

INOVATYVŲ TILTŲ LAIKANČIŲJŲ KONSTRUKCIJŲ STIPRINIMO METODAI IR MEDŽIAGOS

Darius LIAUDANSKAS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: darius.liaudanskas@vdu.lt.

Raimondas ŠADZEVIČIUS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas, el. paštas: raimondas.sadzevicius@vdu.lt.

Santrauka

Darbe nagrinėjami inovatyvūs tiltų laikančiųjų konstrukcijų stiprinimo metodai ir medžiagos, skirtos eksploatuojamų tiltų ilgaamžiškumui ir saugai didinti. Darbe analizuojamos pagrindinės tiltų pažaidų ir defektų priežastys: mechaninis nuovargis, armatūros korozija, aplinkos poveikis ir didėjančios apkrovos. Analizuojami šiuolaikiniai stiprinimo sprendiniai – NSM (Near-Surface Mounted) ir FRP (Fiber Reinforced Polymer) sistemos, įtemptos CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) technologijos, HPFRC/UHPFRC (High Performance Fiber Reinforced Concrete / Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete) apvalkalai bei hibridinės plieno ir FRP sistemos, įvertinant jų efektyvumą, pritaikymo galimybes ir tvarumą. Taip pat nagrinėjama konstrukcijų būklės stebėsenos sistemų reikšmė ankstyvam pažaidų nustatymui. Darbo metu atlikta inovatyvių stiprinimo metodų analizė, taikant juos Česlovo Radzinausko tilto Kaune laikančiosioms konstrukcijoms. Tiltų konstrukcijų apžiūros metu nustatytos tokios dažniausiai pasitaikiusios pažaidos – I tipo betono korozija, armatūros apsauginio sluoksnio nutrūpėjimas, armatūros korozija, biokorozija siūlių irimas, plyšiai ir t.t. Atlikta tiltų laikančiųjų konstrukcijų stiprinimo konstrukcinių skaičiavimų rezultatų palyginamoji analizė.

Reikšminiai žodžiai: tiltų stiprinimas, tiltų priežiūra, korozija, charakteristinis gniuždymo stipris.

Įvadas

Temos aktualumas. Tiltai sudaro transporto infrastruktūros pagrindą, užtikrindami judėjimo tęstinumą, ekonominį augimą ir kasdienį eismą. Vis dėlto, daugelis šių statinių, ypač pastatytų praėjusio amžiaus viduryje, susiduria su rimtais iššūkiais dėl senėjimo, didėjančių apkrovų ir aplinkos poveikio (Brühwiler, 2020; Ortiz et al., 2023). Remiantis naujausiais tyrimais, iki 60 proc. tiltų išsivysčiusiose šalyse viršijo numatytą tarnavimo laiką, o jų pažaidos – nuo mikroplyšių iki struktūrinių deformacijų – kelia grėsmę saugumui ir didina priežiūros išlaidas (Gao ir Fam, 2024). Šios problemos ypač aktualios šiandien, kai klimato kaita stiprina ekstremalius reiškinius, tokius kaip potvyniai ar žymūs temperatūrų svyravimai, o transporto srantai auga dėl urbanizacijos ir prekybos plėtros.

Mokslinės literatūros analizė apie pažaidas ir defektus parodė, kad pažaidos tiltų laikančiuosiuose elementuose dažniausiai kyla dėl kelių veiksnių sąveikos, tokių kaip mechaninio nuovargio nuo eismo cikliškumo, cheminės degradacijos (armatūros korozijos dėl chloridų ar karbonizacijos) ir dinaminių apkrovų, įskaitant seismines (Al-Qaralleh et al., 2020; Liu et al., 2024). Laiku neaptiktos net nedidelės pažaidos gali sukelti grandininę reakciją, sukeliančią avarijas (Shokrzadeh, Nateghi-Alahi, 2023). Tokia situacija ne tik kelia saugumo iššūkius, bet ir reikalauja žymių investicijų – JAV vien peržiūros ir remonto programos kainuoja milijardus dolerių kasmet, o uždaryti tiltai trikdo logistikos grandines (Ortiz et al., 2023). Atsižvelgiant į paminėtas priežastis, tiltų stiprinimas tampa prioritetu, siekiant prailginti jų tarnavimą ir sumažinti rekonstrukcijos išlaidas.

Tradicinių metodų (plieniniai apvalkalai, skerspjuvio didinimas ir pan.) panaudojimas turi apribojimų, pavyzdžiui, dėl elementų korozijos ir padidėjusio svorio, todėl vis daugiau dėmesio skiriama inovatyvioms medžiagoms ir technologijoms. NSM (Near-Surface Mounted) technologija panaudoja FRP (Fiber Reinforced Polymer) strypus įdedamus į išfrezuotus griovelius betono paviršiuje, užtikrindama stiprų sukibimą ir mažą atsluoksniavimo riziką, kas ypač efektyvu lenkimo ir šlyties sukeltų pažaidų taisymui (Abdallah et al., 2020).

FRP lamelės (EBR – externally bonded reinforcement) – tai klijuojami anglies ar stiklo pluošto laminatai, kurie greitai montuojami ir padidina lenkiamąją gebą iki 70 proc., tačiau būtinas kruopštus paviršiaus paruošimas (Tian et al., 2022).

Įtemptieji CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) sprendimai naudoja iš anksto įtemptas plokštes, sumažindamos deformacijas ir atkurdamos iki 90 proc. pradinės laikomosios gebos, idealiai tinka nuovargi patyrusioms konstrukcijoms (Deng et al., 2023). HPFRC/UHPFRC (High Performance Fiber Reinforced Concrete/ Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete) apvalkalai formuoja plonus, bet itin tvirtus sluoksnius aplink

pažeistas dalis, ribodami plyšių plitimą ir apsaugodami nuo aplinkos poveikio, prailgindami tarnavimą agresyviose sąlygose (Brühwiler, 2020; Reggia et al., 2020).

Hibridinės plieno ir FRP sistemos derina plastiškumą su korozijos atsparumu, gerindamos energijos sugėrimą seisminėse zonose (Liu et al., 2024). Šie metodai leidžia stiprinti konstrukcijas be didelių trikdžių eismui, prailgindami tarnavimo laiką iki 50 metų ir mažindami CO₂ emisijas per gyvavimo ciklą (Cadenazzi, Dotelli, 2019).

Straipsnyje nagrinėjamos temos aktualumą parodo ir konstrukcijų būklės stebėsenos sistemų plėtra, kuri pastaraisiais metais tampa neatsiejama tiltų naudojimo ir priežiūros dalimi. Lietuva taip pat stengiasi neatsilikti nuo naujausių tendencijų ir po truputį pradeda diegti konstrukcijų būklės stebėjimo sistemas (KBS, angl. SHM Structural health monitoring).

Naujausi tyrimai rodo, kad tradicinės periodinės apžiūros nėra pakankamos sudėtingų tiltų konstrukcijų būklei įvertinti, ypač esant ilgalaikėms apkrovoms ir nuovargio poveikiui (Elsisi et al., 2025). Šiuolaikinės KBS sistemos leidžia ne tik rinkti duomenis apie konstrukcijų elgseną, bet ir geriau interpretuoti matavimų duomenis taikant hibridinius analitinius metodus, taip didinant sprendimų patikimumą (Deshpande et al., 2025). Be to, pažangūs duomenų analizės metodai suteikia galimybę identifikuoti ankstyvuosius pažaidos požymius dar prieš jiems pasireiškiant vizualiai, kas yra ypač svarbu tiltų saugos ir ilgaamžiškumo užtikrinimui (Pakzad, Masoodi, 2025).

Darbo tikslas – išnagrinėti tiltų laikančiųjų konstrukcijų inovatyvių stiprinimo metodų panaudojimo galimybes ir privalumus bei jų pritaikymą Č. Radzinausko tilto (Kaune) laikančiųjų konstrukcijų stiprinimui.

Iškeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Atlikti literatūros analizę, nustatyti tiltų laikančiųjų konstrukcijų pažaidų priežastis, pažaidų tipus, stiprinimo metodus ir jų efektyvumą.
2. Įvertinti tilto defektus ir pažaidas bei techninę būklę.
3. Atlikti prietilčio sijinės perdangos stiprinimo konstrukcinius skaičiavimus.

Tyrimo objektas

Tiltas per Nemuną (žr. 1 pav.) yra Kauno miesto urbanizuotoje teritorijoje tarp Kulautuvos ir Marvelės gatvių. Pradėtas statyti 1980 m. Pirmoji tilto dalis (dešinioji) atidaryta 1995 m., antroji (kairioji) – 1997 m.



1 pav. Česlovo Radzinausko tiltas - schema, tyrimo ruožai ir vaizdas iš kairiojo kranto Marijampolės kryptis

Fig. 1. Česlovas Radzinauskas Bridge — structural scheme, investigated spans, and view from the left bank in the direction of Marijampolė.

Tyrimo apimtis ir kontroliuojamieji parametrai

Statinių konstrukcinių elementų kontroliuojamieji parametrai ir kontrolės metodai buvo priimti pagal Lietuvos Respublikos galiojančių norminių dokumentų reikalavimus. Kontroliuojamaisiais elementais buvo:

1. Planinė tilto konstrukcijos elementų padėtis.
- Tiriant tilto konstrukcijas buvo kontroliuojama:
1. ar nėra mechaninių pažaidų ir ar nepažeistas vientisumas;
 2. paviršinio betono sluoksnio defektai ir suirimai;
 3. plyšiai ir jų plotis;
 4. deformacijos;

5. korozija.

Tilto konstrukcijų būklei įvertinti naudoti šie metodai:

kameraliniai tyrimai pagal įvairius projektinius šaltinius, vizualinis metodas – apžiūrint tirtas konstrukcijas vietoje, konstrukcijų bei jų pažeistų elementų fotografavimas, neardantis metodas betono stipriui nustatyti, tiltų būklės vertinimo metodika pagal tiltų techninės priežiūros taisykles TTPT 24.

Tilto betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų betono gniuždomojo stiprio tyrimų metodika

Neardantieji stiprio gniuždant bandymai (žr. 2 pav.) atlikti pagal standartą LST EN 12504–2:2021 naudojant tampraus atšokimo principu veikiantis kompiuterinis prietaisas Silver Schmidt N gamyklinis Nr. SH01-006-1642.

Tilto konstrukcijų natūrinių tyrimų metodika

Vizualinė apžiūra vykdyta pagal tiltų techninės priežiūros taisykles TTPT 24 ir techninio reglamento TR 2.01:2019 rekomendacijas, fiksuojant pastebėtus defektus ir pažaidas.

Prietilčio sijinės perdangos stiprinimo konstrukcinių skaičiavimų metodika

Skaičiavimai atliekami su LaSoft 3.1.1 programa, ši programa yra skirta būtent FRP (anglies pluošto) sistemų skaičiavimui. Plokštės konstrukciniam stiprinimui apskaičiuoti 4 variantai:

1. Stiprinimas gelžbetonio papildomu sluoksniu;
2. FRP lamelėmis iš apačios;
3. FRP lamelėmis iš šonų;
4. FRP lamelėmis iš apačios ir šonų.

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

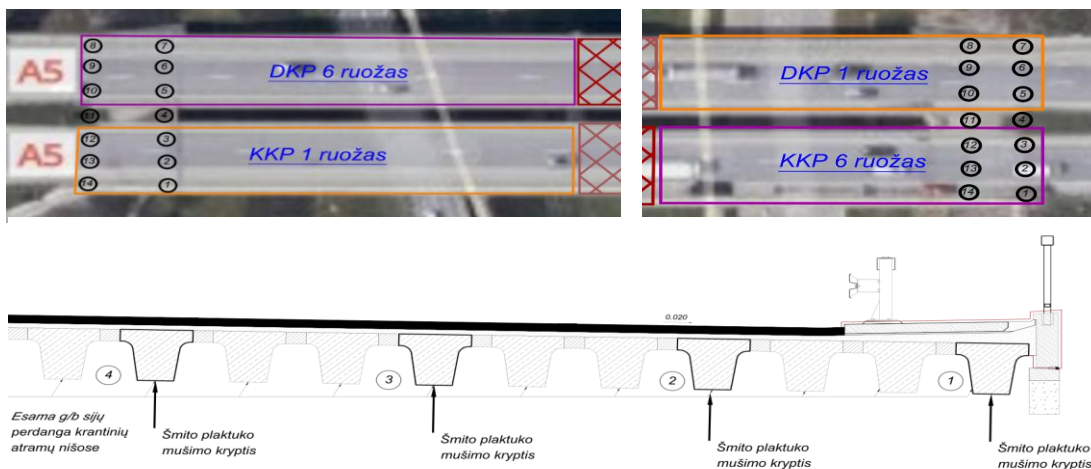
Prietilčio sijinės perdangos betono gniuždymo stiprio nustatymas neardančiuoju metodu, tyrimo vietos pavaizduotos 3 paveiksle.

Atliktas prietilčio sijinės perdangos betono gniuždymo stiprio tyrimas neardančiuoju metodu. Iš viso ištirti 28 taškai (žr. 3 pav.) – 14 kairiojo kranto prietilčio sijinės perdangos ruožuose KKP1 ir DKP6 ir 14 dešiniojo kranto ruožuose KKP6 ir DKP1.



2 pav. Neardantieji stiprio gniuždant bandymai

Fig. 2 Non-destructive compressive strength testing.

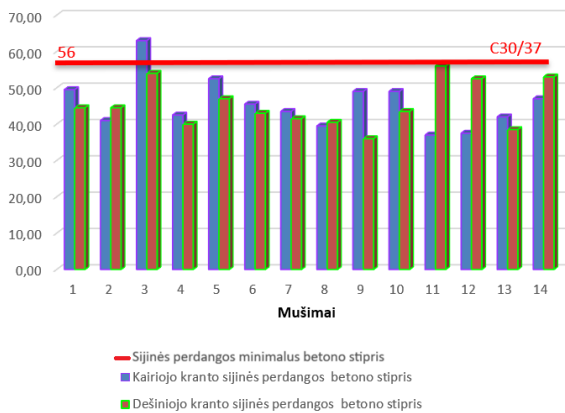


3 pav. Kairiojo ir dešiniojo kranto prietilčio sijinės perdangos betono gniuždomojo stiprio nustatymo neardančiuoju metodu, tyrimo vietos

Fig. 3 Non-destructive compressive strength testing locations of the left and right abutment beam deck concrete.

Gauti betono charakteristiniai gniuždymo stiprio tyrimų rezultatai (žr. 4 pav.) svyruoja gana plačiame diapazone – nuo 36 iki 63, o jų mediana siekia 44. Pagal betono gniuždymo stiprio klases rezultatai pasiskirstė taip: C8/10 – 6 taškai, C12/15 – 13 taškų, C16/20 – 3 taškai, C20/25 – 3 taškai, C25/30 – 3 taškai, C30/37 – 1 taškas, C40/50 – 1 taškas. Visos tirtos sijinės perdangos betono klasė – C12/15, tai parodo bendrą konstrukcijų būklę.

Sijinės perdangos betono stiprio nustatymo rezultatai



4 pav. Charakteristinio gniuždymo stiprio reikšmės skirtinguose taškuose
Fig. 4 Characteristic compressive strength values at different measurement points.

Kadangi dalies konstrukcijų neįmanoma apžiūrėti, nėra galimybės nustatyti tikrąsias būklės parametrų reikšmes.

Tilto konstrukcijų apžiūros metu dažniausiai pastebėtos pažaidos (žr. 5 pav.):



5 pav. 1) I tipo betono korozija, 2) armatūros apsauginio sluoksnio nutrupėjimas, 3) armatūros korozija, 4) kelio dangos pažaidos, 5) biokorozija, 6) siūlių plyšiai.

Fig. 5 1) Type I concrete corrosion, 2) spalling of reinforcement cover, 3) reinforcement corrosion, 4) road surface deterioration, 5) biodeterioration, 6) construction joint cracking.

Nenušienautose šlaituose ir betono plyšiuose kaupiasi humusas, kuris yra ideali terpė augalams. Dumbliai ir samanų gamina rūgštis, skatinančias I tipo koroziją. Mikroorganizmai veikia cementinį akmenį biologiškai aktyviomis medžiagomis. Savalaikis šlaitų ir atramų valymas puiki priemonė norint išvengti ar sumažinti biokorozijos neigiamus padarinius.

➤ Siūlių plyšiai – atsiranda dėl kelių vienu metu veikiančių veiksnių. Temperatūriniai deformaciniai poslinkiai ilgėja ir trumpėja veikiami temperatūros pokyčių. Betono traukimas džiūstant gali sukelti pradinius plyšius sandūrose. Galiausiai, nuolatinis transporto sukeltas vibracija silpnina sandūras ir plečia esamus plyšius.

➤ Kelio dangos pažaidos – nepakankamas dangos sluoksnio storis, senėjimas ir bituminio rišiklio kietėjimas ar rišiklio nusėdimas į gilesnius sluoksnius, virš plyšių arba silpnų betono vietų susiformuojantys refleksiniai plyšiai, bei vandens infiltracija po danga, sukelianti užšalimo/atšilimo ciklų žalą.

Visos pažaidų rūšys yra tarpusavyje susijusios ir viena kitą papildančios, tai tipiškas senėjančios gelžbetoninės infrastruktūros kompleksinis požymis, kurio pagrindas yra vandens skverbimasis ir nepakankama statinio techninė priežiūra per eksploatacijos laikotarpį.

Prietilčio sijinės perdangos stiprinimo konstrukciniai skaičiavimai

Prietilčio sijinės perdangos stiprinimo konstrukciniai skaičiavimai atlikti kompiuterine programa LASOFT 3.1, skirta anglies pluošto ir lamelių paskaičiavimui. Skaičiavimams buvo parinkti 4 stiprinimo variantai – 1) stiprinimas gelžbetonio papildomu sluoksniu, 2) FRP iš apačios, 3) FRP iš šonų, 4) FRP iš apačios ir šonų.

Programa skaičiuoja tik stačiakampės formos elementus, o esama prietilčio sijos skerspjūvis yra trapezinio profilio (žr. 3 pav.). Sijos skerspjūvio profilis buvo modifikuotas taip, kad atitiktų programos reikalavimus. Tyrimu metu buvo nustatyta charakteristinio gniuždymo stiprio (f_{ck}) mediana 44, kas atitinka C12/15 betono gniuždymo stiprio

4 paveiksle pavaizduota, kad betono stiprio gniuždamas reikšmės skirtinguose taškuose reikšmingai skiriasi, tai rodo skirtingą nusidėvėjimo laipsnį skirtinguose sijinės perdangos ruožuose. Net apie 68 proc. visų matavimų atitinka tik C8/10 – C12/15 gniuždomojo betono stiprio klases, kurios neatitinka minimalių reikalavimų tokio tipo statiniams (reikalinga ne žemesnė kaip C30/37). Atsižvelgiant į žemas betono stiprio klases, rekomenduojama atlikti išsamesnę perdangos laikomosios gebos konstrukcinę analizę, apsvaistyti sijinės perdangos stiprinimo priemones (pvz., FRP sistemas) ir nustatyti stebėsenos prioritetus silpniausiose vietose.

Tilto konstrukcijų natūriniai tyrimai

Tyrimo metu išaiškinti defektai ir pažaidos, nurodant jų rūšį ir dydį, su pririšimu prie statinio ir kiekybine charakteristika pateikiami defektų žiniaraščiuose ir atitinkamuose brėžiniuose. Būdingos pažaidos iliustruotos nuotraukomis.

➤ I tipo betono korozija – nepakankama arba pažeista hidroizoliacija ant perdangos plokštės, leidžianti atmosferos ir tirpstančiam vandeniui skverbti į betono struktūrą.

➤ Armatūros apsauginio sluoksnio nutrupėjimas – kyla dėl armatūros korozijos produktų tūrio padidėjimo. Taip pat daro įtaką karbonizacijai, chloridų skverbimuisi iš druskų.

➤ Armatūros korozija – pagrindinis veiksnys yra karbonizacija, chloridų skverbimasis per pažeistą dangą ir hidroizoliaciją, drėgmės ir deguonies nuolatinis patekimas per plyšius apsauginiame sluoksnyje.

➤ Biokorozija – augmenija įsikuria dėl nepakankamos techninės priežiūros.

klasę. Skaičiavimams ši klasė nėra tinkama, nes skaičiuojant betono įtempiai viršija leistinas ribas. Skaičiavimams buvo parinktas C30/37 klasės betonas. Armatūros naudingasis plotas priimtas $19,23\text{ cm}^2$, betono storis – 7 cm, papildomas armatūros plotas – $1,7\text{ cm}^2$. Rezultatai matomi 1 lentelėje.

1 lentelė. Stiprinimo papildomu g/b sluoksniu rezultai

Parametrai Parameters	Prieš Before	Po After	Pokytis Change
Ribinis lenkimo momentas (kNm) Ultimate bending moment (kNm)	323,09	407,68	83,78 (+25,9%)
Atsparumo lenkimui momentas (cm^3) Resistance bending moment (cm^3)	33 915,17	41 520,26	7 605 (+22,4%)

Iš 1 lentelės matoma, kad padidinus sijos skerspjūvio plotą ($297,5\text{ cm}^2$ arba 9,3 proc.), ribinis lenkimo momentas padidėjo 83,78 kNm arba 25,9 proc., o atsparumas lenkimo momentui padidėjo $7\,605\text{ cm}^3$ arba +22,4 proc.

Skaičiavimai apima prietilčio šijinės perdangos sustiprinimą FRP lamelėmis (MC-DUR 160/2400). Visi trys variantai tenkina skaičiavimų reikalavimus, tačiau labai skiriasi savo efektyvumu ir praktiniu pritaikymu.

Skaičiuojant 1 variantą (lamelės apačioje) pagal gautus rezultatus galima spręsti, kad šis variantas yra aiškiai geriausias pasirinkimas. Kadangi reikia tik 4 lamelių, montavimas paprastas, įtempiai medžiagose vidutiniai. Tai ekonomiškiausias ir technologiškai paprasčiausias sprendimas.

Variantas 2 (lamelės šonuose) yra mažiausiai rekomenduotinas, kadangi reikia net 10 lamelių (po 5 iš kiekvienos pusės), montavimas sudėtingas, o plieno įtempiai pasiekia 87,6 proc. leistinos ribos – mažiausias rezervas iš visų trijų variantų. Vienintelis pranašumas būtų tuo atveju, jeigu prie sijos apačios fiziškai neįmanoma prieiti.

Variantas 3 (lamelės šonuose ir apačioje) kombinuotas, yra kompromisinis sprendimas tarp pirmų dviejų. Naudota 4 lamelės apačioje ir po 1 iš kiekvieno šono, iš viso – 6 lamelės. Įtempiai medžiagose mažiausi iš visų variantų, tai reiškia, kad turi didžiausią saugos rezervą, tačiau montavimas sudėtingesnis nei pirmojo varianto.

Išvados

1. Česlovo Radzinausko tilto natūrinių tyrimų metu nustatytos šios pagrindinės pažaidos: I tipo betono korozija, armatūros apsauginio sluoksnio nutrupėjimas, armatūros korozija, biokorozija, siūlių plyšiai ir kelio dangos pažaidos. Visos pažaidų rūšys yra tarpusavyje susijusios ir būdingos senėjančiai gelžbetoninei infrastruktūrai – jų pagrindas yra vandens skverbimasis ir nepakankama techninė priežiūra.

2. Neardančiojo metodo tyrimai parodė, kad betono gniuždymo stiprio mediana siekia tik 44 (C12/15 klasė), o apie 68 proc. matavimų neatitinka minimalių reikalavimų tokio tipo statiniams (C30/37), kas kelia susirūpinimą dėl laikomosios gebos.

3. Skaičiavimai parodė, kad visi 3 FRP lamelių variantai tenkina skaičiavimų reikalavimus. Optimalus sprendimas – lamelių montavimas iš apačios, pakanka tik 4 lamelių, montavimas paprastas. Stiprinimas gelžbetonio papildomu sluoksniu taip pat yra efektyvus – ribinis lenkimo momentas padidėjo 25,9 proc., tačiau šio metodo minusai, tai didesnis nuosavas svoris ir apimtis. Lamelių montavimas iš šonų rekomenduotinas mažiausiai dėl sudėtingo montavimo ir mažiausio saugos rezervo.

Literatūra

1. Abdallah, M., Al Mahmoud, F., Boissiere, R., Khelil, A., & Mercier, J. (2020). Experimental study on strengthening of RC beams with Side Near Surface Mounted technique-CFRP bars. *Composite Structures*, 234, 111716.

2. Al-Qaralleh, M., Toutanji, H., & Eljufout, T. (2020). Overloading impact on the flexural behavior of RC beams strengthened with FRP composites under fatigue: Experimental study. *Engineering Structures*, 220, 111045.

3. Brühwiler, E. (2020). UHPFRC technology to enhance the performance of existing concrete bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(1), 94-105.

4. Cadenazzi, T., & Dotelli, G. (2019). Life-cycle cost and life-cycle assessment analysis at the design stage of a fiber-reinforced polymer-reinforced concrete bridge in Florida. *Journal of Engineering and Materials Technology*, 8(2), 128–140.

5. Deng, Y., Ling, D., Guo, Z., Sukontasukkul, P., & Yuen, T. Y. P. (2023). Strain driven mode-switching analytical framework for estimating flexural strength of RC box girders strengthened by prestressed CFRP plates with experimental validation. *Engineering Structures*, 287, 117017.

6. Deshpande, G. A., Wandile Kimmatkar, N., Sonawane, P., Paithane, S., Shinde, V. D., & Avthankar, A. (2025). Innovative structural health monitoring using a hybrid intelligence framework. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 34(17), e70100. <https://doi.org/10.1002/tal.70100>
7. Elsis, A., Zamrawi, A., Emad, S. (2025). A comprehensive review of structural health monitoring for steel bridges: Technologies, data analytics, and future directions. *Applied Sciences*, 15(22), Article 12090. <https://doi.org/10.3390/app152212090>
8. Gao, C., & Fam, A. (2024). Fatigue behavior of reinforced concrete bridge decks under moving wheel loads: a state-of-the-art review. *Journal of Bridge Engineering*, 29(11), 03124003.
9. Liu, J., Gao, S., Wang, H., & Du, J. (2024). Seismic behavior of concrete columns reinforced with BFRP, GFRP, steel, and hybrid steel-FRP reinforcement. *Journal of Composites for Construction*, 28(6), 04024068.
10. LST EN 12504–2:2021 „Betono bandymas konstrukcijose. 2 dalis. Neardomieji bandymai. Atšokimo rodiklio nustatymas“.
11. Ortiz, J. D., Khedmatgozar Dolati, S. S., Malla, P., & Nanni, A. (2023). FRP-reinforced/strengthened concrete: State-of-the-art review on durability and mechanical effects. *Materials*, 16(5), 1990.
12. Pakzad, S. S., ir Masoodi, A. R. (2025). Early damage detection in bridges using a variational autoencoder-based hybrid unsupervised learning framework. *Scientific Reports*, 16, Article 1389. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-31115-w>
13. Reggia, A., Morbi, A., & Plizzari, G. A. (2020). Experimental study of a reinforced concrete bridge pier strengthened with HPFRC jacketing. *Engineering Structures*, 208, 110312.
14. Shokrzadeh, M. R., & Nateghi-Alahi, F. (2023). Evaluation of hybrid NSM-CFRP technical bars and FRP sheets for seismic rehabilitation of a concrete bridge pier. *Bridge Structures*, 19(1), 17–28.
15. Tian, S., Zhang, X., & Hu, W. (2022). Fatigue Analysis of CFRP-Reinforced Concrete Ribbed Girder Bridge Deck Slabs. *Polymers*, 14(18), 3814.
16. Via Lietuva. (2024). *Tiltų techninės priežiūros taisyklės TTPT 24*. https://vialietuva.lt/wp-content/uploads/2024/12/Tiltu_tehnines_prieziuros_taisykles_TTPT_24.pdf.
17. Lietuvos Respublikos susisiekimo ministerija. (2019). *Techninis reglamentas TR 2.01:2019 „Automobilių kelių ir geležinkelio tiltų ir tunelių projektavimas“*. <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/4465611288df11e98a8298567570d639>.

INNOVATIVE METHODS AND MATERIALS FOR STRENGTHENING LOAD BEARING STRUCTURES IN THE BRIDGES

Abstract

This study investigates innovative strengthening methods and materials for load-bearing bridge structures, aimed at enhancing the service life and structural safety of in-service bridges. The primary causes of bridge deterioration and defect formation are examined, including mechanical fatigue induced by cyclic traffic loading, reinforcement corrosion, environmental degradation, and escalating operational loads. A comprehensive review of contemporary strengthening solutions is presented, encompassing Near-Surface Mounted (NSM) and Fiber Reinforced Polymer (FRP) systems, prestressed Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) technologies, High Performance and Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (HPFRC/UHPFRC) jacketing, as well as hybrid steel-FRP composite systems — evaluated in terms of their structural efficiency, practical applicability, and long-term sustainability. Furthermore, the significance of Structural Health Monitoring (SHM) systems in facilitating early-stage damage detection is addressed. The analytical framework is applied to the load-bearing structures of the Česlovas Radzinauskas Bridge in Kaunas, where the most frequently identified deterioration phenomena include type I concrete corrosion, spalling of reinforcement cover, active reinforcement corrosion, biodeterioration, construction joint cracking, and related deficiencies. A comparative analysis of structural strengthening design calculations is conducted, providing a basis for the evaluation and selection of optimal rehabilitation strategies.

Keywords: bridge strengthening, bridge maintenance, corrosion, characteristic compressive strength.