

GELEŽINKELIO POBALASTINIO SLUOKSNIO IŠ UŽPILDŲ MIŠINIO SAVYBIŲ TYRIMAS

Deividas NAVIKAS¹, Henrikas SIVILEVIČIUS²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva
El. paštas: ¹deividas.navikas@vgtu.lt; ²henrikas.sivilevicius@vgtu.lt

Santrauka. Geležinkelio pobalastinis sluoksnis yra jungiamasis sluoksnis tarp balasto ir grunto sluoksnių. Šis sluoksnis turi užtikrinti tolygų apkrovos perdavimą į sankasą, nudrenuoti paviršinį vandenį, neleisti maišytis sluoksnių medžiagoms. Šių savybių užtikrinimas leidžia prailginti visos kelio konstrukcijos eksploataciją ir geometrinių kelio parametrų išlaikymą. Šiame straipsnyje yra analizuojamos užpildų mišinio, naudojamo geležinkelio pobalastiniame sluoksnyje, iš didelės imties ($n = 49$) gautos savybės: granulimetrinės sudėties, pralaidumo vandeniui ir tankio statistiniai parametrai. Pateikta granulimetrinės sudėties regresijos lygtis, rodanti sąsają tarp pilnutinių išbirų per sietus vidurkių ir standartinių nuokrypių. Jos determinacijos koeficientas $R^2 = 0.909$. Apskaičiuoti reprezentatyvūs minimalūs bandinių skaičiai šioms trims savybėms tirti. Gauta, kad pralaidumo vandeniui savybė yra labiausiai nevienoda dėl laboratorinių tyrimų metodikos paklaidų, variacijos koeficientas (88,3 %).

Reikšminiai žodžiai: geležinkelio pobalastinis mišinys, granulimetrinė sudėtis, vandens pralaidumas, mišinio tankis, bandinių skaičius.

Įvadas

Pobalastinis sluoksnis tarp balasto ir sankasos sluoksnių atskiria juos vienas nuo kito ir saugo sankasą nuo kritulių vandens. Jam rengti naudojamos žvyro ir (ar) gerai išrūšiuoto smėlio medžiagos. Pobalasto sluoksnis turi vienodai paskirstyti įtempius, perduodamus į sankasą, juos mažinti didindamas pasiskirstymo plotą. Jis privalo drenuoti lietaus ir požeminį vandenį, veikti kaip skiriamasis sluoksnis tarp balasto ir sankasos, neleisti medžiagos dalelėms iš žemesnių sluoksnių migruoti į viršų. Taip pat jis privalo būti toks, kad balastiniame sluoksnyje esantis vanduo nenutekėtų į sankasą ir nesideformuotų visa kelio konstrukcija geležinkelio kelio garantiniu naudojimo laikotarpiu.

Geležinkelio kelio pagrindo sudedamųjų dalių (balasto, pobalasto, sankasos) nestabilumas gali atsirasti dėl per silpnų naudojamų medžiagų, balasto skilimo, nepakankamos jo kokybės, balasto ir kitų naudojamų sluoksnių storio. Balasto kokybės prastėjimo priežastys yra jo dalelių formų ir matmenų kaita, kitų medžiagų įsiskverbimas į pobalastinį sluoksnį, bėgių nusidėvėjimas, taip pat balasto ir pobalasto medžiagų maišymasis (Selig, Waters 1994; Guler 2014; Bai *et al.* 2015).

JAV mokslininkai pateikia Ilinojaus universitete vykdyto tyrimo išvadas. Jame kiekybiškai išreiškiamas geode-

zinių tinklų poveikis geležinkelio balasto šlyties stipriui. Naudojant dviejų tipų geodezinį tinklą, balasto šlyties stiprio kitimas buvo įvertintas laboratoriniais bandymais ir taikant skaitinį modeliavimą (Mishra *et al.* 2014).

Indraratna ir Nimbalkar atliko keletą laboratorinių ciklinių tyrimų serijų. Tyrime panaudotas naujai klojamas nusaustas geležinkelio balastas su dviašiais geodeziniais tinklais, neaustine geotekstile ir geodezinių kompozicinių medžiagų tarpais tarp balasto, pobalasto ir sankasos grunto sluoksnių. Dviašis geodezinis tinklas ir neaustinė geotekstilė buvo efektyvūs, nes sumažėjo konstrukcijos nusėdimas, dalelių judėjimas ir dalelių trupėjimas veikiant ciklinėms aprovoms. Geodezinis tinklas buvo veiksmingesnis už geotekstilę dėl stipresnio mechaninio ryšio sukabinant balasto daleles tarp tinklo akių. Naudojant geodezines kompozicines medžiagas buvo įrodyta, kad veiksmingai kontroliuojami įtempiai ir dalelių trupėjimas. Taip pat buvo įrodyta, kad dviejų sluoksnių sutvirtinimai konstrukcijos nusėdimą sumažina daugiau už vieno sluoksnio sutvirtinimus (Indraratna, Nimbalkar 2013).

Naudojant geležinkelio kelio pobalastiniame sluoksnyje susmulkintų padangų užpildą (angl. TDA – *tyre-derived aggregate*), jis sumažina 6–47 dB triukšmą, kylantį

dėl vertikalų virpesių, sukeltų traukiniui judant, ir prailgina kelio gyvavimo ciklą (Esmaeili, Rezaei 2016).

Kitas alternatyvus apsauginio sluoksnio techninis sprendimas geležinkelyje yra naudoti karšto maišymo asfalto (KMA) mišinio sluoksnį tarp balasto ir sankasos. Jis veikia ne tik kaip lankstus sluoksnis, kuris sumažina įtempius sankasoje, bet ir kaip hermetikas, kuris blokuoja vandens išsiskverbimą į sankasą (European Asphalt... 2003).

Didelio greičio ateities keliams bituminio pobalasto užpildų mišinio naudojimas yra alternatyva visoms nesurįštomis riškiais birioms medžiagoms, naudojamoms geležinkelio kelio pobalastiniam sluoksniui įrengti (Teixeira et al. 2009).

Taikant visus minėtus technologinius sprendinius išlieka problema: neaišku, ar būtina naudoti natūralios kilmės ar dirbtines, ar joms prilyginamas medžiagas. Taigi pobalastinio sluoksnio mišiniai turi būti homogeniški, o jų savybės stabilios, t. y. mažos sklaidos.

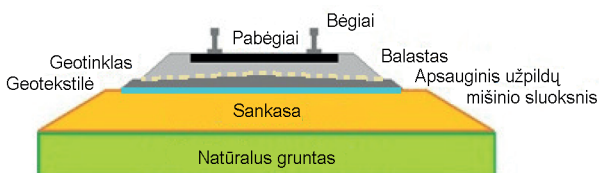
Tyrimu siekiama nustatyti ir išanalizuoti geležinkelio pobalastinio mišinio, gaminamo iš užpildų, granulometrinės sudėties, pralaidumo vandeniui ir tankio variaciją.

Tyrimo tikslas – ištirti paimtų ėminių pobalastinio sluoksnio mišinio savybes: granulometrinę sudėtį, pralaidumą vandeniui ir tankį. Gauti regresijos lygtį, iš kurios būtų galima nustatyti didžiausią sklaidą turinčias pilnutines išbias, tinkančias vertinti medžiagos homogeniškumą. Apskaičiuoti tiriamų savybių minimalų reprezentatyvų ėminių skaičių.

Reikalavimai geležinkelio pobalastiniam sluoksniui

Apsauginis sluoksnis po viršutine geležinkelio konstrukcija yra sudedamoji sankasos dalis, skirta stabiliam viršutinės konstrukcijos įrengimui ir ilgalaikiam eksploatavimui (1 pav.).

Užpildų mišinio apsauginis sluoksnis (KG1) turi atlikti šias funkcijas: atskirti balasto sluoksnį nuo sankasos, neleisti kapiliariniam vandeniui kilti į geležinkelio kelio konstrukcijos viršų, kritulių vandenį nukreipti į sankasos šlaitus ir griovius, nesideformuoti eksploatacijos laikotarpiu, apsaugoti viršutinę geležinkelio kelio konstrukciją nuo iškilų ją sušaldant ir atšildant, tolygiai paskirstyti geležinke-



1 pav. Geležinkelio kelio struktūra
Fig. 2. Railway track structure

lio riedmenų apkrovą į sankasą, turėti pakankamą laikomąją gebą, kuo ilgiau išlaikyti tūrinį stabilumą.

Šios apsauginio KG1 sluoksnio funkcijos bei jų ilgalaikiškumas priklauso nuo keturių veiksnių: medžiagos kokybės (granulometrinės sudėties, pralaidumo vandeniui, tankio, tampros modulio, grūdelių formos, grūdelių stiprio); sluoksnio įrengimo technologinių procesų parametru (įrenginių konstrukcijos ir būklės, klojamo sluoksnio storio, pločio bei skersinio nuolydžio, procesų parametru, užpildų mišinio sutankinimo laipsnio); technologinių medžiagos gamybos įrenginių konstrukcijos ir būklės; darbų savikontrolės ir priėmimo kontrolės veiksmingumo.

Pobalastinio sluoksnio mišinio gamyba

Mineralinių medžiagų užpildų mišinys (KG1 mišinys), naudojamas geležinkelio pobalastiniam sluoksniui įrengti, gaminamas nuolatinio veikimo specialiame stacionariame įrenginyje (2 pav.). Skirtingos granulometrinės sudėties mineralinės medžiagos vienkaušiu krautuvu pilamos į atskirus priėmimo įrenginio bunkerius. Jos pagal parinktą užpildų mišinio optimalią granulometrinę sudėtį yra tolydžiai dozuojamos. Įrenginys gali priimti iki keturių skirtingų frakcijų. Bendrojo transporterio juostos nukrovimo galo aukštis nustatomas taip, kad byrantis nuo jo mišinys minimaliai segreguotų ir iš dalies gravitaciniu būdu susimaišytų formuojamoje krūvoje. Transporterio juostos gale vyksta pradiniai segregacijos procesai. Užpildų mišinio stambiosios frakcijos nubyra į krūvos apačią, o smulkiosios – kaupiasi krūvos centre.

Karjere iškasto žvyro sijojimo procese sunku parinkti tokius technologinius parametrus, kurie leistų gauti įvairios granulometrinės sudėties (nuo 0 iki 45 mm dydžio grūdelių) užpildų medžiagą, tinkančią pobalastiniam sluoksniui



2 pav. Geležinkelio pobalastinio užpildų mišinio gamybos įrenginys su skirtingų medžiagų priėmimo ir dozavimo bunkeriais

Fig. 2. Railway sub-ballast mixture production facility with different materials receiving and dosing bunkers

įrengti. Dėl žaliavos (iškasto žvyro) granulimetrinės sudėties variacijos gali būti reikiamo stambumo vienu frakcijų gaminame mišinyje trūkumas, o kitų perteklius. Todėl pobalastinio sluoksnio mineralinis mišinys gaminamas iš kelių (iki 4) skirtingo stambumo frakcijų, sumaišytų technologiniame įrenginyje, atsižvelgiant į reikiamą masės santykį.

Tyrimo metodika

Tyrimo geležinkelio pobalastinio sluoksnio mišinio (KG1 mišinio) savybėms, kurias nusako DIN 18 123-1: 1998, nustatyti 2014 m. buvo paimti 49 ėminiai, kuriems buvo nustatytos 3 savybės. Visi atskirieji ėminiai buvo ištirti standartiniais laboratoriniais metodais. Kiekvienai pobalasto sluoksnio užpildo mišinio savybei nustatyti padėties (aritmetinis vidurkis) ir sklaidos (standartinis nuokrypis) parametrai.

Granulimetrinė sudėtis nustatyta pagal LST EN 933-1:2012 – sausuoju būdu, nes dalelių, mažesnių nei 0,063 mm, yra <10 %. Paimti ėminiai, kurių masė >2 kg, nes stambiausia frakcija buvo 45 mm. Laboratorijoje išdžiovinti apie +105° temperatūroje ir išsijoti mechaniniu rankiniu ir automatinu kratikliais. Gauta granulimetrinė sudėtis išreikšta pilnutinėmis išbiromis per laboratorinius sietus masės procentais.

Pobalastinio sluoksnio pralaidumas vandeniui priklauso nuo vidutinio tuštymių dydžio. Jam taip pat turi įtakos dalelių dydis, forma ir skirtingo dydžio dalelių santykis, t. y. granulimetrinė sudėtis. Mišinio pralaidumas vandeniui nustatomas pagal LST CEN ISO/TS 17892-11:2005 metodiką. Tiriant šią užpildų mišinio savybę, nustatomas suardytos struktūros mišinio pralaidumas vandeniui, esant pastoviam vandens spūdžiui ir tam tikram hidrauliniam gradientui. Vanduo bandinyje teka laminarine srove. Bandymo metu išmatuojamas vandens kiekis, pratekęs per bandinį per tam tikrą laiką.

Mineralinio užpildų mišinio bandinio pralaidumas vandeniui k (m/s) išreiškiamas kaip vandens tekėjimo greitis bandinyje ir skaičiuojamas pagal formulę:

$$k = \left(\frac{q}{i} \right) \left(\frac{R_t}{A} \right), \quad (1)$$

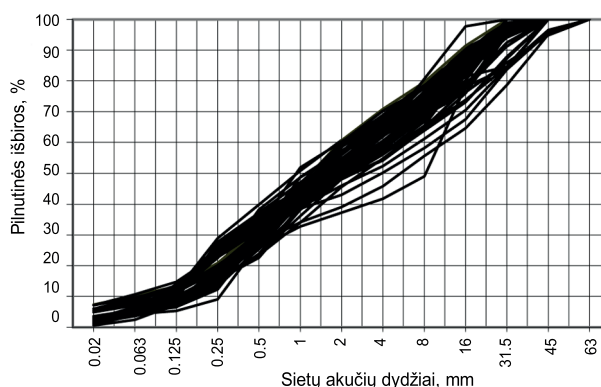
čia: q – vandens debitas, m^3/s ; i – hidraulinis gradientas; A – bandinio skerspjūvio plotas, m^2 ; R_t – temperatūrinis koeficientas, skirtas vandens klampumui koreguoti.

Geležinkelio pobalastinio sluoksnio mišinio tankis priklauso nuo šių savybių: grūdelių formos ir matmenų, stiprumo bei sutankinimo laipsnio. Tiesiant geležinkelio kelią naudojamas KG1 mišinys, kuris gaminamas iš žvyro ir smėlio mišinio pagal LST 1331:2002. Tikėtina, kad laboratorinių bandinių rezultatai būna pasklidę siaurame

ruože, todėl jų sklaida mažai priklauso nuo kitų veiksnių, nes medžiagos grūdelių mechaninės savybės beveik nekinta. Tankis nustatytas pagal LST EN 13286-2:2004.

Rezultatai ir jų analizė

Ištyrus geležinkelio pobalastinio sluoksnio mišinio (KG1) visus atskirus ėminius ($n = 49$), paimtus skirtingais metų laikais iš skirtingų vietų, nustatyta jų granulimetrinės sudėties sklaida (3 pav.).



3 pav. Geležinkelio pobalastinio sluoksnio atskirų ėminių granulimetrinė sudėtis

Fig. 3. Gradation of individual samples of railway sub-ballast layer

Mineralinio mišinio ėminių granulimetrinės sudėties kreivių platus sklaidos laukas (3 pav.) rodo, kad pobalastinio sluoksnio medžiaga yra nehomogeniška.

Užpildų mišinio rūšiuotumo (įvairiagrūdiškumo) koeficientas C_u apibūdina granulimetrinės sudėties kreivės statumą intervale nuo d_{10} iki d_{60} . Kuo mažesnis rūšiuotumo koeficientas C_u , tuo vienodesnis ir geriau išrūšiuotas užpildų mišinys. Teorinės šių dviejų koeficientų – rūšiuotumo (C_u) ir sanklodos (C_c) – kreivės pateiktos 4 pav.

Pobalastinio sluoksnio mineralinės medžiagos rūšiuotumo koeficientas nustatytas iš (2) formulės:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (2)$$

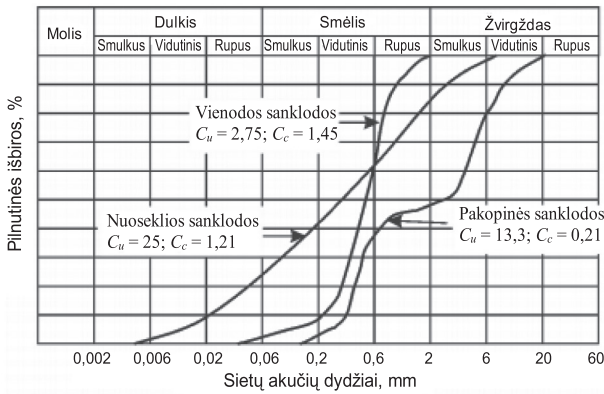
čia d_{10} , d_{60} – dalelių skersmenys, kurie granulimetrinės sudėties kreivės ordinatėje atitinka iki 10 % ir iki 60 % susumuotų tiriamojo užpildų mišinio masės dalių, mm.

Kai $d_{10} = 0,125$ mm ir $d_{60} = 4$ mm, tai rūšiuotumo koeficientas 32.

Sanklodos (frakcionuotumo) koeficientas C_c apibūdina granulimetrinės sudėties kreivės pobūdį intervale tarp d_{10} ir d_{60} ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \cdot d_{60}} = \frac{(0,5)^2}{0,125 \cdot 4} = 0,5, \quad (3)$$

čia d_{10} , d_{30} , d_{60} – dalelių skersmenys, kurie granulimet-



4 pav. Gruntų granulimetrinių kreivių teorinės kreivės (LST EN 1445: 1996)

Fig. 4. Gradation theoretical curves of soils (LST EN 1445: 1996)

rinės sudėties kreivės ordinatėje atitinka iki 10 %, 30 % ir 60 % tiriamojo užpildų mišinio masės dalių, mm.

Kai pateiktas pilnutinės išbiras atitinkantys sietai yra $d_{10} = 0,125$ mm, $d_{30} = 0,5$ mm ir $d_{60} = 4$ mm, tai vienodumo koeficientas yra 0,5.

Imant iš granulimetrinės sudėties kreivių (3 pav.) apskaičiuotus aritmetinius vidurkius, atitinkančius 10 %, 30 % ir 60 % pilnutinių išbirų per sietus dalelių skersmenis, gauti rezultatai rodo, kad pobalastinio sluoksnio mineralinių medžiagų mišinys KG1 yra nuoseklios sanklodos ($32 > 15$), o vienodumo koeficientas $C_c = 0,5$ rodo pakankamą medžiagos vienodumą (1 lentelė).

1 lentelė. Granulimetrinės sudėties kreivės forma (LST EN ISO 14688-2:2004)

Table 1. Granulometric composition curve form (LST EN ISO 14688-2: 2004)

Granulimetrinės sudėties kreivės forma	Koeficientai	
	C_u	C_c
Nuosekli	>15	$1 < C_c < 3$
Vidutiniškai nuosekli	$6 < C_u < 15$	<1
Vienoda	<6	<1
Pakopinė	paprastai didelis	bet koks (paprastai $<0,5$)

Pobalastinio sluoksnio užpildų mišinių granulimetrinę sudėtį rodo pilnutinių išbirų per laboratorinius sietus procentinė masė. Granulimetrinės sudėties variacija išreiškiama pilnutinių išbirų per visus sietus standartiniais nuokrypiais s_p . Jų reikšmės priklauso nuo išbirų aritmetinių vidurkių \bar{p} ir medžiagos homogeniškumo. Biriosios mineralinės medžiagos arba mišinio granulimetrinės sudėties variaciją pasiūlyta vertinti pagal didžiausią pilnutinės išbirų per sietus reikšmę $s_{p\max}$.

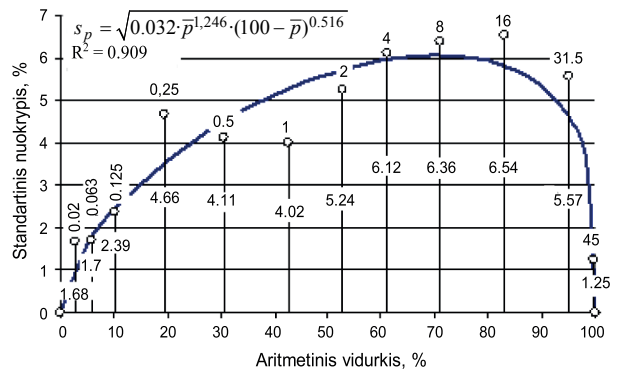
Koreliacinė sietis $s_p = f(\bar{p})$, gauta atlikus granulimetrinės sudėties tyrimą, leidžia apskaičiuoti biriosios medžiagos $s_{p\max}$, neatsižvelgiant į naudotų sietų akučių dydį. Pilnutinių išbirų per sietus standartinis nuokrypis s_p kinta priklausomai nuo jų aritmetinio vidurkio \bar{p} pagal regresijos modelį (Mučinis *et al.* 2009):

$$s_p = \sqrt{a \cdot \bar{p}^b \cdot (100 - \bar{p})^c}, \quad (4)$$

čia a , b , c – atitinkamai nežinomieji modelio parametrai, nulemiantys kreivės formą ir asimetriją; s_p – pilnutinių išbirų per bet kurį sietą standartinis nuokrypis, %; \bar{p} – pilnutinių išbirų per šį sietą aritmetinis vidurkis, %.

Modelis (4) rodo, kad didžiausias $s_{p\max}$ būna tų grūdelių, kurie mineralinėje medžiagoje ar mišinyje sudaro apie 50 % jos (jo) masės.

Pagal modelį (4) iš apskaičiuotų vidurkių \bar{p} ir standartinių nuokrypių s_p gauta šių statistinių rodiklių sieties regresijos lygtis $s_p = f(\bar{p})$ ir jos determinacijos koeficientas $R^2 = 0,909$ (5 pav.). Jis (R^2) rodo, kad s_p kitimas apie 91 % nulemtas \bar{p} kitimo ir tik 9 % s_p kitimo priklauso nuo kitų modelyje nevertinamų parametru.



5 pav. KG1 mišinio pilnutinių išbirų per laboratorinius sietus standartinių nuokrypių (s_p) ir aritmetinių vidurkių (\bar{p}) sietis

Fig. 5. Correlation between the KG1 mixture gradation variation (s_p) and average (\bar{p})

Pagal matematinės statistikos dėsnius nehomogeniškos mineralinės medžiagos granulimetrinei sudėčiai ar kitam fiziniam arba mechaniniam kokybės rodikliui nustatyti imami atsitiktiniai vienetiniai ėminiai, kurių minimalus būtinasis skaičius (duomenų skaičius) apskaičiuojamas pagal formulę:

$$n = \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{\Delta^2}, \quad (5)$$

čia n – minimalus būtinasis duomenų skaičius, t – pasirinkamas patikimumo laipsnis (arba tikimybė gauti teisingą atsakymą), matuojamas standartinio nuokrypio vienetais nuo t pasiskirstymo kreivės centro; σ – matavimų bendras standartinis nuokrypis; Δ – leistinoji paklaida tarp apskaičiuoto aritmetinio vidurkio ir tikrojo vidurkio.

Kai Stjudento skirstinio dvipusio testo reikšmingumo lygmuo imamas 95 % (laisvės laipsnių skaičius imamas ∞), tai $\alpha = 0,05$, o $t = 1,96$.

Leistinoji paklaida skaičiuojama pagal formulę:

$$\Delta = \frac{\delta \cdot \bar{X}}{100}, \quad (6)$$

čia δ – leidžiama santykinė paklaida (gali būti 5 %, 10 %, 15 % arba 20 %); \bar{X} – imties aritmetinis vidurkis.

Kadangi medžiagų granulimetrinė sudėtis gali būti vertinama dalinėmis liekanomis ant sietų, pilnutinėmis liekanomis ant sietų ir pilnutinėmis išbiromis per sietus, todėl aritmetinis vidurkis, nustatytas atskiriems sietams šiais trimis metodais, skiriasi. Todėl KG1 mišinio didžiausiai variacijai nustatyti imamas aritmetinis vidurkis $\bar{p} = 50$ %.

Technikos srities uždaviniuose leidžiamą santykinę paklaidą (δ) pasirenkame 5 %, 10 %, 15 %, 20 %. 2 lentelėje pateikti minimalaus imties didumo n duomenys, kai imama atitinkama santykinė paklaida δ .

Duomenų sklaidai nustatyti taip pat apskaičiuotas procentinis variacijos koeficientas v :

$$v = \frac{s}{\bar{X}} \cdot 100 \%, \quad (7)$$

čia \bar{X} – imties aritmetinis vidurkis; s – standartinis nuokrypis; v – variacijos koeficientas

2 lentelė. Būtinasis minimalus bandinių skaičius savybėms nustatyti

Table 2. Required minimal sample number for evaluation of properties

Statistiniai parametrai δ , %	Tiriama savybė			
	5	10	15	20
Granulimetrinė sudėtis				
Aritmetinis vidurkis \bar{p}_{50} , %	50			
Didžiausias standartinis nuokrypis $s_{p \max}$, %	6,07			
Variacijos koeficientas v , %	12,1			
n	23	6	3	2
Mišinio tankis				
Aritmetinis vidurkis \bar{p} , kg/m ³	2,111			
Standartinis nuokrypis s_p , kg/m ³	0,0817			
Variacijos koeficientas v , %	3,9			
n	3	1	1	1
Pralaidumas vandeniui				
Aritmetinis vidurkis \bar{k} , m/s	$3,66 \cdot 10^{-7}$			
Standartinis nuokrypis s_k , m/s	$3,232 \cdot 10^{-7}$			
Variacijos koeficientas v , %	88,3			
n	1199	300	134	75

Minimalūs reprezentatyvių ėminių skaičiai (2 lentelė) rodo, kiek jų būtina imti, kad būtų patikimai įvertintos medžiagos savybės. Kadangi atskirų sietų gauti standartiniai nuokrypiai skiriasi, tai imamas didžiausias standartinis

nuokrypis $s_{p \max}$, kuris yra gautas ties 65 % išbirų per sietus aritmetiniu vidurkiu ir jis yra 6,07 %. Todėl galima teigti, kad reprezentatyvus granulimetrinės sudėties minimalus ėminių skaičius, kai $\delta = 5$ %, yra 23 bandiniai, o kai $\delta = 10$ %, tai jis lygus 6.

Minimalus reprezentatyviosios imties didumas mišinio tankiui nustatyti, kai $\delta = 5$ %, turi būti $n = 4$, o kai $\delta = (10 - 20)$ %, tai $n = 1$.

Pobalastinio sluoksnio užpildo mišinio pralaidumo vandeniui koeficientas labiausiai varijuoja (2 lentelė). Labai didelė duomenų sklaida ($v > 20$ %), todėl apskaičiuotieji minimalūs reprezentatyvios imties dydžiai, kai $\delta = 5$ % ir $\delta = 10$ %, taip pat labai dideli ir praktikoje mažai tikėtini. Tokia didžiulė variacijos koeficiento (v) reikšmė rodo, kad ši savybė yra labai jautri bandymo metodikai ir gali būti didelių imties aritmetinio vidurkio ir populiacijos (generalinės visumos) vidurkio skirtumų. Kai $\delta = 20$ %, minimalus reprezentatyviosios imties didumas ($n = 75$) ekonominiu ir bandymo trukmės požiūriu nepriimtinas. Atskiruosius ėminus prieš tyrimą būtina sumaišyti, sumažinti ir taip nustatyti tik vidurkį be sklaidos parametru.

Išvados

1. Pasiūlyta metodika, kaip statistiškai vertinti geležinkelio pobalasto užpildams naudojamų birių medžiagų savybes.
2. Pilnutinių išbirų per laboratorinius sietus sklaidos parametras rodo, kad didžiausia standartinio nuokrypio reikšmė yra to dydžio grūdelių, kurie užpildo mišinyje sudaro 50–70 % medžiagos masės. Regresijos lygtis yra patikima ($R^2 = 0,909$), nes iš jos apskaičiuotos kreivių ordinatės rodo glaudžią koreliacinę sąsają. Ji gali būti naudojama pobalastinio užpildų mišinio homogeniškumui vertinti.
3. Mažiausias būtinasis ėminių, reikalingų nustatyti granulimetrinę sudėtį, kai santykinė paklaida $\delta = 5$ %, skaičius yra 23 ėminiai, o kai $\delta = 10$ %, tai 6.
4. Minimalus reprezentatyviosios imties didumas mišinio tankiui nustatyti, kai $\delta = 5$ %, – 4 ėminiai, o kai $\delta = 10$ % ir daugiau, tai 1 ėminys.
5. Geležinkelio pobalastinio užpildų mišinio sluoksnio pralaidumo vandeniui savybė yra labiausiai varijuojanti iš tirtų ($v = 88,3$ %) dėl laboratorinių bandymų paklaidų, todėl gauti minimalūs reprezentatyviosios imties dydžiai nėra tikslūs. Kai santykinė paklaida $\delta = 20$ % – 75 ėminiai.
6. Tiriamų savybių variacijos koeficiento didelės reikšmės rodo laboratorinių tyrimų dideles paklaidas, kurias būtina sumažinti, arba medžiagos nehomogeniškumą.

Todėl technologiniame procese (krovimo ir skleidimo pobalastiniame sluoksnyje) reikia taikyti tokias technologijas, kurios mažintų segregaciją.

Literatūra

- Bai, L.; Liu, R.; Sun, Q.; Wang, F.; Xu, P. 2015. Markov – based model for the prediction of railway track irregularities, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 229(2): 150–159. <http://dx.doi.org/10.1177/0954409713503460>
- DIN-Taschenbuch 113, Erkundung des Baugrunds. 1998. *Bestimmung der Korngroessenverteilung DIN 18 123-1*, DIN e.V., Wiesbaden, S. 273–284.
- Esmaili, M.; Rezaei, N. 2016. In situ impact testing of a light-rail ballasted track with tyre-derived aggregate subballast layer, *International Journal of Pavement Engineering* 17(2): 176–188. <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2015.1007226>
- European Asphalt Pavement Association. 2003. *Asphalt in railway tracks*: Report. Brussels, Belgium [interaktyvus], [žiūrėta 2015 m. balandžio 18 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.eapa.org/publications.php?c=90>
- Guler, H. 2014. Prediction of railway track geometry deterioration using artificial neural networks: a case study for Turkish state railways, *Structure and Infrastructure Engineering* 10(5): 614–626. <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2012.757791>
- Indraratna, B.; Nimbalkar, S. 2013. Stress-strain degradation response of railway ballast stabilized with geosynthetics, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 139(5): 684–700. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000758](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000758)
- LST EN 933-1:2012. *Bandymai užpildų geometrinėms savybėms nustatyti. 1 dalis. Granulimetrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas*.
- LST 1331:2002. *Automobilių kelių gruntai. Klasifikacija*.
- LST EN 13286-2:2004. *Birieji ir hidrauliniais rišikliais sujungti mišiniai. 2 dalis. Laboratoriniai sausojo tankio ir drėgnio nustatymo metodai. Proktoro tankinimas*.
- LST EN ISO 14688-2:2004. *Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Gruntų atpažintis ir klasifikavimas. 2 dalis. Klasifikavimo principai (ISO 14688-2:2004)*.
- LST CEN ISO/TS 17892-11:2005. *Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Laboratoriniai grunto bandymai. 11 dalis. Pralaidumo vandeniui nustatymas esant pastoviam ir kintančiam spūdžiui (ISO/TS 17892-11:2004)*.
- Mishra, D.; Qian, Y.; Kazmee, H.; Tutumluer, E. 2014. Investigation of geogrid-reinforced railroad ballast behavior using large-scale triaxial testing and discrete element modeling, *Journal of the Transportation Research Board* 2462: 98–108. <http://dx.doi.org/10.3141/2462-12>
- Mučinis, D.; Sivilevičius, H.; Oginskas, R. 2009. Factors determining the inhomogeneity of reclaimed asphalt pavement and estimation of its components content variation parameters, *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 4(2): 69–79. <http://dx.doi.org/10.3846/1822-427X.2009.4.69-79>
- Selig, E. T.; Waters, J. M. 1994. *Track geotechnology and substructure management*. London: Thomas Telford Services Ltd. <http://dx.doi.org/10.1680/tgasm.20139>
- Teixeira, P. F.; Ferreira, P. A.; López Pita, A.; Casas, C.; Bachiller, A. 2009. The use of bituminous subballast on future high-speed lines in Spain: structural design and economical impact, *International Journal of Railway* (2)1: 1–7.

RESEARCH OF RAILWAY AGGREGATE SUB-BALLAST MIXTURE PROPERTIES

D. Navikas, H. Sivilevičius

Summary

Railway sub-ballast layer is a connecting layer between the ballast and other track layers. This layer must ensure even load distribution into the subgrade, drainage surface water, prevent materials of layers mixing. Ensuring these properties allows to extend the exploitation of all railway road construction and geometrical parameter of road maintenance. This article analyzes investigated railway sub-ballast mixture properties from large sample sizes ($n = 49$): gradation, water permeability and density statistical parameters. The regression equation showing the relationship between the fully percent passing through sieves averages and standard deviations is presented. Her coefficient of determination ($R^2 = 0.909$). The minimum number of representative samples of these three properties research is determined. Irregularity in most cases of water permeability ($v = 88,3\%$), depending on the laboratory tests methodology errors, is indicated.

Keywords: aggregate of sub-ballast, gradation, permeability of water, mixture density, sample size.