



VIENAJUSČIŲ KABAMŪJŲ PAREMTŲ ARKA PĖSČIŪJŲ TILTŲ PUSIAUSVIROSIOS SISTEMOS KOMPONAVIMAS

Vilius KARIETA

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva
El. paštas vilius.karieta@vgtu.lt*

Santrauka. Straipsnyje pateikiama kombinuotųjų kabamųjų vienajusčių pėsčiųjų tiltų, paremtų arka, apžvalga ir klasifikavimas. Aptariami kombinuotos pusiausvirosios konstrukcijos pagrindiniai komponuojamieji parametrai, jų tarpusavio ryšys. Straipsnyje pateikta metodika, kaip subalansuoti pusiausvirosios kabamojo arkinio tilto konstrukciją.

Reikšminiai žodžiai: vienajuostis kabamasis tiltas, atraminė arka, pusiausvirosios konstrukcija, racionalūs komponuojamieji parametrai, simetrinė apkrova, netiesinė analizė.

Įvadas

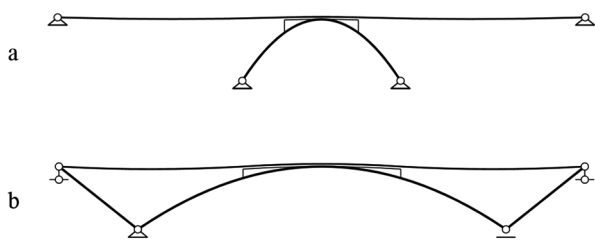
Viena iš efektyviausių, ekonomiškiausių ir grakščiausių kabamųjų tiltų konstrukcijų atmainų yra vienajuostė kabamoji konstrukcija. Dėl savo savybių ir apybrėžtos šios konstrukcijos dažniausiai taikomos pėsčiųjų tiltams statyti (Schlaich *et al.* 2005; Strasky 2005). Vienajusčio kabamojo tilto pagrindiniai laikantieji elementai yra didelio stiprio plieniniai lynai arba juostos (Juozapaitis *et al.* 2006; Strasky 2005; Sandovič *et al.* 2011). Vienajusčiai kabamieji tiltai yra labai efektyvūs, kai galinėms atramoms naudojamas stiprus natūralus pagrindas (Strasky 2005; Kulbach 2007). Kadangi kabamųjų vienajusčių tiltų efektyvumas auga didinant tarpatramių skaičių, dažnai taikomos daugiaatramės vienajuostės konstrukcijos (Troyano 2003; Strasky 2005). Siekiant išvengti nepageidaujamų svyravimų ir virpesių, lanksčioms ir lengvoms vienajusčių tiltų konstrukcijoms šiais laikais naudojami įvairūs mechaniniai ir hidrauliniai dinaminiai slopintuvai (Bleicher *et al.* 2011). Tačiau kabamosios vienajuostės konstrukcijos turi esminį trūkumą – į pamatus perduoda ypač dideles horizontaliąsias atramines reakcijas, kurios dažniausiai lemia šių konstrukcijų ekonomiškumą (Schlaich *et al.* 2005; Kulbach 2007; Karieta 2010; Juozapaitis *et al.* 2012). Siekiant sukurti naujas formas ir praplėsti vienajusčių kabamųjų tiltų taikymo ribas, XX a. pabaigoje šios konstrukcijos buvo pradėtos derinti su kitais laikančiaisiais elementais, siekiant jas panaudoti kombinuotųjų tiltų konstrukcijose. Viena iš kombinuotųjų

konstrukcijų yra vienajuostė kabamoji paremta arka konstrukcija. Ši konstrukcija ypatinga tuo, kad, sujungus priešingą vidines jėgas turinčius laikančiuosius elementus, galima sukurti pusiausvirą konstrukciją, kuri į pamatus perduoda tik vertikaliąsias atramines reakcijas (Strasky 2005; Strasky 2008; Karieta 2010; Juozapaitis *et al.* 2012). Informacijos apie kombinuotosios kabamosios vienajuostės konstrukcijos, paremtos arka, elgseną ir racionalius parametrus nėra daug.

Straipsnyje pateikiama esamų kombinuotųjų kabamųjų vienajusčių paremtų arka pėsčiųjų tiltų apžvalga ir skaičiuojamosios schemos. Aptariami kombinuotos pusiausvirosios konstrukcijos pagrindiniai komponuojamieji parametrai ir jų tarpusavio ryšys. Straipsnyje pateikta metodika, aprašanti pusiausvirosios kabamojo – arkinio tilto konstrukcijos komponavimą.

Kombinuotųjų kabamųjų – arkinių tiltų apžvalga ir klasifikavimas

Kombinuotieji kabamieji vienajusčiai paremti arka pėsčiųjų tiltai pradėti statyti pačioje XXI a. pradžioje. Šio tipo tiltų konstrukcijų pavyzdžių pasaulyje dar nėra daug, tačiau jie yra labai efektyvūs ir racionalūs konstrukciniai bei statybos technologijos požiūriais. Kombinuotųjų kabamųjų – arkinių tiltų pavyzdžių galima aptikti Vokietijoje, Čekijoje, Japonijoje, JAV. Bendroju atveju kombinuotųjų kabamųjų – arkinių tiltų skaičiuojamoji schema gali būti atskirų pamatų ir sujungtų pamatų (1 pav.).



1 pav. Kombinuotųjų kabamųjų – arkinių tiltų pagrindinės skaičiuojamosios schemas: a) atskirtų pamatų; b) sujungtų pamatų

Fig. 1. Suspension supported on arch bridge structure: a) separated foundations; b) connected foundations

Vienas žymiausių kombinuotojo tilto su atskirtais pamatais pavyzdžių yra Börstel tiltas, pastatytas 2000 m. Löhne mieste, Vokietijoje (2 pav., a). Börstel tilto kabamoji vienajuostė perdanga paremta ant gelžbetoninės arkos. Kabamąją tilto dalį sudaro plieniniai lakštai, ant kurių sumontuotos 12 cm storio apspausito betono plokštės. Tiltu ilgis – 96,0 m, plotis – 3,5 m, arkos anga – 20 m (Schlaich, Bergermann 2000). Vienas naujausių kombinuotojo tilto su sujungtais pamatais pavyzdžių yra 2014 m. pastatytas viadukas per greitkelį Durhame, Šiaurės Karolioje, JAV (2 pav., b). Viaduko per greitkelį vienajuostė dalis surinkta iš gelžbetoninių segmentų, juos apspaudžiant vidiniais įtemtais lynais. Kabamoji vienajuostė dalis atremta ant plieninių vamzdinio skerspjūvio arkų. Viaduko ilgis – 83,0 m, plotis – 4,2–5,2 m, arkos anga – 64,0 m (Bd&e/ISSUE 76/2014).

Konstrukcijose, turinčiose atskirus pamatus, arka naudojama kaip efektyvi tarpinė atrama, kuri perdengia kliūtį. Atskirų pamatų konstrukcijos gali būti pritaikytos slėniuose, tarpekliuose, giliose upių vagose arba iškasose, kai sujungti arkos ir kabamosios dalies pamatus yra neracionalu (1 pav., a). Tačiau kombinuotieji kabamieji – arkiniai tiltai, turintys atskirus pamatus, yra racionalūs tiek, kiek yra palankios geologinės sąlygos, nes didelės horizontaliosios laikančiųjų elementų atraminės reakcijos reikalauja stabilų pamatų.



a



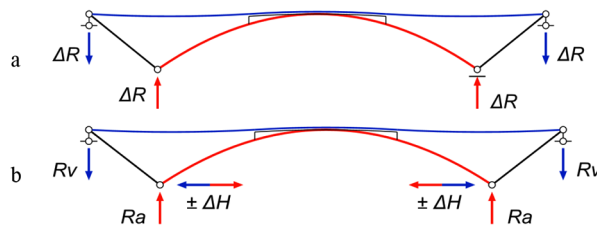
b

2 pav. Kombinuotųjų kabamųjų – arkinių tiltų pavyzdžiai
Fig. 2. Examples of suspension supported on arch bridges

Kombinuotieji kabamieji – arkiniai tiltai su sujungtais pamatais (1 pav., b) turi kitą skaičiuojamąją schemą. Arka šiuo atveju naudojama ne tik kaip tarpinė kabamosios tilto dalies atrama, bet ir kaip jungtis, varžanti kabamosios dalies horizontaliąsias atramines reakcijas. Šiuo atveju kabamosios ir arkinės dalies pamatus sujungus pasvirusiais spyriais, galima sukombinuoti pusiausvirą arba iš dalies pusiausvirą konstrukciją, kuri neperduoda arba perduoda santykinai nedideles horizontaliąsias atramines reakcijas į pamatus (3 pav.).

Siekiant sukombinuoti pusiausvirą konstrukciją, kabamąją vienajuostę tilto dalį galima atremti ant arkos (3 pav. a, b) arba prijungti prie jos (4 pav.). Skirtingos jungtys ir konstravimas leidžia šio tipo tiltams naudoti įvairias medžiagas ir skerspjūvius, spręsti statybos technologijos ir įgyvendinimo klausimus.

Kabamosios tilto dalies prijungimo prie arkos sprendinys tiksliau apibrėžia arkinės tilto dalies apkrovimą, panaikina sudėtingas kontaktines jungtis tarp kabamojo ir



3 pav. Kombinuoto tilto su sujungtais pamatais skaičiuojamoji schema: a) pusiausviroji; b) iš dalies pusiausvira

Fig. 3. Structure of combined bridge with connected foundations: a) self-anchored system; b) partly self-anchored system



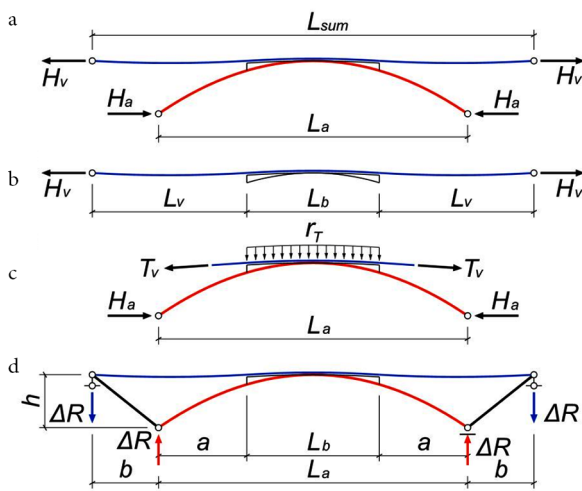
4 pav. Kombinuotos konstrukcijos, kai kabamoji vienajuostė dalis prijungta prie arkos, skaičiuojamoji schema

Fig. 4. Structure of combined bridge when suspension part and connected to an arch

arkinio elemento poreikį. Tačiau toks sprendimas tinka ne visiems kabamųjų vienajuosčių elementų skerspjūviams.

Pusiausvirošios konstrukcijos komponavimo principai

2005 m. savo knygoje J. Strasky vienas pirmųjų aprašė pusiausvirošios kabamosios arkinės konstrukcijos komponavimo idėją, kurią atspindi 4 pav. pateikta schema. Remiantis šia schema galima subalansuoti kabamosios ir arkinės tilto dalių horizontaliąsias atramines reakcijas, sukuriant pusiausvirąją kombinuotojo tilto konstrukciją.



5 pav. Pusiausvirošios konstrukcijos komponavimo principai
Fig. 5. The principles of self-anchored system

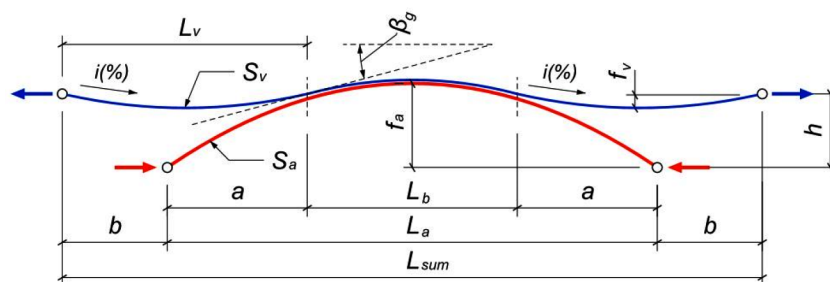
5 pav. pateiktoje schemoje matome, kad kabamojo vienajuosčio elemento vidurinis tarpatramis gali turėti ir arkos apybrėžą. Arka gali būti naudojama kaip balnas, nuo kurio kabamasis vienajuostis elementas gali pakilti dėl veikiančių tempimo jėgų arba neigiamos temperatūros poveikio. Taip pat vienajuostė kabamoji tilto dalis į balną gali atsiremti veikiant teigiamai temperatūrai. Komponavimo pradžioje kabamąjį vienajuosčių elementą galima nagrinėti kaip dviejų tarpatramių viduryje ant nejudraus balno paremtą kabamąjį

konstrukciją (5 pav. b). Arkos analizė atliekama ją apkraunant savuoju svoriu, balno elementų svoriu bei radialinėmis jėgomis, kurias perduoda kabamasis elementas (5 pav. c). Po apkrovimo kabamoji vienajuostė konstrukcija ir arka tampa vientisa sistema. Konstrukcijų parametrai bei pradiniai įtempiai tiek arkoje, tiek kabamajame elemente gali būti parinkti tokie, kad horizontaliosios šių konstrukcijų jėgos būtų vienodos ($H_v = H_a$). Tik tada galima sujungti kabamojo vienajuosčio elemento ir arkos atramas gniuždomais spyriais, kurie subalansuotą kombinuotojo tilto konstrukcijų horizontaliąsias reakcijas. Momentui, atsiradusiam dėl horizontaliųjų jėgų $H_v \cdot h$ priešinasi momentas $\Delta R \cdot b$. Tokiu būdu sukuriama pusiausviroji konstrukcija, kurioje veikia tik vertikaliosios reakcijos (5 pav., d) (Strasky 2005).

Tilto komponavimas, kai vienajuostė kabamoji dalis yra prijungta prie arkos (4 pav.), yra labai panašus, skiriasi tik arkos apkrovų pobūdis. Anksčiau minėtų radialiųjų jėgų balno dalyje nebėra, nes vienajuostė kabamoji dalis nėra atremiama ant arkos, o prijungiama prie jos. Todėl centrinę arkos dalį šiuo atveju galime vadinti pėstiesiems palankia arkos dalimi. Radialiosios balno srities jėgos šiuo atveju pakeičiamos vertikaliosiomis kabamojo vienajuosčio elemento reakcijomis, kuriomis arka apkraunama pėstiesiems palankios arkos dalies kraštuose (4 pav.).

Pusiausvirošios konstrukcijos komponuojamieji parametrai

Modeliuoti kombinuotą pusiausvirąją konstrukciją taikant skaitmeninius metodus – imlus laikui procsas, todėl atlikti modeliavimo procesą parankiausia iš anksto žinant pagrindinius konstrukcijos parametrus. Šiame skyriuje pateikta metodika, kaip subalansuoti pusiausvirojo kabamojo – arkinio tilto konstrukciją, parenkant tinkamus geometrinius komponuojamuosius parametrus. Kabamosios vienajuostės paremtos arka konstrukcijos pagrindiniai komponuojamieji parametrai pateikti 6 pav.: L_a – arkos tarpatramis; f_a – arkos pakyla; L_b – apkrautoji arkos dalis (vienajuosčio balno ilgis); L_v – kabamojo vienajuosčio tilto elemento ilgis;



6 pav. Pagrindiniai komponuojamieji parametrai
Fig. 6. Basic geometric parameters

f_v – kabamojo vienajuosčio elemento įsvyris; h – atstumas tarp arkos ir kabamojo elemento atramų; S_v, S_b, S_a – kabamojo vienajuosčio elemento, balno ir arkos apybrėžų ilgiai; β_g – nuolatinėmis apkrovomis apkrautos vienajuosťės tilto dalies liestinės kampas su horizontale; α – atraminio spyrio posvyrio kampas.

Kadangi kombinuotojo tilto pusiausvrosios konstrukcijos komponavimas vyksta laikančiuosius elementus apkrovus tik nuolatinėmis apkrovomis, labai svarbu analizės pradžioje pasirinkti medžiagas, preliminarius pirminius laikančiųjų elementų skerspjūvius ir skaičiavimo metodus horizontaliosioms atraminėms reakcijoms apskaičiuoti.

Geometrinius parametrus, pateiktus 6 pav., galima suskirstyti į grupes, siekiant išskirti pagrindinius kintamuosius:

- I grupė. Pradiniai tilto parametrai yra šie: L_a, f_a, L_{sum}, h . Jie komponavimo pradžioje visada turėtų būti žinomi, nes jie apibrėžia kliūtį, kurią tiltas privalo įveikti.
- II grupė. Pradiniai kabamosios dalies parametrai yra tokie: β_g, i (%), f_v . Jie apibūdina kabamosios tilto dalies įsvyrius, dažniausiai juos riboja neįgalųjų poreikiai. Remiantis šiais parametrais, nustatoma ne tik kabamosios tilto dalies, bet ir jos tarpinės atramos – arkinio balno – apybrėža.
- III grupė. Pagrindinis kintamasis – L_b . Kadangi anksčiau aptarti geometriniai parametrai visada turėtų būti žinomi komponavimo pradžioje, tad, keičiant parametro L_b reikšmę, galima koreguoti kabamosios tilto dalies tarpatramį, o kartu ir arkos apkrovą. Taip priartėjimo būdu galima subalansuoti pagrindinių laikančiųjų elementų atramines reakcijas.

Žinant aptartus geometrinius parametrus, galima apskaičiuoti kabamosios ir arkinės tilto dalių apkrovas bei nustatyti horizontaliąsias šių elementų atramines reakcijas. Geometrinius parametrus visada galima parinkti tokius, kad H_a būtų lygi H_v (5 pav.), šiuo atveju tilto konstrukcija – pusiausviroji (3 pav., b). Apytikslės plieninės kabamosios ir arkinės tilto dalių horizontaliąsias atramines reakcijas galima apskaičiuoti taikant tokias išraiškas:

- apytikslė pradinė kabamojo elemento horizontalioji reakcija veikiant nuolatinėi apkrovai:

$$H_{v,g} \approx \frac{p_g \cdot L_v^2}{8 \cdot (f^* + \Delta f_{el,g})}, \quad (1)$$

- apytikslis pradinis tamprusis kabamojo elemento įsvyrio prieaugis veikiant nuolatinėi apkrovai:

$$\Delta f_{el,g} \approx \frac{3}{128} \cdot \frac{g \cdot L_v^4}{E \cdot A \cdot (f^*)^2}, \quad (2)$$

- apytikslė arkos skėtimo jėga įvertinus jos lenkiamąjį standumą gali būti užrašoma taip:

$$H_a \cong \frac{M_m^{(0)}}{f_a} - \frac{48 \cdot EI \cdot \Delta f_a}{5 \cdot L_a^2}, \quad (3)$$

čia f^* – pradinis (fiktyvusis) kabamojo elemento įsvyris, kuris apibūdina pradinę jo geometriją; p_g – tolygiai paskirstyta nuolatinė apkrova; L_v – kabamosios tilto dalies tarpatramis; A – kabamosios tilto dalies laikančiojo elemento skerspjūvio plotas; Δf_a – vertikalusis arkos centro poslinkis; L_a – arkos tarpatramis; EI – arkos lenkiamasis standis; $M_m^{(0)}$ – lenkimo momentas arkoje, nagrinėjant ekvivalentinę siją; f_a – arkos pakyla.

Remiantis 6 pav. pateikta schema, kiekvienu atveju galima subalansuoti atramines reakcijas, taip nustatant tikslią kombinuotojo tilto geometriją prieš atliekant detalią skaitmeninę analizę.

Išvados

Straipsnyje atlikta kombinuotųjų kabamųjų – arkinųjų pėsčiųjų tiltų apžvalga ir klasifikavimas pagal skaičiuojamąsias schemas. Aptarti pusiausvrosios kombinuotos konstrukcijos komponavimo principai, pagrindiniai komponuojamieji parametrai ir jų tarpusavio priklausomybės. Straipsnyje pateikta kombinuotojo tilto geometrijos komponavimo metodika, siekiant subalansuoti pusiausvrosios konstrukcijos skaičiuojamąją schemą.

Literatūra

- Bleicher, A.; Schauer, T.; Valtin, M.; Raisch, M.; Schlaich, M. 2011. Active vibration control of a light and flexible stress ribbon footbridge using pneumatic muscles, in *Preprints of the 18th IFAC World Congress*, August 28–September 2, Milano (Italy), 911–916.
- Hayes, T.; Tse, J. 2014. Reports. Ribbon route, *Bd&e/ISSUE 76*.
- 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>
- Juozapaitis, A.; Grigorjeva, T.; Sandovič, G.; Misiūnaitė, I. 2012. *Inovatyvūs plieno tiltai*. Vilnius: Technika. 199 p.
- Karieta, V. 2010. *Analysis of the single-lane suspension supported on arch pedestrian multispan bridge behavior and research rational parameters*: Master's thesis. Vilnius Gediminas Technical University.
- Kulbach, V. 2007. *Cable structures. Design and analysis*. Tallin: Estonian Academy Publisher. 224 p.
- Sandovič, G.; Juozapaitis, A.; Kliukas, R. 2011. Simplified engineering method of suspension two-span pedestrian steel

bridges with flexible and rigid cables under action of asymmetrical loads, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 6(4): 267–273.

<https://doi.org/10.3846/bjrbe.2011.34>

Schlaich, M.; Brownlie, K.; Conzett, J.; Sobrino, J.; Strasky, J.; Takenouchi, K. 2005. *Guidelines for the design of footbridges*. Stuttgart: Sprint-Digital-Druck. 154 p.

Strasky, J. 2005. *Stress ribbon and cable-supported pedestrian bridges*. London: Thomas Telford Ltd. 232 p.

<https://doi.org/10.1680/sracspsb.32828>

Strasky, J. 2008. Stress – ribbon pedestrian bridges supported or suspended on arches, in *Chinese-Croatian joint colloquium “Long arch bridges”*, Brijuni islands, 10–14 July, 135–148.

Schlaich, J.; Bergermann, R. 2000. *Light structures*. München, Berlin, London, New York: Prestel. 328 p.

Troyano, L. F. 2003. *Bridge engineering: a global perspective*. London: Tomas Telford Ltd. 775 p. ISBN 0727732153.

<https://doi.org/10.1680/beagp.32156>

ARRANGING PARAMETERS OF SELF-ANCHORED STRESSED RIBBON SUPPORTED ON ARCH PEDESTRIAN BRIDGES

V. Karieta

Abstract

Stressed ribbon pedestrian bridges are most graceful, efficient and economical strains of suspension bridges. However, these structures have a major disadvantage – very large horizontal support reactions, which result mainly to the construction cost. In order to discover new forms and to extend the limits of stressed ribbon bridges, in the end of twentieth century these constructions were started to combine with other bearing elements in cable-stayed, under-deck cable-stayed bridges and other structures. At the beginning of the twenty-first century stressed ribbon supported on arch structure was discovered. The paper presents reviews of suspension supported on arch footbridges and classification. Considered the main geometrical design parameters and their interdependence. The paper presents a method of how to balance self-anchored suspension supported on arch bridge design computational scheme.

Keywords: stressed ribbon bridge, arch bridge, equilibrium structure, rational parameters, symmetrical load, nonlinear analysis.