

CENTRIFUGAVIMO ĮTAKA GELŽBETONIO ILGAAMŽIŠKUMUI

Linās VENCKUS, Vytauto Didžiojo universitetas, Žemės ūkio akademija, Inžinerijos fakultetas,
el. paštas: linas.venckus@stud.vdu.lt

Santrauka

Statinio konstrukcijos ilgaamžiškumas – konstrukcijos gebėjimas tam tikrą laiką tarpą priešintis nuolatiniais, kintamais ir ypatingiems poveikiams iki tam tikros būsenos, atitinkančios esminius statinio reikalavimus.

Gelžbetoninių konstrukcijų ilgaamžiškumą labiausiai lemia konstrukcijos armatūros korozija, kuriai įtakos turi plyšiai apsauginio betono sluoksnyje.

Centrifuguoto gelžbetonio gaminių gamybos technologija yra specifinė, dėl to susidaro išskirtinė betono struktūra, tekstūra, didesnis betono struktūrinis tankis ir mažesnis likutinio vandens ir cemento santykis (V/C), palyginti su įprastu vibruotu betonu. Centrifuguoto gelžbetonio gaminiai pasižymi didesniu homogeniškumu ir statistiškai lėtesniu betono paviršiaus gniuždomojo stiprio mažėjimo tempu. Tai lemia aukštesnį atsparumą aplinkos poveikiui, gaminių patikimumą ir ilgaamžiškumą, lyginant su vibruoto gelžbetonio gaminiais.

Straipsnyje analizuojama centrifuguoto gelžbetonio parametrų kaita 3–52 m. eksploatacijos laikotarpiu.

Reikšminiai žodžiai: centrifuguotas gelžbetonis, ilgaamžiškumas, defektai, pažaidos.

Įvadas

Gelžbetonis yra viena universaliausių ir patvariausių statybinių medžiagų. Gelžbetonio ilgaamžiškumui įtakos turi daugybė veiksnių: betono komponentų kokybė (cementas, vanduo ir užpildai), likutinis vandens ir cemento santykis (V/C), betono sutankinimo laipsnis, betono kietėjimo sąlygos, bakterinė korozija, įvairių cheminių medžiagų poveikis (chloridų, sulfatų, rūgščių, šarminių užpildų reakcijos), kalcio išplovimas, užšalimas ir atšilimas, karbonizacija, dinaminės apkrovos, armuojančio plieno korozija ir kt. (Kliukas, 2020). Gelžbetonio gaminių degradacija prasideda nuo mikroskopinių pažeidimų, kurie išsivysto į didesnius defektus, tokius kaip įtrūkimai, atsisluoksniavimas, skilimas ir aižėjimas (Vektaris, Vilkas, 2006). Eksploatacijoje dėl ilgalaikių išorinių poveikių gelžbetonis praranda vientisumą, mechanines ir estetines savybes, netenka konstrukcijos projektavimo metu užduotų parametrų.

Gelžbetoninių konstrukcijų patikimumo ir ilgaamžiškumo reikalavimams užtikrinti numatomi tokie pradiniai projektavimo rodikliai, kad per visą projektinę eksploataavimo trukmę, esant pačioms pavojingiausiomis sąlygoms, konstrukcijos atitiktų saugaus, patikimo ir tinkamo naudojimo reikalavimus.

T. C. Powers ir T. L. Browbyard buvo pirmieji mokslininkai, kurie tyrė betono atsparumą šaldymo ir atšildymo ciklams. Jie įrodė, kad betono ilgaamžiškumas priklauso nuo betono struktūros, stiprumo, porų dydžio ir tarpusavio tarpų (Powers, Brownyard, 1947).

Centrifugavimo gamybos būdo išskirtinumas, kad tam tikru greičiu sukantis kojiniui (formai) su jame tolygiai paskirstytu plastišku betono mišiniu, susidaro išcentrinis slėgis. Todėl sumažėja atstumai tarp užpildo ir kitų kietųjų dalelių, o silpnai surištas perteklinis vanduo su jame esančiomis dispersinėmis frakcijomis išstumiamas iš sutankinto betono mišinio. Betono mišinys sutankėja ir išlaiko jam suteiktą formą.

Patalpinus plastišką betono mišinį į besisukančią formą, veikiant išcentriniai jėgai (slėgiui), jis pradeda deformuotis: sklisti į visas puses. Tai vyksta iki nusistovi pusiausvyra tarp slėgio sukeliančio mišinio sklidimą ir vidinio cemento tešlos pasipriešinimo gniuždymui. Didėjant formos sukimosi greičiui išcentrinė jėga išstumia vandenį iš cemento tešlos, betono mišinys tankėja tol, kol pasiekiamas maksimalus mechaninis sutankinimas.

Dėl savo reologinių savybių cemento tešlos geba priešintis gniuždymui didėja mažėjant joje laisvojo vandens.

Centrifugavimo jėgos sukeliamas spaudžiamasis slėgis gaminio sienelės storyje pasiskirsto netolygiai: vidinėje dalyje mažesnis slėgis, išorinėje dalyje didesnis (maksimalus) slėgis.

Betono mišinio tankinimo centrifugavimo būdu metu vyksta vandens ir cemento santykio (V/C) pokytis, o kartu su juo ir betono poringumo pokytis gaminio sienelės storyje. Šlapiame betono mišinyje cemento skiedinys yra suspausta medžiaga, o slėgio persiskirstymas joje priklauso nuo pasipriešinimo, kurį išstumiamas vanduo pasiekia judėdamas per vandens filtravimo kanalų kliūtis centrifuguojamame betone. Todėl betono sutankinimui veikiant slėgiui reikia laiko. Cemento skiedinį veikiant išcentrinio slėgiu, jis perduodamas vandeniui tarp betono mišinio dalelių, todėl sistemoje didėja hidrostatinis slėgis. Prasideda vandens filtracija, tankėja cemento tešla, didėja cemento tešlos pasipriešinimas gniuždymui. Tam tikru momentu nusistovi pusiausvyra, kuriai būdingas filtracijos proceso nutrūkimas. Nuo šios akimirkos spaudžiamasis slėgis visiškai perduodamas cemento grūdeliams, o tolesniam jų suartėjimui trukdo vandens plėvelė.

Tyrimo tikslas – nustatyti centrifuguoto gelžbetonio konstrukcijų degradacijos dėsninumus, analizuojant betono gniuždomojo stiprio ir būklės pokyčius ilgalaikės eksploatacijos laikotarpiu, siekiant įvertinti konstrukcijų patikimumą ir likutinį ilgaamžiškumą.



Šaltinis: autorius (2025)
Source: author (2025)

1 pav. Centrifuguotos atramos pjūvis, eksploatacija 32 metai
Fig. 1. Centrifuged support cross-section, service life: 32 years

Iškeltam tikslui pasiekti sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Nustatyti ir įvertinti skirtingų eksploatacijos laikotarpių centrifuguotų gelžbetonio konstrukcijos būklės ir betono gniuždomojo stiprio pokyčius.
2. Atlikti analogiškais sąlygomis eksploatuojamų vibruto gelžbetonio konstrukcijų būklės betono gniuždomojo stiprio vertinimą, identifikuojant būdingus defektus.
3. Atlikti lyginamąją centrifuguoto gelžbetonio ir vibruto gelžbetonio konstrukcijų būklių pokyčių analizę ilgalaikėje eksploatacijoje.

Tyrimų objektas ir metodai

Lietuvos elektros perdavimo ir skirstymo linijose yra daugiau kaip 2,3 mln. įvairaus amžiaus ir paskirties centrifuguoto gelžbetoninių atramų (Vadlūga, Kliukas, 2000). Elektros perdavimo tinkle 2021 m. buvo eksploatuojama 20 610 centrifuguoto gelžbetonio atramų. Centrifuguoto gelžbetonio atramos elektros perdavimo ir skirstymo tinkluose naudojamos dėl pakankamo jų efektyvumo, patikimumo, ilgaamžiškumo ir ekonomiškumo lyginant su plieninėmis gardelinėmis atramomis.

Pagrindinis statinio konstrukcijos patikimumo parametras yra stiprumas, kurio vertinimui naudojami du principai. Pagal pirmąjį principą konstrukcijos stiprumo kriterijus yra ribinis įtempimas, pagal antrąjį – ribinė apkrova.

Elektros linijų atramų esminis stiprumo kriterijus yra atramos atsparumas lenkimui. Svarbiausi gelžbetoninės atramos ilgaamžiškumo parametrai: armatūros gebėjimas atlaikyti projektinius tempimus ir betono atsparumas gniuždymui. Gelžbetoninės atramos armatūros projektinių parametru mažėjimui lemiamą reikšmę turi armatūros korozija. Pagrindinė apsaugos priemonė nuo gelžbetonio armatūros korozijos yra betoninis apsauginis sluoksnis, kuris tuo pat metu priima ir atramoje esančias gniuždymo apkrovas.

Nustatyti eksploatuojamų centrifuguoto gelžbetonio atramų būklei buvo atlikta 28 vnt. centrifuguoto gelžbetonio atramų apžiūra, vertinant betono paviršiaus pleištumą, ir atramų betono gniuždomojo stiprio nustatymas. Centrifuguoto gelžbetonio betono tankinimo technologijos ilgaamžiškumo parametru palyginimui su vibruto gelžbetonio betono tankinimo technologija, buvo atlikta analogiška 26 vnt. vibruto gelžbetonio atramų apžiūra. Atramų eksploatacijos oro linijose laikotarpis nuo 3 iki 52 m.

Centrifuguotų gelžbetonio atramų ilgalaikės eksploatacijos pokyčių tyrimo objektais pasirinktos elektros perdavimo tinklo Lietuvos Elektrinė–Neris (LN331) ir Kretinga–Benaičių VE oro linijų centrifuguoto gelžbetonio atramos. Oro linijų atramoms panaudoti gamykliniai SK26.1-1.1 tipo centrifuguoto gelžbetonio stiebai suprojektuoti pagal SNiP 2.03.01-84 nuostatas ir pagaminti pagal GOST 22687.1-85 standartą, kuris numato atramų gamybai naudoti C40/50; F200; W8 betoną. Gaminio eksploatavimas projektuotas X0, XC4, XD3, XF4 (LST EN 206-1) aplinkos sąlygomis.

Vibruto gelžbetonio atramų ilgalaikės eksploatacijos pokyčių tyrimo objektais pasirinktos elektros skirstomojo tinklo Vilniaus raj. Dūkštelių k. 0,4 kV įtampos oro linijos vibruto gelžbetonio atramos. Oro linijų atramoms panaudoti gamykliniai S110-34,3 tipo vibruto gelžbetonio stiebai, kurių gamybai naudojamas C35/45, F100, S2, 16 betonas, kur C35/45 betono gniuždomasis stipris po 28 parų kietėjimo, F100 betono, veikiamo šaldymo ir (arba) šildymo ciklų markė, S2 betono mišinio slankumas (nuosėdis 50-90 mm), 16 maksimali užpildo frakcija, mm.

Lauko sąlygomis eksploatuojamų gelžbetonio atramų betono stiprumas tirtas sklerometru INNOVATEST TC-500. Naudojamas atšokimo rodiklio metodo principas. Spyruoklės varoma masė smogia stūmokliui, liečiančiam bandomosios konstrukcijos arba bandinio paviršių. Bandymo rezultatas išreiškiamas skaičiumi, atsižvelgiant į masės atšokimo atstumą. Remiantis parodymais pagal graduotas prietaiso koreliacines kreives orientaciniai nustatomas betono gniuždomasis stipris ir betono klasė. Nėra vienintelio ryšio tarp betono kietumo ir stiprumo, tačiau eksperimentiniu būdu

galima nustatyti ryšį konkrečiam betonui. Ryšys priklauso nuo veiksnių, turinčių įtakos betono paviršiui, pvz. prisotinimo laipsnio ir karbonizacijos (Neville, Brooks, 2010).

Darbo pradžioje buvo analizuojama literatūra, susijusi centrifuguoto gelžbetonio gaminių gamybos ypatumais, gaminių savybėmis, veiksniais, lemiančiais centrifuguoto gelžbetonio atramų patikimumą ir ilgaamžiškumą.

Lauko apžiūros metu buvo atliktas vizualinis ir instrumentinis centrifuguoto gelžbetonio ir vibruoto gelžbetonio atramų būklės vertinimas:

1. betono gniuždomojo stiprio (betono kietumo) nustatymas neardančiaisiais metodais, naudojant sklerometrą – Šmito plaktuką;
2. atramų pleišetumo tyrimas, ruletės ir plyšių pločio matavimo kortelės NeoStrain pagalba matuojant atramų betono plyšius, nustatant jų geometrinius parametrus (plotį, ilgį) ir charakterį (skersiniai/išilginiai);
3. armatūros apsauginio betono sluoksnio pažeidimų akustinis tyrimas, naudojant mažasvorį statybinį plaktuką pagal smūgio garsą nustatyti vietas, kur apsauginis betono sluoksnis atitrūkęs nuo armatūros.

Betono stiprumo nustatymas atliktas pagal LST EN 12504-2 standarto „Betono bandymas konstrukcijose. 2 dalis. Neardomieji bandymai. Atšokimo rodiklio nustatymas“ metodiką.

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Lietuvos Elektrinė–Neris (LN331) perdavimo tinklo 330 kV oro linijoje atlikta 14 vnt. centrifuguoto gelžbetonio atramų, eksploatuotų 52 m. ir 6 vnt. centrifuguoto gelžbetonio atramų, eksploatuotų 10 m. apžiūra ir betono stiprumo tyrimai. Apžiūros metu faktiškai visose minėtose atramose nustatyti išilginiai plyšiai iki 0,02 mm pločio (užakę nuo I-ojo tipo korozijos), 4 atramose didžiausio lenkimo momento dalyse, 0,2–0,8 m nuo žemės paviršiaus, nustatyti ~ 0,7–0,8 m ilgio ~ 0,02–0,04 mm pločio išilginiai plyšiai. Skersinių plyšių nenustatyta. Centrifugavimo siūlių pažeidimų nenustatyta. Atliekant akustinius tyrimus (pagal smūgio garsą), armatūros apsauginio betono sluoksnio pažeidimų nenustatyta. Atramų betono gniuždomojo stiprio tyrimų duomenys susisteminti pagal atramų eksploatacijos trukmės grupes, nevertinant 2 aukščiausių ir 2 žemiausių rezultatų. Nustatytas vidutinis 52 m. eksploatuojamų centrifuguoto gelžbetonio atramų betono gniuždomasis stipris 37,45 MPa, 10 m. eksploatuojamų centrifuguoto gelžbetonio atramų – 41,25 MPa.



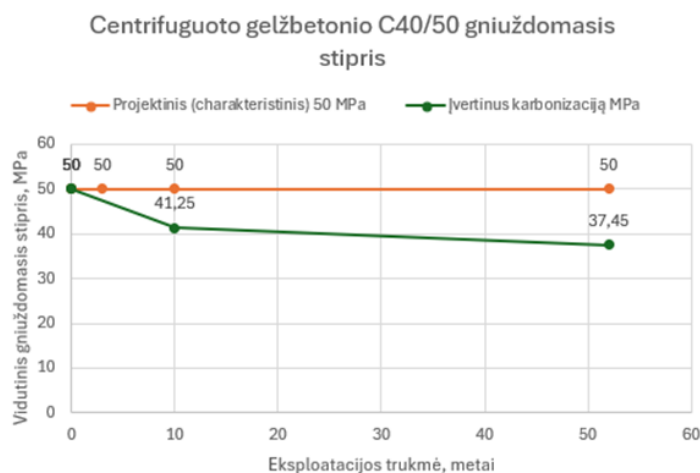
2 pav. Centrifuguoto gelžbetonio atrama, Lietuvos Elektrinė – Neris (LN331), 52 metai

Fig. 2. Centrifuged reinforced concrete support, Lithuanian Power Plant – Neris (LN331), service life: 52

Kretinga–Benaičių VE perdavimo tinklo 110 kV oro linijoje atlikta 8 vnt. centrifuguoto gelžbetonio atramų, eksploatuotų 3 m., apžiūra ir betono stiprumo tyrimai. Apžiūros metu faktiškai visuose minėtose atramose nustatyti išilginiai plyšiai iki 0,02 mm pločio (užakę). Skersinių plyšių nenustatyta. Centrifugavimo siūlių pažeidimų nenustatyta. Atliekant akustinius tyrimus (pagal smūgio garsą), armatūros apsauginio betono sluoksnio pažeidimų nenustatyta. Atramų betono gniuždomojo stiprio tyrimų duomenys susisteminti pagal atramų eksploatacijos trukmės grupes, nevertinant 2 aukščiausių ir 2 žemiausių rezultatų. Nustatytas vidutinis 3 m. eksploatuojamų centrifuguoto gelžbetonio atramų betono gniuždomasis stipris 58,8 MPa.

Vilniaus raj. Dūkštelių k. 0,4 kV skirstomojo tinklo oro linijoje atlikta 16 vnt. vibruoto gelžbetonio atramų, eksploatuotų 50 m., ir 10 vnt. vibruoto gelžbetonio atramų, eksploatuotų 21 m., apžiūra ir betono stiprumo tyrimai. Apžiūros metu 21 m. eksploatuotose atramose nustatyta viršutinio betono sluoksnio erozija, veikiant aplinkos veiksniams nuo betono paviršiaus nuplautas cemento pienelis, išryškėjęs betono stambusis užpildas, prasidėjusi betono karbonizacija, atramos betono paviršiuje matoma korozijos paveikta rišamoji armatūra, kampuose nedideli betono nutrupėjimai. 50 m. eksploatuotose atramose 1/4 atvejų nustatyta pažengusi gelžbetonio korozijos degradacija, kelianti grėsmę konstrukcijos laikomajai galiai: apsauginio betono paviršiaus atsisluoksniavimas, betono stambiojo užpildo visiškas apnuoginimas, atvira darbinė armatūra paveikta. 0,4 kV vibruoto gelžbetonio atramų betono gniuždomojo stiprio tyrimų duomenys susisteminti pagal atramų eksploatacijos trukmės grupes, nevertinant 2 aukščiausių ir 2 žemiausių rezultatų. Nustatytas

vidutinis 50 m. eksploatuojamų vibruoto gelžbetonio atramų betono gniuždomasis stipris 31,38 MPa, 21 m. eksploatuojamų vibruoto gelžbetonio atramų – 38,03 MPa.



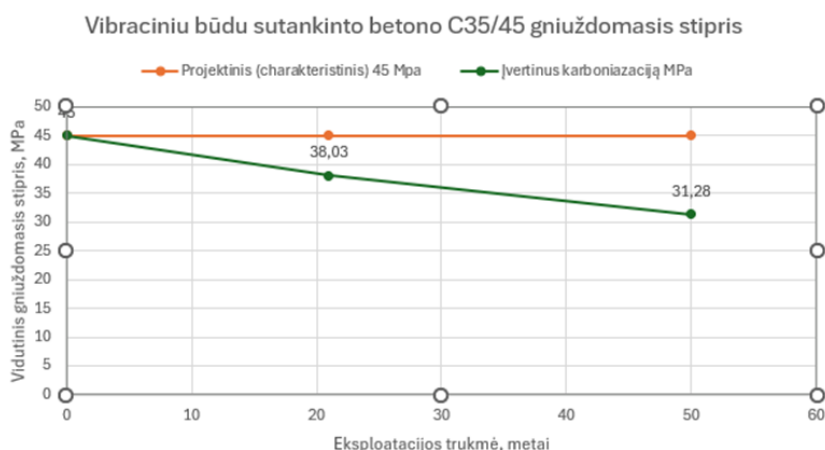
3 pav. Centrifuguoto gelžbetonio atramų betono gniuždomasis stipris

Fig. 3. Compressive strength of concrete in centrifuged reinforced concrete supports.



4 pav. Vibruoto gelžbetonio atrama, 50 metų.

Fig. 4. Vibrated reinforced concrete support, service life: 50



5 pav. Vibruoto gelžbetonio atramų betono gniuždomasis stipris

Fig. 5. Compressive strength of concrete in vibrated reinforced concrete supports.

Apibendrinant galima teigti, kad centrifuguoto gelžbetonio gaminiai ilgalaikio eksploatavimo perspektyvoje yra labiau atsparūs aplinkos poveikiui, lyginant su vibruoto gelžbetonio gaminiais, todėl centrifuguoto gelžbetonio gaminiai yra tinkamesni ilgaamžiams inžineriniams statiniams.

Išvados

1. Centrifugavimo technologijos metu sukuriamas išcentrinis slėgis efektyviai sumažina vandens ir cemento santykį (V/C) bei suformuoja itin tankią betono struktūrą gaminio išoriniame sluoksnyje. Tai sukuria geresnių kokybinių rodiklių apsauginį barjerą, kuris efektyviau nei vibraciniu būdu sutankintas betonas užtikrina gaminio armatūros apsaugą.
2. Centrifugavimo technologijos naudojimas ilgalaikėje perspektyvoje rodo lėtesnį betono gniuždomojo stiprio praradimo tempą, kadangi gaminio išorinis betono sluoksnis yra itin tankus ir veikia kaip apsauginis šarvas, saugantis armatūrą.
3. Centrifuguoto gelžbetonio atramos vyrauja tik mikro plyšiai (iki 0,02 mm), kurie savaime užanka ir neleidžia vystytis betono karbonizacijai. Apsauginio betono sluoksnio atšokimų nuo armatūros nenustatyta, kas patvirtina aukštą atsparumą karbonizacijai.
4. Nustatyta, kad centrifuguoto gelžbetonio gaminių konstrukcijos pasižymi itin lėtu mechaninių savybių praradimo tempu: po 50 m. eksploatavimo betono savybės išlieka artimos projektinėms.
5. Vibruoto gelžbetonio konstrukcijose dėl gamybos metu naudojamo didesnio V/C santykio, lyginant su centrifuguoto gelžbetonio konstrukcijomis, vyksta gilesnė betono karbonizacija, spartesnis apsauginio betono sluoksnio atsisluoksniavimas, armatūros korozija, todėl mažėja konstrukcijų ilgaamžiškumas.

Literatūra

1. Kliukas, R., Jaras, A., & Lukoševičienė, O. (2020). The reinforced spun concrete poles under physical salt attack and temperature: a case study of the effectiveness of chemical admixtures. *Materials*, 13(22), 5111.
2. Neville A.M., Brooks J.J., (2010). *Concrete technology* (2nd ed.). Pearson Education.
3. Powers, T. C., & Brownyard, T. L. (1947, February). Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. In *Journal Proceedings* (Vol. 43, No. 9, pp. 669-712).
4. Vadlūga R., Kliukas R. (2000). Elektros tinklo laikančiųjų gelžbetoninių konstrukcijų patikimumo ir ilgaamžiškumo problemos. *Statyba*, 6:3, 162-168.
5. Vadlūga R., Kliukas R., Garalevičius R. (1996). Centrifuguotojo betono stiprumo ir deformatyvumo vertinimas. *Statyba*, 4(8), 73-83.
6. Vektaris B., Vilkas V., (2006). *Betono tvarumas*. Monografija. Kaunas: Technologija, 163 p.
7. Walter H. Dilger, Amin Ghali, S. V. Krishna Mohan Rao (1996). Improving the Durability and Performance of Spun-Cast Concrete Poles. *PCI Journal*, 41(2), 68-90.

THE IMPACT OF CENTRIFUGATION ON THE DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE

Abstract

The durability of reinforced concrete structures is a critical factor in ensuring the safety and reliability of infrastructure, primarily determined by its resistance to reinforcement corrosion and environmental degradation. This article investigates the impact of the centrifugation manufacturing process on the long-term performance of concrete poles in Lithuania's electrical grid. The research employs a comparative analysis of spun-cast (centrifuged) and vibrated concrete structures with service lives ranging from 3 to 52 years. Research methods include visual inspection, crack width measurement, and non-destructive testing of compressive strength using the Schmidt hammer (rebound index) according to LST EN 12504-2. The results indicate that the centrifugation process creates a high-density concrete matrix with a lower water-to-cement (W/C) ratio, particularly in the outer protective layer. Findings show that centrifuged poles exhibit significantly higher durability, maintaining an average compressive strength of 37,45 MPa after 52 years, compared to 31,38 MPa for vibrated concrete after 50 years. Furthermore, centrifuged structures showed high resistance to carbonation and only minor longitudinal micro-cracks (<0.02 mm), whereas vibrated structures displayed advanced degradation and reinforcement exposure. The study concludes that the unique structural density achieved through centrifugation ensures superior reliability and a residual service life exceeding standard design projections.

Keywords: centrifuged concrete, durability, spun-cast poles.