamosios konstrukcijos poslinkius ir jų skaičiavimą, būtina yra įvertinti visus konstrukcijos geometrinius parametrus bei kinematinės ir nuolatinės apkrovos santykį. Projektuojant tokią konstrukciją yra privaloma vertinti tiek tampriuosius, tiek kinematinius poslinkius bei jų pasiskirstymą. Kaip parodė atlikta konstrukcijos elgsenos analizė, didžiausią įtaką konstrukcijos bendriesiems bei kinematiniams poslinkiams turi apatinio lyno pradinis įsvyris. Visgi, būtina atkreipti dėmesį ir į kitus parametrus (ašinių standžių santykis, išankstinis stygos įtempimas, mechaniniai medžiagų (stygos ir lyno) parametrai), kurie mažintų konstrukcijos bendruosius poslinkius.

Nagrinęjant stygos ir apatinio lyno ašines jėgas, lentelėje 2.11 matyti, kad apatinio lyno ašinės jėgos praktiškai nepriklauso nuo apkrovos pridėjimo vietos (apkrova simetrine ar asimetrinė) ir priklauso tik nuo suminės apkrovos dydžio. Kitaip sakant, tiek simetrinio, tiek asimetrinio apkrovimo atveju, apatinio lyno ašinės jėgos beveik sutampa.

2.11 lentelė. Apatinio lyno ašinės jėgos, kai apkrovimas asimetrinis ir simetrinis
Table 2.11. Axial forces of the lower cable when the load is asymmetrical and symmetrical

Apatinio lyno pradinis įsvyris f_0 , m	Parametras, n	Apatinio lyno ašinė jėga (Simetrinis apkrovimas), kN	Apatinio lyno ašinė jėga (asimetrinis apkrovimas), kN	Skirtumas, %
5	0,6	628,82	619,77	1 %
5	1	625,81	618,05	1 %
5	1,67	621,6	615,29	1 %
2,5	0,6	1209,38	1190,09	2 %
2,5	1	1190,12	1174,48	1 %
2,5	1,67	1161,04	1150,17	1 %
1,25	0,6	1998,66	1969,92	1 %
1,25	1	1898,4	1878,22	1 %
1,25	1,67	1657,05	1707,94	-3 %

Kalbant apie ašines jėgas stygoje, asimetrinio apkrovimo atveju turime daug didesnes ašines jėgas (dydžius galima matyti 2.11 lentelėje) nei simetrinio apkrovimo atveju. Styga, priešindamasi apatinio lyno kinematiniams poslinkiams, deformuojasi kartu su visa konstrukcija, o tai stygoje sukelia tampriuosius poslinkius ir papildomas ašinės jėgas.

2.12 lentelė. Stygos ašinės jėgos, kai apkrovimas asimetrinis ir simetrinis
Table 2.12. Axial forces of strings with asymmetric and symmetric loading

Apatinio lyno pradinis įsvyris f_0 , m	Parametras, n	Stygos ašinė jėga, asimetrinis apkrovimas, kN	Stygos ašinė jėga, simetrinis apkrovimas, kN	Skirtumas, kN
5	0,6	797,38	0,86	796,52
5	1	896,76	1,79	894,97
5	1,67	982,61	3,98	978,63
2,5	0,6	695,79	13,95	681,84
2,5	1	786,8	29,16	757,64
2,5	1,67	873,91	64,99	808,92
1,25	0,6	675,64	117,64	558
1,25	1	790,34	233,64	556,7
1,25	1,67	939,53	451,49	488,04

2.12 lentelėje taip pat matoma stygos įtaka konstrukcijai. Anksčiau yra minėta, kad didžiausi kinematiniai poslinkiai apatiniame lyne yra tada, kai turime didžiausią pradinį apatinio lyno įsvyrį. Analizuojant ašines jėgas stygoje, esant simetriniam ir asimetriniam apkrovimui, matoma, kad didžiausias ašinių jėgų padidėjimas būtent šiuo atveju ir pastebimas, nes stygai tenka priešintis kinematiniais poslinkiams. Kai mažėja kinematiniai poslinkiai (atvejai, kai pradinis apatinio lyno įsvyris $L/20-L/40$), ašinių jėgų prieaugis stygoje daug mažesnis.

Vertinant ašinių jėgų pasiskirstymą priklausomai nuo konstrukcijos komponavimo parametrų (apatinio lyno pradinis įsvyris, stygos ir apatinio lyno ašinių standžių santykis) matyti, kad ašinės jėgos didėja, didinat šį santykį. Ašinių jėgų pasiskirstymas, priklausomai nuo apatinio lyno pradinio įsvyrio, nėra didelis. Jei palyginti atvejus, kai stygos ir apatinio lyno ašinių standžių santykis sutampa, ašinės jėgos, priklausomai nuo apatinio lyno įsvyrio, kinta ne daugiau nei 18 %, kai poslinkių priklausomybė nuo apatinio lyno pradinio įsvyrio yra daug reikšmingesnė (poslinkis, lyginant apatinio lyno pradinius įsvyrius $L/10$ ir $L/40$, priklausomai nuo stygos ir apatinio lyno ašinių standžių santykio, skiriasi nuo 1,5 iki 2 kartų).

Vertinant gautus rezultatus, galima pagrįstai teigti, kad styginei kabamajai konstrukcijai reikšmingesni yra poslinkiai. Projektuojant tokią konstrukciją, didesnę dėmesį būtina skirti kinematiniais ir bendriesiems konstrukcijos poslinkiams, nes būtent jie labiausiai kinta priklausomai nuo komponavimo parametrų: stygos išankstinio įtempimo, stygos ir lyno ašinių standžių santykio bei apatinio lyno pradinio įsvyrio). Taip pat konstrukcijos poslinkių ir ašinių jėgų rezultatai atskleidžia, kad asimetrisis apkrovimo variantas yra daug pavojingesnis ir sukelia tiek didesnius poslinkius, tiek didesnes ašines jėgas stygoje.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

Skyriuje buvo pristatyta nauja styginė kabamoji konstrukcija bei aptarti tokios konstrukcijos komponavimo parametrai. Parametrai, lemiantys styginės kabamosios konstrukcijos elgseną, yra pradinis apatinio lyno įsvyris f_0 , ašiniai stygos $A_S E_S$ ir apatinio lyno $A_C E_C$ standžiai bei jų santykis $n = \frac{A_S E_S}{A_C E_C}$, taip pat atstumas tarp statramsčių a ir tarpatramio ilgis L .

Skyriuje taip pat atskirai buvo pateiktos visiškai naujos styginės ir styginės kabamosios konstrukcijos inžinerinės metodikos poslinkiams ir įrašoms apskaičiuoti. Inžinerinių apskaičiavimo metodikų rezultatai buvo sulyginami su skaitiškai gautais rezultatais. Skyriaus išvados pateikiamos atskirai styginei ir atskirai styginei kabamajai konstrukcijai.

Styginė konstrukcija

1. Styginei konstrukcijai buvo parengta inžinerinė poslinkių ir įrąžų apskaičiavimo metodika. Skirtumai tarp skaitiškai ir analitiškai gautų rezultatų, neviršija 3 %. Kai stygos išankstinis įtempimas 5,25 kN, paklaidos neviršijo 2 %, o kai 6,625 kN, neviršijo 3 %. Skaitiniu metodu apskaičiuoti konstrukcijos poslinkiai visais atvejais buvo didesni nei gauti analitiniu metodu. Šie rezultatai parodo, kad inžinerinė stygos poslinkių ir įrąžų skaičiavimo metodika gali būti taikoma tokio tipo konstrukcijoms projektuoti ir yra tinkamas įrankis konstrukcijos poslinkiams ir įrąžoms analizuoti.
2. Analizuojant konstrukciją skaitiškai, nustatyta, kad styginėje konstrukcijoje poslinkiai didesni, kai konstrukcija apkraunama asimetriškai. Nors styga neturi kinematinų poslinkių, tačiau asimetrinio apkrovimo atveju, šiek tiek didesnis poslinkis gaunasi apkrautoje tarpatramio pusėje (nagrinėjamu atveju, asimetriškai apkrautos stygos (kai $\gamma = 2$) poslinkiai yra apie 1,8 % didesni nei esant simetriniam apkrovimui). Iš analizinių išraiškų galima nustatyti maksimalaus poslinkio koordinatę (2.3 lygtį). Kuo didesnė apkrovų santykio γ reikšmė, tuo labiau maksimalaus poslinkio vieta/koordinatė tolsta nuo tarpatramio vidurio. Tokie rezultatai parodo, kokias paklaidas gali sukurti vien tik superpozicijos taikymo principas, kai tariama, kad ta pati suminė apkrova sukuria tokius pat tampriuosius poslinkius.

Styginė kabamoji konstrukcija

1. Rengiant inžinerinę poslinkių ir įtempių apskaičiavimo metodiką, priėmus prielaidą, kad tiek lynas, tiek styga veikia kaip viena sistema ir jų poslinkiai visuomet yra vienodi, sudarytos naujos matematinės lygtys, leidžiančios apskaičiuoti apkrovas, tenkančias stygai ir lynui. Parengus šią metodiką, buvo atlikta skaitinė analizė, o rezultatai sulyginti su analitiškai apskaičiuotais. Lyginant rezultatus, didžiausi skirtumai neviršijo 15 % tiek skaičiuojant poslinkius, tiek įtempius. Tokios paklaidos leidžia parengtą inžinerinę metodiką naudoti preliminariai konstrukcijai projektuoti. Taip pat šį metodiką leidžia tirti ir analizuoti konstrukcijos parametrų įtaką jos poslinkiams ir įrąžoms, kadangi tiek skaitiškai, tiek analitiškai gautų rezultatų dinamika sutampa.
2. Pasitelkiant skaitinį metodą, buvo atskirai išanalizuota konstrukcijos elgsena esant simetriniam apkrovimui. Nustatyta, kad esant simetriniam apkrovimui didžiausią įtaką poslinkiams daro apatinio lyno pradinis įsvyris. Esant mažiausiam apatinio lyno įsvyriui ($L/40$), poslinkiai yra maždaug 10 kartų didesni nei atveju, kai įsvyris yra didžiausias ($L/10$).

Taip pat buvo atskleista stygos ir apatinio lyno ašinių standžių santykio įtaka poslinkiams. Esant apatinio lyno įsvyriui $L/10$, didinant ašinių standžių santykį nuo 0,6 iki 1,67, konstrukcijos poslinkiai padidėja 1,6–1,7 karto, kai, turint pradinį apatinio lyno įsvyrį $L/40$, poslinkiai padidėja apie 1,4–1,5 karto. Vertinant išankstinio įtempimo įtaką, kai apkrova simetrinė, matoma minimali įtaka poslinkiams. Stygai suteikiant 448,3–531,5 kN išankstinio įtempimo jėgą, poslinkis sumažėja tik 6 %, esant mažiausiam apatinio lyno pradiniam įsvyriui ($L/40$) ir praktiškai nekinta, kai pradinis apatinio lyno įsvyris $L/10$. Įvertinus gautus rezultatus, priimta, kad esant simetriniam apkrovimui išankstinis stygos įtempimas nėra būtinas, kadangi sukuria papildomas ašines jėgas, tačiau poslinkių nemažina.

3. Parengta inžinerinė poslinkių ir įrašų apskaičiavimo metodika, kai apkrova asimetrinė. Palyginus skaitiškai ir analitiškai gautus poslinkių ir įtempimų apskaičiavimo rezultatus, skirtumai neviršijo 15 %. Didžiausios paklaidos visais atvejais buvo gaunamos tada, kai apatinio lyno įsvyris buvo pats mažiausias ($L/40$). Tokios paklaidos leidžia parengtą inžinerinę metodiką naudoti preliminariai konstrukcijai projektuoti. Taip pat ši metodika leidžia tirti ir analizuoti konstrukcijos parametrų įtaką jos poslinkiams ir įrašoms, kadangi tiek skaitiškai, tiek analitiškai gautų rezultatų dinamika sutampa. Įvertinus gautas paklaidas, atliekant konstrukcijų projektavimą pasitelkiant tik analitinę metodiką, konstrukcijos elementų skerspjuvio išnaudojimas neturėtų viršyti 85 %.
4. Atlikus skaitinę konstrukcijos analizę nustatyta, kad esant asimetriniam apkrovimui, didžiausią įtaką bendriesiems poslinkiams daro apatinio lyno pradinis įsvyris. Kai kintamosios ir nuolatinės apkrovos santykis $\gamma = 1$, matoma ir išankstinio stygos įtempimo įtaka. Poslinkiai, iš anksto įtempus stygą, sumažėja apie 17 %. Šie rezultatai parodo stygos panaudojimo efektyvumą kabančiose konstrukcijose, kai apkrovimas yra asimetrinis, ypač taikant išankstinį jos įtempimą.
5. Didėjant kintamajai apkrovai ir tampriesiems poslinkiams, mažiausi poslinkiai konstrukcijoje yra tada, kai turime didžiausią apatinio lyno pradinį įsvyrį, bet šiuo atveju turime didžiausius kinematinis poslinkius. Kinematinis poslinkius galima sumažinti didinant stygos ašinį standį ir jos išankstinį įtempimą. Tokia elgsena atskleidžia stygos naudojimo kabančiose konstrukcijose privalumus – išankstinio stygos įtempimu galimu reguliuoti įrašas ir poslinkius konstrukcijoje.
6. Analizuojant kinematinis poslinkius, didžiausi poslinkiai gaunami, kai apatinio lyno įsvyris yra $L/10$, o mažiausi, kai apatinio lyno pradinis įsvyris $L/40$. Taip pat nustatyta, kad didinant kintamosios ir nuolatinės apkrovos santykį γ , didėja ir kinematiniai poslinkiai. Santykiui didėjant

nuo 1 iki 2, kinematiniai poslinkiai didėja apie 26 %, kai apatinio lyno įsvyris $L/10$, ašinių standžių santykis $n = 0,6$ ir 60 %, kai apatinio lyno įsvyris $L/40$, o ašinių standžių santykis $n = 0,6$.

7. Asimetrinio apkrovimo atveju ašinės jėgos stygoje yra daug didesnės nei simetrinio apkrovimo atveju. Styga, priešindamasi apatinio lyno kinematiniams poslinkiams, deformuojasi, dėl ko joje atsiranda tamprieji poslinkiai. Tokie rezultatai atskleidžia stygos, kaip konstrukcinio elemento, svarbą visai konstrukcijos elgsenai ir jos efektyvumą veikiant kartu su apatiniu lynu. Styga yra vienas iš būdų mažinti konstrukcijoje atsirandančius kinematinis poslinkius, kurie yra viena pagrindinių kabančių konstrukcijų problemų.

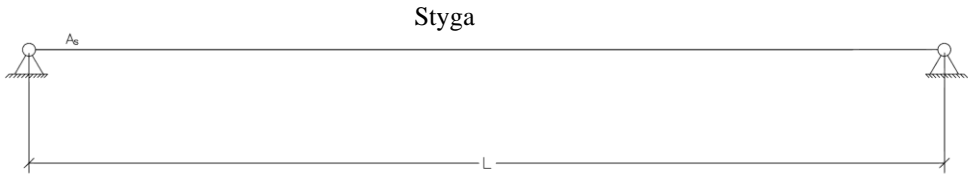
Styginės kabamosios konstrukcijos eksperimentinis tyrimas

Šiame skyriuje pateikiami styginės ir styginės kabamosios konstrukcijos modelių eksperimentiniai tyrimai, kurių tikslas ištirti styginės ir styginės kabamosios konstrukcijų elgsenas. Skyriuje aprašoma eksperimento programa, eksperimentui naudotų medžiagų ir įrangos parametrai. Taip pat aprašomi gauti rezultatai, kurie yra sulyginami su skaitiniu baigtinių elementų metodu gautais rezultatais. Skyriuje pateikti rezultatai publikuoti dvejuose autoriaus straipsniuose (Beivydas et al., 2023; Beivydas & Juozapaitis, 2024).

3.1. Eksperimentinis styginės konstrukcijos modelio tyrimas ir skaitinių rezultatų sugretinimas

Siekiant ištirti stygos elgseną, buvo atliktas ir jos modelio eksperimentinis tyrimas. Tilto modelio stygos ir kabamojo elemento medžiagų savybėms nustatyti buvo paimti keturi 6 mm diametro apvalaus strypo bandiniai, kurių ilgis $L = 500$ mm. Bandiniai buvo paimti iš strypo ruošinių, iš kurių buvo pagaminta modelio konstrukcijos styga (3.1 pav.) ir apatinė juosta (3.2 pav.). Suprojektuotos styginės konstrukcijos parametrai pateikti žemiau:

- stygos tarpatramis $L = 5,0$ m;
- vienos stygos skerspjūvis – 6 mm skersmens plieninis apvalus strypas, kurio skerspjūvio plotas $A = 28,26$ mm².



3.1 pav. Styginė konstrukcija
Fig. 3.1. String structure



3.2 pav. Strypo tempimo bandymas
Fig. 3.2. Rod tensile test

Bandymai buvo atlikti pagal ISO 6892-1 A223, 2019, Vilnius Gedimino Technikos universiteto Statybos fakulteto konstrukcijų ir medžiagų laboratorijoje.

Bandymui buvo naudotas tempimo įrenginys (*w+b walter+bai ag*), kurio tempimo galia 100 kN.

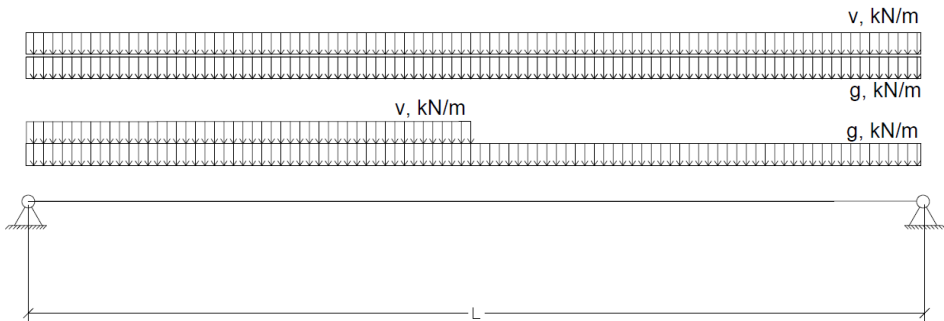
Bandymo metu buvo nustatytas plieninių strypų tamprumo modulis E , kurio gauta vidutinė reikšmė 202,81 GPa. Kitos bandinių mechaninės savybės pateiktos 3.1 lentelėje. Visi pateikti rezultatai gauti bandymo įrenginio programinės įrangos pagalba.

3.1 lentelė. Mechaninės 6 mm strypo savybės

Table 3.1. Mechanical properties of 6 mm rod

Bandinio numeris	Tamprumo modulis, E (N/mm ²)	Stiprumo riba, R_m (MPa)	Takumo riba, $RP_{0,2}$ (MPa)
1	200,11	857	808
2	203,98	859	804
3	201,26	859	810
4	205,87	853	793
Vidurkis	202,81	857	803,75

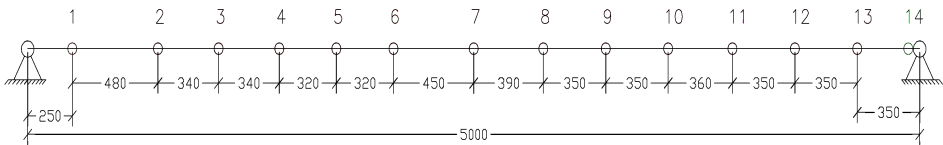
Modelio konstrukcija buvo apkraunama tolygiai paskirstyta apkrova, naudojant svarmenis iš stačiakampių plieninių strypų, kurių matmenys – 25x25 mm, ilgis – 500 mm ilgio, o vieno svarmens skaičiuotinas svoris 2,45 kg. Stygos apkrovimo schemas pateiktos 3.3 pav. Apkrovimo dydis buvo parinktas taip, kad po maksimalaus apkrovimo, įtempiai stygoje siektų apie 50 % takumo ribos. Tai buvo apskaičiuota pasitelkiant skaitinį BEM metodą.



3.3 pav. Stygos apkrovimo schema

Fig. 3.3. String loading scheme

Poslinkiams matuoti buvo naudojami skaitmeniniai įlinkomačiai *Novoteknik* TYP:TR-0100, ART. Nr. 023264, F.NR 119988/A, kurie matavo poslinkius 0,001 mm tikslumu. Vertikalūs modelio poslinkiai buvo matuojami 13-oje taškų, neskaitant atramų horizontalių poslinkių matavimo (horizontalių poslinkių reikšmės iki 0,003 mm). Stygos įtempiai buvo matuoti tenzo jutikliais, kurių bazė 20 mm, o varža $R = 202,3 \Omega$, kurių išdėstymo schema parodyta 3.4 pav. Visi davikliai buvo sujungti su įrenginiu *Ahlborn Almemo 5990-2*, kuriuo buvo gauti bandymo duomenys.



3.4 pav. Įlinkomačių išdėstymo schema. Nuo 1 iki 14 – įlinkomačių numeriai

Fig. 3.4. Scheme of vertical displacements and stresses gauges.

Here: 1 to 14 are numbers of gauges



3.5 pav. Eksperimentinio modelio nuotrauka

Fig. 3.5. Photo of experimental model

Pirmiausiai konstrukcija buvo apkrauta nuolatine apkrova, kurios dydžiai nurodyti 3.2 ir 3.3 lentelėse, naudojant plieninius strypus, juos tolygiai išskirstant ant stygos. Visi duomenys buvo sekami sumontuotos įrangos, fiksuojant kiekvieno apkrovimo laiką, pagalba. Vėliau buvo atitinkamai užkraunama simetrinė kintamoji apkrova ir trys variantai asimetrinės kintamosios apkrovos (vis didinant kintamosios ir nuolatinės apkrovos santykį). Atlikus pirmąjį bandymą, styga buvo papildomai įtempta ties atrama įmontuoto varžto pagalba (papildomai įtempta tiek, kiek tai pavyko padaryti rankiniu būdu). Vėliau išankstinis įtempimas buvo pamatuotas naudojant tenzo jutiklius – bandymo pabaigoje atliktas visiškasis stygos atleidimas, o įtempių rezultatai palyginti tarp keturių būsenų: prieš apkrovimą, po apkrovimo, po papildomo išankstinio įtempimo ir po konstrukcijos atleidimo. Apkrovimo variantai, gauti rezultatai ir skaitinės jų vertės pateiktos 3.2–3.3 lentelėse.

3.2 lentelė. Skaitiniai ir eksperimentiniai rezultatai $N_0 = 5,25$ kN

Table 3.2. Numerical and experimental results $N_0 = 5.25$ kN

Apkrovimo variantas	Apkrova		Rezultatai gauti eksperimentiškai		Rezultatai gauti skaitiškai		Skirtumas, %
	Nuolatinė, kN/m	Kintamoji, kN/m	Įtempiai, MPa	Ašinė jėga, kN	Įtempiai, MPa	Ašinė jėga, kN	
Nuolatinė apkrova	0,17		247,35	6,99	247,35	7,00	0 %
Simetrinis apkrovimas	0,17	0,17	358,30	10,13	361,31	10,23	1 %
Asimetrinis apkrovimas $\gamma = 1$	0,17	0,17	308,29	8,71	308,42	8,73	0 %
Asimetrinis apkrovimas $\gamma = 2$	0,17	0,34	363,74	10,28	365,91	10,36	1 %
Asimetrinis apkrovimas $\gamma = 3$	0,17	0,51	413,90	11,70	419,80	11,88	1 %

3.3 lentelė. Skaitiniai ir eksperimentiniai rezultatai $N_0 = 6,625$ kN

Table 3.3. Numerical and experimental results $N_0 = 6.625$ kN

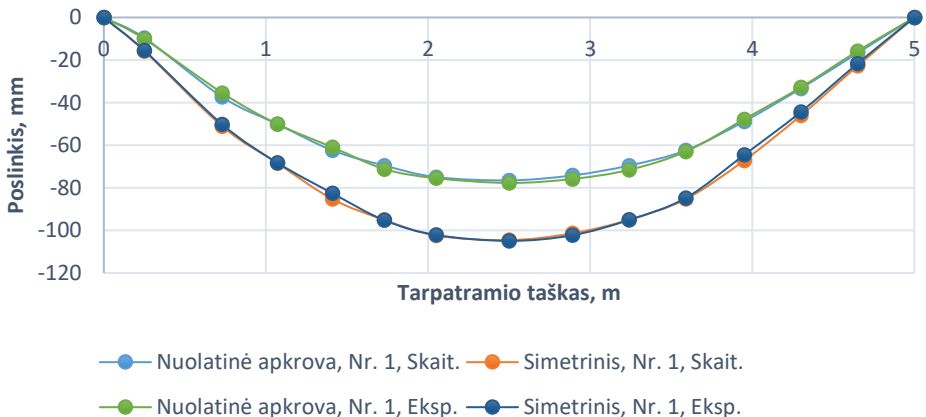
Apkrovimo variantas	Apkrova		Rezultatai gauti eksperimentiškai		Rezultatai gauti skaitiškai		Skirtumas, %
	Nuolatinė, kN/m	Kintamoji, kN/m	Įtempiai, MPa	Ašinė jėga, kN	Įtempiai, MPa	Ašinė jėga, kN	
Nuolatinė apkrova	0,17		257,00	7,26	257,00	7,26	0 %
Simetrinis apkrovimas	0,17	0,17	354,50	10,02	369,34	10,45	4 %
Asimetrinis apkrovimas $\gamma = 1$	0,17	0,17	313,34	8,86	316,88	8,97	1 %
Asimetrinis apkrovimas $\gamma = 2$	0,17	0,34	364,61	10,30	373,91	10,58	2 %
Asimetrinis apkrovimas $\gamma = 3$	0,17	0,51	412,91	11,67	427,52	12,10	3 %

3.6–3.11 pav. esančiuose grafikuose, kaip ir 3.2–3.3 lentelėse, yra pateikiami eksperimentinių ir skaitinės analizės rezultatai. Grafikuose ir lentelėse pateikiami vienos iš stygos įtempiai ir poslinkiai. Įtempiai buvo matuojami atskirai abiejose stygose, tačiau įtempių skirtumai absoliučiu skirtumu sudarė tik 4 %, o įtempių pokytis, priklausomai apkrovimo varianto, skirtingose stygose skiriasi iki 1,5 %, dėl ko rezultatų palyginime pateikiami tik vienos iš stygos įtempių ir tempimo jėgų matavimo rezultatai. 3.6–3.11 pav. pateiktuose grafikuose duomenys pateikiami sekančiu žymėjimu: Nr. 1, kai išankstinis stygos įtempimas 5,25 kN, Nr. 2, kai stygos išankstinis įtempimas 6,625 kN.

Atlikus eksperimentiškai ir skaitiškai gautų įtempių rezultatų palyginimą, nustatyta, kad eksperimentiniu būdu gauti ir išmatuoti įtempiai skiriasi iki 4 %. Vidutinis įtempių skirtumas ~1 %.

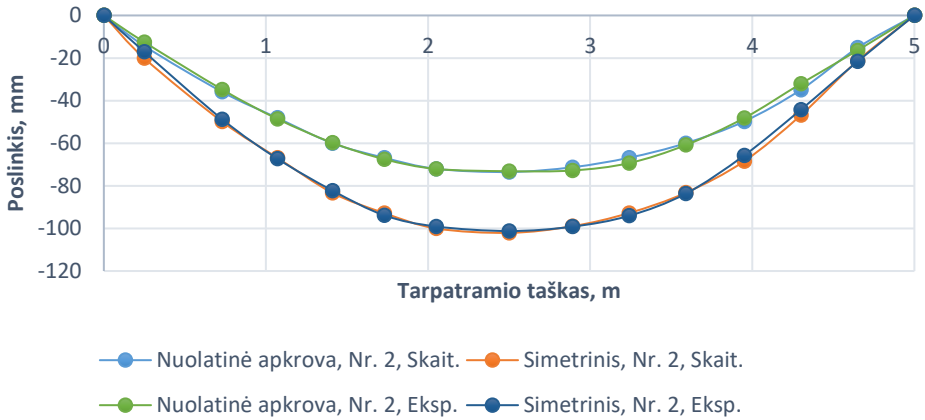
Norint palyginti skaitiškai ir analitiškai gautus rezultatus, 3.6–3.11 pav. pateikiami vertikalių poslinkių grafikai kiekviename matuotame pjūvyje (3.4 pav.).

3.6–3.9 pav. pateiktuose grafikuose matyti, kad skirtumai tarp eksperimentinių ir skaitinių rezultatų yra minimalūs. Didžiausi ekstremumų skirtumai – iki 3 %. 3.10–3.11 pav. pateikti grafikai tik eksperimentinio modelio rezultatų. Pateikti rezultatai prie 2-jų skirtingų išankstinio įtempimo $N_0 = 5,25$ ir 6,625 kN reikšmių. Iš grafikų matome, kad išankstinis įtempimas mažina stygos maksimalius poslinkius. Padidinus stygos išankstinį įtempimą N_0 nuo 5,25 kN iki 6,625 kN, stygos poslinkiai, tiek simetrinio apkrovimo atveju, tiek asimetrinio apkrovimo atveju – sumažėjo 3,6 %.



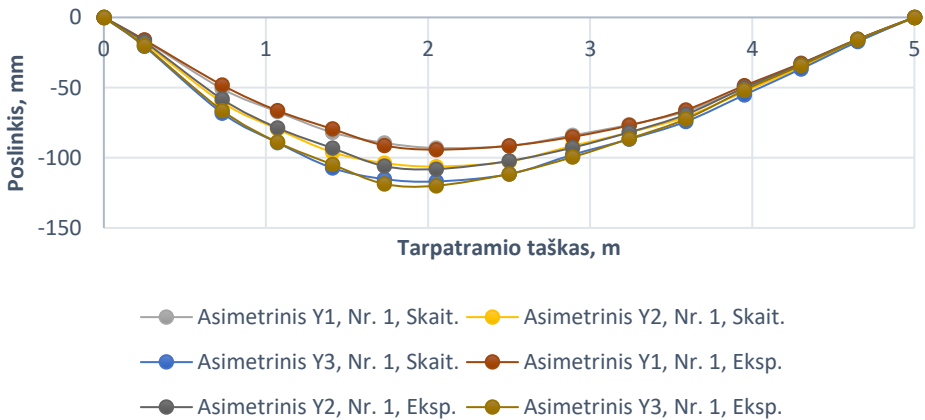
3.6 pav. Vertikalių poslinkių skaitiniai ir eksperimentiniai rezultatai, kai stygos išankstinis įtempimas $N_0 = 5,25$ kN, o apkrovimas simetrinis

Fig. 3.6. Numerical and experimental results of vertical displacements when the string is prestressed, $N_0 = 5.25$ kN, and the loading is symmetrical



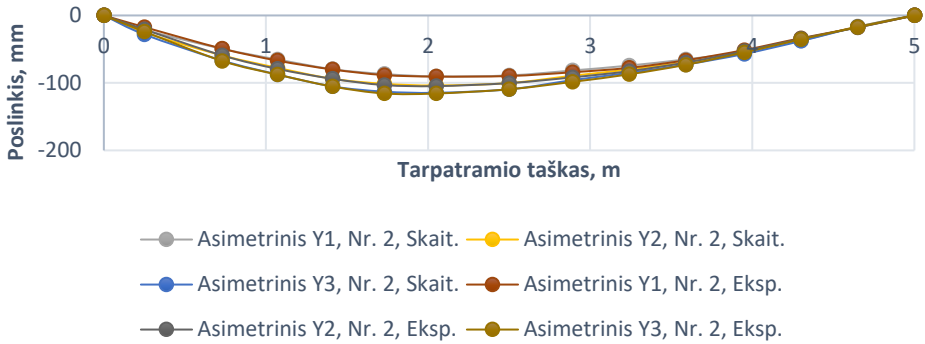
3.7 pav. Vertikalių poslinkių skaitiniai ir eksperimentiniai rezultatai, kai stygos išankstinis įtempimas $N_0 = 6,625$ kN, o apkrovimas simetrinis

Fig. 3.7. Numerical and experimental results of vertical displacements when the string is prestressed, $N_0 = 6.625$ kN, and the loading is symmetrical

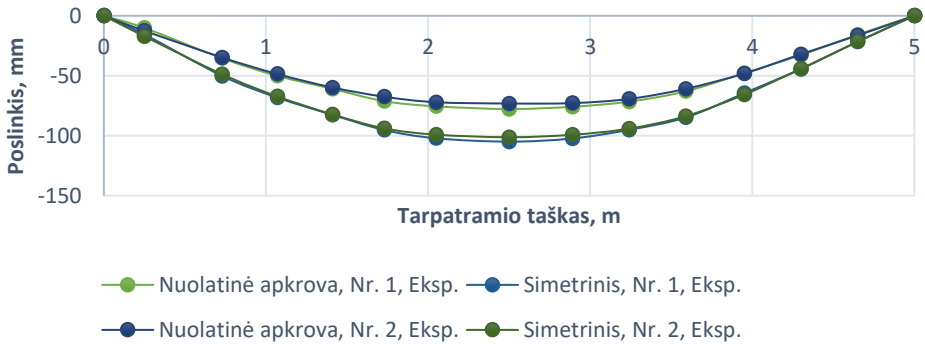


3.8 pav. Vertikalių poslinkių skaitiniai ir eksperimentiniai rezultatai, kai stygos išankstinis įtempimas $N_0 = 5,25$ kN, o apkrovimas asimetrinis

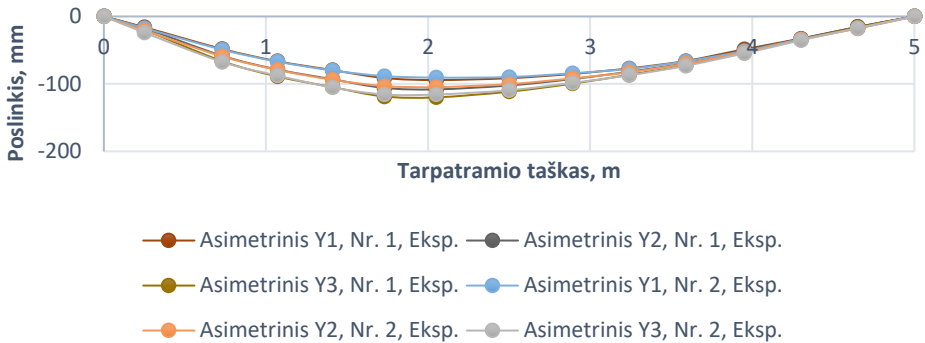
Fig. 3.8. Numerical and experimental results of vertical displacements when the string is prestressed, $N_0 = 5.25$ kN, and the loading is asymmetrical



3.9 pav. Vertikalių poslinkių skaitiniai ir eksperimentiniai rezultatai, kai stygos išankstinis įtempimas $N_0 = 6,625$ kN, o apkrovimas asimetrisis
Fig. 3.9. Numerical and experimental results of vertical displacements when the string is prestressed, $N_0 = 6.625$ kN, and the loading is asymmetrical



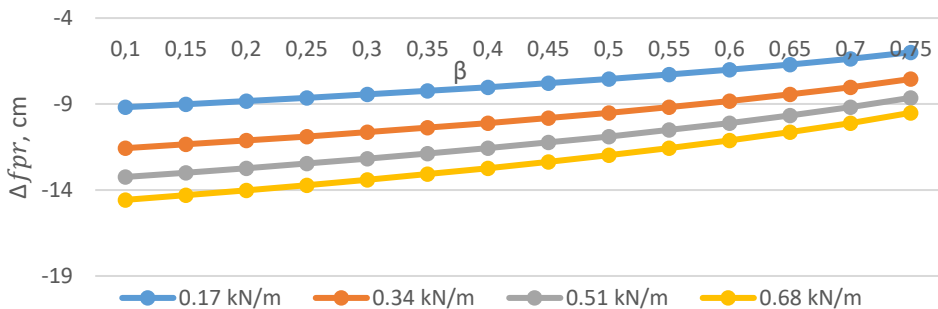
3.10 pav. Vertikalių poslinkių eksperimentiniai rezultatai, kai stygos išankstinis įtempimas $N_0 = 5,25$ ir $6,625$ kN, o apkrovimas simetrisis
Fig. 3.10. Numerical and experimental results of vertical displacements when the string is prestressed, $N_0 = 5.25$ and 6.625 kN, and the loading is symmetrical



3.11 pav. Vertikalių poslinkių eksperimentiniai rezultatai, kai stygos išankstinis įtempimas $N_0 = 5,25$ ir $6,625$ kN, o apkrovimas asimetrišnis

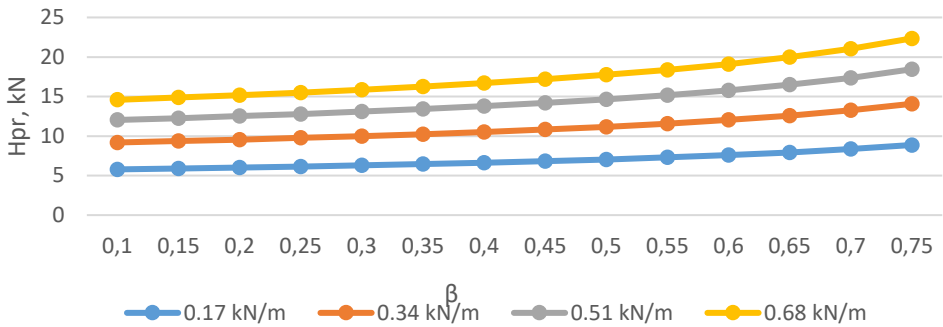
Fig. 3.11. Numerical and experimental results of vertical displacements when the string is prestressed, $N_0 = 5.25$ and 6.625 kN, and the loading is asymmetrical

Siekiant tiksliau parodyti stygos išankstinio įtempimo įtaką jos poslinkiams, 3.12 pav. pateikiamas grafikas – stygos poslinkių priklausomybė nuo išankstinio įtempimo parametro n , keičiant n nuo 0,1 iki 0,75 (pagal eksperimento modelio geometriją). 3.13 pav. pateikiama skėtimo jėgos priklausomybė nuo to pačio parametro β . Pateikti rezultatai yra gauti analitiniu metodu, siekiant parodyti išankstinio įtempimo stygoje įtaką.



3.12 pav. Vertikalių poslinkių priklausomybė nuo stygos išankstinio įtempimo parametro β , kai styga apkrauta simetriškai

Fig. 3.12. Dependence of vertical displacements on the string pretension parameter β , when the string is loaded symmetrically



3.13 pav. Skėtimo jėgos stygoje priklausomybė nuo stygos išankstinio įtempimo parametro β , kai styga apkrauta simetriškai.

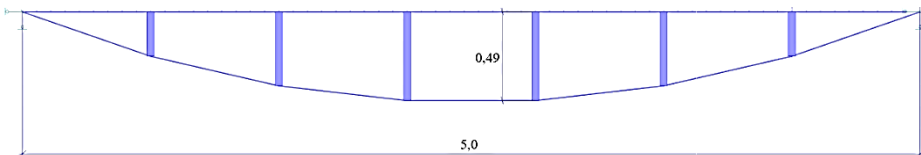
Fig. 3.13. Dependence of the shear force in the string on the string pretension parameter β , when the string is loaded symmetrically

3.12–3.13 pav. pavaizduoti grafikai atskleidžia stygos išankstinio įtempimo įtaką. Kuo didesnis stygos išankstinis įtempimas, tuo stygos poslinkis mažesnis. Žinoma, mažinant stygos poslinkį bei didinant išankstinį įtempimą stygoje, didėja ir jos tempimo jėga.

3.2. Eksperimentinis styginės kabamosios konstrukcijos modelio tyrimas ir skaitinių rezultatų sugretinimas

Poskyryje pateikiamas eksperimentinis ir skaitinis styginės kabamosios konstrukcijos tyrimas. Tiriamos konstrukcijos schema pateikta 3.14 pav. Konstrukcijai apkrauti ir įvairiems matavimams atlikti buvo naudojami tie patys apkrovos stypai ir įrenginiai, kaip ir stygos bandymo metu (3.1 skyrius).

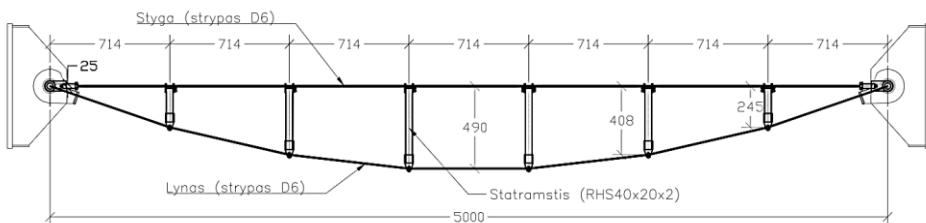
Eksperimentinis styginės kabamosios konstrukcijos tyrimas. Eksperimentinė programa



3.14 pav. Styginė kabamoji tilto konstrukcija. Modelis iš BEM programos
Fig. 3.14. String cable suspension bridge structure Model from FE software

Pagrindinis eksperimentinio tyrimo tikslas buvo ištirti naujo styginio kabamojo plieninio tilto elgseną, veikiant statinėms simetrinėms ir asimetrinėms apkrovoms. Taip pat buvo siekiama nustatyti tikrąją tokio tilto modelio elementų įtempių ir deformacijų būseną bei įvertinti iš anksto įtemptos stygos įtaką tilto deformacijoms veikiant asimetrinėms apkrovoms.

Eksperimento tikslams pasiekti buvo suprojektuotas inovatyvus styginio kabamojo tilto modelis. Šis tilto modelis susideda iš: iš anksto įtemptos stygos, paremtos per statramsčius ant apatinio lyno; apatinio lyno; statramsčių tarp apatinio lyno ir stygos. Ši styga, kaip viršutinis naujos kombinuotos plieninės konstrukcijos elementas, atlieka tilto standumo sijos funkciją. Apatinis elementas veikia kaip konstrukcijos atraminė juosta. Stygos ir apatinio lyno atramos yra suprojektuotos taip, kad būtų nepaslankios tiek vertikaliai, tiek horizontaliai ir būtų sujungtos į vieną sistemą. Bandomasis modelis buvo sukurtas taip, kad viršutinį elementą (stygą) būtų galima lengvai papildomai įtempti. Styga buvo ištininė per visą tarpatramį, o galuose pritvirtinta varžtais (3.15 pav.). Styga ir lynas atraminuose mazguose gali laisvai sukis apie ašį, statmeną konstrukcijos plokštumai.



3.15 pav. Eksperimentinio tilto modelio schema su parametrais (matmenys pateikti milimetrais)

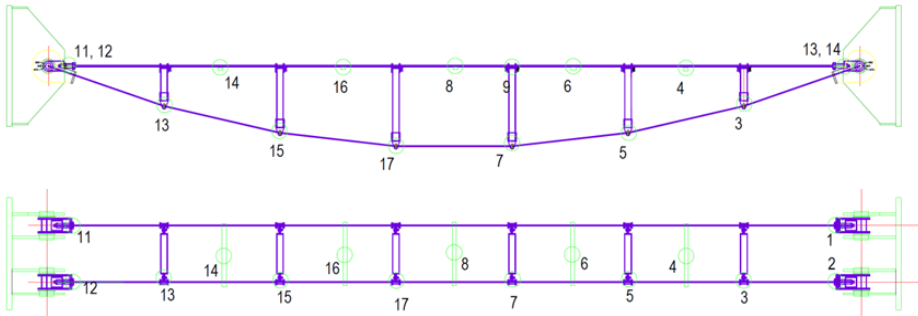
Fig. 3.15. Scheme of the bridge model with parameters (dimensions are given in millimetres)

Styginių lyno konstrukcijos modelio parametrai buvo tokie:

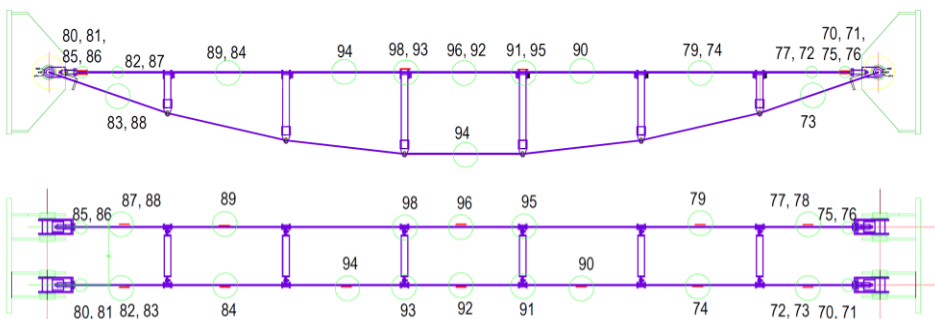
- modelio tarpatramis L – 5,0 m;
- tilto modelio plotis (atstumas tarp dviejų plokščių konstrukcijų) lygus 0,5 metro;
- atstumas tarp statramsčių visur vienodas ir yra 0,714 m (3.15 pav.);
- modelio statramsčiai suprojektuoti iš stačiakampio skerspjūvio profilių RHS 40x20x2. Tokie statramsčių skerspjūvio matmenys parinkti siekiant pašalinti galimas ašines statramsčių deformacijas ir tuo pačiu jų įtaką tilto modelio elgsenai;
- vienos stygos skerspjūvis – 6 mm skersmens plieninis apvalus strypas, kurio skerspjūvio plotas $A = 28,26 \text{ mm}^2$.

Statramsčių aukščiai parinkti taip, kad apatinio lyno forma atitiktų parabolės formą. Tokios lyno koordinatės leidžia tilto sistemai tolygiai deformuotis esant simetrinei apkrovai. Maksimalus statramsčio aukštis arba lyno pradinis įsvyris yra 0,490 m. Viršutinis elementas (styga) ir apatinis elementas (lynas) suprojektuoti iš 6 mm skersmens apvalaus plieninio strypo, kadangi tokio diametro strypą buvo galima užsakyti kalibruotą, be to, 6 mm diametras buvo minimalus, leidžiantis sėkmingai pritvirtinti tenzo jutiklius.

Šiam modelio bandymui buvo parinktos dviejų tipų matavimo priemonės: poslinkio matuokliai ir deformacijų matuokliai. Poslinkių duomenims fiksuoti buvo naudojamas *Novotechnik* TYP:TR-0100, ART Nr. 023264, F.NR 119988/A linijinis potenciometrinis jutiklis. Vertikalūs modelio poslinkiai buvo išmatuoti ties 16 taškų (3.16 pav.) Stygos ir apatinio lyno įtempimas buvo matuojamas klijuojamais 20 mm bazės įtempių matuokliais. Visi deformacijų matuokliai (28 vnt., 3.17 pav.) buvo prijungti prie prietaiso *Ahlborn Almemo* 5990-2.



3.16 pav. Įlinkomačių išdėstymo schema, kur nuo 1 iki 17 – įlinkomačių numeriai
Fig. 3.16. Deflectometers layout scheme, where 1 to 17 are the deflectometer numbers



3.17 pav. Tenzo jutiklių išdėstymo schema, kur nuo 70 iki 98 – jutiklių numeriai
Fig. 3.17. Tenzo sensor layout scheme, where 70 to 98 - sensor numbers

3.17 pav. matoma, kad jutikliai sugrupuoti į tris grupes: nuo 70–79 (dešinioji dalis), jutikliai 80–89 kairioji modelio dalis ir jutikliai 90–99 centrinėje modelio dalyje. Įtempiai apatiniame lyne buvo matuojamai 4 davikliais (83, 88, 94, 73), viršutiniame elemente (stygoje) – 24 davikliais. Toks daviklių išdėstymas buvo pasirinktas dėl įrangos apribojimų ir maksimalaus galimų prijungti daviklių skaičiaus. Didžioji dauguma daviklių buvo sudėti ant stygos, kadangi ji yra pagrindinis tiriamasis elementas ir atlieka pagrindinės sijos funkciją.

Styginių kabamojo tilto modelis buvo išbandytas veikiant statinėms ir asimetrinėms apkrovoms. Ši plieninė tilto konstrukcija apkraunama 5 skirtingais deriniais: 2 variantai, kai apkrovos yra simetrinės, ir 3 variantai, kai apkrovos yra asimetrinės. Apkrovų deriniai pateikti 3.4 lentelėje. Stygos išankstinio įtempimo tikslios reikšmės buvo gautos tik po pilno konstrukcijų nukrovimo ir stygos atleidimo, skaičiuojant įtempių skirtumus tarp įtempimo variantų. Taigi T_1 išankstinis įtempimas apibrėžia pradinę modelio būseną, kai konstrukcija yra sumontuota taip, kad atitiktų geometrinę modelio formą. Vėliau įtempimas buvo atliekamas rankiniu būdu, sukant atramų galuose esančius varžtus. Kiekvieno naujo įtempimo metu buvo siekiama konstrukciją įtempti po 0,5 kN, o tai buvo matuojama naudojant ekstensometrą.

3.4 lentelė. Konstrukcinė apkrova ir išankstinis stygos įtempimas

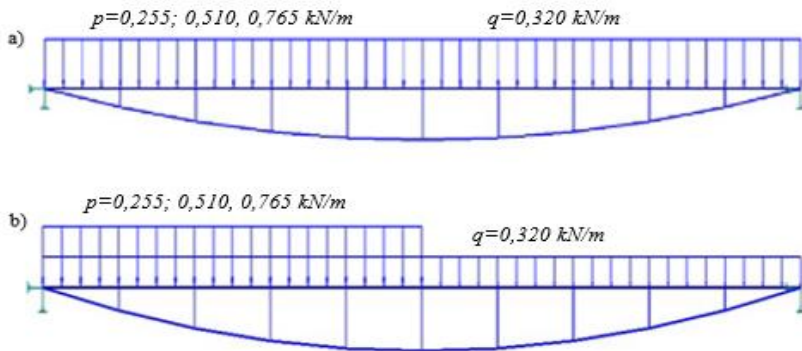
Table 3.4. Structural load and string prestress

Apkrovos tipas	$\gamma = \frac{q}{p}$;	q, kN/m	Išankstinio įtempimo jėga, kN
Nuolatinė apkrova	-	0,320	$T_1 = 0,472$ $T_2 = 1,084$ $T_3 = 1,506$
Kintamojo apkrova (simetrinė)	-	0,255	$T_1 = 0,472$ $T_2 = 1,084$ $T_3 = 1,506$
Kintamoji apkrova (asimetrinė)	1	0,255	$T_1 = 0,472$ $T_2 = 1,084$ $T_3 = 1,506$
	2	0,510	$T_1 = 0,472$ $T_2 = 1,084$ $T_3 = 1,506$
	3	0,765	$T_1 = 0,472$ $T_2 = 1,084$ $T_3 = 1,506$

Kai analizuojami apkrovimo variantai, svarbus parametras čia yra kintamosios ir nuolatinės apkrovos santykis:

$$\gamma = \frac{p}{q}$$

Tilto modelis buvo apkrautas tolygiai paskirstyta apkrova, naudojant 25×25 mm skerspjūvio, 500 mm ilgio stačiakampius plieninius strypus, kurių kiekvieno masė lygi 2,45 kg. Tilto modelio apkrovų schemas pateiktos 3.18 pav.



3.18 pav. Tilto modelio apkrovimo variantai su trimis skirtingais kintamosios apkrovos (p) variantais: a) simetrinė apkrova, b) asimetrinė apkrova

Fig. 3.18. Load variants of the bridge model with three different variable loads (p) variants: (a) symmetric load and (b) asymmetric load



3.19 pav.. Eksperimentinio modelio nuotrauka: kairėje – surinkta konstrukcija, dešinėje – konstrukcijos atrama

Fig. 3.19. Photo of the experimental model: left-assembled structure and right-structure support

Bendras tilto modelio ir atramos mazgo vaizdas parodytas 3.19 pav., o jo simetrinės ir asimetrinės apkrovos eksperimento metu – 3.20–3.21 pav.



3.20 pav. Eksperimentinio modelio nuotrauka. Simetriškai apkrauta (nuolatinė apkrova) konstrukcija

Fig. 3.20. Photo of the experimental model. Symmetrically loaded (constant load) structure



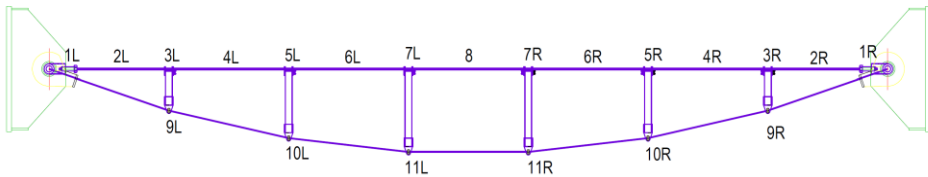
3.21 pav. Asimetriškai apkrauta modelio konstrukcija, kai veikia simetrinės nuolatinės ir kintamos (eismo) asimetrinės apkrovos

Fig. 3.21. Asymmetrically loaded model structure with symmetric constant and variable asymmetric loads

Po bandymo konstrukcija buvo nukrauta ir joje taip pat buvo fiksuojami įlinkiai ir įtempiai. Nukrovus konstrukciją visiškai, ši buvo atleista ir vėl buvo fiksuojami įtempių konstrukcijoje rezultatai.

Eksperimentinis styginės kabamosios konstrukcijos tyrimas. Bandymų rezultatai ir analizė

Visi eksperimento metu gauti rezultatai pateikti pagal 3.22 pav. Schema skirta atskirti kairę ir dešinę konstrukcijos puses. Analizuojami taškai su raide „L“ nurodo kairę konstrukcijos pusę, o raide „R“ – dešinę konstrukcijos pusę. Viduriniam taškui „8“ indeksas nesuteikiamas, nes tai yra tarpatramio vidurio taškas. Tokie žymėjimai buvo pasirinkti aiškesniems duomenims pateikti.



3.22 pav. Tilto modelio taškų numeracija
Fig. 3.22. Numbering of points of the bridge model

Simetrinė apkrova

Simetriškai apkrauto tilto modelio poslinkio reikšmės pateiktos atitinkamai 3.5–3.7 lentelėse pagal stygos išankstinio įtempimo reikšmes. Vertikalūs poslinkiai pateikiami tik mazguose, kaip nurodyta įlinkomačių schemeje (3.16).

3.5 lentelė. Tilto modelio vertikalūs poslinkiai veikiant stygos išankstinio įtempimo jėgai $T_1 = 0,472$ kN

Table 3.5. Vertical displacements of the bridge model under the action of the string prestressing force $T_1 = 0,472$ kN

Apkrovos tipas	Vertikalūs poslinkiai, mm							
	1L	3L/9L	5L/10L	7L/11L	7R/11R	5R/10R	3R/9R	1R
Matavimo taškai	1L	3L/9L	5L/10L	7L/11L	7R/11R	5R/10R	3R/9R	1R
Nuolatinė apkrova	0	-1,87	-2,54	-2,76	-2,65	-2,41	-1,66	0
Kintamoji apkrova	0	-3,06	-4,64	-5,66	-5,95	-4,98	-3,22	0

3.6 lentelė. Modelio vertikalūs poslinkiai veikiant stygos išankstinio įtempimo jėgai $T_2 = 1,084$ kN

Table 3.6. Vertical displacements of the model under the action of the prestressing force of the string $T_2 = 1.084$ kN

Apkrovos tipas	Vertikalūs poslinkiai, mm							
	1L	3L/9L	5L/10L	7L/11L	7R/11R	5R/10R	3R/9R	1R
Matavimo taškai	1L	3L/9L	5L/10L	7L/11L	7R/11R	5R/10R	3R/9R	1R
Nuolatinė apkrova	0	-1,82	-2,45	-2,84	-2,9	-2,57	-2,08	0
Kintamoji apkrova	0	-3,32	-4,72	-5,9	-5,91	-4,57	-2,95	0

3.7 lentelė. Vertikalūs modelio poslinkiai veikiant stygos išankstinio įtempimo jėgai $T_3 = 1,506$ kN

Table 3.7. Vertical displacements of the model under the action of the prestressing force of the string $T_3 = 1.506$ kN

Apkrovos tipas	Vertikalūs poslinkiai, mm							
	1L	3L/9L	5L/10L	7L/11L	7R/11R	5R/10R	3R/9R	1R
Matavimo taškai	1L	3L/9L	5L/10L	7L/11L	7R/11R	5R/10R	3R/9R	1R
Nuolatinė apkrova	0	-1,97	-3,07	-3,3	-3,4	-3,07	-2,19	0
Kintamoji apkrova	0	-3,64	-5,02	-5,96	-5,95	-5,35	-3,57	0

3.8 lentelė. Ašinės jėgos stygoje ir apatiniame lyne. Simetrinė apkrova

Table 3.2.5. Axial forces in the string and cable symmetrically load

Elementas	Ašinės jėgos H_{string} , H_{cable} , kN		
	$T_1 = 0,472$ kN	$T_2 = 1,084$ kN	$T_3 = 1,506$ kN
Styga	2,95	3,31	4,02
Apatinis lynas	3,30	3,49	3,31

Iš 3.5–3.7 lentelėse pateiktų rezultatų aiškiai matyti, kad tilto modelis buvo deformuotas pakankamai simetriškai, maksimalus skirtumas tarp kairės (L) ir dešinės (R) pusių poslinkių yra apie 5 %. Eksperimentiškai nustatyta, kad esant simetrinei apkrovai, išankstinis stygos įtempimas neturi reikšmingos įtakos tilto modelio mazgų poslinkiams. Padidinus stygų įtempimo vertes nuo 0,472 kN iki 1,506 kN, poslinkio reikšmės praktiškai nepakito.

Būtina pastebėti, kad simetrinės apkrovos atveju, padidinus stygos išankstinį įtempimą, stygoje pastebimas didesnis ašinės jėgos pokytis, o ašinė jėga apatiniame lyne praktiškai nekinta (3.8 lentelė). Taip yra todėl, kad styga neturi pradinio išsvyrio ir yra itin jautri poslinkiams, kurie iš karto sukelia stygoje ašinės jėgas.

Asimetrinė apkrova

3.9–3.11 lentelėse parodytos tilto modelio, apkrauto laikinąja asimetrine apkrova per pusę tilto tarpatramio, poslinkių reikšmės. Poslinkių reikšmės pateikiamos pagal išankstinio įtempimo reikšmes: $T_1 = 0,472$ kN; $T_2 = 1,084$ kN; $T_3 = 1,506$ kN. Lentelėse pateikiami matavimo rezultatai per kintamosios ir nuolatinės apkrovos santykį γ .

3.9 lentelė. Tilto modelio vertikalūs poslinkiai veikiant stygos išankstinio įtempimo jėgai $T_1 = 0,472$ kN

Table 3.9. Vertical displacements of the bridge model under the action of the string prestressing force $T_1 = 0.472$ kN

Vertikalūs poslinkiai, mm								
Mata- vimo taškai	1L	3L/9L	5L/10L	7L/11L	7R/11R	5R/10R	3R/9R	1R
$\gamma = 1$	0	-10,09	-18,55	-18,4	6,55	12,01	6,88	0
$\gamma = 2$	0	-14,85	-27,51	-25,52	13,72	20,6	10,96	0
$\gamma = 3$	0	-18,28	-33,3	-30,15	17,2	25,78	12,94	0

3.10 lentelė. Vertikalūs modelio poslinkiai veikiant stygos išankstinio įtempimo jėgai $T_2 = 1,084$ kN

Table 3.10 Vertical displacements of the bridge model under the action of the string prestressing force $T_2 = 1.084$ kN

Vertikalūs poslinkiai, mm								
Mata- vimo taškai	1L	3L/9L	5L/10L	7L/11L	7R/11R	5R/10R	3R/9R	1R
$\gamma = 1$	0	-10,78	-17,11	-15,69	6,63	10,11	3,23	0
$\gamma = 2$	0	-15,39	-26,02	-23,07	13,62	18,41	7,04	0
$\gamma = 3$	0	-18,74	-32,05	-28,21	18,09	23,79	9,16	0

3.11 lentelė. Vertikalūs modelio poslinkiai veikiant stygos išankstinio įtempimo jėgai $T_3 = 1,506$ kN

Table 3.11. Vertical displacements of the bridge model under the action of the string prestressing force $T_3 = 1.506$ kN

Vertikalūs poslinkiai, mm								
Mata- vimo taškai	1L	3L/9L	5L/10L	7L/11L	7R/11R	5R/10R	3R/9R	1R
$\gamma = 1$	0	-10,31	-16,22	-14,65	5,18	8,09	2,53	0
$\gamma = 2$	0	-15,39	-24,88	-21,43	11,75	15,88	5,61	0
$\gamma = 3$	0	-18,88	-31,13	-26,65	16,3	21,29	7,76	0

Iš 3.9–3.11 lentelėse pateiktų rezultatų akivaizdu, kad tilto modelis deformavosi asimetriškai pagal apkrovos išsidėstymą (kai asimetrinė apkrova buvo kairėje modelio pusėje, 3.22 pav.). Didžiausi poslinkiai atsirado asimetrine apkrova apkrautoje pusėje (mazgai 3L, 5L, 7L). Šie poslinkiai padidėjo proporcingai apkrovos santykio γ vertėms. Pavyzdžiui, kai stygos išankstinis įtempimas 0,472 kN ir apkrovos koeficiento reikšmės didėja nuo $\gamma = 1$ iki $\gamma = 3$, modelio poslinkiai padidėjo nuo 18,55 mm iki 33,3 mm (mazgas 5L). Eksperimentiškai buvo nustatyta, kad išankstinis stygos įtempimas sumažina didžiausių poslinkių reikšmes. Padidinus stygos įtempimo reikšmes nuo 0,472 kN iki 1,506 kN, minėti didžiausi poslinkiai (mazgas 5L) sumažėjo (esant $\gamma = 1$) apie 14 %, esant $\gamma = 2$ apie 11 %, o esant $\gamma = 3$ – apie 7 %. Pažymėtina, kad net ir esant apkrovos santykiui $\gamma = 1$, didžiausi asimetrinės apkrovos poslinkiai yra maždaug 3,3 karto didesni nei simetrinės apkrovos. Tai reiškia, kad asimetrinės apkrovos atveju dominuoja kinematinis poslinkis. Šie kinematiniai poslinkiai didėja proporcingai apkrovos santykiui γ ir pradiniam apatinio lyno pradiniam įsvyriui. Kadangi styga neturi pradinio įsvyrio, joje nesusidaro kinematinų poslinkių, todėl ji stabilizuoja viso tilto modelio asimetrinės apkrovos sukeltus poslinkius (iš esmės lyno poslinkius). Didinant stygos išankstinio įtempimo vertes, šis stabilizavimo efektas taip pat padidėja. Tai matyti iš gautų eksperimentinių rezultatų (3.9–3.11 lentelės).

Analizuojant asimetriškai apkrauto tilto modelio elgseną, būtina atkreipti dėmesį į tai, kad modelio dalies, kuri nėra apkrauta kintamąja apkrova (mazgai 3R, 5R, 7R), poslinkiai yra nukreipti į viršų. Kuo didesnės apkrovos koeficiento γ reikšmės, tuo šie poslinkiai yra didesni absoliučiais dydžiais (3.9–3.11 lentelės). Tačiau pagal savo absoliutų dydį šie poslinkiai yra reikšmingai mažesni už vertikalios apkrautos dalies poslinkius apkrautoje konstrukcijos dalyje (vidutiniškai apie 50 %, kai $\gamma = 1$).

Tilto modelio elementų ašinės jėgos stygoje ir apatiniame lyne, esant simetrinei ir asimetrinei apkrovai, pateiktos 3.12 lentelėje.

3.12 lentelė. Ašinės jėgos stygoje ir lynė, kai apkrova simetrinė ir asimetrinė
Table 3.12. Axial forces in string and cable with symmetrical and asymmetrical loading

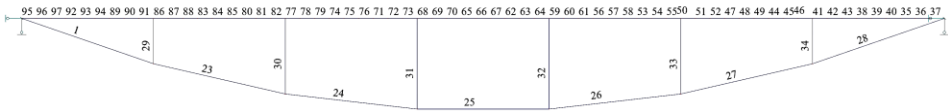
Asimetrinė apkrova	Ašinės stygos jėgos, H_{string} , kN		
	$T_1 = 0,472$ kN	$T_2 = 1,084$ kN	$T_3 = 1,506$ kN
$\gamma = 1$	3,20	3,79	4,26
$\gamma = 2$	3,86	4,44	4,92
$\gamma = 3$	4,88	5,45	5,93
Asimetrinė apkrova	Apatinio lyno ašinės jėgos, H_{cable} , kN		
$\gamma = 1$	3,03	3,03	2,97
$\gamma = 2$	3,42	3,40	4,10
$\gamma = 3$	3,77	3,76	4,50

Iš 3.12 lentelės duomenų matyti, kad tempimo jėgos stygoje, veikiant asimetrinei apkrovai, yra didesnės nei simetrinės apkrovos atveju (3.8 lentelė). Ir apatinio lyno jėgos didėja didėjant įtempimo vertėms (0,472 kN, 1,084 kN, 1,506 kN). Šiuo atveju ašinės lyno jėgos kinta nedaug ir yra mažesnės absoliučiu dydžiu (nepriklausomai nuo γ reikšmės) nei stygos ašinės jėgos.

Eksperimentinis styginės kabamosios konstrukcijos tyrimas. Skaitinių ir eksperimentinių rezultatų sulyginimas

Inovatyvi styginė kabamoji tilto konstrukcija sumodeliuota ir apskaičiuota baigtinių elementų programa *Autodesk Robot Structural Analysis* (2024 metų versija). Konstrukcija modeliuojama vienoje plokštumoje (2D). Viršutinis ir apatinis elementai (styga ir apatinis lynas) modeliuojami kaip *cable* elementai, kurie perima tik tempimo jėgas. Statramsčiai sumodeliuoti kaip *truss* elementai, kurie perima tik gniuždymo ir tempimo jėgas. Viršutinis elementas (styga) yra padalintas į daugybę baigtinių elementų (3.23 pav.). Toks konstrukcijos modeliavimas pasirinktas, kadangi apatinį ir viršutinį elementą (styga ir apatinis lynas) modeliuojant kaip *beam* elementą iš 6 mm apvalaus strypo, gauti poslinkių ir įtempimų rezultatų skirtumai (lyginant su absoliučiai lanksčiu elementu), simetrinio apkrovimo atveju siekė 1,6 %, o asimetrinio 0,69 %. Maksimalių poslinkių vietose šie skirtumai siekė 0,49 % ir 0,23 %, atitinkamai esant simetriniam ir asimetriniam apkrovimui.

Kombinuoto tilto modelio statiniai skaičiavimai atlikti taikant geometriškai netiesinį skaičiavimą.



3.23 pav. Tilto skaitmeninis modelis ir BE numeracija
Fig. 3.23. Bridge digital model and FE numbering

BEM tilto modelio elementų matmenys ir skerspjūviai parinkti pagal eksperimentinio modelio geometrinius ir fizikinius parametrus (žr. 3.2 skyrių). Tilto modelis buvo apkrautas analogiškais apkrovomis, kaip ir eksperimentinio tyrimo atveju.

Skaitinių rezultatų analizė, kai apkrova yra simetrinė ir asimetrinė

Tilto modelio skaitinės analizės rezultatai pateikti 3.13–3.15 lentelėse.

Analizuojant BEM rezultatus, galima stebėti analogišką tilto modelio deformacijos formą, kaip ir eksperimento metu. Esant simetrinei apkrovai, konstrukcija deformuojasi simetriškai, o didžiausias poslinkis atsiranda tarpatramio viduryje, kuris lygus $-5,94$ mm, kai išankstinio įtempio reikšmė lygi $T_1 = 0,472$ kN.

3.13 lentelė. Modelio teoriniai vertikalūs poslinkiai veikiant išankstinio įtempimo jėgai $T_1 = 0,472$ kN

Table 3.13. Theoretical vertical values of the model displacements under prestressing force $T_1 = 0.472$ kN

Vertikalūs poslinkis, mm								
Matavimo taškai/ Apkrova	1L	3L	5L	7L	7R	5R	3R	1R
Nuolatinė	0	-2,19	-2,92	-3,27	-3,27	-2,92	-2,19	0
Kintamoji, simetrinė	0	-3,59	-5,16	-5,94	-5,94	-5,16	-3,59	0
Asimetrinė $\gamma = 1$	0	-16,11	-19,55	-11,43	5,04	13,2	11	0
Asimetrinė $\gamma = 2$	0	-23,27	-28,25	-15,64	9,56	21,86	18,17	0
Asimetrinė $\gamma = 3$	0	-28,02	-34,04	-18,52	12,38	27,39	22,77	0

3.14 lentelė. Modelio teoriniai vertikalūs poslinkiai veikiant išankstinio įtempimo jėgai $T_2 = 1,084$ kN

Table 3.14. Theoretical vertical values of the model displacements under prestressing force $T_2 = 1.084$ kN

Vertikalus poslinkis, mm								
Matavimo taškai/ Apkrova	1L	3L	5L	7L	7R	5R	3R	1R
Nuolatinė	0	-2,25	-2,9	-3,23	-3,23	-2,9	-2,25	0
Kintamoji, simetrinė	0	-3,62	-5,14	-5,91	-5,91	-5,14	-3,62	0
Asimetrinė $\gamma = 1$	0	-15,01	-18,36	-10,99	4,13	11,74	9,92	0
Asimetrinė $\gamma = 2$	0	-22,14	-27	-15,23	8,48	20,17	16,89	0
Asimetrinė $\gamma = 3$	0	-26,97	-32,89	-18,18	11,28	25,7	21,49	0

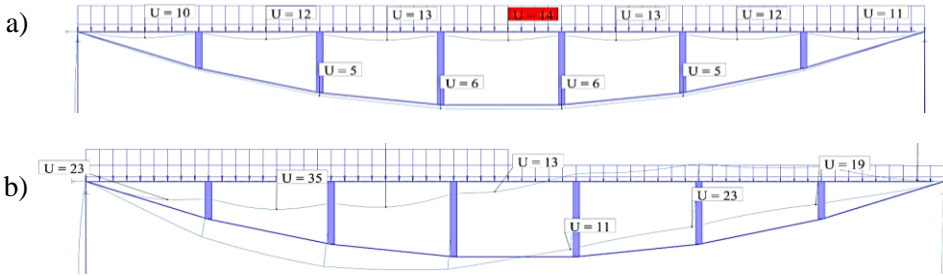
3.15 lentelė. Modelio teoriniai vertikalūs poslinkiai veikiant išankstinio įtempimo jėgai $T_3 = 1,506$ kN

Table 3.15. Theoretical vertical values of the model displacements under prestressing force $T_3 = 1.506$ kN

Vertikalus poslinkis, mm								
Matavimo taškai/ Apkrova	1L	3L	5L	7L	7R	5R	3R	1R
Nuolatinė	0	-2,36	-2,86	-3,13	-3,13	-2,86	-2,36	0
Kintamoji, simetrinė	0	-3,68	-5,11	-5,85	-5,85	-5,11	-3,68	0
Asimetrinė $\gamma = 1$	0	-14,36	-17,66	-10,73	3,6	10,89	9,29	0
Asimetrinė $\gamma = 2$	0	-21,46	-26,25	-14,97	7,84	19,16	16,13	0
Asimetrinė $\gamma = 3$	0	-26,33	-32,18	-17,96	10,62	24,69	20,72	0

Kai $T_2 = 1,084$ kN, poslinkis yra $-5,91$ mm, o kai $T_3 = 1,506$ kN yra $-5,85$ mm. Esant asimetrinei modelio apkrovai, didžiausi poslinkiai eksperimento

metu atsiranda dalyje, apkrautoje kintamąja apkrova, maždaug tarpatramio ketvirtyje. Modelio deformacijos simetrinės ir asimetrinės apkrovos atvejais schemas parodytos 3.24 pav.



3.24 pav. Deformuoto modelio struktūros schema: a) simetrinė apkrova, b) asimetrinė apkrova. Čia U – poslinkiai, mm

Fig. 3.24. Scheme of the structure of the deformed model: a) symmetric load, and b) asymmetric load, where U – displacements in mm

Atlikus eksperimentinius ir skaitinius tilto modelio tyrimus, galima palyginti gautus rezultatus. Jie pateikiami 3.16 ir 3.17 lentelėse santykiniais dydžiais (procentais), siekiant įvertinti rezultatų skirtumus (poslinkius) abiem analizės atvejais, atsižvelgiant į stygos įtempimo reikšmes.

3.16 lentelė. Skaitinių ir eksperimentinių poslinkių rezultatų palyginimas

Table 3.16. Comparison of numerical and experimental displacements results.

Vertikalių poslinkių skirtumas. Eksperimentiniai/Skaitiniai rezultatai								
Matavimo taškai/Apkrova	1L	3L	5L	7L	7R	5R	3R	1R
$T_1 = 0,472 \text{ kN}$								
Simetrinė apkrova	0	20 %	10 %	3 %	-2 %	1 %	11 %	0
Asimetrinė $\gamma = 1$	0	60 %	5 %	-38 %	-23 %	10 %	60 %	0
Asimetrinė $\gamma = 2$	0	57 %	3 %	-39 %	-30 %	6 %	66 %	0
Asimetrinė $\gamma = 3$	0	53 %	2 %	-39 %	-28 %	6 %	76 %	0

3.16 lentelės pabaiga

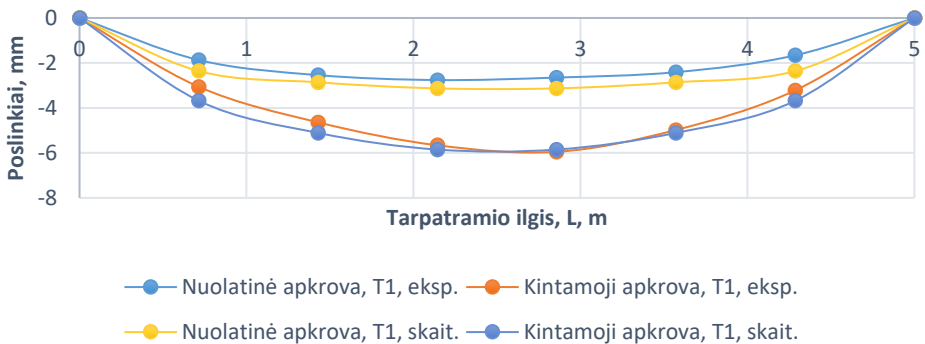
Vertikalių poslinkių skirtumas. Eksperimentiniai/Skaitiniai rezultatai								
Matavimo taškai/Apkrova	1L	3L	5L	7L	7R	5R	3R	1R
$T_2 = 1,084 \text{ kN}$								
Simetrinė apkrova	0	9 %	9 %	0 %	-1 %	9 %	17 %	0
Asimetrinė $\gamma = 1$	0	39 %	7 %	-30 %	-38 %	16 %	207 %	0
Asimetrinė $\gamma = 2$	0	44 %	4 %	-34 %	-38 %	10 %	140 %	0
Asimetrinė $\gamma = 3$	0	44 %	3 %	-36 %	-38 %	8 %	135 %	0
$T_3 = 1,506 \text{ kN}$								
Simetrinė apkrova	0	-1 %	3 %	0 %	-1 %	-7 %	-5 %	0
Asimetrinė $\gamma = 1$	0	39 %	9 %	-27 %	-31 %	35 %	267 %	0
Asimetrinė $\gamma = 2$	0	39 %	6 %	-30 %	-33 %	21 %	188 %	0
Asimetrinė $\gamma = 3$	0	39 %	3 %	-33 %	-35 %	16 %	167 %	0

Didžiausių poslinkių vietos (mazgas 5L) skirtumai dėl asimetrinės apkrovos neviršija 10 %. O santykinai dideli poslinkių skirtumai pastebimi mazguose 3L (3R), 7L (7R). Simetrinės apkrovos atveju taip pat turime nedidelius skirtumus didžiausių poslinkių vietoje (7L, 7R) t. y. iki 3 %, ir turime daug didesnius skirtumus taškuose, kurie yra tik tarpiniai. Iš tokių skirtumų matome, kad eksperimentinio modelio deformacijos forma skiriasi nuo BEM modelio formos, nes eksperimentiniame modelyje buvo sumontuoti masyvūs atraminiai guoliai, kurie varžo mazgų pasisukimą (standumą), tuo pačiu varžant ir poslinkius. Taip pat būtina paminėti, kad tarpiniai stygos ir statramsčių mazgai dėl mažų atstumų tarp statramsčių galėjo sukelti papildomą mazgo standumą.

Pateiktame grafike (3.25 pav.) matomi simetriškai apkrautos konstrukcijos poslinkiai, gauti skaitiškai ir eksperimentiškai. Matome, kad eksperimento metu gauti poslinkiai yra mažesni nei gauti skaitiniu metodu. Žinoma, tiek skaitiniu, tiek eksperimentiniu būdu gautų poslinkių rezultatų dydžiai yra santykinai labai maži, palyginti su viso tilto modelio matmenimis, todėl normalu, kad bet koks minimalus nuokrypis čia sukeldavo daug didesnes paklaidas.

3.17 lentelė. Skaitinių ir eksperimentinių ašinių jėgų rezultatų palyginimas
Table 3.17. Comparison of numerical and experimental axial forces results.

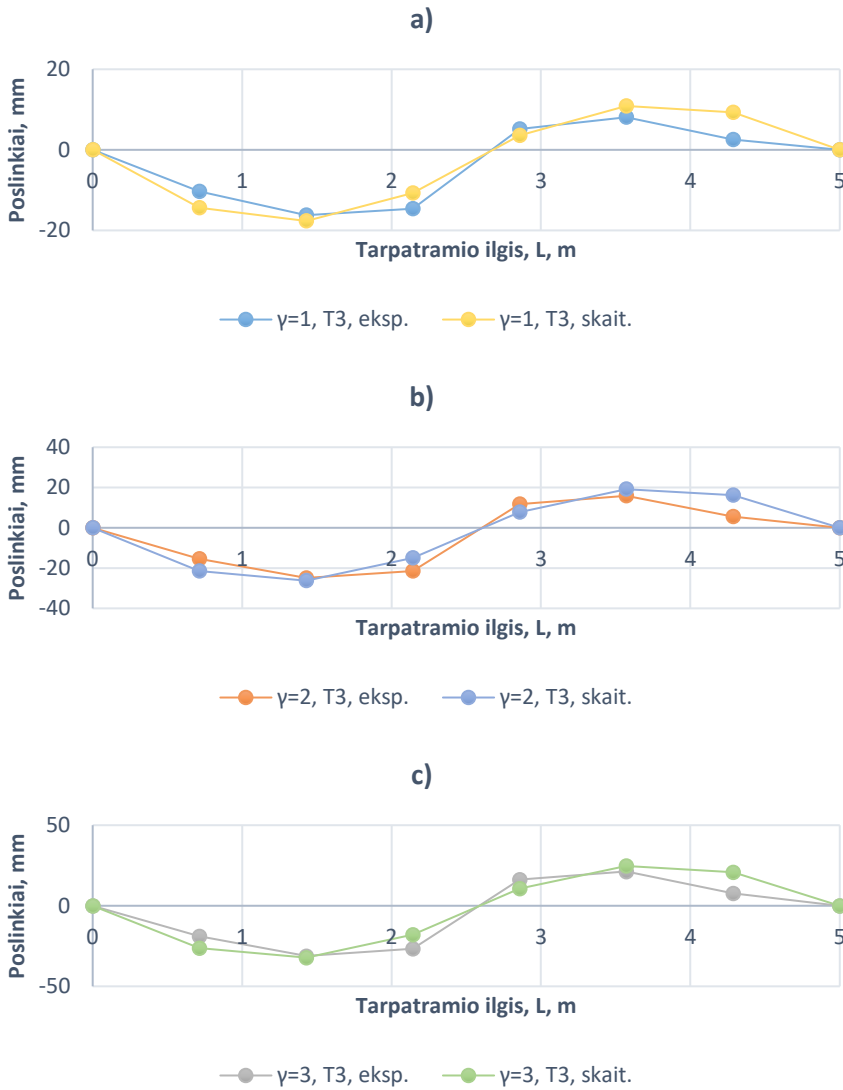
Parametras	Rezultatai		
	$T_1 = 0,472 \text{ kN}$	$T_2 = 1,084 \text{ kN}$	$T_3 = 1,506 \text{ kN}$
H_{string} , kN, sim	7,80 %	11,48 %	0,75 %
H_{string} , kN, $\gamma = 1$	-0,31 %	-1,85 %	-4,23 %
H_{string} , kN, $\gamma = 2$	10,10 %	6,98 %	3,25 %
H_{string} , kN, $\gamma = 3$	7,17 %	4,77 %	1,52 %
H_{cable} , kN, sim	7,93 %	1,15 %	6,65 %
H_{cable} , kN, $\gamma = 1$	-8,58 %	-8,91 %	-7,41 %
H_{cable} , kN, $\gamma = 2$	3,51 %	3,53 %	-14,15 %
H_{cable} , kN, $\gamma = 3$	14,06 %	13,83 %	-4,89 %



3.25 pav. Skaitiškai ir eksperimentiškai gauti poslinkiai, kai apkrova yra simetriška ir iš anksto įtemptiamas viršutinis elementas (styga): $T_1 = 0,472 \text{ kN}$

Fig. 3.25. Numerically and experimentally obtained displacements when the load is symmetrical and the top element (string) is prestressed: $T_1 = 0.472 \text{ kN}$

Nagrinėjant asimetriškai apkrautos konstrukcijos rezultatus, matome, kad didžiausi konstrukcijos poslinkiai sutampa tarpatramio ketvirtyje, tačiau skiriasi kituose taškuose, palyginti skaitiškai ir analitiškai gautus rezultatus. Skirtumus galima matyti 3.26 pav.



3.26 pav. Poslinkiai, gauti skaitiniu ir eksperimentiniu būdu esant asimetrinei apkrovai, kai $T_3 = 1,506 \text{ kN}$, kur a) $\gamma = 1$ b) $\gamma = 2$ c) $\gamma = 3$
Fig. 3.26. Displacements obtained numerically and experimentally under asymmetric loading when $T_3 = 1.506 \text{ kN}$. (a) $\gamma = 1$, (b) $\gamma = 2$, and (c) $\gamma = 3$

Iš poslinkių grafikų (3.26 pav.) matome, kad didžiausi poslinkių skirtumai yra neapkrautoje konstrukcijos dalyje. Kaip matome, deformacijos forma visais atvejais yra vienoda, nepriklausomai nuo apkrovų dydžio. Taip pat, kaip jau buvo minėta anksčiau, didžiausių poslinkių skirtumai tarp skaitinio modelio ir eksperimentinio modelio skiriasi iki 3 kartų (priklausomai nuo apkrovimo varianto). Taip yra dėl anksčiau minėtos priežasties – didelių ir sunkių atramų bei dėl trinties mazguose, kuri sukuria papildomus suvaržymus, tačiau šiuos apsektus atskirai įvertinti yra sudėtinga, nes norint tai atspindėti skaitiniame modelyje, reikalinga žinoti kurie taškai, kokius tiksliai turi papildomus standumus ir pan. Šis efektas labiausiai matomas neapkrautoje konstrukcijos dalyje (3R taškas).

Jei kalbėtume apie asimetrinę apkrovą ir lygintume tik apkrautos dalies rezultatus, bendrų poslinkių skirtumas neviršija 10 %. Visais atvejais didžiausių poslinkių vieta sutampa, neatsižvelgiant į tai, ar tyrimas buvo atliktas skaitiniu, ar eksperimentiniu būdu.

Atliekant skaičiavimus, galima pastebėti stygos išankstinio įtempimo jėgų įtaką poslinkiams. Nors simetrinės apkrovos atveju šis poveikis yra nedidelis, esant asimetrinei apkrovai jis tampa gerokai reikšmingesnis.

Kalbant apie ašinę jėgą stygoje, matome, kad eksperimentiniai ir skaitiniai rezultatai skiriasi ne daugiau kaip 14 %. Beveik visais atvejais skaitiškai gautos ašinės jėgos yra didesnės nei gautos eksperimentiniu būdu. Taip pat matome, kad padidinus ašinę jėgą stygoje (jei apkrova nesikeičia), sumažėja bendrieji konstrukcijos poslinkiai. Tai rodo ir eksperimentinės, ir skaitinės analizės duomenys.

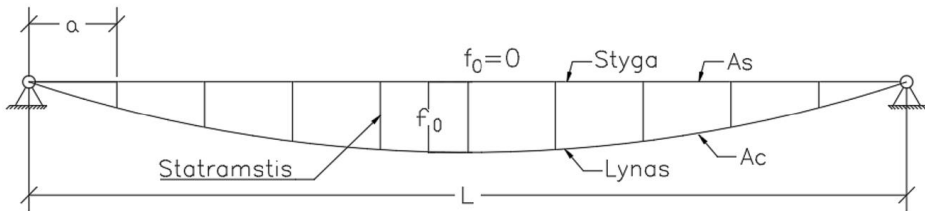
Bendru atveju, remiantis gautais rezultatais, matyti, kad skirtumai tarp skaitiniu ir eksperimentiniu būdu gautų duomenų apkrautoje konstrukcijos dalyje, vertinant maksimalius poslinkius, neviršija 9 %, o stygos ašinių jėgų skirtumai – 14 %.

3.3. Styginės kabamosios konstrukcijos komponavimo ir projektavimo rekomendacijos

Projektuojant styginę kabamąją konstrukciją, visų pirma reikėtų atsižvelgti į projektavimo užduoties sąlygas ir apribojimus, taikomus tiltams.

Kalbant apie bendrąjį atvejį, vienas pagrindinių kabamųjų tiltų projektavimo apribojimų yra jo ilinkių ir deviacijų reikalavimai. Tokio tipo tiltų skerspjuvių išnaudojimas, kalbant apie saugos ribinį būvį, dažniausiai yra gana žemas. Vertinant jėgas apatinėje ir viršutinėje juostoje, jos dažniausiai kelia apribojimus jungčių ir pamatų projektavime, tačiau paprastai nedaro esminės įtakos skerspjuvio išnaudojimui.

Parametrai, lemiantys styginės kabamosios konstrukcijos elgseną ir apibrėžiantys konstrukcijos geometriją, yra pradinis apatinio lyno išsvyris f_0 , ašiniai stygos $A_S E_S$ ir apatinio lyno $A_c E_c$ standžiai bei jų santykis $n = \frac{A_S E_S}{A_c E_c}$, taip pat atstumas tarp statramsčių a , tarpatramio ilgis L . Visus parametrus galima matyti 3.27 pav.



3.27 pav. Styginės kabamosios konstrukcijos parametrai
Fig. 3.27. Parameters of the string cable suspension structure

- *Tilto tarpatramis L*: tilto tarpatramis dažnu atveju yra parenkamas pagal vietovės apribojimus. Kadangi nuo tilto tarpatramio ilgio priklauso ir pradinis apatinio lyno išsvyris f_0 , kuris neturėtų būti didesnis nei $L/10$ ir neturėtų būti mažesnis nei $L/40$ – $L/30$. Dažnu atveju būtent šis parametras lems, kokį tarpatramį parinkti tiltui ir ar pakaks vieno tarpatramio, ar reikės projektuoti kelių tarpatramių konstrukciją.
- *Apatinio lyno pradinis išsvyris f_0* : rekomenduojamas kuo didesnis pradinis apatinio lyno išsvyris, o jo ribos turėtų būti $L/10$ – $L/40$. Atlikta skaitinė analizė parodė, kad visais atvejais bendrieji poslinkiai bus mažesni, kai pradinio lyno apatinis išsvyris yra $L/10$, nei atveju, kai pradinis apatinio lyno išsvyris yra $L/40$.
- *Stygos ir apatinio lyno ašinių standžių santykis $n = \frac{A_S E_S}{A_c E_c}$* : šis parametras turi būti parenkamas atsižvelgiant į kitus geometrinius konstrukcijos parametrus. Kalbant apie tai, kaip turėtų būti parenkamas ašinių standžių santykis, reikėtų daugiausiai dėmesio kreipti į tai, koks yra apatinio lyno pradinis išsvyris f_0 . Esant didesniam apatinio lyno pradiniam išsvyriui ($L/10$), rekomenduojama naudoti didesnę stygos ir apatinio lyno ašinių standžių santykį (1 – $1,67$), kadangi tai mažins apatinio lyno kinematinį poslinkių įtaką konstrukcijai. Atveju, kai dėl įvairių apribojimų ar kitų elgsenos parametrų naudojame mažą pradinį apatinio lyno išsvyrį ($L/30$ – $L/40$) ir turime nedidelius kinematinis poslinkius, efektyviau naudoti mažesnę ašinių standžių santykį ($0,6$ – $1,0$), kadangi taip mažinami tamprieji poslinkiai.

- *Išankstinis stygos įtempimas T* : tai yra vienas pagrindinių veiksnių, leidžiančių valdyti konstrukcijos elgseną ir varžyti kinematinčius poslinkius, nekeičiant konstrukcijos geometrinių ir mechaninių parametrų. Visais atvejais rekomenduojama taikyti stygos išankstinį įtempimą. Stygos išankstinio įtempimo maksimalus dydis turėtų būti parenkamas atsižvelgiant į eksploatacinius reikalavimus bei pamatų galimas perimti horizontalias skėtimo jėgas. Išankstinis stygos įtempimas turėtų būti nustatomas tokio dydžio, kad konstrukcija tenkintų tinkamumo ir saugos ribinių būvių sąlygas.
- *Atstumas tarp statramsčių a* : projektuojant konstrukciją, atstumas tarp statramsčių neturėtų būti ne daugiau nei $L/7$. T. y., mažiausias statramsčių kiekis konstrukcijoje turėtų būti 6–10 vienetų, kad perduodamą apkrovą į apatinį lyną dar būtų galima traktuoti kaip paskirstytą ir būtų galima taikyti inžinerinę apskaičiavimo metodiką. Kitas labai svarbus faktorius čia yra vietiniai įlinkiai, sukeliama ant stygos išskirstytos jėgos. Mažinant atstumą tarp statramsčių, mažėja ir vietiniai įlinkiai bei, žinoma, įtempiai.
- *Apkrovos paskirstymas (koncentruota arba paskirstyta apkrova)*: apkrovos perdavimas konstrukcijai turėtų būti parenkamas pagal projektuojamą situaciją. Perduodant jėgas į statramsčius, konstrukcijai papildomai turės būti formuojama danga (tilto paklotas), kuri atlaikys eismo apkrovas. Paklotui jėgas perduodant tiesiai į statramsčius, stygoje neatsiras papildomų vietinių įtempimų, tačiau galimai prireiks sunkesnio pakloto, kuris atlaikytų tiek save, tiek eismo apkrovas. Tuo tarpu tilto paklotą atremiant / išskirstant ant stygos, galime naudoti žymiai lengvesnes konstrukcijas, kadangi galima nesunkiai reguliuoti atstumus tarp stygų ir jų kiekį parinkti pagal reikiamus pakloto matmenis. Vienas iš efektyviausių sprendimų yra paskirstyti apkrovą ant stygos, naudojant nesunkius paklotus, kurie atitiktų stygos išlinkio formą ir jau po nuolatinės apkrovos uždėjimo – sukurtą tiesią eismo liniją.

3.4. Trečiojo skyriaus išvados

Pagrindinis eksperimentinio tyrimo tikslas buvo ištirti naujo styginio kabamojo plieninio tilto elgseną, veikiant statinėms simetrinėms ir asimetrinėms apkrovoms. Eksperimentas ir BEM (baigtinių elementų metodas) parodė šios naujos tilto konstrukcijos elgseną, veikiant tiek simetrinėms, tiek asimetrinėms apkrovoms. Išanalizavus minėto inovatyvaus tilto modelio elgseną, galima padaryti tokias išvadas:

1. Atliktas eksperimentinis styginės kabamosios konstrukcijos tilto modelio tyrimas parodė, kad esant simetrinėms apkrovoms didžiausias poslinkių skirtumas tarp kairės ir dešinės modelio pusių yra apie 5 %. Taip pat nustatyta, kad esant simetrinei apkrovai, išankstinis stygos įtempimas neturi reikšmingos įtakos tilto modelio mazgų poslinkiams.
2. Pridėjus asimetrinę apkrovą styginės kabamosios konstrukcijos tilto modelio didžiausi poslinkiai yra asimetrine apkrova apkrautoje modelio dalies pusėje (mazgai 3L, 5L, 7L). Šie poslinkiai padidėjo proporcingai apkrovų santykiu γ vertėms.
3. Nustatyta, kad veikiant asimetrinei apkrovai, tempimo jėgos stygoje yra didesnės nei esant simetrinei apkrovai. Stygos ašinės jėgos didėja didėjant išankstinio stygos įtempimo vertėms (0,472 kN, 1,084 kN, 1,506 kN). Apatinio lyno ašinės jėgos keičiasi minimaliai ir yra mažesnės absoliučiu dydžiu (esant bet kokiai γ vertei) nei stygos ašinės jėgos.
4. Skaitiškai ir eksperimentiškai nustatytų modelio didžiausių poslinkių skirtumai, veikiant asimetrinei apkrovai, nustatyti mazge 5L – tarpatrio ketvirtyje neviršija 10 %. Didesni poslinkių santykiniai skirtumai pastebimi mazguose 3L (3R), 7L (7R). Šie skirtumai galimai atsiranda dėl modelio tarpinių mazgų standžio, atraminių mazgų įtakos bei pačių konstrukcijos strypų esamo lenkiamojo standžio. Simetrinės apkrovos atveju taip pat turime nedidelius skirtumus didžiausių poslinkių vietoje (7L, 7R), kurie siekia iki 3 %.
5. Analizuojant ašinę tempimo jėgą stygoje nustatyta, kad eksperimentinės ir skaitinės ašinių jėgų vertės skiriasi ne daugiau kaip 14 %. Beveik visais atvejais skaitiškai gautos ašinės jėgos yra didesnės nei nustatytos eksperimentiškai. Taip pat nustatyta, kad padidinus ašinę jėgą (suteikus išankstinį įtempimą) stygoje ir veikiant tai pačiai apkrovai, bendrieji konstrukcijos poslinkiai sumažėja. Tai patvirtina tiek eksperimentiniai, tiek skaitiniai duomenys.

Bendrosios išvados

1. Atlikta taikomų vienajuosčių ir dvijuosčių kabamųjų tiltų apžvalga parodė, kad šios kreivos apybrėžos konstrukcijos yra jautrios asimetrinių apkrovų poveikiui, o jų perdangos forma yra tinkama tik pėsčiųjų eismui.
2. Sukurta naujos formos iš anksto įtempta styginė kabamoji tilto konstrukcija sumažina asimetrinių apkrovų sukeltus tilto poslinkius ir, dėl tiesaus perdangos paviršiaus, pagerina tilto eksploataavimo sąlygas. Tai sudaro galimybę taikyti tokios sandaros konstrukciją net tik pėsčiųjų eismui.
3. Parengti du styginio kabamojo tilto konstrukcijos variantai: vienas, kai nuolatinės ir eismo apkrovos perduodamos sutelktomis jėgomis į statramsčius, ir kitas, kai šios apkrovos paskirstomos tolygiai per stygą. Nustatyta, kad tolygiai išskirstyta apkrova per stygą sukuria papildomus vietinius įlinkius tarp statramsčių, taip sukurdamą papildomą ašinę jėgą stygoje, kuri mažina konstrukcijos kinematinis ir bendruosius poslinkius.
4. Atlikta ir iš anksto įtemptos stygos, kaip konstrukcinio elemento, elgsenos analizė. Skaitiškai ir eksperimentiškai nustatyta, kad asimetrinis apkrovimas nesukelia stygoje didelių poslinkių, būdingų kabamiesiems lynams, nes ji neturi pradinio įsvyrio ir todėl joje nepasireiškia kinematinės kilmės poslinkiai.

5. Parengta dviejų styginio kabamojo tilto konstrukcijų variantų skaičiavimo metodika, atsižvelgiant į geometrinį netiesiškumą. Atlikta skaitinė analizė parodė, kad šios apytikslės metodikos didžiausios paklaidos apskaičiuojant poslinkius neviršijo 15 %.
6. Atlikus naujos styginės kabamosios tilto konstrukcijos elgsenos analizę nustatyta, kad esant simetriniam apkrovimui šios konstrukcijos vertikaliems poslinkiams didžiausią įtaką turi apatinio lyno pradinis įsvyris ir jo ašinis standis, o stygos išankstinis įtempimas neturi reikšmingos įtakos.
7. Veikiant asimetrinėms apkrovoms, didžiausią įtaką vertikaliems poslinkiams turi apatinio lyno pradinis įsvyris ir stygos išankstinis įtempimas.

Literatūra ir šaltiniai

Ahmadizadeh, M. (2013). Three-dimensional geometrically nonlinear analysis of slack cable structures. *Computers ir Structures*, 128, 160–169. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUC.2013.06.005>

Ai, Z., Liu, H., Zhang, J., Zhang, C., Wang, C., Jiang, Z., & Xiao, R. (2023). Study on The Mechanical and Economic Performance of Super Long-Span Cable-Stayed Bridges with UHPC-Girder. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27(11), 4744–4761. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-0835-0>

An, X., Gosling, P. D., & Zhou, X. (2016). Analytical structural reliability analysis of a suspended cable. *Structural Safety*, 58, 20–30. <https://doi.org/10.1016/J.STRUSAFE.2015.08.001>

Arnautov, A. K., Kulakov, V., Andersons, J., Gribniak, V., & Juozapaitis, A. (2016). Experimental investigation on stiffness and strength of single-lap Z-pinned joints in a laminated CFRP stress-ribbon strip. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 11(2), 120–126. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2016.14>

Au, F. T. K., Wang, J. J., & Cheung, Y. K. (2002). Impact study of cable-stayed railway bridges with random rail irregularities. *Engineering Structures*, 24(5), 529–541. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(01)00119-5)

Bacci, G., Petersen, W., Denoël, V., & Øiseth, O. (2024). Advanced statistical analysis of vortex-induced vibrations in suspension bridge hangers with and without Stockbridge dampers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 255. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2024.105931>

- Bai, L. H., Yan, Q. S., Yang, Z., Jia, B. Y., Wang, L., & Chen, Z. (2024). Ultimate strength of light-rail hybrid cable-stayed bridge including concrete tension softening effect. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*. <https://doi.org/10.1680/jstbu.22.00173>
- Baldomir, A., Hernandez, S., Nieto, F., & Jurado, J. A. (2010). Cable optimization of a long span cable stayed bridge in la Coruña (Spain). *Advances in Engineering Software*, 41(7–8), 931–938. <https://doi.org/10.1016/J.ADVENGSOFT.2010.05.001>
- Barni, N., & Mannini, C. (2024). Parametric effects of turbulence on the flutter stability of suspension bridges. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105615>
- Battini, J.-M. (2018). Analysis of Dampers for Stay Cables Using Non Linear Beam Elements. *Structures*, 16, 45–49. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2018.08.009>
- Beghini, A., Beghini, L. L., Schultz, J. A., Carrion, J., & Baker, W. F. (2013). Rankine's Theorem for the design of cable structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48(5), 877–892. <https://doi.org/10.1007/s00158-013-0945-2>
- Bendalla, A. S. K., & Morgenthal, G. (2023). A nonlinear finite element framework for static and dynamic analysis of structural cables with deviating supports. *Engineering Structures*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116363>
- Bleicher, A., Schlaich, M., Fujino, Y., & Schauer, T. (2011). Model-based design and experimental validation of active vibration control for a stress ribbon bridge using pneumatic muscle actuators. *Engineering Structures*, 33(8), 2237–2247. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2011.02.035>
- Casciati, F., & Faravelli, L. (2025). Paradigm update in the design of long-span railway-crossing bridges. *Journal of Constructional Steel Research*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.109206>
- Chai, S. bo, Li, L. hao, & Wang, X. lan. (2024). Study on asymmetric arrangement ratio of main span stay cables of multi-tower cable-stayed bridge. *Structures*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106539>
- Chen, Z. H., Wu, Y. J., Yin, Y., & Shan, C. (2010). Formulation and application of multi-node sliding cable element for the analysis of Suspen-Dome structures. *Finite Elements in Analysis & Design*, 46, 743–750. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2010.04.003>
- Chen, Z., Cao, H., Zhu, H., Hu, J., & Li, S. (2014). A simplified structural mechanics model for cable-truss footbridges and its implications for preliminary design. *Engineering Structures*, 68, 121–133. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2014.02.015>
- Chen, Z., Yu, Y., Wang, X., Wu, X., & Liu, H. (2015). Experimental research on bending performance of structural cable. *Construction and Building Materials*, 96, 279–288. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.08.026>
- Crusells-Girona, M., Filippou, F. C., & Taylor, R. L. (2017). A mixed formulation for nonlinear analysis of cable structures. *Computers & Structures*, 186, 50–61. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUC.2017.03.011>

- de Menezes, E. A. W., Lisbôa, T. v., & Marczak, R. J. (2023). A novel finite element for nonlinear static and dynamic analyses of helical cables. *Engineering Structures*, 293. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116622>
- Dederichs, A. C., Frøseth, G. T., & Øiseth, O. (2024). Experimental comparison of three automatic operational modal analysis algorithms on suspension and floating bridges. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2024.111448>
- Foti, F., & Martinelli, L. (2016). Mechanical modeling of metallic strands subjected to tension, torsion and bending. *International Journal of Solids and Structures*, 91, 1–17. <https://doi.org/10.1016/J.IJSOLSTR.2016.04.034>
- Foti, F., Martinelli, L., & Perotti, F. (2017). A parametric study on the structural damping of suspended cables. *Procedia Engineering*, 199, 140–145. <https://doi.org/10.1016/J.PRO-ENG.2017.09.196>
- Fujino, Y., Siringoringo, D. M., Ikeda, Y., Nagayama, T., & Mizutani, T. (2019). Research and Implementations of Structural Monitoring for Bridges and Buildings in Japan. *Engineering*, 5(6), 1093–1119. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2019.09.006>
- Goldack, A., Schlaich, M., & Meiselbach, M. (2016). Stress Ribbon Bridges: Mechanics of the Stress Ribbon on the Saddle. *Journal of Bridge Engineering*, 21(5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000869](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000869)
- Goremikins, V., Rocens, K., & Serdjusks, D. (2012). Decreasing displacements of prestressed suspension bridge. *Journal of Civil Engineering and Management*, 18(6), 858–866. <https://doi.org/10.3846/13923730.2012.720936>
- Gou, H., Zhao, T., Qin, S., Zheng, X., Pipinato, A., & Bao, Y. (2022). In-situ testing and model updating of a long-span cable-stayed railway bridge with hybrid girders subjected to a running train. *Engineering Structures*, 253. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113823>
- Grigorjeva, T., & Juozapaitis, A. (2013). Revised Engineering Method for Analysis of Behavior of Suspension Bridge with Rigid Cables and Some Aspects of Numerical Modeling. *Procedia Engineering*, 57, 364–371. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.048>
- Grigorjeva, T., & Paeglitis, A. (2018). The Application Of The Finite Element Method For Static Behaviour Analysis Of The Asymmetrical One-Pylon Suspension Bridge Built-In Bending Cables Of Different Rigidity. *Engineering Structures and Technologies*, 10(2), 78–83. <https://doi.org/10.3846/est.2018.6481>
- Grigorjeva, T., Juozapaitis, A., & Kamaitis, Z. (2010). Static Analysis And Simplified Design Of Suspension Bridges Having Various Rigidity Of Cables. *Journal Of Civil Engineering And Management*, 16(3), 363–371. <https://doi.org/10.3846/jcem.2010.41>
- Gu, Y. W., Nie, X., Liu, Y. F., Duan, S. K., & Fan, J. S. (2021). Experimental and numerical study of steel-to-concrete joint section in hybrid cable-stayed bridges. *Journal of Constructional Steel Research*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106982>
- Han, K. J., Lim, N. H., Ko, M. G., & Kim, K. D. (2016). Efficient assumption of design variables for stress ribbon footbridges. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(1), 250–260. <https://doi.org/10.1007/S12205-015-0186-6>

- Hong, K.-J., Yi, C., & Lee, Y. (2012). Geometry and friction of helically wrapped wires in a cable subjected to tension and bending. *International Journal of Steel Structures*, 12(2), 233–242. <https://doi.org/10.1007/s13296-012-2007-9>
- Hong, W. K., Park, S. C., Kim, J. M., Kim, S. il, Lee, S. G., Yune, D. Y., Yoon, T. H., & Boong Yeol Ryoo. (2010). Development of structural composite hybrid systems and their application with regard to the reduction of co2 emissions. *Indoor and Built Environment*, 19(1), 151–162. <https://doi.org/10.1177/1420326X09358142>
- Hu, W.-H., Caetano, E., & Cunha, Á. (2013). Structural health monitoring of a stress-ribbon footbridge. *Engineering Structures*, 57, 578–593. <https://doi.org/10.1016/J.ENG-STRUCT.2012.06.051>
- Huang, W., Pei, M., Liu, X., & Wei, Y. (2020). Design and construction of super-long span bridges in China: Review and future perspectives. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14(4), 803–838. <https://doi.org/10.1007/S11709-020-0644-1>
- Hui, Y., Kang, H. J., Law, S. S., & Chen, Z. Q. (2018). Analysis on two types of internal resonance of a suspended bridge structure with inclined main cables based on its sectional model. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 72, 135–147. <https://doi.org/10.1016/J.EUROMECHSOL.2018.05.005>
- Yang, N., Liu, X., Huang, P., Huang, Y., Xu, M., & Lin, K. (2024). IMST-based identification of time-varying cable forces in cable-supported bridges: Numerical, experimental, and field test validation. *Ocean Engineering*, 313. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119481>
- Yao, Y., Yan, M., Shi, Z., Wang, Y., & Bao, Y. (2021). Mechanical behavior of an innovative steel–concrete joint for long-span railway hybrid box girder cable-stayed bridges. *Engineering Structures*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112358>
- Yin, R. T., Zhu, B., Yuan, S. W., Li, J. N., Yang, Z. Y., & Yang, Z. Y. (2023). Dynamic analyses of long-span cable-stayed and suspension cooperative system bridge under combined actions of wind and regular wave loads. *Applied Ocean Research*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103683>
- Impollonia, N., Ricciardi, G., & Saitta, F. (2011). Statics of elastic cables under 3D point forces. *International Journal of Solids and Structures*, 48, 1268–1276. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2011.01.007>
- Yu, X. min, Chen, D. wei, & Bai, Z. zhou. (2019). A Stability Study of the Longest Steel Truss Deck Cable-stayed Bridge during Construction. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(4), 1717–1724. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-1221-9>
- Yu, X., Chen, D., & Yu, J. (2023). Review of design and innovative construction of steel truss cable-stayed bridges in China. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering*, 177(1), 32–45. <https://doi.org/10.1680/jcien.23.00046>
- Jing, H., Feng, Z., Chen, Z., Hua, X., Chen, Z., & Wan, T. (2024). Enhancing longitudinal performance in railway suspension bridges through an integrated cable restrainer system. *Structures*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106769>

- Juozapaitis, A., & Norkus, A. (2004). Displacement analysis of asymmetrically loaded cable. *Journal of Civil Engineering and Management*, 10(4), 277–284. <https://doi.org/10.1080/13923730.2004.9636320>
- Juozapaitis, A., Idnurm, S., Kaklauskas, G., Idnurm, J., & Gribniak, V. (2010). Non-Linear Analysis Of Suspension Bridges With Flexible And Rigid Cables. *Journal Of Civil Engineering And Management*, 16(1), 149–154. <https://doi.org/10.3846/jcem.2010.14>
- Juozapaitis, A., Merkevičius, T., Daniūnas, A., Kliukas, R., Sandovič, G., & Lukoševičienė, O. (2015). Analysis of innovative two-span suspension bridges. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 10(3), 269–275. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2015.34>
- Juozapaitis, A., Sandovič, G., Jakubovskis, R., & Gribniak, V. (2021). Effects of flexural stiffness on deformation behaviour of steel and FRP stress-ribbon bridges. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(6), 2585. <https://doi.org/10.3390/app11062585>
- Juozapaitis, A., Vainiunas, P., & Kaklauskas, G. (2006). A new steel structural system of a suspension pedestrian bridge. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(12), 1257–1263. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.04.023>
- Kang, H. J., Zhao, Y. Y., Zhu, H. P., & Jin, Y. X. (2013). Static behavior of a new type of cable-arch bridge. *Journal of Constructional Steel Research*, 81, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.10.010>
- Kiisa, M., Idnurm, J., & Idnurm, S. (2012). Discrete Analysis Of Elastic Cables. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 7(2), 98–103. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2012.14>
- Kmet, S., Tomko, M., Soltys, R., Rovnak, M., & Demjan, I. (2019). Complex failure analysis of a cable-roofed stadium structure based on diagnostics and tests. *Engineering Failure Analysis*, 103, 443–461. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2019.04.051>
- Krivoshapko, S. N. (2017). Thin sheet metal suspended roof structures. *Thin-Walled Structures*, 119, 629–634. <https://doi.org/10.1016/J.TWS.2017.07.014>
- Lee, S., Seo, M., Baek, K. Y., Jeong, J., Kim, S. M., & Lee, J. (2019). Experimental study of two-way beam string structures. *Engineering Structures*, 191, 563–574. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.04.033>
- Li, C., Xu, Y., Zhang, X., & Wei, X. (2024). Through-deck suspension footbridge: A comparison study with above-deck suspension footbridge. *Structures*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.105943>
- Li, F. Y., & Wu, P. F. (2015). Dynamic behaviors of pretensioned cable AERORail structure. *Journal of Central South University*, 22(6), 2267–2276. <https://doi.org/10.1007/S11771-015-2751-Z>
- Li, F., Guo, Z., Cui, Y., & Wu, P. (2023). Dynamic Load Test and Contact Force Analysis of the AERORail Structure. *Applied Sciences* 13(3), 2011. <https://doi.org/10.3390/APP13032011>
- Li, F., Wu, P., & Liu, D. (2012). Experimental study on the cable rigidity and static behaviors of AERORail structure. *Steel and Composite Structures*, 12(5), 427–444. <https://doi.org/10.12989/SCS.2012.12.5.427>

- Li, Y., Feng, P., Xiao, J. X., Chen, M., & Li, J. W. (2024). Experimental investigations on the influence of bridge deck gratings on the aerodynamic stability of the long-span suspension footbridge with a streamlined double-side box girder. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2024.105904>
- Liu, X., Schauer, T., Goldack, A., & Schlaich, M. (2017). Multi-Modal Active Vibration Control of a Lightweight Stress-Ribbon Footbridge Based on Subspace Identification. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 7058–7063. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1352>
- Lorenzi, A., & Moser, S. (2022). Design and construction of a new stress-ribbon pedestrian bridge in the Italian Alps. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering*, 175(3), 119–124. <https://doi.org/10.1680/JCIEN.21.00213>
- Ma, C., Duan, Q., Li, Q., Liao, H., & Tao, Q. (2019). Aerodynamic characteristics of a long-span cable-stayed bridge under construction. *Engineering Structures*, 184, 232–246. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2018.12.097>
- Madrado-Aguirre, F., Wadee, M. A., & Ruiz-Teran, A. M. (2015). Non-linear stability of under-deck cable-stayed bridge decks. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2015.07.001>
- Ménard, F., & Cartraud, P. (2023). A computationally efficient finite element model for the analysis of the non-linear bending behaviour of a dynamic submarine power cable. *Marine Structures*, 91. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2023.103465>
- Morgenthal, G., & Yamasaki, Y. (2011). Aerodynamic behaviour of very long cable-stayed bridges during construction. *Procedia Engineering*, 14, 1463–1471. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2011.07.184>
- Moskalev, N. S. (1980). Konstruktsii visyachikh pokrytiy [Kabamųjų lynų konstrukcijos]. Moskva: Strojizdat.
- Mozos, C. M., & Aparicio, A. C. (2011). Numerical and experimental study on the interaction cable structure during the failure of a stay in a cable stayed bridge. *Engineering Structures*, 33(8), 2330–2341. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2011.04.006>
- Niero, L., Piazzon, R., Zampieri, P., & Pellegrino, C. (2024). Post-tensioning system as a strengthening solution for masonry arch bridges: Numerical and experimental results. *Procedia Structural Integrity*, 62, 454–459. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.065>
- Pan, Q., Yan, D., & Yi, Z. (2018). Form-finding analysis of the rail cable shifting system of long-span suspension bridges. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(11), 2033. <https://doi.org/10.3390/app8112033>
- Phocas, M. C., Alexandrou, K., & Athini, S. (2019). Design and analysis of an adaptive hybrid structure of linearly interconnected scissor-like and cable bending-active components. *Engineering Structures*, 192, 156–165. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.04.102>
- Radnić, J., Matešan, D., & Buklijaš-Kobojević, D. (2015). Numerical model for analysis of stress-ribbon bridges. *Gradevinar*, 67(10), 959–973. <https://doi.org/10.14256/JCE.1383.2015>

- Ren, L., Fang, Z., & Wang, K. (2019). Design and behavior of super-long span cable-stayed bridge with CFRP cables and UHPC members. *Composites Part B: Engineering*, 164, 72–81. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.11.060>
- Salamak, M., & Markocki, B. (2014). Durability of Stress Ribbon Bridge Checked during Loading Test Identification of bridge models through the load tests View project Bridges located one areas with ground deformations View project Durability of Stress Ribbon Bridge Checked during Loading Te. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 8(4), 470–476. <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2014.04.011>
- Salehi Ahmad Abad, M., Shooshtari, A., Esmaeili, V., & Naghavi Riabi, A. (2013). Non-linear analysis of cable structures under general loadings. *Finite Elements in Analysis and Design*, 73, 11–19. <https://doi.org/10.1016/J.FINEL.2013.05.002>
- Sandovic, G., Juozapaitis, A., & Gribniak, V. (2017). Experimental and Analytical Investigation of Deformations and Stress Distribution in Steel Bands of a Two-Span Stress-Ribbon Pedestrian Bridge. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/9324520>
- Sandovič, G., & Juozapaitis, A. (2014). Behaviour Analysis And Engineering Calculation Of The Stress-Ribbon Bridge With External Tendons / Dvijuosčio Lankstaus Kabamojo Plieno Tilto Elgsenos Analizė Ir Inžinerinis Skaičiavimas. *Engineering Structures and Technologies*, 5(4), 141–146. <https://doi.org/10.3846/2029882X.2014.893601>
- Shah, Y. I., Hu, Z., & Huang, J. (2024). Main cable structure analysis and construction control of short span suspension bridge within three-tower. *Structures*, 69. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107417>
- Shi, Z., Gu, J., Li, Y., Zhang, Y., & Zhao, X. (2024). Mechanical properties of an innovative steel–concrete joint for high-speed railway long-span hybrid girder cable-stayed bridges. *Engineering Structures*, 300. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117170>
- Shi, Z., Yu, W., Gu, J., Li, J., & Zhong, M. (2021). Mechanical behaviour of a novel floor system with horizontal K-shaped brace in Long-span High-speed railway steel truss Cable-stayed bridge. *Engineering Structures*, 249. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113270>
- Spinelli, P., Marra, A. M., & Salvatori, L. (2023). Super long span bridges: wind-resistant design developments and open issues. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Bridge Engineering*. <https://doi.org/10.1680/jbren.23.00020>
- Srimontriphakdi, T., Mahasuwanchai, P., Athisakul, C., Leelataviwat, S., Klaycham, K., Poovarodom, N., Magteppong, N., & Chucheeesakul, S. (2023). A Non-contact approach for cable tension evaluation based on 3D laser scanning data and nonlinear finite element analysis. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112680>
- Strasky, J. (2011). *Stress Ribbon and Cable-supported Bridges, second edition. Stress Ribbon and Cable-supported Bridges, second edition*. Thomas Telford Ltd. <https://doi.org/10.1680/srcspb.41462>

- Sun, Y., Zhang, M., Wang, X., Zhao, J., & Bai, Y. (2022). Analytical investigation of the main cable bending stiffness effect on free flexural vibration of suspension bridges with a 3D cable system. *Structures*, 41, 764–776. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.05.010>
- Tadeu, A., Romero, A., Dias, S., Pedro, F., Brett, M., Serra, M., Galvín, P., & Bandeira, F. (2022). Vibration serviceability assessment of the world's longest suspended footbridge in 2020. *Structures*, 44, 457–475. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.015>
- Tanaka, T., Yoshimura, T., Gimsing, N. J., Mizuta, Y., Kang, W.-H., Sudo, M., Shinohara, T., & Harada, T. (2002). A study on improving the design of hybrid stress-ribbon bridges and their aerodynamic stability. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(12–15), 1995–2006. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(02\)00316-1](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00316-1)
- Tarvydaitė, G., & Juozapaitis, A. (2010). The Kinematic Displacements Of The Two-Spans Single Lane Suspension Steel Footbridge And Their Stabilization. *Engineering Structures and Technologies*, 2(4), 155–162. <https://doi.org/10.3846/skt.2010.20>
- Tian, G. min, & Zhang, W. ming. (2023). A semi-analytical form-finding method of the 3D curved cable considering its flexural and torsional stiffnesses in suspension bridges. *Applied Mathematical Modelling*, 124, 806–839. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2023.08.027>
- Troyano, L. F. (2003). *Bridge Engineering A Global Perspective*. <https://doi.org/10.1680/BEAGP.32156>
- Unitsky, A. E., Kryvitski, A. I., Artyushevsky, S. V., Sokur, M. V., & Tsyrlin, M. I. (2022). UST high-speed string transport for passenger transportation: advantages and development prospects. *Innotrans*, 2, 3–7. <https://doi.org/10.20291/2311-164X-2022-2-3-7>
- Unitsky, A. E., Tikhonov, D. N., & Tsyrlin, M. I. (2021). On the prospects of the development of string transport for freight transportation. *Innotrans*, 3, 7–10. <https://doi.org/10.20291/2311-164X-2021-3-7-10>
- Wang, H., Yang, L., & Zeng, H. (2025). Study on static performance of the steel-concrete joint in a high-speed railway hybrid girder low tower cable-stayed bridge. *Structures*, 71. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107858>
- Wang, H., Shen, R., Wen, W., Dai, Q., & Bai, L. (2024). Investigation of longitudinal movements of girder ends considering various longitudinal non-linear resistances in railway suspension bridges. *Journal of Constructional Steel Research*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108446>
- Wei, B., Zhang, R., Jiang, L., Zheng, X., Ji, W., & Ma, G. (2024). Scale model test and numerical analysis on the anchorage zone of a cable-stayed bridge with the cross-anchor structure. *Engineering Structures*, 316. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118614>
- Wen, Y., & Zhou, Z. (2022). Qualification of the Ernst formula for modeling the sag effect of super-long stay cables in the long-span railway cable-stayed bridges. *Structures*, 45, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.09.002>
- Wu, Z., & Wei, J. (2019). Nonlinear Analysis of Spatial Cable of Long-Span Cable-Stayed Bridge considering Rigid Connection. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(5), 2148–2157. <https://doi.org/10.1007/S12205-019-0071-9>*

- Xiao, J., Han, R., Wan, H., Tan, S., Sun, S., & Liu, Z. (2024). Multi-dimensional characteristics investigation of track geometry on kilometer-level span high-speed railway suspension bridge. *Structures*, 70. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107808>
- Xue, H., Peng, Z., & Yin, H. (2025). Estimation of cable tension in large-span cable-stayed bridges using image super-resolution reconstruction technology. *Structures*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108701>
- Zhang, Y., He, W., Zhang, J., & Dong, H. (2021). Experimental and Numerical Investigation on Dynamic Properties and Human-Induced Vibrations of an Asymmetric Steel-Plated Stress-Ribbon Footbridge. *Advances in Civil Engineering*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/2028378>
- Zhang, J., Yang, Z. yu, Yuan, D. ping, Zheng, S. xiong, & Hu, Y. ran. (2021). Seismic Response of Two Site Models and Their Effects on the Railway Cable-Stayed Bridge. *KSCSE Journal of Civil Engineering*, 25(12), 4724–4741. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1990-9>
- Zhang, W. ming, Chang, J. qi, & Feng, D. dian. (2022). Determination of main cable shape and hanger tensions of a suspension bridge based on the measured live-load deflection of the main beam: An analytical algorithm. *Engineering Structures*, 272. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115031>
- Zhang, Z. hong, Zhang, W. ming, & Wang, Z. wei. (2024). An analytical method for thermal behavior analysis of long-span suspension bridges: Based on elastic catenary cable and gradient optimization. *Engineering Structures*, 321. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119013>
- Zhao, J.-Z., Wu-Jun, C., & Fu, G.-Y. (2013). Computational Method for Prestress Developing of Tensile Cable-Net Structures. *J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.)*, 18(2), 197–204. <https://doi.org/10.1007/s12204-013-1383-4>
- Zhu, W., Ge, Y., Fang, G., & Cao, J. (2021). A Novel Shape Finding Method for the Main Cable of Suspension Bridge Using Nonlinear Finite Element Approach. *Applied Sciences*, 11(10), 4644. <https://doi.org/10.3390/app11104644>

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Beivydas, E., & Juozapaitis, A. (2024). Experimental and numerical analysis of an innovative combined string–cable bridge. *Applied Sciences*, 14(17), 7542. <https://doi.org/10.3390/app14177542>

Beivydas, E., Juozapaitis, A., & Paeglite, I. (2023). Experimental and analytical studies of string steel structure for bridges. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 18(4), 145–165. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2023-18.622>

Beivydas, E. (2022). Analysis for symmetrical and asymmetrical loading of a single-span combined string steel structure. *Engineering Structures and Technologies*, 14(1), 1–6. <https://doi.org/10.3846/est.2022.18403>

Beivydas, E. (2022). Influence of local displacements and stresses on combined string structure (Vietinių įlinkių ir įtempių įtaka kombinuotai styginei konstrukcijai). *Science – Future of Lithuania: Civil Engineering*, 14, 1–4. <https://doi.org/10.3846/mla.2022.15246>

Beivydas, E. (2019). A simplified calculation method for symmetrical loading of a single-span composite string steel structure. *Engineering Structures and Technologies*, 11(2), 70–73. <https://doi.org/10.3846/est.2019.11323>

Beivydas, E. (2018). Structural analysis of one-span suspension combined string steel bridge (Vieno tarpatramio kabamosios kombinuotos styginės plieno konstrukcijos skaitinė analizė). *Science – Future of Lithuania: Civil Engineering*, 10, 1–5. <https://doi.org/10.3846/mla.2018.2867>

Straipsniai kituose leidiniuose

Beivydas, E. (2022). Parametrical analysis for symmetrical loading of a single-span composite string steel structure. In *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering and Mathematics: 4th International Conference on Research in Engineering, Technology and Science (ICRETS)* (Vol. 17, pp. 90–101). ISRES Publishing. <https://doi.org/10.55549/epstem.1176065>

Beivydas, E. (2020). Suspension string future structure. In *IABSE Symposium "Synergy of Culture and Civil Engineering – History and Challenges"*, 7–9 October 2020, Wrocław University of Technology, Poland (pp. 733–740). IABSE. <https://doi.org/10.2749/wroclaw.2020.0733>

Summary in English

Introduction

Problem formulation

Suspension bridges are engineering structures known for their distinctive architectural appearance and the challenges associated with their structural behaviour under various loads. In recent decades, increasing attention has been given to stress-ribbon pedestrian suspension bridges due to their low construction height and cost-effectiveness. However, these structures exhibit significant disadvantages: due to their small initial sag, they are subject to high tensile forces, experience significant deformations under asymmetrical loads, and their shape does not always ensure convenient traffic organisation.

The scientific literature frequently examines various geometrical and material solutions for suspension bridges aimed at reducing displacements. Yet the integration of pretensioned strands into double-cable suspension systems remains insufficiently explored. This structural concept represents a combined system, merging the advantages of both stress-ribbon and string bridges. Preliminary calculations suggest that strings, acting as load-bearing elements, are free from kinematic displacements and enable a straight traffic trajectory, while their pretensioning helps to efficiently resist both symmetrical and asymmetrical loads.

The problem arises from the discrepancy between the initial indications of this system's effectiveness and the lack of comprehensive theoretical and experimental studies to substantiate the proposed structural solution.

Addressing this problem not only contributes a new perspective to the engineering analysis of bridge structures but also promotes the development of advanced and more efficient structural solutions applicable to pedestrian bridges and other bridge types.

Relevance of the research

Suspension structures, known for their elegant architecture, long spans, and minimal material consumption, are widely used worldwide. However, they suffer from a critical limitation, e.g., kinematic displacements, which restrict their application, especially when high operational performance is required.

Bridge structures with the main cable as the primary beam are widely applied, though less frequently used due to their form. They are mainly used for pedestrian traffic, and the kinematic displacements in such structures are typically controlled only by increasing the permanent load or reducing the initial sag, which in turn increases axial forces within the structure. These factors limit the broader application of such bridges. Furthermore, current studies lack a systematic analysis of an alternative structural scheme capable of managing displacements more efficiently and meeting functional and operational requirements more effectively.

In response, this work investigates an innovative cable suspension bridge design, combining the benefits of both stress-ribbon and string systems into a unified structure. The essence of this design lies in a pre-tensioned strand that significantly reduces kinematic displacements and allows for a straight, traffic-suitable trajectory. Such a system expands the applicability of suspension bridges and opens new possibilities in design practice.

The relevance of this work is further emphasised by the absence of an engineering methodology for analysing the stresses and displacements in such structures. Therefore, comprehensive theoretical and experimental investigations are necessary.

This research is important for solving specific engineering challenges and advancing scientific knowledge in suspension structure behaviour, forming new structural schemes, and optimising their performance characteristics.

Object of the research

The object of scientific research is the string cable suspension bridge and its stress-strain behaviour in the elastic stage under symmetrical and asymmetrical loads, considering both concentrated and distributed loading methods.

Aim of the dissertation

The dissertation aims to develop an innovative bridge string cable suspension structure, determine its compositional parameters, investigate its stress-strain behaviour, and prepare an engineering methodology for calculating its displacements and internal forces.

Objectives of the dissertation

The following tasks are addressed to achieve the aim:

1. To review the structures of stress-ribbon and string steel bridge structures and the methods for calculating their displacements and forces and to discuss the advantages and disadvantages of their behaviour.
2. To create a new bridge string cable suspension structure and present its component parameters.
3. To develop a bridge string cable engineering methodology for calculating displacements and stresses under asymmetric loads.
4. To develop a bridge string cable suspension structure engineering methodology for calculating displacements and forces.
5. To perform numerical research of a bridge string cable suspension structure to analyse the behaviour of the structure and to substantiate the obtained analytical results.
6. To perform experimental research of a bridge string cable suspension structure to analyse the behaviour of the structure and to substantiate the obtained numerical results.
7. To provide recommendations for the composition and design of a bridge string cable suspension structure.

Research methodology

The research employs analytical methods for analysing structural behaviour considering geometric nonlinearity, the numerical finite element method, and experimental investigations.

Scientific novelty of the dissertation

During the preparation of the dissertation, the following new results for Civil Engineering science were obtained:

1. A new string cable suspension steel bridge structure design was developed, and its key compositional parameters were created.
2. An engineering calculation methodology was formulated for the bridge cable-stayed steel structure, considering pre-tensioning and asymmetrical loading.
3. An engineering methodology was developed for calculating displacements and internal forces in the pre-tensioned cable suspension bridge under various loading scenarios (symmetrical, asymmetrical).
4. The effect of initial bridge string pretensioning on the structural behaviour was evaluated, revealing that it significantly reduces displacements caused by asymmetrical loading in the cable suspension structure.

Practical value of the research findings

The developed engineering methodology for calculating internal forces and displacements in cable suspension bridges enables the preliminary analysis and design of this novel structure. Using this method, it is possible to select rational compositional parameters and

preliminary cross-sections of load-bearing elements. Furthermore, the methodology allows for the selection of appropriate strand pretensioning based on operational requirements.

The paper provides recommendations for composing and designing a string cable suspension bridge structure. These recommendations will allow for the preliminary structural composition parameters to be determined in advance, taking into account the operational requirements of the bridge.

Defended statements

1. In the cable suspension structure bridges, displacements can be controlled by adjusting the strand's initial pretension, the initial sag of the lower cable, and the ratio of axial stiffnesses between the strand and the lower cable.
2. Appropriately selected bridge strand pretension effectively reduces displacements under asymmetrical loading conditions.
3. The way in which a string cable suspension structure bridge is loaded (by transferring loads to the struts or distributing them evenly across the string) determines the behaviour of the structure.
4. The developed engineering calculation methodology for string and string cable suspension structures expands the application of strings in suspension bridges.

Approval of the research findings

The subject of the dissertation was discussed in six scientific articles in peer-reviewed scientific journals, two of which were published in the *Web of Science* database with a citation index, two in the publications of other international databases, and two articles in the peer-reviewed journal *Science – Future of Lithuania*. A list of the author's publications is given on pages 112–113.

The results of the research conducted in the dissertation were publicised at two scientific conferences:

- International conference *IABSE Symposium “Synergy of culture and civil engineering – history and challenges”*, 2020, Wrocław University of Technology, Wrocław, Poland.
- 17th international conference *“The Eurasia proceedings of science, technology, engineering and mathematics”*, 2022, Baku, Azerbaijan.

Structure of the dissertation

The dissertation consists of an introduction, three chapters, a summary of the results, a list of references, and appendices. The main body of the dissertation comprises 141 pages without annexes. The text includes 82 numbered formulas, 60 figures, and 29 tables. A total of 103 literature sources were used in writing the dissertation.

1. Overview of string and suspension bridge structures

Suspension bridges are considered exceptional structures and have been globally recognised for more than a century. They are renowned not only for their excellent architectural expression but also for having some of the longest spans in the world (Ahmadizadeh, 2013; Grigorjeva & Paeglitis, 2018; Huang et al., 2020; Troyano, 2003). These bridges have a broad range of applications, from efficient vehicular and railway bridges to elegant pedestrian bridges (Fujino et al., 2019; Morgenthal & Yamasaki, 2011; Wu & Wei, 2019; W. Zhang et al., 2024). Innovative solutions for suspension bridges have been developed, incorporating so-called rigid cables (Juozapaitis et al., 2015).

Among suspension pedestrian bridges, stress-ribbon bridges should be highlighted as they have the smallest structural depth (Hu et al., 2013; Strasky, 2011; Tarvydaitė & Juozapaitis, 2010). Although such bridges have been known for centuries, their widespread application began in the 1950s (Bleicher et al., 2011; Goldack et al., 2016). Futuristic concepts have even been proposed for using stress-ribbon structures in large-span vehicular bridges (Strasky, 2011).

One of the most popular pedestrian bridge schemes is the suspended cable system, where the main structural element also serves as the primary bridge girder that supports traffic flow (Fig. S1.1). Recently, two primary structural solutions for stress-ribbon bridges have dominated: prestressed concrete stress-ribbon bridges (Radnić et al., 2015) and metal strip (sheet) stress-ribbon bridges (Juozapaitis et al., 2006; Y. Zhang et al., 2021).

However, the stress-ribbon structure has several drawbacks (negative effects): high tensile forces due to its relatively small sag, a curved shape that may not always be optimal for traffic functionality, and significant displacements under asymmetric loads (Strasky, 2011).

It is important to note that beneath the elegant appearance of stress-ribbon bridges lies a complex structural behaviour, which can lead to undesirable operational challenges. These bridges are particularly sensitive to asymmetric traffic loads, which cause significant kinematic displacements (Juozapaitis & Norkus, 2004).

Comprehensive calculation methods have been developed for stress-ribbon bridges, considering both their static and dynamic behaviour (Bleicher et al., 2011; Han et al., 2016; Liu et al., 2017; Tanaka et al., 2002). In such bridges, the application of so-called “rigid” cables has been introduced, which stabilise the bridge’s initial shape due to their bending stiffness (Sandovic et al., 2017).

To restrict bridge displacements, a cable can be used as a supporting element, holding the stiffening girder, which both stabilises kinematic displacements and facilitates traffic organisation (Fig. S1.2). These structures are used not only for pedestrian bridges but also for vehicular traffic management.

The main drawback of such constructions is the relatively heavy stiffening girder, which can impose additional deformation constraints on the structure.

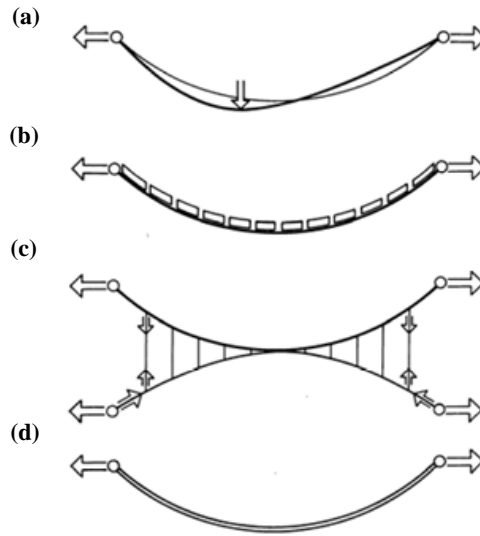


Fig. S1.1. Suspension cable bridge structure: (a) stress-ribbon with flexible cable, (b) stress-ribbon with ballast on the cable, (c) double-suspended cable system, and (d) stress-ribbon with rigid cable (Strasky, 2011)

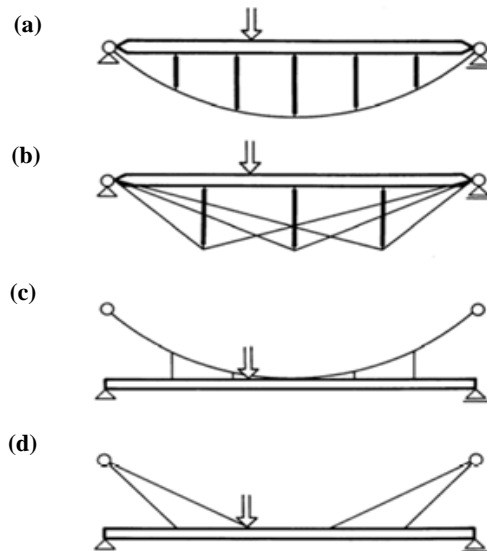


Fig. S1.2. Suspension bridge structure with a stiffening beam: (a) footbridge structure with a suspended cable, (b) footbridge structure with cable stays, (c) a suspension structure with a cable, and (d) a suspension structure with cable stays (Strasky, 2011)

2. String cable suspension structure and calculation of its displacements and stresses

A string cable suspension system is a combination of stress-ribbon and string bridges when these two structural schemes are combined into a common system. This construction is similar to the two-chord construction when both the lower and upper cables have initial sags (Sandovič, Juozapaitis, 2016), but instead of a cable with an initial sag, the upper cable uses a string that does not have an initial sag.

A string, unlike a cable with initial sag, is not sensitive to asymmetric loading because it does not have kinematic displacements. It is prestressed, further restraining displacements caused by asymmetric loading. Also, one of the biggest advantages of such a structure is the possibility of adapting the structure to the load of pedestrians and other types of traffic after properly selecting the composite parameters since the string forms a straight line for traffic organisation.

When constructing a string cable suspension structure, the supporting cable with the string is connected through the struts into a common structural system (Fig. S2.1). Combining these different constructions into a common system aims to obtain a more rational combined string system.

The main parameters that determine the behaviour of the string cable suspension structure and define the geometry of the structure are the initial sag of the lower cable f_0 and the axial stiffness of the string. $A_s E_s$ and the lower cable $A_c E_c$ and their ratio $n = \frac{A_s E_s}{A_c E_c}$, as well as the distance between the struts a and the span length L :

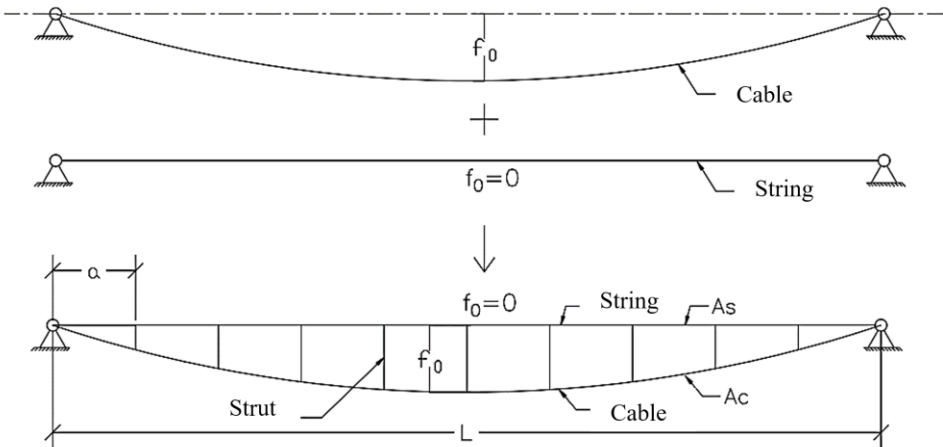


Fig. S2.1. Composition of the string cable suspension structure

When designing and composing the loading of the structure, the load can be applied either to the struts or to the upper supporting element, e.g., the string (Fig. S2.2). In cases where the structure is loaded through the struts, transverse beams may be introduced to

transfer the external load, which is then transmitted to the struts. Alternatively, to eliminate the need for additional load-bearing elements, the load can be distributed directly onto the string.

The main difference between these two loading methods in terms of structural displacements and stresses is local deflections and stresses. When the load is distributed on the string, the string between the struts is additionally deformed (Fig. S2.3), which lengthens the string and creates an additional axial tension.

Also, when designing and calculating a string structure, its prestressing must be evaluated when calculating displacements and deflections. Different locations of load addition (symmetric or asymmetric loading) and calculations when the string is given additional pretension and when the string is without additional prestressing.

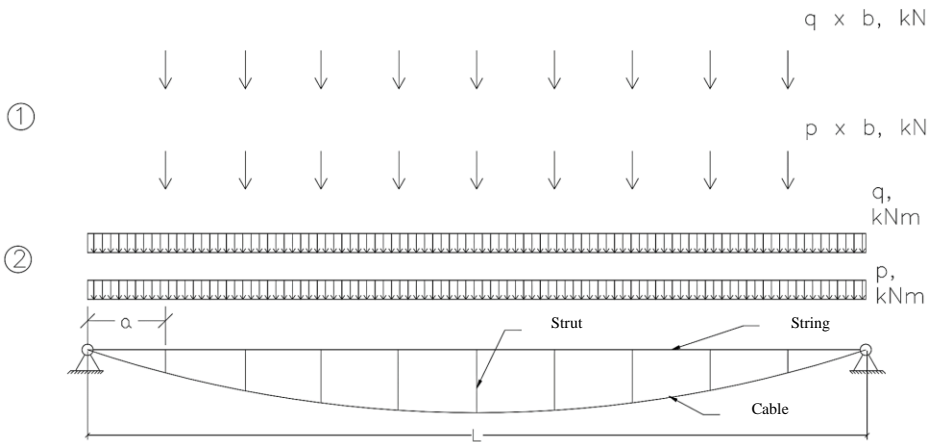


Fig. S2.2. Structural loading options for string cable suspension structure: 1 – loading with concentrated loads and 2 – loading with distributed load

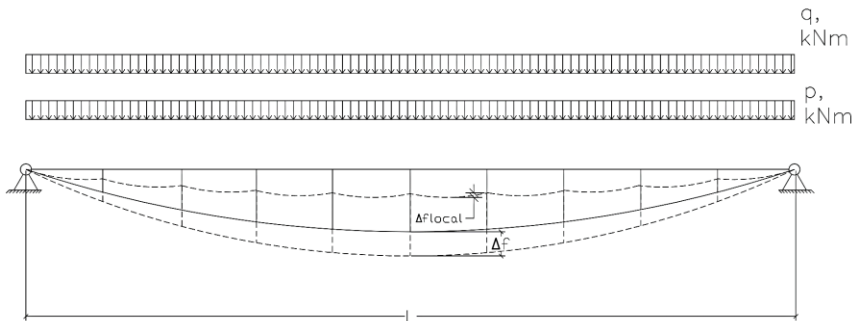


Fig. S2.3. Deformation scheme of the string cable suspension structure under the distributed load

In all calculation cases, the following basic assumptions were adopted:

1. The vertical displacement of the upper and lower cable after loading at any point is equal to each other.

2. End supports are resistant to linear displacements and favourable to angular displacements.

3. Both the upper element (string) and the lower element (cable) are considered flexible elements ($EI = 0$).

4. The entire structural system deforms only elastically.

5. Strut deformations are ignored.

Other calculation methods and additional assumptions are applied when analysing the case when the structure is loaded with an asymmetric load.

In the case of asymmetric loading, the principles of the arch calculation methodology are used. According to the methodology of calculation of arches, when the structure is subjected to an asymmetric load, only half of the structure is considered, saying that the middle point of the chord has only vertical displacement.

Calculations are performed on the principle of superposition in stages, based on the Figure S2.4 scheme.

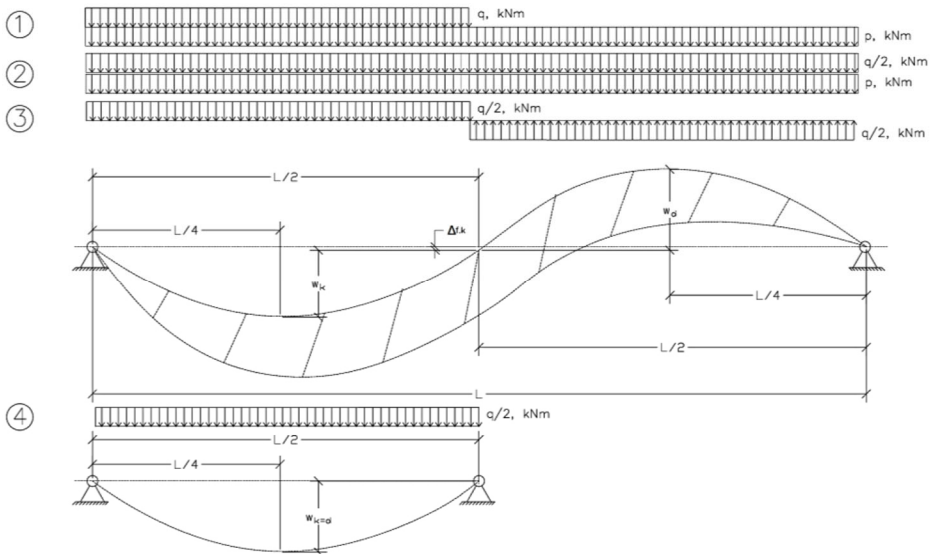


Fig. S2.4. Calculation scheme of string cable suspension structure when the load is asymmetric

The following calculation sequence applies: 1 – primary loading scheme; 2 – the structure is loaded with a pseudo-asymmetric load, e.g. the variable load is distributed over the entire span, assuming that the total load remains the same, to calculate the elastic displacements of the construction in the middle of the span; 3 – the structure is loaded with an antimetric load, which is consumed by the structure; the other side is loaded with an antimetric load in the other direction to achieve equilibrium; adding a pseudo load, which is not shown, would bring the equilibrium to the load of Option 1; and 4 – assuming

that the midpoint of the span moves only vertically, and almost all of the antisymmetric load is taken by the chord, the half-loaded chord option is considered. A string cable suspension structure was modelled with the FE calculation program Autodesk Robot Structural Analysis (2024 version). The structure was examined with three different initial deflections of the lower cable. For each case considered, three different string and bottom cable axial stiffness ratios were investigated. All geometrical parameters of the structure are presented in Tables S2.1 and S2.2.

The structure is modelled in one plane. The lower cable is modelled as a “truss” element, which takes only tensile forces, the upper element is a string, as a “cable” element. Struts are modelled as truss elements that take only tensile or compressive forces. End supports are fixed for linear displacements and movable for angular displacements.

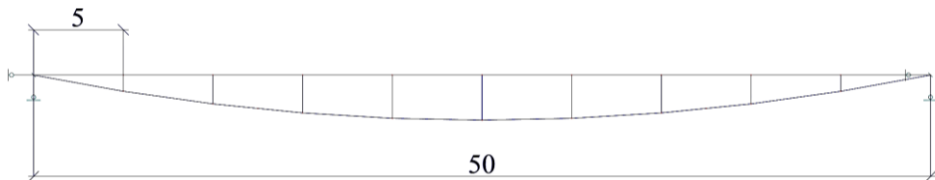


Fig. S2.5 Scheme of the research design model

Table S2.1. The cross-sectional areas of string and lower cable

Parameter $n = \frac{A_s}{A_c}$	The cross-sectional area of the string A_s, cm^2	The cross-sectional area of the lower cable A_c, cm^2
0.6	75	125
1.0	100	100
1.67	125	75

Table S2.2. The initial sag of the lower cable

Parameter $k = \frac{L}{f_0}$	Span length L, m	The initial sag of the lower cable $f_0 = \frac{L}{k}, \text{m}$
10	50.0	5.0
20	50.0	2.5
40	50.0	1.25

The structure under consideration was loaded with a constant symmetric load (g), a variable symmetric load (v) and a variable asymmetric load (v).

In the case of symmetric loading, the structure was loaded over the entire length of the span, in the case of asymmetric loading, over half the length of the span (Fig. S2.6).

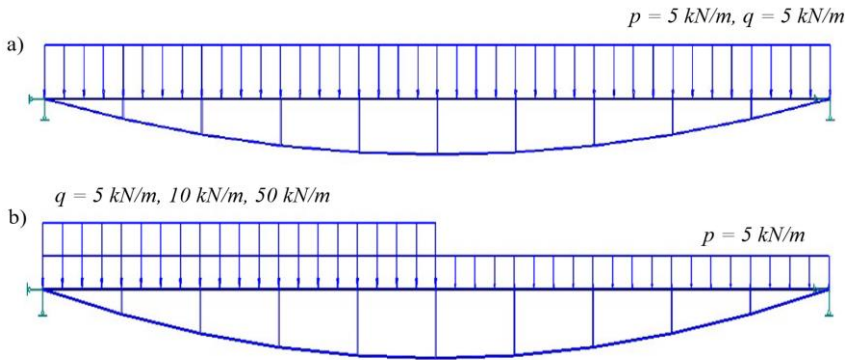


Fig. S2.6 Load variants of the string cable suspension structure, where a) – symmetric load and b) – asymmetric load

Evaluating the obtained results, it can be reasonably stated that the displacements are more significant for the string cable suspension structure, and when composing and designing such a structure, more attention should be paid to the kinematic and general displacements of the structure since they are much more sensitive to the composition parameters. Also, the results reveal that the asymmetric loading option is much more dangerous and causes both higher displacements and higher stresses in the string.

3. Experimental research of the string cable suspension structure

The main objective of the experimental research was to investigate the behaviour of a new string cable suspension steel bridge under static symmetric and asymmetric loads. It was also aimed to determine the actual state of stresses and deformations of the elements of such a bridge model and to evaluate the influence of the pretensioned chord on the deformations of the bridge under asymmetric loads.

An innovative model of the string cable suspension bridge was designed to achieve the goals of the experiment. This bridge model consists of a pre-tensioned string supported through struts on a lower rope. As the top element of the new composite steel structure, this chord performs the function of the bridge's stiffness beam. The lower element acts as a supporting cable of the combined construction. The stringers and bottom rope supports are designed to be stationary both vertically and horizontally and are integrated into a single system. The test model was designed in such a way that the upper element (string) could be easily added to the tension. The string was continuous throughout the entire span, and the ends were fixed with screws (Fig. S3.1). The string and rope in the supporting nodes can rotate freely about an axis perpendicular to the plane of the structure.

The parameters of the structure model were as follows:

- Model span $L = 5.0$ m.
- The width of the bridge model (distance between two flat structures) is equal to 0.5 meters.

- The distance between the uprights is the same everywhere and is 0.714 m (see Figure S3.1).
- The struts of the model are designed from rectangular cross-section profiles RHS 40x20x2. Such cross-sectional dimensions of the struts were chosen to eliminate possible axial deformations of the struts and, at the same time, its influence on the behaviour of the bridge model.
- The cross-section of one chord is a steel round rod with a diameter of 6 mm, the cross-sectional area of which is $A = 28.26 \text{ mm}^2$.

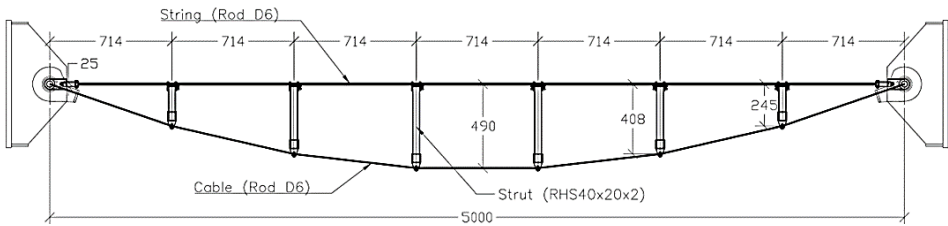


Fig. S3.1. Scheme of the bridge model with parameters (dimensions are given in millimetres)

The model of the string suspension bridge was tested under static loads. This steel bridge structure is loaded in five different combinations: two variants when the loads are symmetrical and three variants when the loads are asymmetrical. Load combinations are given in Table S3.1.

Table S3.1. Structural load and string prestress

Type of load	$\gamma = \frac{q}{p}$;	q, kN/m	Prestressing, kN
Constant load	-	0.320	$T_1 = 0.472$ $T_2 = 1.084$ $T_3 = 1.506$
Variable load (symmetrical)	-	0.255	$T_1 = 0.472$ $T_2 = 1.084$ $T_3 = 1.506$
Variable load (asymmetrical)	1	0.255	$T_1 = 0.472$ $T_2 = 1.084$ $T_3 = 1.506$
	2	0.510	$T_1 = 0.472$ $T_2 = 1.084$ $T_3 = 1.506$
	3	0.765	$T_1 = 0.472$ $T_2 = 1.084$ $T_3 = 1.506$

Table S3.2. Comparison of numerical and experimental displacements results

<i>Difference in vertical displacements. Experimental/Numerical results</i>								
<i>Local point of measuring/Load</i>	1L	3L	5L	7L	7R	5R	3R	1R
$T_1 = 0.472 \text{ kN}$								
Symmetrical	0	20%	1%	3%	-2%	1%	11%	0
Asymmetrical $\gamma = 1$	0	60%	5%	-38%	-23%	10%	60%	0
Asymmetrical $\gamma = 2$	0	57%	3%	-39%	-30%	6%	66%	0
Asymmetrical $\gamma = 3$	0	53%	2%	-39%	-28%	6%	76%	0
$T_2 = 1.084 \text{ kN}$								
Symmetrical	0	9%	9%	0%	-1%	9%	17%	0
Asymmetrical $\gamma = 1$	0	39%	7%	-30%	-38%	16%	207%	0
Asymmetrical $\gamma = 2$	0	44%	4%	-34%	-38%	10%	140%	0
Asymmetrical $\gamma = 3$	0	44%	3%	-36%	-38%	8%	135%	0
$T_3 = 1.506 \text{ kN}$								
Symmetrical	0	-1%	3%	0%	-1%	-7%	-5%	0
Asymmetrical $\gamma = 1$	0	39%	9%	-27%	-31%	35%	267%	0
Asymmetrical $\gamma = 2$	0	39%	6%	-30%	-33%	21%	188%	0
Asymmetrical $\gamma = 3$	0	39%	3%	-33%	-35%	16%	167%	0

The differences in the location of the largest displacements (node 5L) due to asymmetric loading do not exceed 10%. Relatively large differences in displacements are observed in nodes 3L (3R). 7L (7R). In the case of symmetrical loading. Minor differences were also observed at the locations of the largest displacements (7L, 7R), reaching up to 3%. Significantly larger discrepancies appeared at intermediate points. These differences indicate that the deformation shape of the experimental model did not fully correspond to that of the BEM model, likely due to the installation of massive support bearings in the experimental setup, which constrained both node rotations and displacements. Additionally, the intermediate nodes of the chord and the struts must be considered. Due to the short distances between the struts and the minimal stiffness of the 6 mm rods, rotational constraints at the nodes may have occurred. In contrast, in the BEM model, the nodes are assumed to be fully free for angular displacements).

Table S3.3. Comparison of numerical and experimental axial forces results

Parameter	Results		
	$T_1 = 0.472 \text{ kN}$	$T_2 = 1.084 \text{ kN}$	$T_3 = 1.506 \text{ kN}$
H_{string} . kN. sim.	7.80%	11.48%	0.75%
H_{string} . kN. $\gamma = 1$	-0.3%	-1.85%	-4.23%
H_{string} . kN. $\gamma = 2$	10.10%	6.98%	3.25%
H_{string} . kN. $\gamma = 3$	7.17%	4.77%	1.52%
H_{cable} . kN. sim.	7.9 %	1.15%	6.65%
H_{cable} . kN. $\gamma = 1$	-8.58%	-8.91%	-7.41%
H_{cable} . kN. $\gamma = 2$	3.51%	3.53%	-14.15%
H_{cable} . kN. $\gamma = 3$	14.06%	13.83%	-4.89%

Overall, the obtained results reveal differences between the numerical and experimental data. In the loaded part of the structure, the maximum displacements do not exceed 9% (Table S3.2), while the discrepancies in the axial forces of the string remain within 14% (Table S3.3).

General conclusions

1. A review of existing stress-ribbon and double-span suspension bridges revealed that these curved-outline structures are sensitive to asymmetric loading effects, and their deck geometry is suitable only for pedestrian traffic.
2. A newly developed form pretensioned string cable suspension bridge structure reduces displacements caused by asymmetric loads and, due to its flat deck surface, improves operational conditions. This allows for the use of such structures not only for pedestrian bridges.
3. Two design variants of the string cable suspension bridge were proposed: one in which permanent and traffic loads are transferred as concentrated forces to the struts and another where these loads are evenly distributed through the string. It was found that uniformly distributed loading on the string generates additional local displacements between the struts, creating extra-axial force in the string, which helps to reduce both kinematic and overall structural displacements.
4. The behaviour of the pretensioned string as a structural element was also analysed. Numerical and experimental studies showed that asymmetric loading does not cause large displacements in the string, as is typical in suspension cables, since the string lacks initial sag and thus does not exhibit kinematically induced displacements.

5. A calculation methodology was developed for two variants of the string cable suspension bridge, considering geometric nonlinearity. Numerical analysis demonstrated that the maximum errors of this approximate method in calculating displacements did not exceed 15%.
6. Analysis of the behaviour of the newly developed string cable suspension structure showed that under symmetric loading, the vertical displacements are most affected by the initial sag and axial stiffness of the lower cable, while the initial pretension in the string has no significant influence.
7. Under asymmetric loading, vertical displacements are mainly influenced by the initial sag of the lower cable and the pretension in the string.

Priedai

A priedas. Skaitinių ir analitinių rezultatų sugretinimas

A priedas. Skaitinių ir analitinių rezultatų sugretinimas

1. Simetrinis koncentruotas apkrovimas. Styga be papildomo išankstinio įtempimo

1.1 lentelė. Konstrukcijos poslinkiai tarpatramio viduryje, kai apkrovimas simetrinis
Table 1.1. Displacements of the structure in the middle of the span, when the loading is symmetrical

<i>Apatinio lyno pradinis įsvyris f_0, m</i>	<i>Parametras n</i>	<i>Poslinkis apskaičiuotas analitiškai, cm</i>	<i>Poslinkis apskaičiuotas skaitiškai, cm</i>	<i>Skirtumas, %</i>
L/10=5	0,6	2,28	2,50	10 %
L/10=5	1	2,85	3,10	9 %
L/10=5	1,67	3,80	4,10	8 %
L/20=2.5	0,6	8,98	8,80	-2 %
L/20=2.5	1	11,17	10,80	-3 %
L/20=2.5	1,67	14,76	14,10	-4 %
L/40=1.25	0,6	31,74	27,80	-14 %
L/40=1.25	1	37,62	33,50	-14 %
L/40=1.25	1,67	45,13	40,20	-12 %

1.2 lentelė. Ašinės jėgos stygoje, kai apkrovimas simetrinis
Table 1.2. Axial forces in the string, when the loading is symmetrical

<i>Apatinio lyno pradinis įsvyris f_0, m</i>	<i>Parametras n</i>	<i>Ašinė jėga stygoje apskaičiuota analitiškai, kN</i>	<i>Ašinė jėga stygoje apskaičiuota skaitiškai, kN</i>	<i>Skirtumas, %</i>
L/10=5	0,6	0,98	0,86	14 %
L/10=5	1	2,06	1,79	15 %
L/10=5	1,67	4,55	3,98	14 %
L/20=2,5	0,6	12,61	13,95	-10 %
L/20=2,5	1	25,74	29,16	-12 %
L/20=2,5	1,67	54,99	64,99	-15 %

1.2 lentelės pabaiga kitame puslapyje

L/40=1,25	0,6	118,37	117,64	1 %
L/40=1,25	1	219,12	233,64	-6 %
L/40=1,25	1,67	403,88	451,49	-11 %

1.3 lentelė. Ašinės jėgos apatiniame lyne, kai apkrovimas simetrinis
Table 1.3. Axial forces in the lower cable, when the load is symmetrical

<i>Apatinio lyno pradinis įsvyris f_0, m</i>	<i>Parametras n</i>	<i>Ašinė jėga apa- tiniame lyne apskaičiuota a- nalitiškai, kN</i>	<i>Ašinė jėga apa- tiniame lyne apskaičiuota skaitiškai, kN</i>	<i>Skirtumas, %</i>
L/10=5	0,6	622,16	620,44	0 %
L/10=5	1	621,45	621,70	0 %
L/10=5	1,67	620,26	622,46	0 %
L/20=2,5	0,6	1206,17	1207,52	0 %
L/20=2,5	1	1195,28	1197,36	0 %
L/20=2,5	1,67	1176,68	1180,46	0 %
L/40=1,25	0,6	1946,06	2038,58	5 %
L/40=1,25	1	1813,55	1952,87	8 %

2. Simetrinis koncentruotas apkrovimas. Styga iš anksto įtempta

2.1 lentelė. Konstrukcijos poslinkiai tarpatramio viduryje, kai apkrovimas simetrinis, styga iš anksto įtempta

Table 2.1. Displacements of the structure at mid-span with symmetrical loading, string prestressed

<i>Apatinio lyno pradinis įsvyris f_0, m</i>	<i>Parametras n</i>	<i>Poslinkis aps- kaičiuotas anali- tiškai, cm</i>	<i>Poslinkis aps- kaičiuotas skai- tiškai, cm</i>	<i>Skirtumas, %</i>
L/10=5	0,6	2,28	2,50	10 %
L/10=5	1	2,84	3,10	9 %
L/10=5	1,67	3,78	4,10	8 %
L/20=2,5	0,6	8,82	8,80	0 %
L/20=2,5	1	10,92	10,80	-1 %

2.1 lentelės pabaiga kitame puslapyje

L/20=2,5	1,67	14,33	14,20	-1 %
L/40=1,25	0,6	27,78	26,80	-4 %
L/40=1,25	1	32,08	31,50	-2 %
L/40=1,25	1,67	37,23	38,20	3 %

2.2 lentelė. Konstrukcijos ašinės jėgos stygoje, kai apkrovimas simetrinis, styga iš anksto įtempta

Table 2.2. Structural axial forces in a string, when the load is symmetrical, the string is prestressed

<i>Apatinio lyno pradinis įsvyris f_0, m</i>	<i>Parametras n</i>	<i>Ašinė jėga stygoje apskaičiuota analitiškai, kN</i>	<i>Ašinė jėga stygoje apskaičiuota skaitiškai, kN</i>	<i>Skirtumas, %</i>
L/10=5	0,6	30,73	33,94	10 %
L/10=5	1	63,43	70,05	10 %
L/10=5	1,67	138,13	152,52	10 %
L/20=2,5	0,6	43,11	42,42	-2 %
L/20=2,5	1	88,94	87,25	-2 %
L/20=2,5	1,67	193,75	188,70	-3 %
L/40=1,25	0,6	112,51	112,96	0 %
L/40=1,25	1	216,39	213,34	-1 %
L/40=1,25	1,67	412,51	406,99	-1 %

2.3 lentelė. Konstrukcijos ašinės jėgos apatiniame lyne, kai apkrovimas simetrinis

Table 2.3. Axial forces of the structure in the lower cable, when the load is symmetrical

<i>Apatinio lyno pradinis įsvyris f_0, m</i>	<i>Parametras n</i>	<i>Ašinė jėga apatiniame lyne apskaičiuota analitiškai, kN</i>	<i>Ašinė jėga apatiniame lyne apskaičiuota skaitiškai, kN</i>	<i>Skirtumas, %</i>
L/10=5	0,6	622,16	622,29	0 %
L/10=5	1	621,45	621,27	0 %
L/10=5	1,67	620,26	619,23	0 %
L/20=2,5	0,6	1206,17	1206,53	0 %
L/20=2,5	1	1195,28	1194,89	0 %
L/20=2,5	1,67	1176,68	1173,67	0 %
L/40=1,25	0,6	1946,05	2039,40	5 %

2.3 lentelės pabaiga kitame puslapyje

L/40=1,25	1	1813,54	1953,85	8 %
L/40=1,25	1,67	1597,31	1819,39	14 %

3. Simetrinis apkrovimas. Išskirstytas apkrovimas

3.1 lentelė. Stygos išankstinio įtempimo reikšmės, sukeltos vietinių stygos įlinkių nuo nuolatinės apkrovos

Table 3.1. String prestress values caused by local string deflections under distributed load

<i>Stygos skerspjūvio plotas A_s, cm²</i>	<i>Ašinė jėga stygoje H_s nuo nuolatinės apkrovos</i>	<i>Vietinių įtempimų sukeltas išankstinis įtempimas T, kN</i>	<i>Parametras n</i>
75	3,32	448,3	$n_1 = 0,6$
100	6,85	493,4	$n_2 = 1,0$
125	14,91	531,5	$n_3 = 1,67$

3.2 lentelė. Konstrukcijos poslinkiai tarpatramio viduryje, kai apkrovimas simetrinis

Table 3.2. Displacements of the structure in the middle of the span, when the loading is symmetrical

<i>Apatinio lyno pradinis įsvyris f_0, m</i>	<i>Parametras n</i>	<i>Poslinkis apskaičiuotas analitiškai, cm</i>	<i>Poslinkis apskaičiuotas skaitiškai, cm</i>	<i>Skirtumas, %</i>
L/10=5	0,6	2,28	2,50	10 %
L/10=5	1	2,84	3,10	9 %
L/10=5	1,67	3,78	4,10	9 %
L/20=2,5	0,6	8,92	8,70	-2 %
L/20=2,5	1	11,06	10,60	-4 %
L/20=2,5	1,67	14,56	13,80	-5 %
L/40=1,25	0,6	31,04	26,90	-13 %
L/40=1,25	1	36,57	31,40	-14 %
L/40=1,25	1,67	43,65	37,90	-13 %

3.3 lentelė. Konstrukcijos ašinės jėgos stygoje, kai apkrovimas simetrinis, styga iš anksto įtempta

Table 3.3. Structural axial forces in a string, when the load is symmetrical, the string is prestressed

Apatinio lyno pradinis įsvyris f_0 , m	Parametras n	Ašinė jėga stygoje apskaičiuota analitiškai, kN	Ašinė jėga stygoje apskaičiuota skaitiškai, kN	Skirtumas, %
L/10=5	0,6	540,88	548,30	1 %
L/10=5	1	594,75	603,69	2 %
L/10=5	1,67	640,34	650,98	2 %
L/20=2,5	0,6	549,56	552,00	0 %
L/20=2,5	1	613,99	611,27	0 %
L/20=2,5	1,67	686,35	667,24	-3 %
L/40=1,25	0,6	606,3	587,30	-3 %
L/40=1,25	1	785,8	728,94	-7 %
L/40=1,25	1,67	1052,3	901,52	-14 %

3.4 lentelė. Konstrukcijos ašinės jėgos apatiniame lyne, kai apkrovimas simetrinis

Table 3.4. Axial forces of the structure in the lower cable, when the load is symmetrical

Apatinio lyno pradinis įsvyris f_0 , m	Parametras n	Ašinė jėga apatiniame lyne apskaičiuota analitiškai, kN	Ašinė jėga apatiniame lyne apskaičiuota skaitiškai, kN	Skirtumas, %
L/10=5	0,6	619,73	619,77	0 %
L/10=5	1	618,12	618,05	0 %
L/10=5	1,67	615,54	615,29	0 %
L/20=2,5	0,6	1188,49	1190,09	0 %
L/20=2,5	1	1171,80	1174,48	0 %
L/20=2,5	1,67	1144,87	1150,17	0 %
L/40=1,25	0,6	1864,55	1969,92	6 %
L/40=1,25	1	1723,49	1878,22	9 %
L/40=1,25	1,67	1509,03	1707,94	13 %

4. Asimetrinis koncentruotas apkrovimas. Styga be papildomo išankstinio įtempimo

4.1 lentelė. Konstrukcijos poslinkiai tarpatramio ketvirtyje, kai apkrovimas asimetrinis
Table 4.1. Displacements of the structure in the quarter of the span, when the load is asymmetric

<i>Apatinio lyno pradinis išvyris f_0, m</i>	<i>Kintamos ir nuolatinės apkrovos santykis γ</i>	<i>Parametras n</i>	<i>Poslinkis apskaičiuotas skaitiškai</i>	<i>Poslinkis apskaičiuotas analitiškai</i>	<i>Skirtumas, %</i>
L/10=5	1	0,6	22,2	24,2	9 %
L/10=5	1	1	21,3	22,5	6 %
L/10=5	1	1,67	20,9	21,6	3 %
L/20=2,5	1	0,6	20,0	20,3	2 %
L/20=2,5	1	1	20,7	20,1	-3 %
L/20=2,5	1	1,67	22,1	21,2	-4 %
L/40=1,25	1	0,6	25,4	25,5	1 %
L/40=1,25	1	1	28,2	27,8	-2 %
L/40=1,25	1	1,67	32,3	31,0	-4 %
L/10=5	2	0,6	28,7	30,5	6 %
L/10=5	2	1	27,4	28,4	4 %
L/10=5	2	1,67	26,9	27,3	2 %
L/20=2,5	2	0,6	26,6	25,9	-2 %
L/20=2,5	2	1	27,4	25,7	-6 %
L/20=2,5	2	1,67	29,2	27,1	-7 %
L/40=1,25	2	0,6	33,4	32,7	-2 %
L/40=1,25	2	1	36,7	35,1	-4 %
L/40=1,25	2	1,67	41,4	38,4	-7 %
L/10=5	10	0,6	47,6	51,7	9 %
L/10=5	10	1	46,6	49,1	5 %
L/10=5	10	1,67	46,9	48,4	3 %
L/20=2,5	10	0,6	49,2	49,4	1 %
L/20=2,5	10	1	52,1	50,7	-3 %

4.1 lentelės pabaiga kitame puslapyje

L/20=2,5	10	1,67	56,9	55,6	-2 %
L/40=1,25	10	0,6	66,7	67,4	1 %
L/40=1,25	10	1	72,1	70,9	-2 %
L/40=1,25	10	1,67	79,0	74,8	-5 %

4.2 lentelė. Stygos ašinės jėgos, kai apkrovimas asimetrinis
Table 4.2. Axial forces of the string under asymmetric loading

<i>Apatinio lyno pradinis įsvyris f_0, m</i>	<i>Kintamos ir nuolatinės apkrovos santykis γ</i>	<i>Parametras n</i>	<i>Stygos ašinė jėga, apskaičiuota skaitiškai</i>	<i>Stygos ašinė jėga apskaičiuota analitiškai</i>	<i>Skirtumas, %</i>
L/10=5	1	0,6	354,43	393,75	-10 %
L/10=5	1	1	413,46	440,69	-6 %
L/10=5	1	1,67	464,6	485,69	-4 %
L/20=2,5	1	0,6	198,52	225,26	-12 %
L/20=2,5	1	1	250,13	264,98	-6 %
L/20=2,5	1	1,67	304,09	317,49	-4 %
L/40=1,25	1	0,6	144,81	162,02	-11 %
L/40=1,25	1	1	229,42	222,85	3 %
L/40=1,25	1	1,67	327,57	301,59	9 %
L/10=5	2	0,6	619,43	625,34	-1 %
L/10=5	2	1	715,75	700,71	2 %
L/10=5	2	1,67	798,97	773,52	3 %
L/20=2,5	2	0,6	381,91	362,26	5 %
L/20=2,5	2	1	472,69	427,86	10 %
L/20=2,5	2	1,67	565,35	515,53	10 %
L/40=1,25	2	0,6	270,4	274,49	-1 %
L/40=1,25	2	1	408,47	372,90	10 %
L/40=1,25	2	1,67	516,12	495,03	4 %
L/10=5	10	0,6	1777,54	1828,43	-3 %
L/10=5	10	1	2066,04	2078,54	-1 %
L/10=5	10	1,67	2321,55	2339,36	-1 %

4.2 lentelės pabaiga kitame puslapyje

L/20=2,5	10	0,6	1139,68	1197,61	-5 %
L/20=2,5	10	1	1451,6	1472,84	-1 %
L/20=2,5	10	1,67	1804,41	1867,21	-3 %
L/40=1,25	10	0,6	1040	1208,89	-12 %
L/40=1,25	10	1	1551,07	1605,18	-3 %
L/40=1,25	10	1,67	2246,06	2051,86	9 %

4.3 lentelė. Apatinio lyno ašinės jėgos, kai apkrovimas asimetrinis

Table 4.3. Axial forces of the lower cable, when the load is asymmetric

<i>Apatinio lyno pradinis įsvyris f_0, m</i>	<i>Kintamos ir nuolatinės apkrovos santykis γ</i>	<i>Parametras n</i>	<i>Stygos ašinė jėga, apskaičiuota skaitiškai</i>	<i>Stygos ašinė jėga apskaičiuota analitiškai</i>	<i>Skirtumas, %</i>
L/10=5	1	0,6	467,68	467,15	0 %
L/10=5	1	1	469,57	466,75	1 %
L/10=5	1	1,67	470,94	466,08	1 %
L/20=2,5	1	0,6	919,27	912,59	1 %
L/20=2,5	1	1	910,35	906,39	0 %
L/20=2,5	1	1,67	896,41	895,87	0 %
L/40=1,25	1	0,6	1600,42	1544,43	4 %
L/40=1,25	1	1	1539,37	1463,96	5 %
L/40=1,25	1	1,67	1445,56	1326,68	9 %
L/10=5	2	0,6	624,33	622,16	0 %
L/10=5	2	1	628,33	621,45	1 %
L/10=5	2	1,67	631,34	620,26	2 %
L/20=2,5	2	0,6	1224,48	1206,17	2 %
L/20=2,5	2	1	1206,71	1195,28	1 %
L/20=2,5	2	1,67	1179,87	1176,68	0 %
L/40=1,25	2	0,6	2064,51	1946,06	6 %
L/40=1,25	2	1	1965,27	1813,55	8 %
L/40=1,25	2	1,67	1718,47	1597,33	8 %
L/10=5	10	0,6	1860,07	1849,69	1 %

4.3 lentelės pabaiga kitame puslapyje

L/10=5	10	1	1893,46	1843,38	3 %
L/10=5	10	1,67	1918,68	1832,76	5 %
L/20=2,5	10	0,6	3539,77	3384,68	5 %
L/20=2,5	10	1	3412,53	3294,60	4 %
L/20=2,5	10	1,67	3230,61	3136,61	3 %
L/40=1,25	10	0,6	4409,29	4034,54	9 %
L/40=1,25	10	1	3681,77	3429,17	7 %
L/40=1,25	10	1,67	3009,95	2704,74	11 %

5. Asimetrinis koncentruotas apkrovimas. Styga iš anksto įtempta

5.1 lentelė. Konstrukcijos poslinkiai tarpatramio ketvirtyje, kai apkrovimas asimetrinis
Table 5.1. Displacements of the structure in the quarter of the span, when the load is asymmetric

<i>Apatinio lyno pradinis įsvyris f_0, m</i>	<i>Parametras n</i>	<i>Poslinkis apskaičiuotas analitiškai, cm</i>	<i>Poslinkis apskaičiuotas skaitiškai, cm</i>	<i>Skirtumas, %</i>	<i>Apatinio lyno pradinis įsvyris f_0, m</i>
L/10=5	1	0,6	21,8	24,2	11 %
L/10=5	1	1	20,6	22,5	9 %
L/10=5	1	1,67	19,5	21,6	11 %
L/20=2,5	1	0,6	19,7	20,4	3 %
L/20=2,5	1	1	20,1	20,2	0 %
L/20=2,5	1	1,67	21,1	21,3	1 %
L/40=1,25	1	0,6	25,3	29,5	15 %
L/40=1,25	1	1	28,2	32,1	14 %
L/40=1,25	1	1,67	32,2	36,2	12 %
L/10=5	2	0,6	28,4	30,5	7 %
L/10=5	2	1	26,9	28,4	6 %
L/10=5	2	1,67	25,9	27,3	5 %
L/20=2,5	2	0,6	26,3	25,9	-1 %
L/20=2,5	2	1	26,9	25,8	-4 %

5.1 lentelės pabaiga kitame puslapyje

L/20=2,5	2	1,67	28,3	27,3	-3 %
L/40=1,25	2	0,6	33,4	38,0	14 %
L/40=1,25	2	1	36,7	41,0	12 %
L/40=1,25	2	1,67	41,3	45,5	10 %
L/10=5	10	0,6	47,4	51,7	9 %
L/10=5	10	1	46,3	49,1	6 %
L/10=5	10	1,67	46,4	48,4	4 %
L/20=2,5	10	0,6	48,8	49,9	2 %
L/20=2,5	10	1	51,6	51,6	0 %
L/20=2,5	10	1,67	56,2	57,3	2 %
L/40=1,25	10	0,6	66,6	75,5	13 %
L/40=1,25	10	1	72	78,4	9 %
L/40=1,25	10	1,67	78,8	81,5	3 %

5.2 lentelė. Stygos ašinės jėgos, kai apkrovimas asimetris

Table 5.2. Axial forces of the string under asymmetric loading

<i>Apatinio lyno pradinis išsvyris f_0, m</i>	<i>Kintamos ir nuolatinės apkrovos santykis γ</i>	<i>Parametras n</i>	<i>Stygos ašinė jėga, apskaičiuota skaitiškai</i>	<i>Stygos ašinė jėga apskaičiuota analitiškai</i>	<i>Skirtumas, %</i>
L/10=5	1	0,6	372,62	423,62	-12 %
L/10=5	1	1	449,99	502,34	-10 %
L/10=5	1	1,67	544,12	619,91	-12 %
L/20=2,5	1	0,6	221,12	255,37	-13 %
L/20=2,5	1	1	295,16	327,19	-10 %
L/20=2,5	1	1,67	400,83	453,16	-12 %
L/40=1,25	1	0,6	239,72	228,68	5 %
L/40=1,25	1	1	324,02	307,22	5 %
L/40=1,25	1	1,67	470,49	410,89	15 %
L/10=5	2	0,6	636,36	655,20	-3 %
L/10=5	2	1	749,75	762,35	-2 %
L/10=5	2	1,67	872,49	907,77	-4 %

5.2 lentelės pabaiga kitame puslapyje

L/20=2,5	2	0,6	402,78	392,60	3 %
L/20=2,5	2	1	514,11	490,70	5 %
L/20=2,5	2	1,67	653,94	652,88	0 %
L/40=1,25	2	0,6	365,51	408,84	-11 %
L/40=1,25	2	1	503,33	568,87	-12 %
L/40=1,25	2	1,67	718,87	806,18	-11 %
L/10=5	10	0,6	1794,79	1857,87	-3 %
L/10=5	10	1	2100,41	2140,03	-2 %
L/10=5	10	1,67	2394,89	2474,21	-3 %
L/20=2,5	10	0,6	1161	1232,33	-6 %
L/20=2,5	10	1	1493,74	1548,78	-4 %
L/20=2,5	10	1,67	1893,53	2041,11	-7 %
L/40=1,25	10	0,6	1035,25	1247,98	-15 %
L/40=1,25	10	1	1546,17	1647,36	-6 %
L/40=1,25	10	1,67	2248,61	2120,13	6 %

5.3 lentelė. Apatinio lyno ašinės jėgos, kai apkrovimas asimetrinis
Table 5.3. Axial forces of the lower cable, when the load is asymmetric

<i>Apatinio lyno pradinis įsvyris f_0, m</i>	<i>Kintamos ir nuolatinės apkrovos santykis γ</i>	<i>Parametras n</i>	<i>Stygos ašinė jėga, apskaičiuota skaitiškai</i>	<i>Stygos ašinė jėga apskaičiuota analitiškai</i>	<i>Skirtumas, %</i>
L/10=5	1	0,6	470,76	467,15	1 %
L/10=5	1	1	469,21	466,75	1 %
L/10=5	1	1,67	466,84	466,08	0 %
L/20=2,5	1	0,6	918,48	912,59	1 %
L/20=2,5	1	1	908,58	906,39	0 %
L/20=2,5	1	1,67	891,91	895,86	0 %
L/40=1,25	1	0,6	1601,12	1544,43	4 %
L/40=1,25	1	1	1540,18	1463,95	5 %
L/40=1,25	1	1,67	1445,06	1326,66	9 %
L/10=5	2	0,6	631,08	622,16	1 %

5.3 lentelės pabaiga kitame puslapyje

L/10=5	2	1	627,83	621,45	1 %
L/10=5	2	1,67	623,2	620,26	0 %
L/20=2,5	2	0,6	1223,43	1206,17	1 %
L/20=2,5	2	1	1204,43	1195,28	1 %
L/20=2,5	2	1,67	1174,33	1176,68	0 %
L/40=1,25	2	0,6	2065,33	1946,05	6 %
L/40=1,25	2	1	1966,2	1813,54	8 %
L/40=1,25	2	1,67	1817,93	1597,31	14 %
L/10=5	10	0,6	1917,98	1875,10	2 %
L/10=5	10	1	2192,09	2077,80	6 %
L/10=5	10	1,67	2357,01	2267,42	4 %
L/20=2,5	10	0,6	3537,18	3384,67	5 %
L/20=2,5	10	1	3407,16	3294,59	3 %
L/20=2,5	10	1,67	3218,4	3136,59	3 %
L/40=1,25	10	0,6	4110,58	4034,53	2 %
L/40=1,25	10	1	3683,12	3429,16	7 %
L/40=1,25	10	1,67	3109,25	2704,73	15 %

6. Asimetrinis apkrovimas. Apkrova išskirstyta į stygą

6.1 lentelė. Konstrukcijos poslinkiai tarpatramio ketvirtyje, kai apkrovimas asimetrinis
Table 6.1. Displacements of the structure in the quarter of the span, when the load is asymmetric

<i>Apatinio lyno pradinis išvyris f_0, m</i>	<i>Parametras n</i>	<i>Poslinkis apskaičiuotas analitiškai, cm</i>	<i>Poslinkis apskaičiuotas skaitiškai, cm</i>	<i>Skirtumas, %</i>	<i>Apatinio lyno pradinis išvyris f_0, m</i>
L/10=5	1	0,6	18,4	19,5	6 %
L/10=5	1	1	17,8	18,3	3 %
L/10=5	1	1,67	17,6	17,6	0 %
L/20=2,5	1	0,6	17	16,0	-6 %
L/20=2,5	1	1	17,7	16,0	-10 %
L/20=2,5	1	1,67	19,3	17,1	-12 %

6.1 lentelės pabaiga kitame puslapyje

L/40=1,25	1	0,6	23,6	24,0	2 %
L/40=1,25	1	1	26,3	28,0	7 %
L/40=1,25	1	1,67	30,4	32,8	8 %
L/10=5	2	0,6	25,7	26,3	2 %
L/10=5	2	1	24,7	24,6	0 %
L/10=5	2	1,67	24,4	23,7	-3 %
L/20=2,5	2	0,6	23,7	22,0	-7 %
L/20=2,5	2	1	24,7	21,9	-11 %
L/20=2,5	2	1,67	26,6	23,5	-12 %
L/40=1,25	2	0,6	31,4	30,6	-3 %
L/40=1,25	2	1	34,6	36,5	6 %
L/40=1,25	2	1,67	39,4	42,1	7 %
L/10=5	10	0,6	45	48,7	8 %
L/10=5	10	1	44,2	46,5	5 %
L/10=5	10	1,67	44,7	45,9	3 %
L/20=2,5	10	0,6	46,3	47,0	1 %
L/20=2,5	10	1	49,3	48,7	-1 %
L/20=2,5	10	1,67	54,2	54,3	0 %
L/40=1,25	10	0,6	66,9	76,4	14 %
L/40=1,25	10	1	72,5	80,4	11 %
L/40=1,25	10	1,67	76,7	84,0	9 %

6.2 lentelė. Stygos ašinės jėgos, kai apkrovimas asimetris

Table 6.2. Axial forces of the string under asymmetric loading

<i>Apatinio lyno pradinis įsvyris f_0, m</i>	<i>Kintamos ir nuolatinės apkrovos santykis γ</i>	<i>Parametras n</i>	<i>Stygos ašinė jėga, apskaičiuota skaitiškai</i>	<i>Stygos ašinė jėga apskaičiuota analitiškai</i>	<i>Skirtumas, %</i>
L/10=5	1	0,6	557,96	599,99	-7 %
L/10=5	1	1	623,12	665,54	-6 %
L/10=5	1	1,67	679,21	724,47	-6 %
L/20=2,5	1	0,6	513,38	474,21	8 %

6.2 lentelės pabaiga kitame puslapyje

L/20=2,5	1	1	574,27	530,14	8 %
L/20=2,5	1	1,67	630,89	588,01	7 %
L/40=1,25	1	0,6	511,82	460,87	11 %
L/40=1,25	1	1	589,54	575,43	2 %
L/40=1,25	1	1,67	687,5	708,13	-3 %
L/10=5	2	0,6	797,38	914,74	-13 %
L/10=5	2	1	896,76	1016,94	-12 %
L/10=5	2	1,67	982,61	1110,60	-12 %
L/20=2,5	2	0,6	695,79	698,82	0 %
L/20=2,5	2	1	786,8	788,04	0 %
L/20=2,5	2	1,67	873,91	886,85	-1 %
L/40=1,25	2	0,6	675,64	636,06	6 %
L/40=1,25	2	1	790,34	845,60	-7 %
L/40=1,25	2	1,67	939,53	1063,19	-12 %
L/10=5	10	0,6	2087,03	2080,18	0 %
L/10=5	10	1	2373,63	2352,27	1 %
L/10=5	10	1,67	2627,37	2629,35	0 %
L/20=2,5	10	0,6	1742,86	1602,42	9 %
L/20=2,5	10	1	2022,63	1849,73	9 %
L/20=2,5	10	1,67	2325,3	2211,68	5 %
L/40=1,25	10	0,6	1747,91	1850,12	-6 %
L/40=1,25	10	1	2144,88	2342,32	-8 %
L/40=1,25	10	1,67	2686,55	2842,82	-5 %

6.3 lentelė. Apatinio lyno ašinės jėgos, kai apkrovimas asimetris

Table 6.3. Axial forces of the lower cable, when the load is asymmetric

<i>Apatinio lyno pradinis išsvyris f_0, m</i>	<i>Kintamos ir nuolatinės apkrovos santykis γ</i>	<i>Parametras n</i>	<i>Stygos ašinė jėga, apskaičiuota skaitiškai</i>	<i>Stygos ašinė jėga apskaičiuota analitiškai</i>	<i>Skirtumas, %</i>
L/10=5	1	0,6	469,14	465,99	1 %
L/10=5	1	1	467,68	465,16	1 %

6.3 lentelės pabaiga kitame puslapyje

L/10=5	1	1,67	465,54	463,82	0 %
L/20=2,5	1	0,6	908,91	903,95	1 %
L/20=2,5	1	1	898,21	894,80	0 %
L/20=2,5	1	1,67	881,7	879,88	0 %
L/40=1,25	1	0,6	1551,95	1498,84	4 %
L/40=1,25	1	1	1486,71	1410,67	5 %
L/40=1,25	1	1,67	1393,14	1269,92	10 %
L/10=5	2	0,6	628,82	620,62	1 %
L/10=5	2	1	625,81	619,34	1 %
L/10=5	2	1,67	621,6	617,26	1 %
L/20=2,5	2	0,6	1209,38	1194,85	1 %
L/20=2,5	2	1	1190,12	1180,16	1 %
L/20=2,5	2	1,67	1161,04	1156,03	0 %
L/40=1,25	2	0,6	1998,66	1892,10	6 %
L/40=1,25	2	1	1898,4	1753,44	8 %
L/40=1,25	2	1,67	1657,05	1538,14	8 %
L/10=5	10	0,6	1905,97	1845,16	3 %
L/10=5	10	1	1881,16	1837,21	2 %
L/10=5	10	1,67	1847,3	1824,03	1 %
L/20=2,5	10	0,6	3467,25	3355,00	3 %
L/20=2,5	10	1	3340,68	3256,61	3 %
L/20=2,5	10	1,67	3160,02	3089,08	2 %
L/40=1,25	10	0,6	4217,23	3965,25	6 %
L/40=1,25	10	1	3618,98	3369,46	7 %
L/40=1,25	10	1,67	2889,37	2659,32	9 %

Edmundas BEIVYDAS

INOVATYVIOS STYGINĖS KABAMOSIOS PLIENINIO TILTO
KONSTRUKCIJOS ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ ANALIZĖ

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Statybos inžinerija (T 002)

STRESS AND STRAIN ANALYSIS OF AN INNOVATIVE
SRING CABLE SUSPENSION STEEL BRIDGE STRUCTURE

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (T 002)

Lietuvių kalbos redaktorė Deimantė Grigaitė

Anglų kalbos redaktorė Jūratė Griškėnaitė

2025 05 12. 11,2 sp. l. Tiražas 20 egz.
Leidinio el. versija <https://doi.org/10.20334/2025-035-M>
Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius
Spausdino UAB „Ciklonas“,
Žirmūnų g. 68, 09124 Vilnius