



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

Mindaugas Zakarka

LAKIŲJŲ PELENŲ PANAUDOJIMO MOLINIAMS GRUNTAMS

STIPRINTI TYRIMAS

INVESTIGATION OF FLY-ASH USE FOR CLAYEY SOIL

STABILIZATION

Baigiamasis magistro darbas

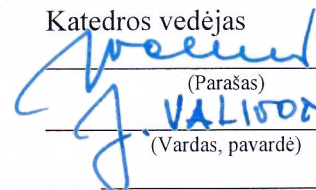
Geotechnikos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX038

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2020

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas


(Parašas)
J. VALIONIS
(Vardas, pavardė)
(Data)

Mindaugas Zakarka

**LAKIŲJŲ PELENŲ PANAUDOJIMO MOLINIAMS GRUNTAMS STIPRINTI
TYRIMAS**

INVESTIGATION OF FLY-ASH USE FOR CLAYEY SOIL STABILIZATION

Baigiamasis magistro darbas

Geotechnikos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX038
Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

Doc. dr. R. Mackevičius *Back. 2020.5.11.*
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Lietuvių kalbos konsultantė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

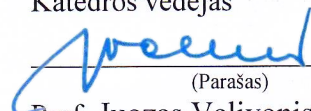
Vilnius, 2020

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GEOTECHNIKOS KATEDRA

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Geotechnikos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX038

TVIRTINU
Katedros vedėjas


(Parašas)
Prof. Juozas Valivonis
(Vardas, pavardė)

(Data)

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO
UŽDUOTIS

2018.10.15. Nr. GT-1801
Vilnius

Studentui

Mindaugui Zakarkai
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema:

LAKIŲJŲ PELENŲ PANAUDOJIMO MOLINIAMS GRUNTAMS STIPRINTI TYRIMAS

patvirtinta 2020 m. balandžio 24 d. Statybos fakulteto Dekano įsakymu Nr. 110st

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas - 2020 m. birželio 1 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

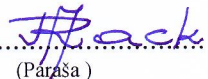
Atlikti lakiųjų pelenų panaudojimo
gruntams stiprinti analitinę ap-
žvalgą. Sukurti laboratorinių ban-
dymų metodiką. Atlikti bandinių
su įvairių lakiųjų pelenų kiekiu
tyrimus, įvertinti bandinių, kuriems
parengti naudotas skirtingas mo-
linis gruntas, savybių kitimą lai-
ke. Atlikti gautų rezultatų analizę.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

Lietuvių kalbos konsultantė Lina
Rutkienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas


(Paraša)

docentas, daktaras
(Mokslinis laipsnis, pedagoginis vardas, vadovo vardas, pavardė)

Rimantas

Mackevičius

Užduotį gavau


(Parašas)
Mindaugas Zakarka
(Vardas, pavardė)
2018 10 15
(Data)

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Mindaugas Zakarka, 20144800

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Statybos fakultetas

(Fakultetas)

Geotechnika, Gfm-18

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2020 m. gegužės 24 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Lakiųjų pelenų panaudojimo moliniams gruntams stiprinti tyrimas“ patvirtintas 2020 m. balandžio 24 d. dekanų potvarkiu Nr. 110st, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: Lina Rutkienė. Mano darbo vadovas docentas daktaras Rimantas Mackevičius.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas)

Mindaugas Zakarka

(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Statybos fakultetas Gelžbetoninių konstrukcijų ir geotechnikos katedra	ISBN Egz. sk. Data-.....-.....
Antrosios pakopos studijų Geotechnikos programos magistro baigiamasis darbas	
Pavadinimas	Lakiųjų pelenų panaudojimo moliniams gruntams stiprinti tyrimas
Autorius	Mindaugas Zakarka
Vadovas	Rimantas Mackevičius
Kalba: lietuvių	
Anotacija Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamos mineralinės vatos gamyboje surinktų lakiųjų pelenų (LP) panaudojimo galimybės moliniams gruntams stiprinti. Šia tema atlikta literatūros apžvalga, parengta eksperimentinė dalis bei gautų rezultatų analizės dalis. Molinių gruntų stiprinimas yra sudėtingesnis, lyginant su nesankabiais gruntais. Apžvelgtos LP galimybės šiam gruntui stiprinti ir įmanomos technologijos. Taip pat, apžvelgiami mineralinės vatos gamyboje gauti LP. Šio tipo LP yra nauja patirtis, tad jų savybės lyginamos su kitų tipų LP savybėmis ir jų panaudojimo galimybėmis. Didžiausias dėmesys skiriamas gniuždomojo stiprio apžvalgai. Eksperimentinėje dalyje nustatomos naudojamų gruntų savybės ir gruntbetonio gniuždomasis stipris po 7, 28 parų ir 6 mėnesių. Atliktoje rezultatų analizėje pateikiamos LP – cemento ir molio miltelių – smėlio santykių įtakos gniuždomojo stiprio vertei. Pagal rezultatų analizę formuluojamos išvados ir pasiūlymai. Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, literatūros apžvalga, bandymų metodika, rezultatų analizė, išvados ir pasiūlymai, literatūros sąrašas. Darbo apimtis – 49 p. teksto be priedų, 34 iliustr., 6 lent., 51 bibliografinis šaltinis. Atskirai pridedami darbo priedai.	
Prasminiai žodžiai: Lakieji pelenai, molis, molinis gruntas, gniuždomasis stipris, gruntų stabilizavimas, mineralinė vata	

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Civil Engineering
Department of Reinforced Concrete Structures and Geotechnics

ISBN	ISSN
Copies No.	
Date-.....-.....	

Master Degree Studies **Geotechnics** study programme Master Graduation Thesis

Title	Investigation of Fly-ash use for Clayely Soil Stabilization
-------	--

Author

Mindaugas Zakarka

Academic supervisor	Rimantas Mackevičius
---------------------	-----------------------------

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The master's thesis represents an investigation of fly-ash (FA), which is collected during the production of mineral wool for strengthening clay soil. According to thesis theme it is provided main parts, namely: literature overview, experimental set up, results analysis.

The strengthening of clay (cohesive) soil is more complicated when comparing to cohesionless soils. Thus, the thesis focus on suggestions on how to strengthen clay soil and what technologies to use as well. FA which was obtained during the mineral wool production is presented in the literature overview section. It is a new FA type therefore its properties are compared with other types of FA and their applications possibilities. Mainly analyzed the compressive strength of FA.

In the experimental section, it is presented strengthened clay with FA compressive strength after 7 days, 28 days and 6 months. The result analysis demonstrate the relationship between FA-Portland cement, clay powder-sand ratio, as well as significant impact on compressive strength. The results are taken into consideration and according to them the conclusion and suggestions are prepared.

The master's thesis includes 7 sections, namely: introduction, literature review, testing methodology, results analysis, conclusion and suggestions, bibliography.

It contains 49 pages (not including appendixes), 34 images, 6 tables, 51 references. Appendixes included.

Keywords: Fly-ash, clay, compressive strength, soil stabilization, soil improvement, mineral wool

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	9
ĮVADAS	10
1. LAKIŲJŲ PELENŲ PANAUDOJIMAS GRUNTO STIPRINIMUI.....	12
1.1. Srautinės injekcijos.....	12
1.2. Stipraus grunto sluoksnio įrengimas	15
1.3. Lakieji pelenai	17
1.4. Lakiųjų pelenų klasifikacija	18
1.5. Mineralinės vatos lakieji pelenai	20
1.6. Lakiųjų pelenų panaudojimas betone	21
1.7. Lakiųjų pelenų poveikis aplinkai	22
2. BANDYMŲ METODIKA	23
2.1. Bandymų eiga.....	23
2.2. Tiriamas smėlis.....	25
2.3. Nagrinėjamas molinis gruntas	27
2.4. Vienaašio gniuždomojo stiprio nustatymas.....	31
3. REZULTATŲ ANALIZĖ	33
3.1. Bandinių tankis.....	33
3.2. Vienaašis gniuždomasis stipris.....	33
3.3. Smėlio ir lakiųjų pelenų įtaka bandinių tankiui ir stipriui.....	38
3.4. Tankio ir gniuždomojo stiprio priklausomybės nuo smėlio ir lakiųjų pelenų.....	39
3.5. Suirimo plokštuma	42
IŠVADOS IR PASIŪLYMAI	46
LITERATŪROS SĄRAŠAS	47
A PRIEDAS. MAGISTRANTO PUBLIKUOTI STRAIPSNIAI	50

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Didelio slėgio čiurkšlė (CFORCIVIL, 2018)	12
2 pav. Gruntbetonio kolonos (Samanpey, 2020)	12
3 pav. Srautinės injekcijos įrengimo technologija (RailSystem, 2015).....	13
4 pav. Horizontalus srautinis injektavimas (RODIO, 2015).....	13
5 pav. Srautinės injekcijos tipai (RailSystem, 2015).....	14
6 pav. Srautinės injekcijos metodo panaudojimas (RailSystem, 2015).....	15
7 pav. Skysto mišinio technologija (ang. Liquid soil) (FiFB, 2017)	16
8 pav. Skysto mišinio technologijos panaudojimas (FiFB, 2017)	17
9 pav. Lakieji pelenai (Brics, 2016)	18
10 pav. C klasės ir F klasės LP (Chou, 2012).....	19
11 pav. Mineralinės vatos gamybos technologija (KING, 2020)	20
12 pav. Cemento ir lakiųjų pelenų (C+ LP) suspensija	24
13 pav. Bandiniai laikomi eksikatoriuose.....	25
14 pav. Sietai granulimetrinei sudėčiai nustatyti.....	26
15 pav. Granulimetrinės sudėties kreivė.....	26
16 pav. Prietaisas takumo drėgniui nustatyti	28
17 pav. Bandinių džiovinimas krosnyje	29
18 pav. Plastiškumo drėgnio nustatymas.....	30
19 pav. Molio mišinių plastiškumo ir takumo drėgniai (Zakarka et al., 2019)	30
20 pav. Bandinio gniuždymas presu.....	32
21 pav. Suardyti bandiniai	32
22 pav. Bandinių tankis	33
23 pav. Gniuždomasis stipris vertinant MM ir Sa santykį	34
24 pav. Gniuždomasis stipris vertinant C ir LP santykį	35
25 pav. Bandinių gniuždomasis stipris pagal išlaikymo trukmę	36
26 pav. Santykinis stiprio kitimas po 28 parų ir 6 mėnesių lyginant su stipriu po 7 parų.....	38
27 pav. Smėlio ir lakiųjų pelenų poveikis tankiui ir gniuždomajam stipriui.....	39
28 pav. Tankio ir gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo smėlio priemaišų molyje	40
29 pav. Tankio ir gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo lakiųjų pelenų priedo prie cemento.....	40
30 pav. Gniuždomojo stiprio suvestinis grafikas	41
31 pav. LP dalelių forma ir atspalvis skerspjūvyje.....	43
32 pav. Gruntbetonio spalva.....	43
33 pav. Suardytas bandinys	44

34 pav. Skirtingų mišinių suirimo plokštuma.....	45
--	----

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Lakiųjų pelenų cheminės sudėtys	19
2 lentelė. Lakiųjų pelenų cheminė sudėtis.....	23
3 lentelė. Molio miltelių cheminė sudėtis.....	23
4 lentelė. Bandinių sudėtis.....	24
5 lentelė. Bandinių matmenų nustatymas.....	31
6 lentelė. Stiprio vertė po 28 parų procentais nuo galutinio stiprio.....	42

IVADAS

Sparčiai augantis ekonomikos lygis ir vartotojiškumas sukėlė šalutinį poveikį – didėjančius atliekų kiekius. Europoje vienam žmogui tenka apie 16 t atliekų per metus, iš jų perdirbamos yra maždaug 6 t (European Commission, 2010). Ekonominio bendradarbiavimo ir plėtros organizacijos (EBPO, 2019) duomenimis, numatomas ir tolesnis atliekų kiekio didėjimas, todėl vis daugiau investuojama į šios problemos sprendimą. Lietuvoje atliekų tvarkymo problemai spręsti pasirinktos atliekų deginimo jėgainės. Nuo 2013 m. veiklą vykdo termofikacinė jėgainė Klaipėdoje, o 2020 m. numatomas Vilniaus ir Kauno jėgainių atidarymas. Deginimo metu gaunami du pagrindiniai šalutiniai produktai – pakuros dugno pelenai ir lakieji pelenai (LP). Pelenai gaunami deginant atliekas, biokurą, taip pat gaminant mineralinę vatą ir kt. Pakuros dugno pelenai gali būti panaudojami konstrukcijose (Zabihi-Samani et al., 2018), ypač kelių (Vaitkus et al., 2017), įtraukti į gamybos procesą arba laidojami šachtose. LP utilizavimo problema sudėtingesnė, jų susidaro iki 15% nuo viso pelenų kiekio (Pundinaitė-Barsteigienė et al., 2017). Ne visi LP gali būti panaudoti dėl prastos kokybės (Giergiczny et al., 2019). Dėl smulkių dalelių (Supancic, 2011) LP surinkimas, transportavimas ir darbas su jais yra sudėtingesnis nei su pakuros dugno pelenais. LP gali keisti kitų mišinių smulkias daleles ir turi išsėjančių savybių (Rutkauskas, 2018).

Geotechnikoje vienas iš LP panaudojimo būdų yra cemento dalies keitimas LP ir tokio mišinio taikymas silpniems gruntams stiprinti (Pentti, 2001), naudojant srautinį injektavimą. Srautinės injekcijos cemento suspensijos tam tikra cemento dalis pakeičiama LP. Nuo LP tipo ir santykio gaunamos skirtingos trumpalaikės ir ilgalaikės stiprio vertės (Essler & Yoshida, 2004; Hemalatha, 2017). Svarbu, kad daug kalcio turinčiais LP galima stiprinti ir molinius gruntuos (Kolias et al., 2004). Birių (nesankabių) gruntų stiprinimas paprastesnis ir egzistuoja ne viena technologija tinkanti šiems gruntams, o moliniai (sankabūs) gruntai dėl savo mažų porų turi ribotas stiprinimo galimybes. Pavyzdžiui trifazė srautinė injekcija (Sližytė et al., 2012), kurios metu yra suardoma grunto struktūra, arba stipraus grunto sluoksnio įrengimas, kuris aktualus kelių tiesyboje (Turner, 1997; Zokaite, 2015).

Viena pagrindinių problemų dirbant su LP – jų sudėtis labai skirtinga ir ji priklauso nuo deginamų medžiagų (Vaitkus et al., 2017; Rudžionis et al., 2004). Net ir toje pačioje gamykloje skirtingu metu surinktų LP savybės gali skirtis (Rutkauskas, 2018). LP surinkimas mineralinės vatos gamyboje įgauna pranašumą, nes jų sudėtis yra pastovi ir labiau prognozuojama.

Šio baigiamojo magistro darbo tikslas – pagal vienašio gniuždymo rezultatus nustatyti trumpalaikį ir ilgalaikį molinio grunto sustiprėjimą, stiprinant jį lakiaisiais pelenais, gautais gaminant mineralinę vatą.

Pasiekti baigiamojo darbo tikslui keliami tokie uždaviniai:

1. Parinkti molinius gruntus ir nustatyti jų plastiškumo ir takumo drėgnius.
2. Nustatyti bandinių gniuždomąjį stiprį atliekant bandymus po 7, 28 ir 183 parų nuo bandinių paruošimo.
3. Nustatyti lakiųjų pelenų – cemento, molio miltelių – smėlio įtaką bandinių stipriui.
4. Parinkti optimalų lakiųjų pelenų santykį moliniams gruntams stiprinti.

Įprastai bandymams naudojami šiluminių elektrinių degimo metu surinkti lakieji pelenai, tad bandymai atlikti naudojant mineralinės vatos gamyboje surinktus LP yra nauja patirtis. Taip pat, silpnų molingų gruntų stabilizavimas yra aktuali problema, kurią reikia spręsti.

Buvo paruoštos publikacijos – Zakarka, M., Mackevičius, R., Skuodis, Š., Sližytė, D. ir Kudžma, A. (2019). Stabilization of clay powder with mineral wool fly ash. *Engineering Structures and Technologies*, 11(4), 106–113. <https://doi.org/10.3846/est.2019.12021>

Skuodis, Š., Karpis, R., Zakarka, M., Gedvilas, M., Raginis, V., Orlova, K. ir Katauskas, M. (2018). Grunto, veikiamo periodinėmis apkrovomis, elgsenos tyrimai. *Inžinerinė geologija / Engineering Geology*. 4(4), 159–167. <https://doi.org/10.6001/geol-geogr.v4i4.3888>

Skaitomas pranešimas – *Molinių gruntų stiprinimas naudojant mineralinės vatos lakiuosius pelenus*. Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“, STATYBA, 2020.

1. LAKIŲJŲ PELENŲ PANAUDOJIMAS GRUNTO STIPRINIMUI

1.1. Srautinės injekcijos

Silpniems gruntams stiprinti ieškoma įvairių sprendinių. Vienas iš jų yra injekcijos, kurių metu grunto masivas paverčiamas į dirbtinę uolieną, tvirtą ir jei reikia nelaidžią vandeniui. Pagrindams ir pamatams stiprinti taikytini du injekcijos metodai: porų (mažo slėgio, klasikinė) injekcija ir srautinė (didelio slėgio, čiurkšlinė) injekcija. Kiekviena jų turi savo pranašumų ir trūkumų (Mackevičius, 2012). Mažo slėgio injekcija gali būti taikoma tik laidiesiems gruntams, tad moliniuose gruntuose ji neveiksminga.

Aukšto slėgio injekcija (angl. Jet-grouting) – metodas, kurio metu suardoma natūrali grunto struktūra didelio slėgio čiurkšle (40–60 MPa) (1 pav.) ir susicementavęs gruntas virsta gruntbetoniu (stipria ir ilgaamžė medžiaga) (2 pav.). Ši technologija gali būti taikoma ne tik rupiuose, bet ir smulkiuose gruntuose.



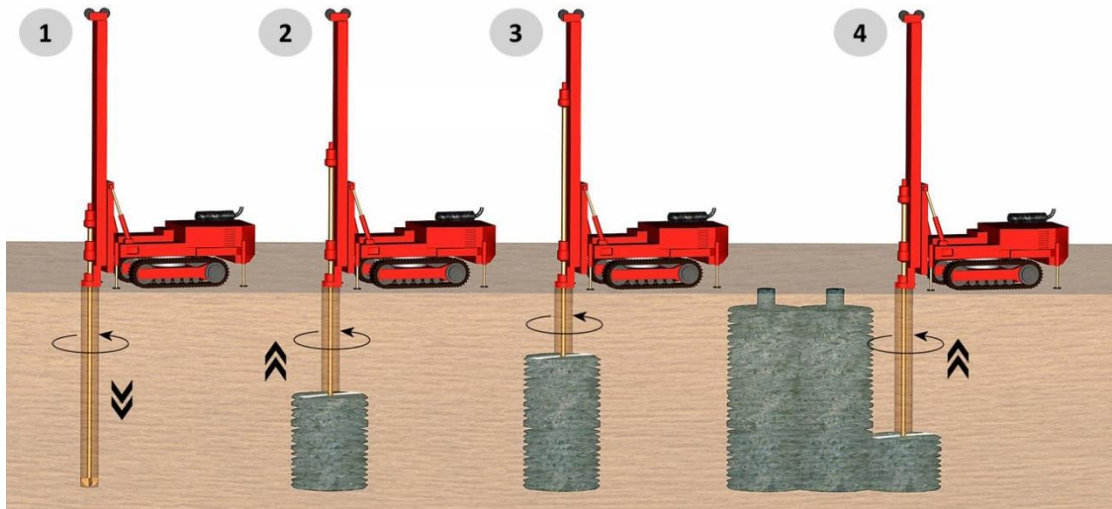
1 pav. Didelio slėgio čiurkšlė (CFORCIVIL, 2018)



2 pav. Gruntbetonio kolonos (Samanpey, 2020)

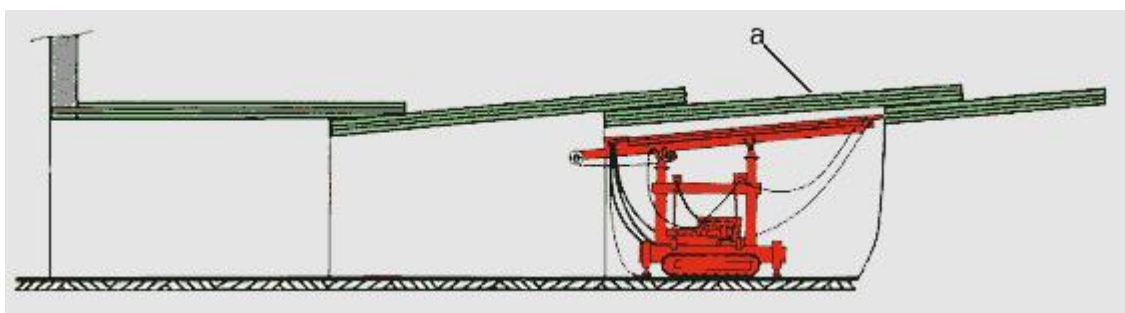
Srautinės injekcijos darbų eiga susideda iš tokių etapų (3 pav.3 pav.):

1. Gręžimas.
2. Grunto suardymas aukštu slėgiu.
3. Gruntbetonio kolonos formavimas keliant ir sukant grąžtą.
4. Procedūros kartojimas.



3 pav. Srautinės injekcijos įrengimo technologija (RailSystem, 2015)

Srautinės injekcijos metodas labai universalus – gali būti naudojamas visuose gruntuose. Ypatingai pranašumą suteikia moliniuose gruntuose, kur įprasti metodai netinka (Page et al., 2005). Gruntbetonio kolonas įmanoma įrengti skirtingame gylyje po žeme ar po jau stovinčiu pastatu tam, kad sutvirtinti pagrindą. Įmanomos ne tik vertikalios, bet ir horizontalios gruntbetonio kolonos (4 pav.). Galimas kolonų skersmens apytikslis skaičiavimas (2015 m. Lenkijoje įrengtos 5 metrų gruntbetonio kolonos (Žabelovič, 2017)). Pagal skirtingas norimas stiprio reikšmes galima optimizuoti injektuojamos suspensijos sudėtį.

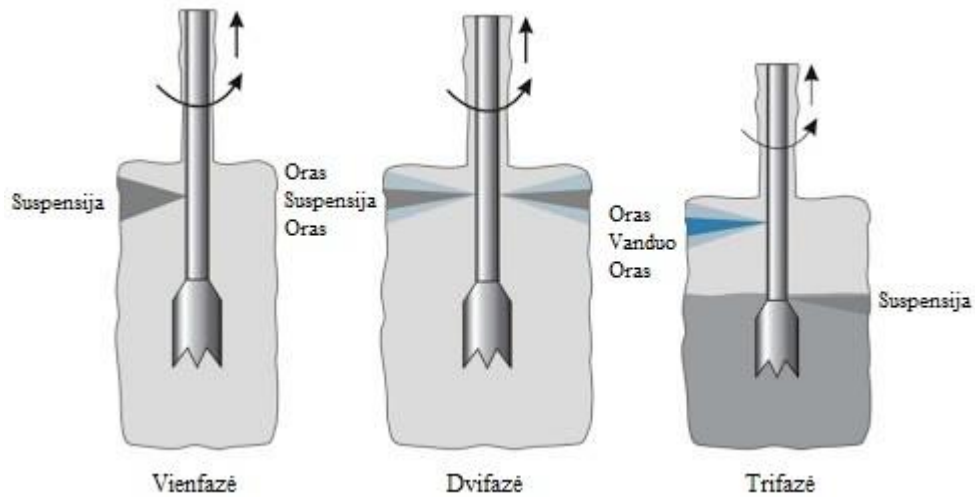


4 pav. Horizontalus srautinis injektavimas (RODIO, 2015)

Priklausomai nuo grunto tipo, taikomos trijų rūšių srautinės injekcijos (5 pav.):

1. Vienfazė (ang. single fluid system) – purškiama tik cemento suspensija. Tinkama smėliniams gruntams. Gruntbetonio kolonos skersmuo – 0,7 – 1,0 m;

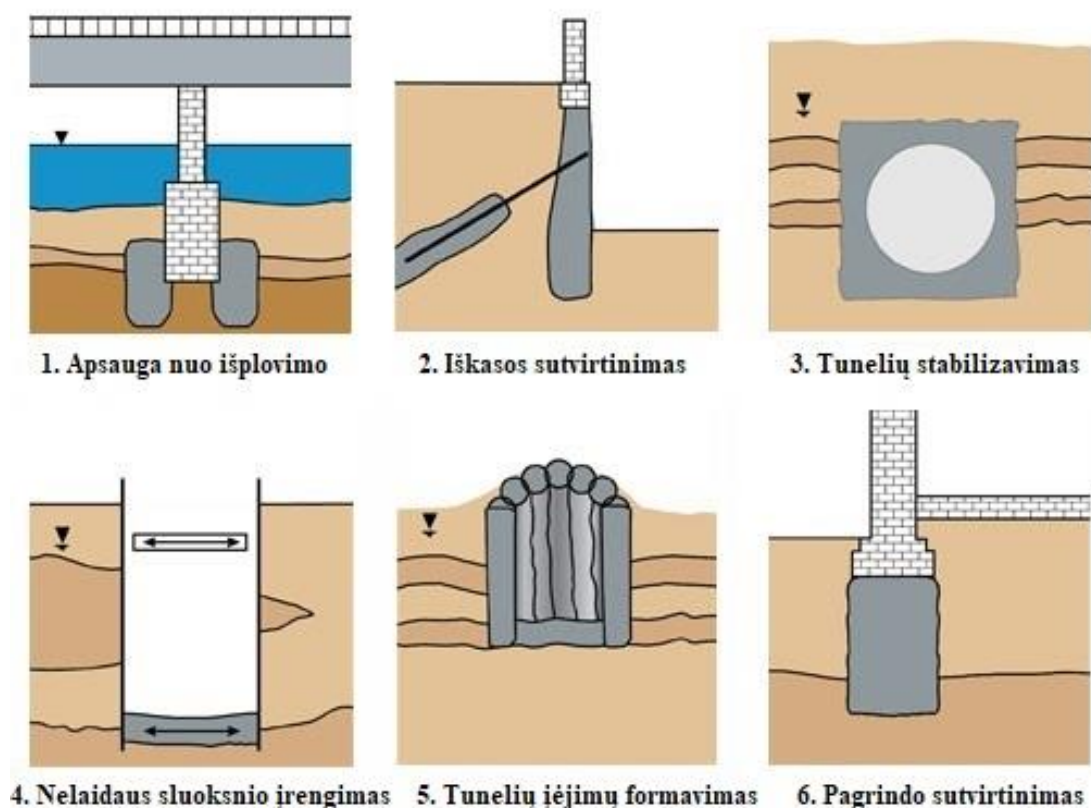
2. Dvifazė (ang. double fluid system) – purškiama cemento suspensija ir oras. Tinkama smėliniams gruntams. Gruntbetonio kolonos skersmuo – 1,5–2,0 m;
3. Trifazė (ang. triple fluid system) – purškiamas oro apsuptas vanduo ir cemento suspensija. Tinkama moliniams ir organiniams gruntams.



5 pav. Srautinės injekcijos tipai (RailSystem, 2015)

Galimas platus srautinės injekcijos metodo panaudojimas (6 pav.):

1. Apsagai nuo išplovimo. Naudojama kaip apsauginė, sandarinanti technologija.
2. Iškasos sutvirtinimui. Naudojama kaip atraminė siena. Galima dalį gelžbetoninių polių keisti gruntbetonio kolonomis arba daryti tik gruntbetonio kolonas (Page et al., 2005).
3. Tuneliams ar šlaitams stabilizuoti. Gali būti pritaikoma tiek kaip sandarinanti, tiek kaip gruntą stiprinanti medžiaga.
4. Nelaidaus sluoksnio įrengimui. Tiek apsaugoti nuo vandens prasisunkimo, tiek kaip nelaidus barjeras sąvartynuose ar pan. Taip pat, hidroizoliaciniams ekranams, kad išvengti vandens nuostolių.
5. Tunelių įėjimams formuoti. Skirtas šalia esantiems statiniams apsaugoti nuo galimo tunelių poveikio.
6. Pagrindui sutvirtinti. Tiek jau esamam pamatui stabilizuoti, tiek pagrindui sutvirtinti prieš naujo pamato įrengimą.



6 pav. Srautinės injekcijos metodo panaudojimas (RailSystem, 2015)

Kaip injektavimo medžiaga dažniausiai naudojamas cemento ir vandens (V/C) mišinys (cemento suspensija). Vandens ir cemento mišiniuose V/C santykis gali kisti nuo 0,5 iki 1,5. Į vandens ir cemento mišinį galima pridėti medžiagų, kurios jį stabilizuoja, plastifikuoja, mažina jo išplovimą iš grunto, kontroliuoja rišimosi greitį ir pan. Galima pridėti bentonito, lakiųjų pelenų (Mackevičius, 2012). Kita galimybė yra visai atsisakyti cemento ir naudoti tik LP (Cristelo et al., 2013). Šio bandymo rezultatai labai perspektyvūs, tačiau gaunamas efektas skiriasi nuo srautinio injektavimo su cemento suspensija. Naudojant cemento suspensiją 80 – 85 % gruntbetonio stiprio vertės yra pasiekiamos per 28 paras. Kai rišiklis yra LP, stiprio vertės nuolat didėja ir stiprėjimas nesustoja vienerių metų laikotarpyje (Cristelo et al., 2011; Marinković et al., 2018).

Srautinio injektavimo šalutinis produktas – išplūdas, tai iš gręžinio plūstantis vanduo su cemento ir grunto dalelėmis. Ši atlieka turi būti surinkta ir išgabenta iš statybos aikštelės.

1.2. Stipraus grunto sluoksnio įrengimas

Stipraus grunto sluoksnio įrengimas – metodas, kuris padeda išspręsti silpno grunto problemas, molinio grunto problemas, požeminių komunikacijų apsaugos bei įrengimo problemas, vandens problemas, stipraus grunto sluoksnis leidžia sumažinti asfalto sluoksnio storį (Parsons et al., 2005). Galima gruntą stiprinti LP be cemento priemaišos (Mishra et al., 2011; Supancic, 2011). Šis metodas sprendžia LP utilizavimo problemą, bet yra galimas tik mažo intensyvumo transporto priemonių

keliams. Kelių konstrukcijose naudojami LP ne tik pagerina stiprio charakteristikas, bet dėl atsparumo užšalimo – atšilimo ciklams, pagerina konstrukcijos ilgaamžiškumą. Geresnėmis geotechninėmis savybėmis pasižymi biokuro LP lyginant su anglies degimo metu gautais LP (Lahtinen, 2001). Tačiau esama ir sunkumų panaudojant LP, pavyzdžiui kylančios dulkės darbo metu.

Kita galimybė – silpno grunto sluoksnį sumaišyti su cementu arba cementu ir LP. Šio metodo privalumas – suardytas ir sumaišytas su cementu gali būti ir molingas gruntas. Silpnas (nebūtinai) gruntas suardomas, sumaišomas su cemento suspensija ir grąžinamas atgal. Technologijos taikymo pradžioje iškasamas gruntas buvo pakeičiamas cemento vandens ir bentonito mišiniu, o dabar vietoj bentonito gali būti naudojamas ir darbų metu iškastas gruntas. Ši technologija nėra paplitusi Lietuvoje, daugiau naudojama Vokietijoje.

Populiari naudoti skysto mišinio technologiją (ang. Liquid soil), kurios metu sumaišomas ir grąžinamas skystos konsistencijos gruntbetonis (7 pav.). Jis užpildo ertmes ir laikomas savaime susitankinančiu. Savaime susitankinantis gruntas leidžia išvengti požeminių komunikacijų pažaidų, galinčių atsirasti gruntą tankinant vibracinėmis plokštėmis.



7 pav. Skysto mišinio technologija (ang. Liquid soil) (FiFB, 2017)

Technologija pradėta naudoti komunikacijoms tiesti, bet dabar jos panaudojimo galimybės labai išsiplėtė (8 pav.):

1. Kelio pagrindui įrengti, grunto savybėms gerinti, netankinamo grunto sluoksniui (molinio grunto) pakeisti;
2. Tranšėjoms užpilti, komunikacijoms įrengti;
3. Apsaugai nuo vandens poveikio, nuo taršos;

4. Šlaitams sutvirtinti;
5. Gręžiniams užpildyti, pagrindui stiprinti;
6. Šilumai išsklaidyti aplink aukštos įtampos kabelius;
7. Metalinių vamzdžių apsaugai nuo korozijos;
8. Vamzdynų apsaugai nuo dujų nutekėjimo;
9. Silpnų vamzdžių apsaugai nuo aplinkos poveikio;
10. Apsaugai nuo šaknų poveikio;
11. Apsaugai nuo vibracijų (žemės drebėjimo).



8 pav. Skysto mišinio technologijos panaudojimas (FiFB, 2017)

Pagrindiniai technologijos privalumai:

1. Nereikalingas sutankinimas;
2. Neatsiranda nuosėdžių;
3. Paprastas įrengimas, galimas gruntbetonio pumpavimas;
4. Nepažeidžiamos komunikacijos (vamzdžiai, kabeliai);
5. Apsauga nuo korozijos;
6. Kontroliuojamas kietėjimas;
7. Nedidelės vibracijos, triukšmas, mažai dulkių;
8. Panašios savybės į natūralaus grunto, o esant poreikiui – pagerinamos.

1.3. Lakieji pelenai

Degimo metu gaunami pakuros dugno pelenai ir lakieji pelenai. Plačiai naudojami gali būti dugno pelenai. Jų dalelių forma kampuota, o dydis atitinka smelio ar žvyro dalelių dydį (Kumar et al., 2014). Šios savybės leidžia dugno pelenus naudoti konstrukcijose. Didžiausias pelenų kiekis panaudojamas kelių tiesyboje.

Lakieji pelenai (9 pav.), kurių susidaro iki 15 % nuo viso pelenų kiekio, yra smulki, kieta medžiaga, kurios dalelių dydis kinta tarp 0,2 – 200 μm , o piltinis tankis svyruoja tarp 0,54 – 0,86 g/cm^3 . Mikromorfologiniai tyrimai rodo, kad pelenų dalelės dažniausiai būna sferinės (Yao et al., 2015). Bet kurių lakiųjų pelenų dalelių dydis priklauso nuo deginamos medžiagos ir kaminų

valymo įrenginių. Mechaniniais separatoriais surinkti lakieji pelenai yra stambesni, lyginant su elektrostatiniais nusodintuvais surinktais pelenais.

Didžiausias pelenų kiekis susidaro deginant biokurą ar atliekas, mažesni kiekiai gaunami gaminant mineralinę vatą. Gamybos metu susidarantys dugno pelenai vėl grąžinami į gamybos procesą, taip pat ir panaudotą vatą galima perdirbti (Vantsi et al., 2014, Balkevičius et al., 2007). Kaip šalutinis produktas lieka tik LP, kurie dėl smulkių dalelių nebegrąžinami į gamybos procesą. Yra galimybė vykdyti ir atvirkštinį procesą. G. Monaghan dar 1983 m. patentavo prietaisą, kurio pagalba iš LP galima gaminti aukštos kokybės mineralinę vatą.

Lakiųjų pelenų spalva gali kisti nuo šviesiai rusvos iki rudos ir nuo pilkos iki juodos, atsižvelgiant į juose esančius mineralus. Krūvoje jie būna pilkšvos spalvos, kuri gali būti tamsesnė, jei yra didesnis kiekis nesudegusios anglies (Tokuy et al. 2016).

Dėl dalelių smulkumo, darbas su lakiaisiais pelenais yra sudėtingesnis nei su dugno pelenais. Nepaisant to, 44,19 % lakiųjų pelenų utilizuojama kartu su cementu ir betonu, 15,25 % kelių tiesyboje, pylimų ar užtvankų įrengime, 12,49 % melioracijai ir paviršiaus lyginimui (Loya et al., 2014).



9 pav. Lakieji pelenai (Brics, 2016)

1.4. Lakiųjų pelenų klasifikacija

Priklausomai nuo kalcio oksido kiekio LP sudėtyje, pelenai skiriamos į (10 pav.):

C klasės – $\text{CaO } 15 - 35 \%$ arba $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50 \%$ (Gaunami kūrenant lignito anglį).

F klasės – CaO apie 5% arba $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70 \%$ (Gaunami deginant bituminę anglį).

Cheminė sudėtis priklauso nuo deginamos medžiagos. Abi klasės pasižymi skirtingais poveikiais. F klasės pelenai dėl savo pucolaninių savybių yra naudojami kaip aktyvusis betono mineralinis priedas ir yra gera priemonė stabdant betono koroziją (Grinys et al., 2014). Geopolimeriniam betonui tinka kalcingi (C klasė) ir siliciški pelenai (F klasė). F klasės pelenai turi

pucolaninių savybių, kadangi sudėtyje yra didelis kiekis amorfinio SiO_2 ir gali būti naudojami kaip portlandcemenčio pakaitalas (Bocullo, 2019). Taip pat juos galima naudoti kaip aktyvųjį betono mineralinį priedą ir sėkmingai apsaugoti betoną nuo šarminės korozijos. Nepaisant to, F klasės lakiaisiais pelenais galima pakeisti tik 25 % portlandcemenčio, o C klasės pelenų išvis nerekomenduojama naudoti betono gamyboje. Tai riboja lakiųjų pelenų utilizavimą gaminant betoną.



10 pav. C klasės ir F klasės LP (Chou, 2012)

Antrame skyriuje aprašytiems tyrimams naudoti LP gauti iš mineralinės vatos gamybos proceso kaip susidaranti atlieka, kurių cheminė sudėtis pateikta 1 lentelėje (Stonys et al. 2016). Lentelėje taip pat pateikta cheminė sudėtis pelenų gautų deginant biokurą (Česnauskas, 2018). Jie atitinka C klasės LP. Kartu lyginama F klasės LP cheminė sudėtis (Gamage et al., 2011).

Mineralinės vatos gamyboje gauti LP pagal CaO kiekį atitinka F klasės pelenus, o pagal $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ kiekį C klasės LP, todėl konkrečiai klasei priskirti negalima.

Mineralinės vatos lakiųjų pelenų:

- SiO_2 kiekis 4,5 % mažesnis už C klasės ir 14,3 % mažesnis už F klasės;
- Al_2O_3 kiekis 23,66 % mažesnis už F klasės;
- CaO kiekis 13,02 % mažesnis už C klasės ir 5,18 % už F klasės;
- MgO kiekis 9,2 % didesnis už C klasės ir 9,3 % už F klasės;
- Na_2O kiekis 6,34 % už C klasės ir 6,41 % už F klasės.

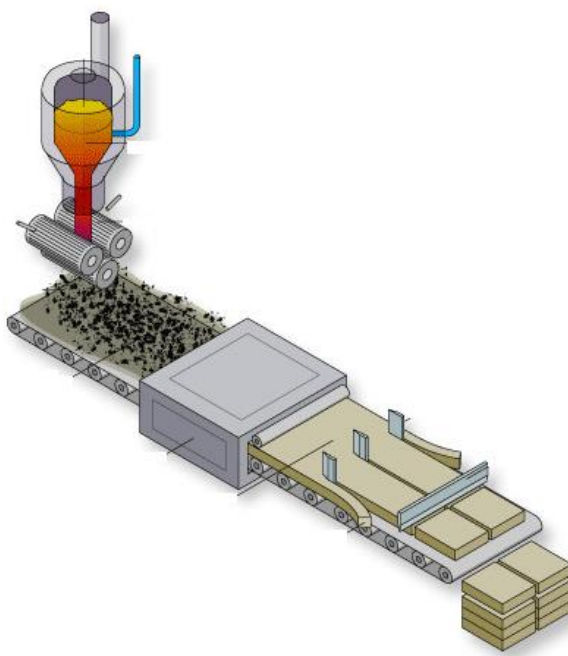
1 lentelė. Lakiųjų pelenų cheminė sudėtis

LP tipas	Cheminė sudėtis, %								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	SO_3
Mineral. Vat. LP	40,6	2,14	6,91	3,52	11,1	6,71	6,34	0,23	2,41
C klasės LP	45,1	2,98	1,37	16,6	1,9	0,37	4,47	0,2	2,26
F klasės LP	54,9	25,8	6,90	8,70	1,8	0,30	0,30	-	0,6

1.5. Mineralinės vatos lakieji pelenai

Prognozuojama, kad 2020 m. per metus Europoje susidarys apie 100 t mineralinės vatos atliekų (Vantsi et al., 2013). Pagal Europos komisijos reikalavimus šalys turi perdirbti 70 % šio kiekio. Tik vienetai Europos šalių yra pajėgios įgyvendinti šiuos reikalavimus. 60 % izoliacijai panaudojamos medžiagos yra mineralinė vata. Tai gali būti šilumos, ugnies, garso izoliacija. Įrengimo metu lieka 5 % šių atliekų, po 30 m. naudojimo, reikalingas vatos keitimas ir t. t.

Mineralinės vatos gamybos metu, žaliava pilama į lydkrosnę (1500°C), iš kurios lydalas patenka į išplaušinimo įrenginius, kur suformuojami plaušeliai (11 pav.). Populiariausios mineralinės vatos yra stiklo vata ir akmens vata. Stiklo vatos gamyboje didelę dalį žaliavos sudaro perdirbamas stiklas. Akmens vatos gamyboje – vulkaninės uolienos, dažniausiai bazaltas, gabras, anortozitas ir dolomitas. Pridedama 2 – 4 % rišiklio plaušelių stabilizavimui.



11 pav. Mineralinės vatos gamybos technologija (KING, 2020)

Gaminant mineralinę vatą, didesnės nesusirišusios dalelės vėl grąžinamos į gamybos procesą, taip pat ir panaudotą vatą galima perdirbti (Vantsi et al., 2014, Balkevičius et al., 2007). Kaip šalutinis produktas lieka tik LP, kurie dėl smulkių dalelių nesusiriša ir nebegali būti įtraukti į gamybos procesą.

Mineralinės vatos atliekos aktuali problema. Ilgą laiką ši atlieka buvo laikoma neperdirbama ir tiesiog vežama į sąvartynus arba laidojama šachtose. Šiuo metu dalis atliekų panaudojama keramikos bei cemento gamybai, gipskartonio bei pluoštiniais gaminiais, padangoms (Kinnunen et al., 2016).

1.6. Lakiųjų pelenų panaudojimas betone

Betonas pasižymi mechaninėmis savybėmis: susitraukimu ir valkšnumu, gniuždymo stipriu, tempimo stipriu, lenkimo stipriu ir tamprumo moduliu. Gniuždomasis stipris – viena svarbiausių betono savybių. Betono, kuriame dalis cemento pakeista mineraliniais priedais, mechaninės savybės nėra tiesiogiai susijusios su gniuždymo stipriu, o to paties kiekio skirtingų mineralinių priedų poveikis cementinio akmens mechaninėms savybėms nėra vienodas (Guneyisi et al., 2008). Taip yra dėl to, kad mineraliniuose prieduose esančios smulkios dalelės gali keisti kitų medžiagų daleles ir turi rišančiųjų savybių (Rutkauskas, 2018).

Lakiųjų pelenų dalelių struktūra nėra kristalinė, LP turi geras pucolanines savybes (kietėjant išskiria mažiau šilumos bei atsparesnės vandens poveikiui, todėl tinka didelėms konstrukcijoms betonuoti), o pelenai, kuriuose daug kalcio oksido, turi pucolanines ir hidraulines savybes. Dar 1910 m. pastebėtos LP savybės sudarė galimybes nuo 1930 m. naudoti juos kaip svarbią betono sudedamąją dalį.

Svarbu pabrėžti, kad nėra vieno LP kiekio santykio tinkančio visiems mišiniams. Lygis, kuriuo LP pakeičia betono savybes, priklauso nuo užpildų sudėties, santykio, dalelių dydžio, bandinių išlaikymo sąlygų ir t. t. (Bhatt et al., 2019). Pavyzdžiui:

- C klasės lakieji pelenai naudojami, kai norima padidinti trumpalaikio stiprio vertes (Gamage et al., 2011).
- Jei LP sudėtyje yra sieros, bandiniuose įmanomas ilgalaikio stiprumo ir ilgaamžiškumo susilpnėjimas (Mahvash et al., 2017).
- Kada bandiniai buvo stabilizuojami vien tik LP, gniuždomasis stipris po 28 parų, lyginant su stipriu po 7 parų, sumažėjo ir vėliau vėl pradėjo didėti. Bandiniuose, kuriuose buvo įmaišyta bent 10 procentų cemento, mažėjimas neatsirado (Kamon et al., 2000).
- LP, priešingai nei betonas, neįgauna apie 80 % stiprio per 28 paras, o stipris laipsniškai didėja vienerių metų laikotarpyje (Marinković et al., 2018).
- LP sudėtis labai skirtinga ir skirtingas jų poveikis betonui (Vaitkus et al., 2017). Net ir toje pačioje gamykloje skirtingu metu surinktų LP savybės gali skirtis (Rutkauskas, 2018), todėl LP surinkti mineralinės vatos gamyboje įgauna pranašumą, nes jų sudėtis yra pastovi ir labiau prognozuojama.

Stiprumas nėra vienintelė savybė, kurią LP suteikia betonui. Nustatytos geresnės laidumo vandeniui charakteristikos, mažesnis reikalingas vandens kiekis betonui, geresnis atsparumas šalčiui, o naudojami F klasės LP apsaugo betoną nuo šarminės korozijos (Grinys et al., 2014;

Rutkauskas, 2018). Svarbu, kad betone utilizuojant LP, juose esančios toksiškos dalelės gali būti surištos geopolimerinėje struktūroje (Zhuang et al., 2016).

1.7. Lakiųjų pelenų poveikis aplinkai

Yra dvejonių, kad lakieji pelenai gali būti kenksmingi dėl savyje esančio radioaktyvumo ar sunkiųjų metalų. Vykstant degimo procesui, kartu su lakiais junginiais iš katilo gali pasišalinti ir lakesnieji mikroelementai (pvz. Cd pradeda garuoti 756 °C, o Zn – 907 °C temperatūroje). Dūmams vėstant, išgaravę metalai susikondensuoja, sudaro lakius aerozolius ir patenka į lakiųjų (kamino) pelenų sudėtį. Sunkiųjų metalų koncentracija biomasės degimo metu gautuose LP 2–20 kartų didesnė nei dugno pelenuose. Didžiausios koncentracijos yra Zn, Cd, Cu ir Pb elementų (Maldaris, 2017). Dėl šios priežasties atliekamos dažnos LP cheminės analizės, o dideli pelenų kiekiai utilizuojami nelaidžiose talpyklose, kad nepatektų į gruntinius vandenis.

Nustatyta, kad LP utilizuojant betone, toksiškos dalelės gali būti surištos geopolimerinėje struktūroje (Zhuang et al., 2016). Pelenai nuo seno naudojami kaip Ca, Mg, K, P ir mikroelementų šaltinis žemės ūkio augalams, tad atliekami bandymai konkrečiai LP panaudojimui žemės ūkyje. Rezultatai perspektyvūs – LP suteikia dirvožemiui maistinių medžiagų ir padidina derlių, bet reikalingi ilgalaikiai eksperimentai neigiamo poveikio nustatymui (Basu et al., 2009). Lietuvoje atlikti bandymai parodė, kad išbarsčius miško kuro pelenus miške, dirvožemiai pašarmėja ir praturtėja visomis, išskyrus azotą, augalams reikalingomis svarbiausiomis maisto medžiagomis (Ozolinčius et al., 2011). Be to, miško paklotėje padidėja ir kai kurių sunkiųjų metalų koncentracijos, tačiau jos neviršija didžiausių leistinų koncentracijų, netgi į vieną hektarą išbėrus 5 t nestabilizuotų (lakiųjų) pelenų. Ozolinčius (2011) pateikia pagrindinius miško kuro pelenų poveikius miškams:

Miško kuro pelenus tikslingiausia naudoti vadinamajam kompensuojamajam miškų tręsimui, t. y. tręšti tuos medynus, kuriuose buvo ruošiamas miško kuras. Tai atitiktų darnios miškininkystės principus. Pelenai būtų ne tik utilizuojami, bet ir miško ekosistemoms kompensuojami maisto medžiagų nuostoliai dėl medienos ir kirtimų atliekų išvežimo. Tačiau, tręšiant miško kuro pelenais, miške būtina išvengti neigiamų pasekmių – biologinės įvairovės, ypač augalijos, nuskurdinimo, maisto medžiagų disbalanso, kenksmingų medžiagų (pvz., sunkiųjų metalų) sankaupų augalijoje ir dirvožemyje, jų patekimo į gilesnius dirvožemio horizontus bei į gruntinius vandenis. Miško kuro pelenų negalima barstyti arčiau 50 m iki atvirų vandens telkinių (upelių, melioracinių griovių ar pan.) ar užmirkusių plotų. Be to, kompensuojamasis tręšimas neturėtų būti vykdomas žiemą, esant sniego dangai, arba pavasarinio polaidžio metu, nes yra pavojus, kad pelenai ar jų cheminės medžiagos gali patekti į vandens telkinius (Ozolinčius et al., 2011).

2. BANDYMŲ METODIKA

2.1. Bandymų eiga

Darbo tikslas – pagal vienašio gniuždymo rezultatus nustatyti trumpalaikį ir ilgalaikį molinio grunto sustiprėjimą, stiprinant jį lakiisiais pelenais gautais gaminant mineralinę vatą. Gruntbetonio bandiniai paruošti maišant portlandcementį (C), LP, molio miltelius (MM), smėlį (Sa) ir vandenį. Bandinių gamybai ir tyrimams buvo taikomi standartiniai metodai.

Bandiniai gaminami naudojant portlandcementį CEM I 42,5 R, atitinkantį LST EN 197-1:2011, lakiuosius pelenus, kurių cheminė sudėtis pateikta 2 lentelėje, molio miltelius, kurių cheminė sudėtis pateikta 3 lentelėje, ir smėlį, kurio savybės pateiktos 2.2 poskyryje. Kiekvienai skirtingai mišinio sudėčiai paruoštos trys cilindro formos partijos bandinių, kurių skersmuo 4,5 cm, aukštis 7,0 cm (santykis 1/1,5). Bandinių formos pagamintos iš PVC vamzdžių. Iš viso bandymuose tirta 15 skirtingų sudėčių, kurios pateiktos 4 lentelėje. Visų pirma paruošti penki cemento ir lakiųjų pelenų santykiai: 100 % C su 0 % LP, 90 % C su 10 % LP, 80 % C su 20 % LP, bei 70 % C su 30 % LP. Atskirai sumaišyti trys molio miltelių ir smėlio mišiniai, kuriuos sudaro 80 % MM ir 20 % Sa, 60 % MM ir 40 % Sa bei 40 % MM ir 60 % Sa.

2 lentelė. Lakiųjų pelenų cheminė sudėtis.

Cheminė sudėtis, %											
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	Cl	Kita	LOI
40,6	2,14	6,91	3,52	11,1	6,71	6,34	0,23	2,41	4,58	4,67	10,79

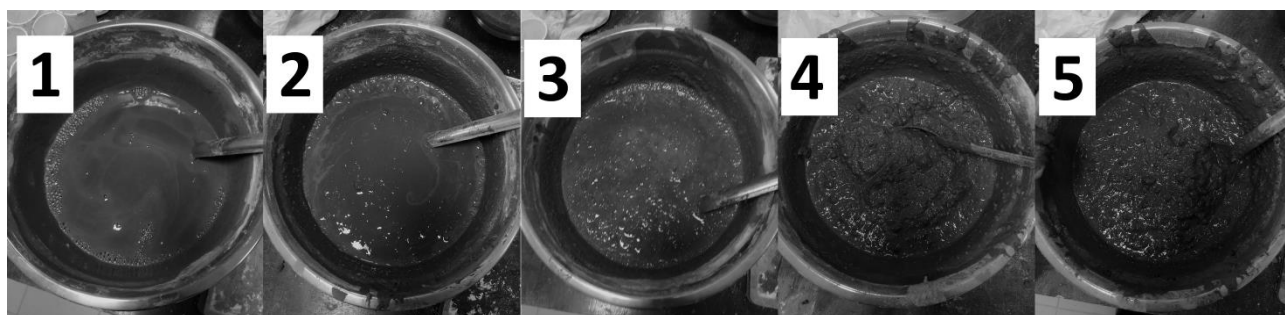
3 lentelė. Molio miltelių cheminė sudėtis.

Cheminė sudėtis, %									
SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
55,0-62,1	15,7-17,7	0,7-0,9	6,1-7,9	0,1-0,2	2,2-3,2	0,3-1,8	0,1-0,3	2,9-3,5	0,1-0,2

4 lentelė. Bandinių sudėtis.

Eil. nr.	C kiekis, %	LP kiekis, %	V/(C+LP)	MM kiekis, %	Sa kiekis, %
1	100	0	1	80	20
2	100	0	1	60	40
3	100	0	1	40	60
4	90	10	1	80	20
5	90	10	1	60	40
6	90	10	1	40	60
7	80	20	1	80	20
8	80	20	1	60	40
9	80	20	1	40	60
10	70	30	1	80	20
11	70	30	1	60	40
12	70	30	1	40	60
13	60	40	1,5	80	20
14	60	40	1,5	60	40
15	60	40	1,5	40	60

Cemento ir lakiųjų pelenų (C + LP) suspensija buvo maišoma su vandeniu santykiu 1:1, tačiau, didinant LP kiekį, suspensija tirštėjo ir tapo netinkama darbui (12 pav.), t. y. esant 60 % C + 40 % LP santykis padidintas iki 1:1,5. Skirtingiems LP tipams reikalingi skirtingi vandens santykiai, kad būtų galima pasiekti didžiausias gniuždomojo stiprio reikšmes (Fuller et al., 2018).



12 pav. Cemento ir lakiųjų pelenų (C+ LP) suspensija: 1– 100 % C + 0 % LP; 2 – 90% C + 10 % LP; 3 – 80% C+ 20 % LP; 4 – 70 % C + 30 % LP; 5 – 60 % C + 40 % LP

Sumaišyta cemento ir LP suspensija rankiniu būdu maišoma su moliniu gruntu (stambus užpildas nenaudojamas). C ir LP suspensijos maišymu su gruntu, imituojamas srautinis

injektavimas. Mišinys sluoksniais sudedamas į PVC vamzdžių formas, jį tankinant mentele. Perteklinis kiekis nubraukiamas ir paviršius nulyginamas.

Bandiniai po 24 valandų išimami iš formų ir laikomi eksikatoriuose drėgnoje aplinkoje (13 pav.). Drėgna aplinka – kai eksikatoriuose yra vandens, bet bandiniai į jį neįmerkiami. Jiems nustatytas tankis ir gniuždomasis stipris po 7, 28 parų ir 6 mėnesių.



13 pav. Bandiniai laikomi eksikatoriuose

2.2. Tiriamas smėlis

Grunto granulimetrinės sudėties nustatymas

Granulimetrinė sudėtis nustatyta sijoavimo (sietinės analizės) metodu. Sijojimas – tai procesas, kurio metu gruntas sugrupuojamas į skirtingo dydžio dalelių grupes. Granulimetrinė sudėtis yra užpildo dalelių pasiskirstymas pagal stambumą, išreikštą išbirų per nustatytą sietų skaičių masės procentais (Amšiejus et al., 2006). Smėlio granulimetrinė sudėtis nustatoma vadovaujantis LST CEN ISO/TS 17892-4:2017 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2017) reikalavimais.

Atlikus grunto granulimetrinės sudėties bandymą, sudaroma jo granulimetrinės sudėties kreivė. Pagal šią kreivę apskaičiuojamas grunto vienodumo koeficientas C_u ir granulimetrinės kreivės koeficientas C_c .

Tikslas – nustatyti smėlio granulimetrinę sudėtį pagal liekanas ant sietų, sijojant sausą smėlį pro standartinių sietų rinkinį.

Naudojama įranga:

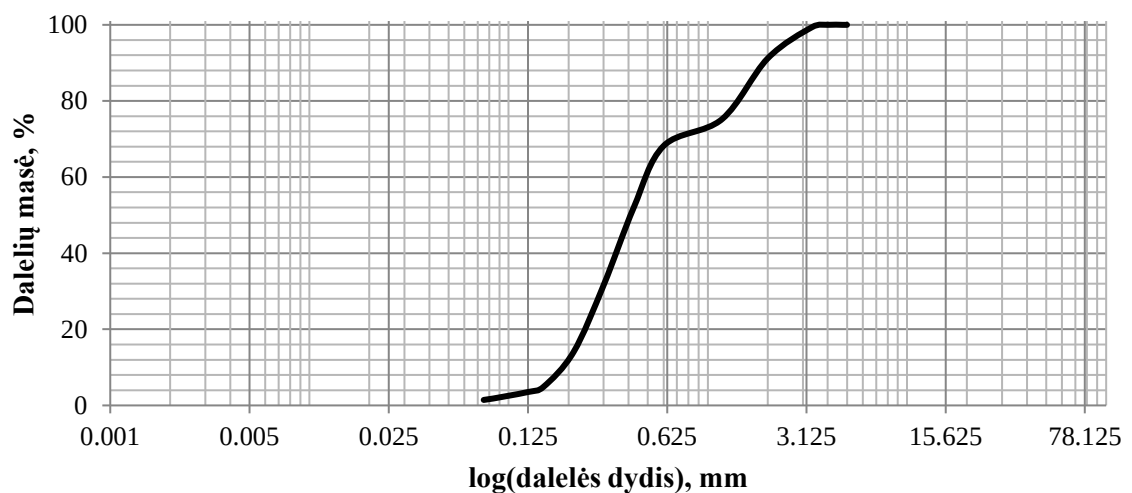
- džiovinimo spinta. Joje turi būti galima palaikyti temperatūras $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- svarstyklės. Tikslumas iki 0,3 % nuo sausojo bandinio masės, o atskaitymo tikslumas 0,1 % nuo sausojo bandinio masės;
- sietai (14 pav.). Privalo turėti gaudyklę. Sietų akučių skersmenys turi atitikti bandomojo grunto dalelių dydį, tačiau rekomenduojama, kad nuo 125 mm iki 63 μm būtų ne mažiau kaip 12 sietų. Mažiausios akutės skersmuo turi būti 63 μm arba panašus.



14 pav. Sietai granulimetrinei sudėčiai nustatyti

Bandymo eiga: smėlio bandinys išdžiovinamas ir atsveriamas 250 g smėlio. Atsvertas smėlis automatinio sijotuvu sijojamas pro standartinį sietų koloną. Sijoti baigiama, kai per 1 min pro kiekvieną sietą persijojama ne daugiau kaip 0,1 % bandinio masės. Gauti rezultatai ir pagal juos braižoma smėlio granulimetrinės sudėties kreivė (15 pav.). Bandymas kartojamas keturis kartus.



15 pav. Granulimetrinės sudėties kreivė

Apskaičiuojamas grunto vienodumo koeficientas C_u :

$$C_u = d_{60}/d_{10} = 0,5114/0,1845 = 2,77. \quad (1)$$

Apskaičiuojamas granulimetrinės kreivės koeficientas C_c :

$$C_c = (d_{30})^2/(d_{60} \cdot d_{10}) = (0,2919)^2/(0,5114 \cdot 0,1845) = 0,9. \quad (2)$$

Išvada: Remiantis granulimetrine kreive ir apskaičiuotais grunto vienodumo koeficientu bei granulimetrinės kreivės koeficientu nustatyta, kad gruntas yra vienodos sanklodos smėlis.

2.3. Nagrinėjamas molinis gruntas

Molinis gruntas maišomas naudojant molio miltelius (2 lentelė) ir smėlį iš 2.2 poskyrio. Sumaišomi trys skirtingi mišiniai: 80 % MM ir 20 % Sa; 60 % MM ir 40 % Sa; 40 % MM ir 60 % Sa. Šiems gruntams nustatomi takumo, plastiškumo drėgniai ir plastiškumo rodikliai.

Molinių gruntų plastiškosios būsenos (Aterbergo) ribų nustatymas

Takumo drėgnis W_L – laboratorijoje nustatytas išminkyto molinio grunto drėgnis, kai gruntas pereina iš plastiškosios būsenos į takiąją, ir atvirkščiai. Jis nustatomas smeigiant į gruntą standartinį kūgį (Amšiejus et al., 2006).

Plastiškumo drėgnis W_p – laboratorijoje nustatytas išminkyto molinio grunto drėgnis, kuriam esant gruntas pereina iš kietosios būsenos į plastiškąją, ir atvirkščiai. Jis nustatomas kočiojant gruntą pirštais (Amšiejus et al., 2006).

Plastiškumo rodiklis I_p apskaičiuojamas pagal formulę:

$$I_p = W_L - W_p. \quad (3)$$

Takumo ir plastiškumo ribos nustatomos vadovaujantis LST CEN ISO/ TS 17892-12:2018 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2018) reikalavimais.

Tikslas – nustatyti molinio grunto plastiškosios būsenos ribas: takumo drėgnį W_L ir plastiškumo drėgnį W_p bei plastiškumo rodiklį I_p .

Naudojama įranga:

- prietaisas takumo drėgniui nustatyti (16 pav.) – standartinis kūgis, kurio masė 80 g, o viršūnės kampas 30°;
- elektroninės svarstyklės, kurių tikslumas 0,01 g;
- metaliniai indeliai su sandariais dangteliais (biuksai);
- džiovavimo spinta. Joje turi būti galima palaikyti temperatūros $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.



16 pav. Prietaisas takumo drėgniui nustatyti

Bandymo eiga:

Plastiškumo nustatymas – apie 200 g grunto išsijojama, kad neliktų dalelių didesnių nei 0,4 mm, gruntas sudrėkinamas švariu vandeniu ir minkomas, kol gaunama tiršta masė. Pasta dedama į bandymo indą, kad neliktų tarpų ir išlyginamas viršus. Standartinio kūgio smaigalys prigludžiamas prie grunto paviršiaus ir paleidžiamas savuoju svoriu smigti 5 sek. Jei kūgis įsmigo 20 mm, pasiektas takumo drėgnis W_L . Galima interpoliacija, bet įsmigio gylis turi būti tarp 20–25 mm. Bandymas kartojamas 3 kartus ir iš kiekvieno bandinio į sandarius indelius su dangteliais (biuksus) įdedamos dvi grunto dalys. Jos pasveriamos, išdžiovinamos (17 pav.) ir vėl pasveriamos. Drėgnis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$W = m_w / m_s \cdot 100 \% . \quad (4)$$

čia m_w drėgno grunto masė, m_s išdžiovinoto grunto masė.



17 pav. Bandinių džiovinimas krosnyje

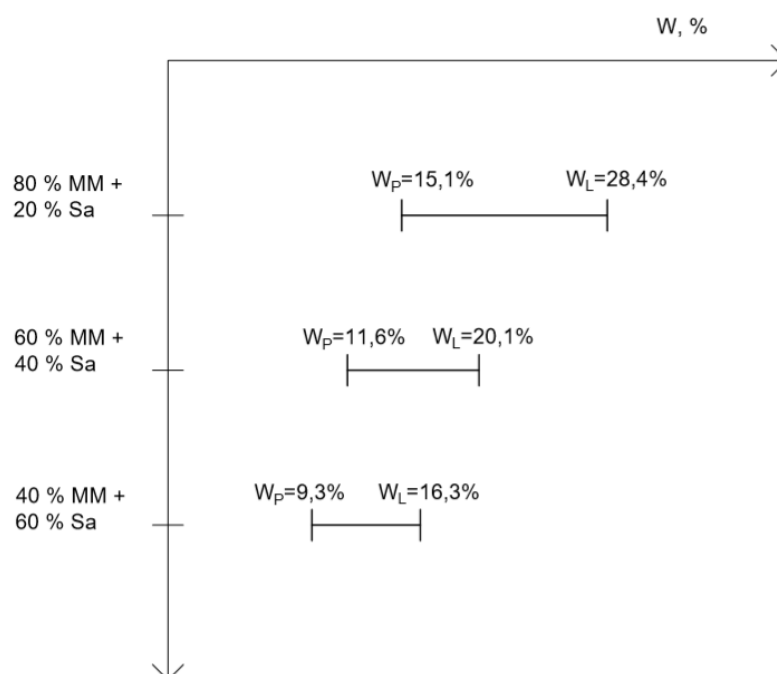
Takumo nustatymas – bandymui naudojama ta pati molinio grunto pasta kaip ir plastiškumo nustatymo metu. Apie 20 g pastos kočiojama tarp delnų, o vėliau su pirštais ant stiklinės plokštelės tol, kol molio volelis tampa apie 3 mm pločio. Jei volelyje kas 3 – 10 mm atsiranda skersiniai plyšiai (18 pav.), gruntas pasiekia plastiškumo drėgnį. Jei plyšių neatsiranda, gruntą reikia perminkyti, padžiovinti ir kočioti iš naujo. Jei grunto plyšiai atsiranda anksčiau nei pasiekus 3 mm storį, gruntas per sausas. Reikia perminkyti papildomai sudrėkinus ir vėl kartoti procedūrą. Plastiškumo drėgnį pasiekę voleliai sudedami į sandarius indelius (iš vienos partijos du po 10 g), pasveriami, išdžiovinami ir vėl pasveriami. Bandymas atliekamas 3 kartus. Plastiškumo drėgnis apskaičiuojamas pagal 4 formulę.



18 pav. Plastiškumo drėgnio nustatymas

Plastiškumo rodiklio nustatymas – pagal gautus duomenis iš plastiškumo ir takumo drėgnių nustatytomo, apskaičiuojamas taikant 3 formulę.

Sudaroma plastiškumo ir takumo drėgnių suvestinė pagal gruntų mišinius (19 pav.).



19 pav. Molio mišinių plastiškumo ir takumo drėgniai (Zakarka et al., 2019)

Išvada: Remiantis plastiškumo ir takumo drėgniu suvestine bei nustatytais plastiškumo drėgniais, visi gruntų mišiniai yra moliniai gruntai.

2.4. Vienaašio gniuždomojo stiprio nustatymas

Betono gniuždomasis stipris – tai betono, kuris suyra veikiamas gniuždymo apkrovos, stiprumo riba. Taigi, dirbant su bet kokio tipo betonu, svarbiausia nustatyti šią savybę. Bandymas atliekamas vadovaujantis LST EN 12390-3:2009 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 009) reikalavimais.

Tikslas – nustatyti gruntbetonio su lakiųjų pelenų priemaiša vienaašį gniuždomąjį stiprį.

Naudojama įranga:

- Slankmatis, kurio tikslumas 0,01 mm;
- Elektroninės svarstyklės, kurių tikslumas 0,01 g;
- Skaitmeninis gniuždymo presas.

Bandymo eiga:

Gruntbetonio bandiniai išimami iš eksikatorijų, pasveriami (tankio nustatymui) ir su slankmačiu išmatuojami matmenys. Skersmuo matuojamas 6 kartus – skirtingomis kryptimis bandinio viršuje, viduryje, apačioje. Aukštis trijose vietose (bandinį suskirsčius į 3 lygias dalis). Išvedami reikšmių vidurkiai bei apskaičiuojamas skerspjuvio plotas (5 lentelė).

5 lentelė. Bandinių matmenų nustatymas.

Nr.	Skersmuo, mm							Aukštis, mm				Plotas
	1	2	3	4	5	6	Vidurkis	1	2	3	Vidurkis	cm ²
1	47	46	45	46	46	46	46	70	68	69	69	16,61
2	45	45	46	47	46	46	45,8	69	69	69	69	16,49
3	46	47	46	46	46	46	46,2	70	71	70	70,3	16,73

Cilindro formos bandinių paviršiai, kurie remiasi į presą, nušlifuojami ir statomi į preso centrą. Preso viršutinė atrama yra su lanksčia jungtimi. Jei neišlaikytas bandinio atramų lygiagretumas, lankstas pasisuka taip, kad priglustų visa plokštuma (20 pav.).



20 pav. Bandinio gniuždymas presu

Pradedamas gniuždymas. Pasirinktas apkrovimo greitis 1,0 mm/min. Nustatoma bandinio suirimo apkrova (21 pav.). Vienašis gniuždomasis stipris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f = F/A. \quad (5)$$

čia F – suardymo apkrova; A – bandinio skerspjūvio plotas.

Gniuždomasis stipris nustatomas kiekvienos rūšies mišiniams 3 kartus ir išvedamas vidurkis.

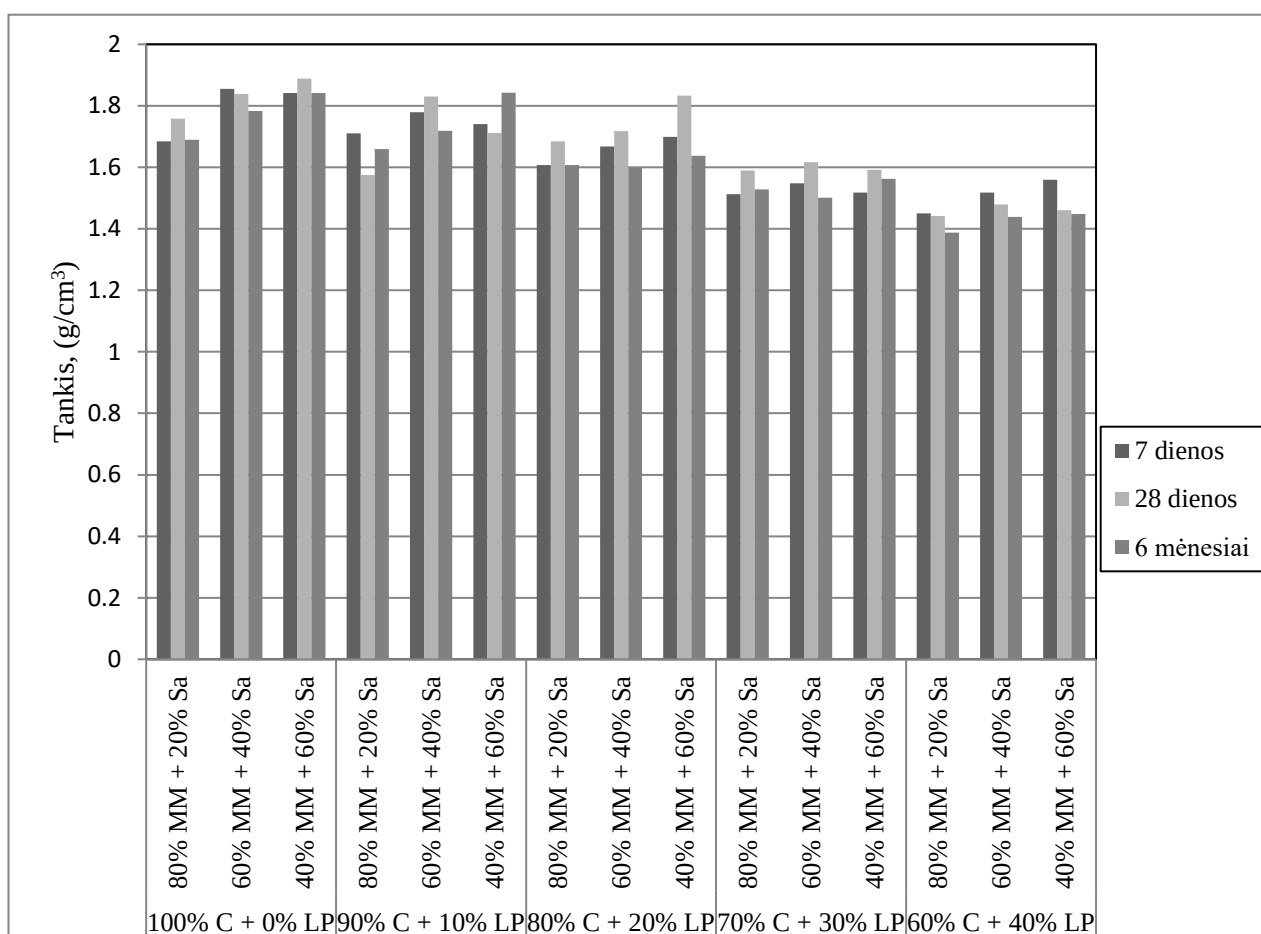


21 pav. Suardyti bandiniai

3. REZULTATŲ ANALIZĖ

3.1. Bandinių tankis

Prieš nustatant vienašį gniuždomąjį stiprį, nustatytas bandinių tankis (22 pav.). Jis gautas matuojant bandinių gabaritus ir juos sveriant. Tankis tarp tos pačios sudėties bandinių, bandomų po skirtingo laiko tarpo, vidutiniškai skiriasi 3,6 %, o didžiausias skirtumas yra 7,9 %. Mažiausias tankis lygus $1,388 \text{ g/cm}^3$, kuris buvo pasiektas po 6 mėnesių esant 60 % C + 40 % LP ir 80 % MM + 20 % Sa. Didžiausias tankis lygus $1,889 \text{ g/cm}^3$, kuris buvo pasiektas po 28 parų esant 100 % cemento ir 40 % MM + 60 % Sa. Tankis didėja didinant smėlio santykį mišinyje, taip pat cemento santykį mišinyje.

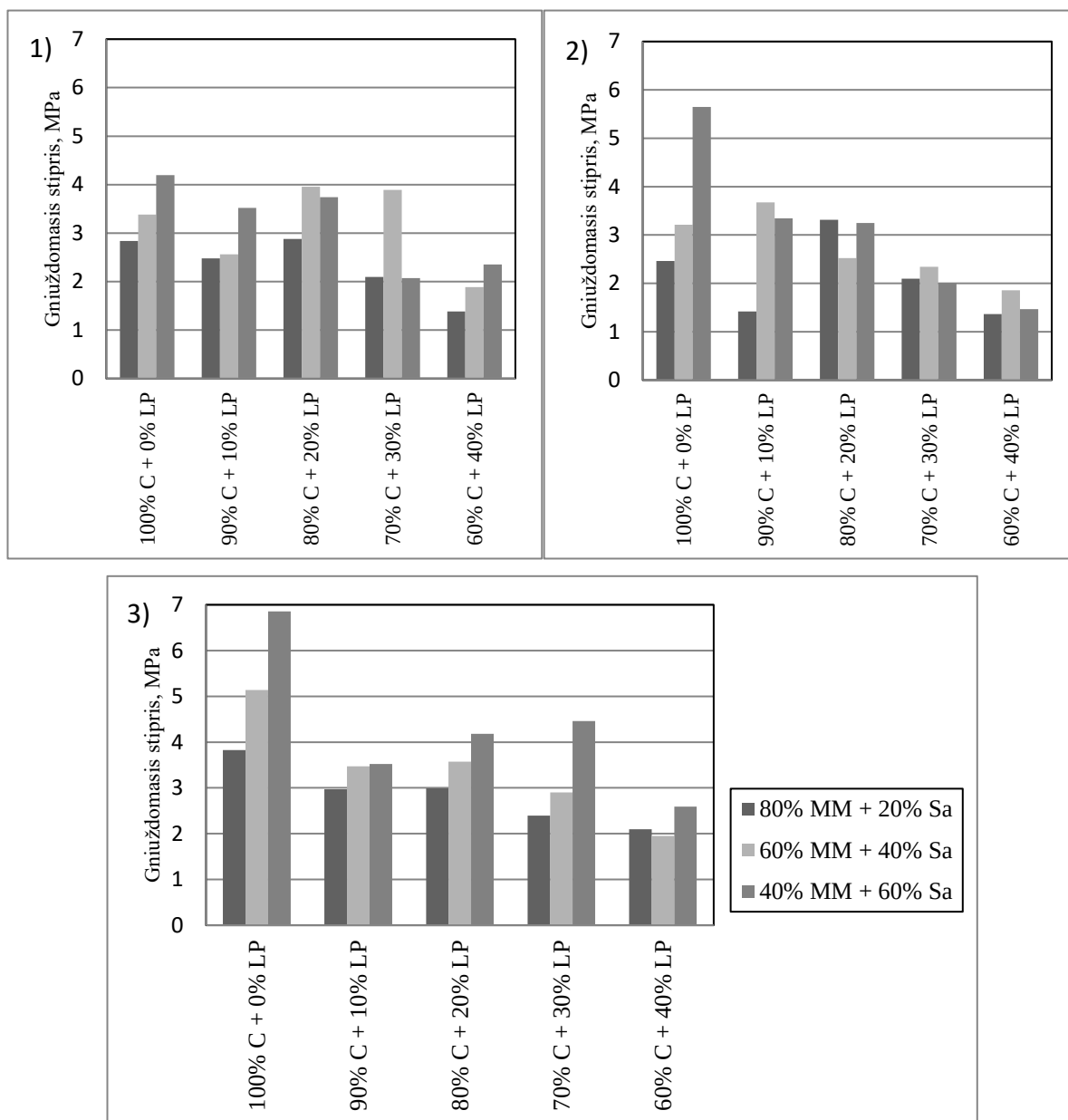


22 pav. Bandinių tankis

3.2. Vienašis gniuždomasis stipris

Kaip etaloniniai rezultatai yra naudojami duomenys, gauti iš bandinių, kuriuose nėra LP. Šie vienašio gniuždymo bandymų rezultatai aiškiausi ir labiausiai prognozuojami (23 pav.). Didžiausi gniuždomieji stipriai pasiekti, kai gruntbetonį sudaro 100 % C + 0 % LP ir 40 % MM + 60 % Sa. Po 7 parų jis lygus 4,19 MPa, po 28 parų – 5,64 MPa, po 6 mėnesių – 6,85 MPa. Mažiausi gniuždomieji stipriai gauti, kai gruntbetonį sudaro 60 % C + 40 % LP, po 7 parų jis lygus 1,39 MPa

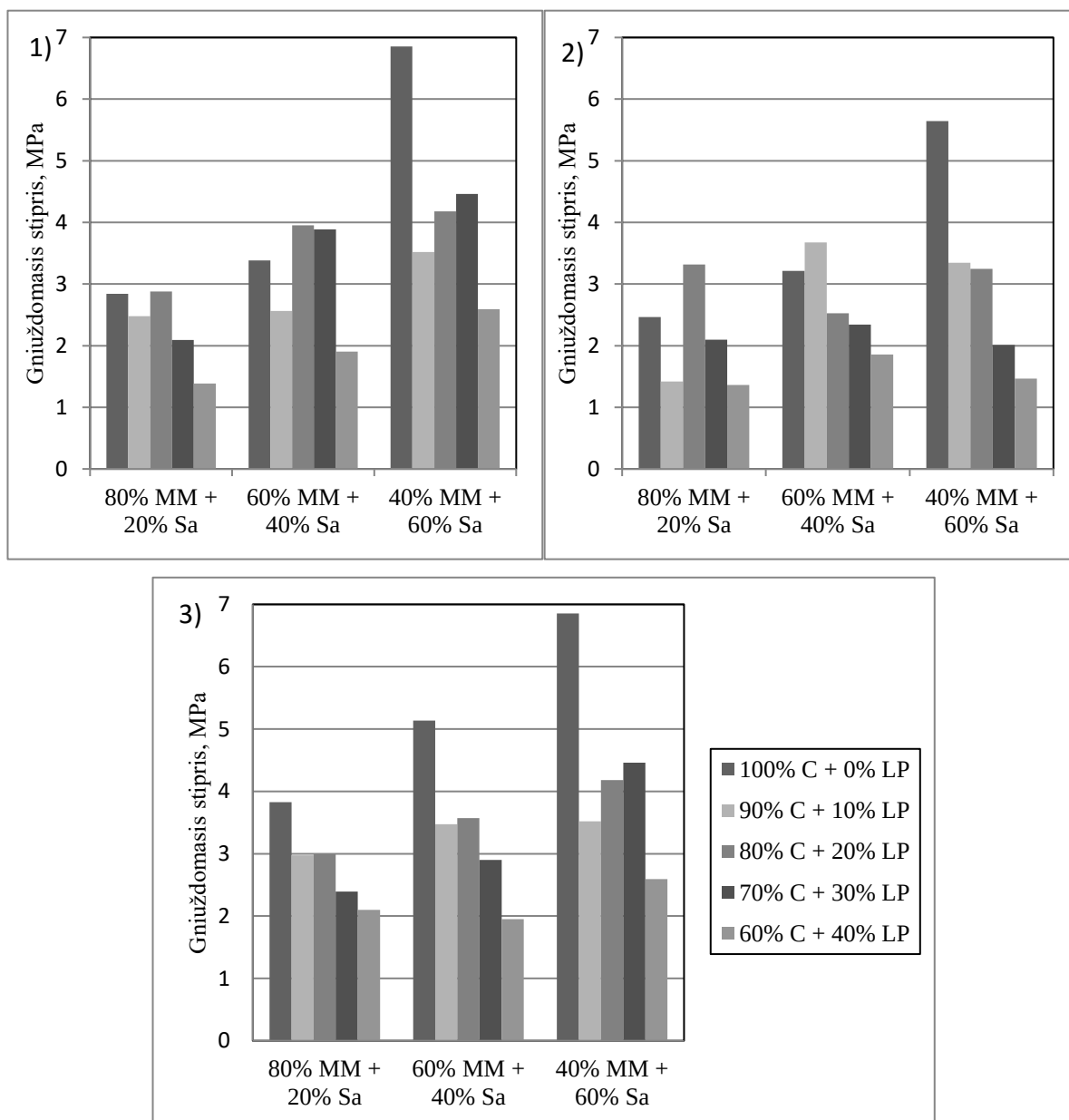
(80 % MM + 20 % Sa), po 28 parų – 1,36 MPa (80 % MM + 20 % Sa), po 6 mėnesių – 1,95 MPa (60 % MM + 40 % Sa). Kada bandiniai gaminami naudojant 100 % cementą be LP priedo, didinant smėlio kiekį, gerėja gniuždomojo stiprio rezultatai. Ši tendencija galioja bandiniuose išbandytuose po 6 mėnesių (išskyrus rezultatus, kai mišinį sudaro 60 % C ir 40 % LP). Bandymuose atliktuose po 28 parų, smėlio priedas gniuždomojo stiprio rezultatams įtakos neturi.



23 pav. Gniuždomasis stipris vertinant MM ir Sa santykį: 1 – po 7 parų; 2 – po 28 parų; 3 – po 6 mėnesių

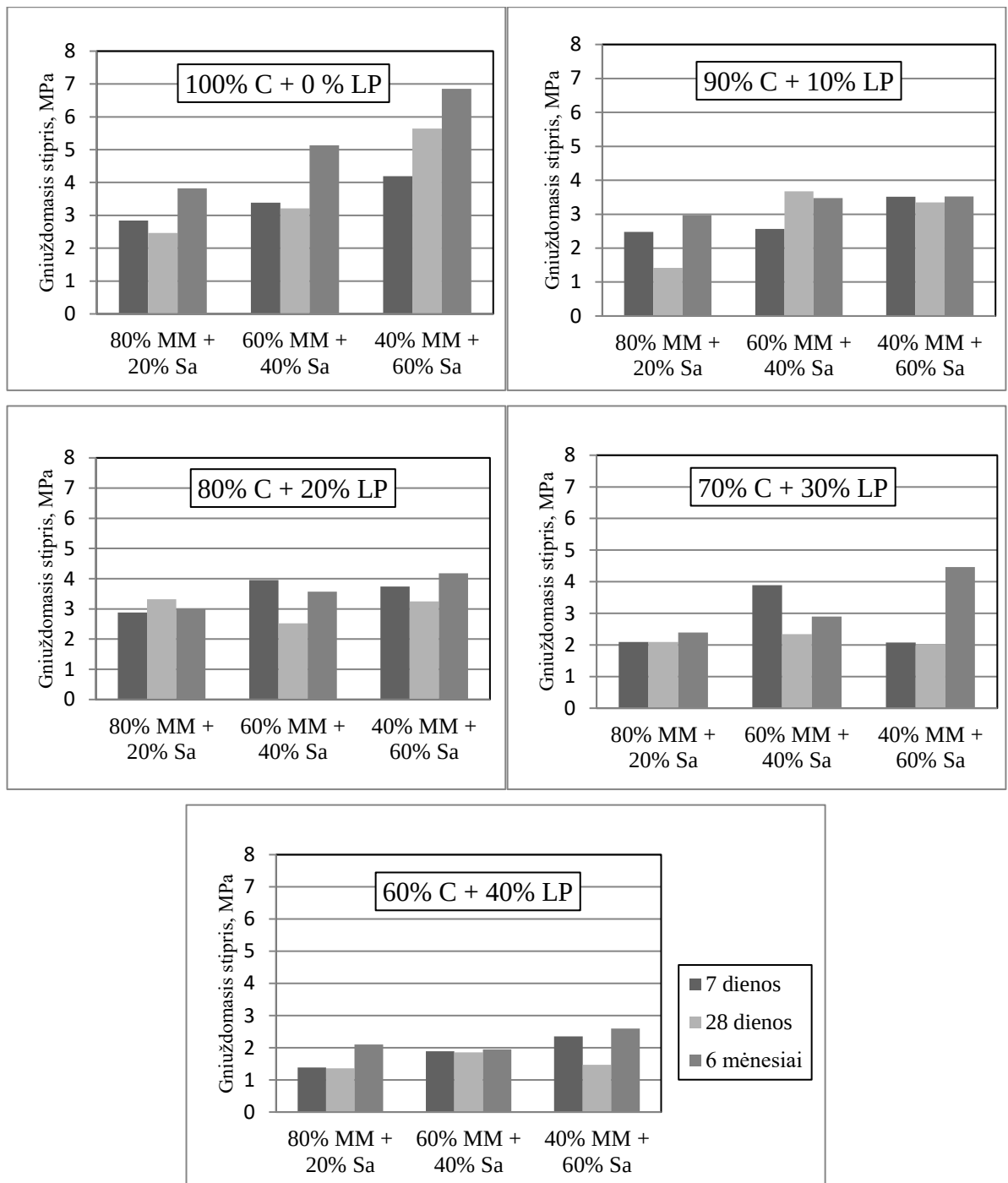
Kada rezultatai išskaidomi pagal bandinių išlaikymo trukmę ir C bei LP santykį, išryškėja smėlio priedo įtaka vienašio gniuždomojo stiprio rezultatams (24 pav.). Didinant smėlio santykį molinio grunto mišinyje, gerėja gniuždomasis stipris, bet tai atsispindi rezultatų suvestinėje, o ne visuose rezultatuose. Didinant lakiųjų pelenų kiekį C ir LP suspensijoje, visada gaunamas stiprio

sumažėjimas lyginant tarp 100 % C + 0 % LP ir 60 % C + 40 % LP. Esant kitiems C ir LP santykiams, rezultatas nėra pastovus.



1 pav. Gniuždomasis stipris vertinant C ir LP santykį: 1 – po 7 parų; 2 – po 28 parų; 3 – po 6 mėnesių

Rezultatai analizuojami pagal bandinių išlaikymo laiką. Esant 100 % C + 0 % LP ir 40 % MM + 60 % Sa, stiprio reikšmės didėjo tolygiai vertinant rezultatus skirtingais laiko tarpais. Kada 100 % C bandiniai buvo maišomi su 80 % MM + 20 % Sa ir 60 % MM + 40 % Sa, stiprio reikšmės po 28 parų, lyginant su 7 parų reikšmėmis, susilpnėjo, o po 6 mėnesių sustiprėjo. Didinant LP santykį nuo 10 iki 30 %, bandinių stiprio rezultatai svyruoja nežymiai ir didelio gniuždomojo stiprio pokyčio neturi.



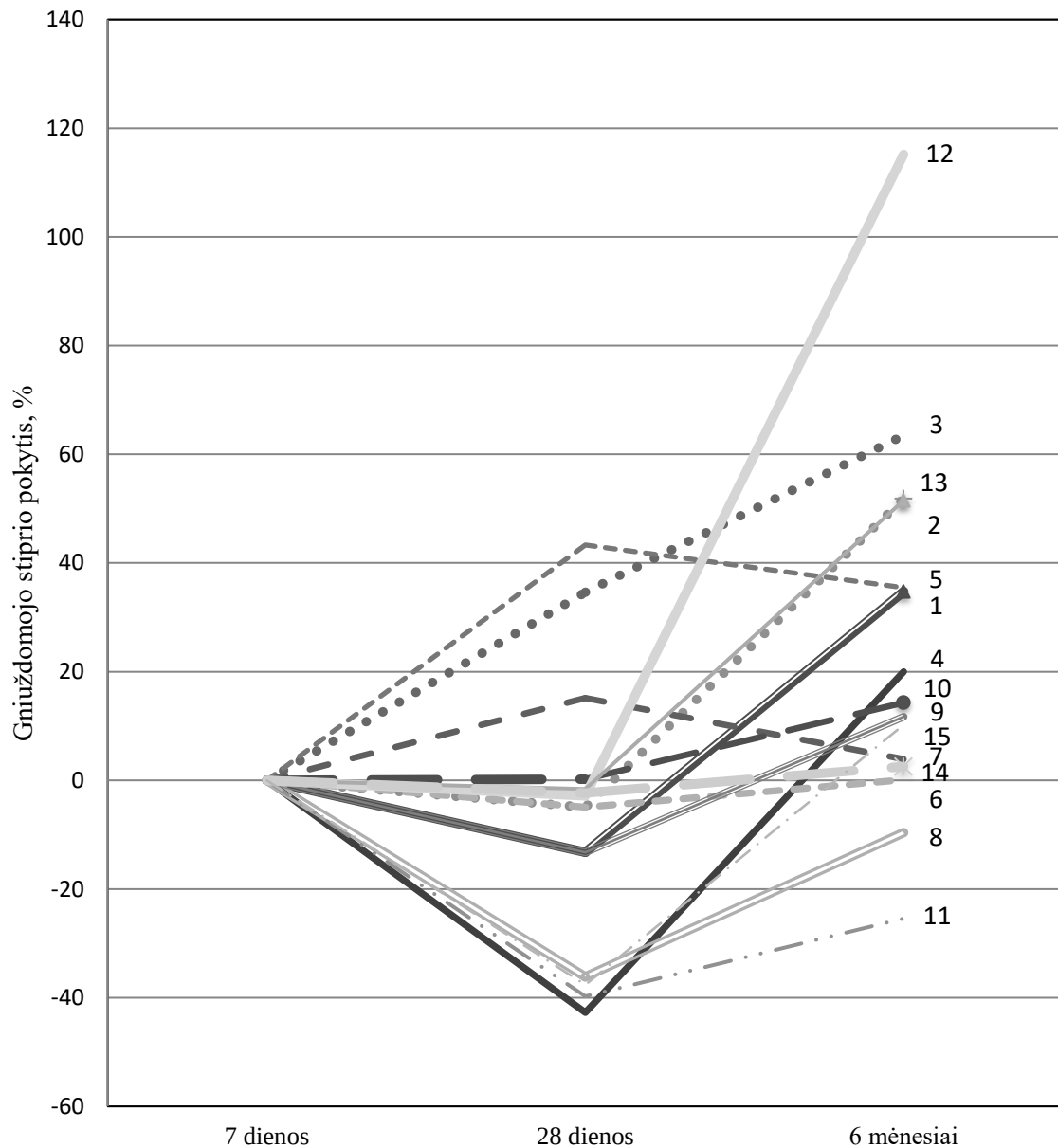
25 pav. Bandinių gniuždomasis stipris pagal išlaikymo trukmę

Esant akivaizdžiam gniuždomojo stiprio susilpnėjimui po 28 parų, mišinių rezultatai suskirstomi pagal išlaikymo trukmę. Dvylikos iš penkiolikos mišinių stipris po 28 parų (lyginant su 7 paromis) susilpnėjo (26 pav.). Didžiausias susilpnėjimas siekė 43 %. Mišiniai, kuriuos sudarė 80 % C + 20 % LP ir 80 % MM + 20 % Sa; 100 % C ir 40 % MM + 60 % Sa; 90 % C + 10 % LP ir 60 % MM + 40 % Sa, po 28 parų, lyginant su 7 paromis, stipris padidėjo (didžiausias sustiprėjimas 43 %). Po 6 mėnesių, lyginant su po 28 parų, trylikos iš penkiolikos bandinių stipris padidėjo. Susilpnėjo bandiniai, kuriuos sudarė 90 % C + 10 % LP ir 60 % MM + 40 % Sa; 80 % C + 20 % LP ir 80 % MM + 20 % Sa. Po 28 parų buvo šių bandinių sustiprėjimas, lyginant su rezultatais po 7

parų. Trylikos iš penkiolikos mišinių stipriai po 6 mėnesių padidėjo, lyginant su stipriais po 7 parų (padidėjimas iki 115 %). Susilpnėjo rezultatai bandinių, kuriuos sudarė 70% C + 30 % LP ir 60 % MM + 40 % Sa; 80 % C + 20 % LP ir 60 % MM + 40 % Sa (didžiausias susilpnėjimas 38 %).

Panašaus tipo susilpnėjimai buvo pastebėti ir kituose tyrimuose. Pavyzdžiui molinius gruntus stiprinant kalkėmis, kada stipris gniuždant po 28 parų buvo mažesnis nei po 14 parų (Geivelis, 2015). Kitas atvejis, kai gruntas buvo stabilizuojamas tik LP, tada gniuždomasis stipris po 28 parų sumažėjo, lyginant su stipriu po 7 parų, bet vėliau vėl pradėjo didėti (Kamon et al., 2000). Tačiau Kamono (2000) tirtu atveju sumažėjimas nepasireiškė, kai į mišinį buvo pridėta bent 10 % LP.

Mišiniai: 1 – 100% C + 0% LP ir 80% MM + 20% Sa; 2 – 100% C + 0% LP ir 60% MM + 40% Sa; 3 – 100% C + 0% LP ir 40% MM + 60% Sa; 4 – 90% C + 10% LP ir 80% MM + 20% Sa; 5 – 90% C + 10% LP ir 60% MM + 40% Sa; 6 – 90% C + 10% LP ir 40% MM + 60% Sa; 7 – 80% C + 20% LP ir 80% MM + 20% Sa; 8 – 80% C + 20% LP ir 60% MM + 40% Sa; 9 – 80% C + 20% LP ir 40% MM + 60% Sa; 10 – 70% C + 30% LP ir 80% MM + 20% Sa; 11 – 70% C + 30% LP ir 60% MM + 40% Sa; 12 – 70% C + 30% LP ir 40% MM + 60% Sa; 13 – 60% C + 40% LP ir 80% MM + 20% Sa; 14 – 60% C + 40% LP ir 60% MM + 40% Sa; 15 – 60% C + 40% LP ir 40% MM + 60% Sa.



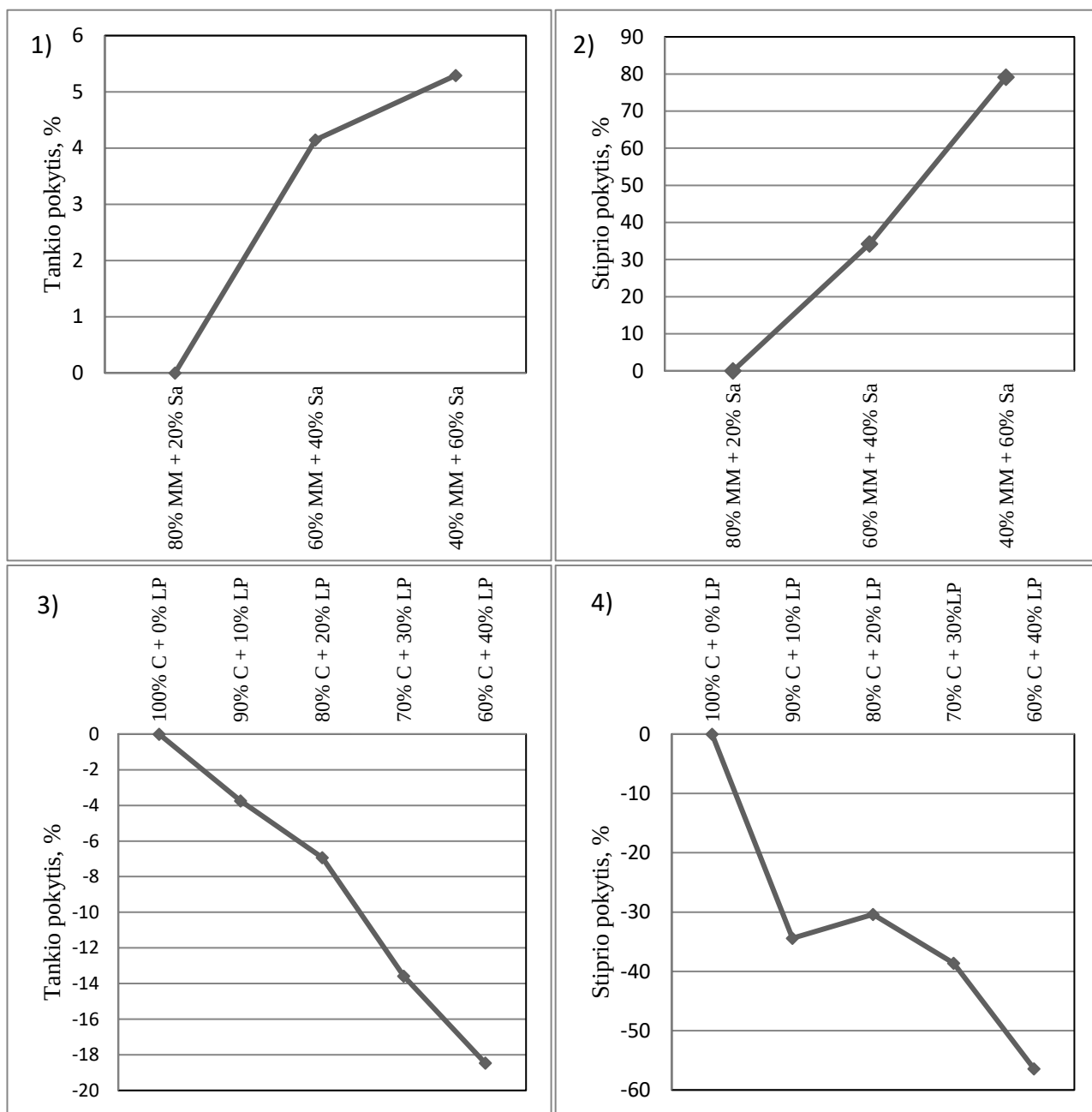
26 pav. Santykinis stiprio kitimas po 28 parų ir 6 mėnesių lyginant su stipriu po 7 parų

3.3. Smėlio ir lakiųjų pelenų įtaka bandinių tankiui ir stipriui

Smėlio ir lakiųjų pelenų įtaka bandinių tankiui pavaizduota 27 pav. Smėlio įtaka tankiui, lyginant 80 % MM + 20 % Sa ir 60 % MM + 40 % Sa, padidėjo 4,15 %. Lyginant 80 % MM + 20 % Sa ir 40 % MM + 60 % Sa – tankis padidėjo 5,29 %. Lakiųjų pelenų įtaka tankiui, lyginant su 100 % cemento ir pridedant po 10 % LP, mažėja 3,7 %; 6,9 %; 13,6 % ir 18,5 %.

Bandinių stipris, lyginant 80 % MM + 20 % Sa ir 60 % MM + 40 % Sa, padidėjo 34,2 %, o lyginant 80 % MM + 20 % Sa ir 40 % MM + 60 % Sa – 79,2 % (27 pav. 2). Stipris, lyginant su 100 % C ir pridedant po 10 % LP, mažėja 34,4 %; 30,4 %; 38,6 % ir 56,4 % (27 pav. 4). Kai LP

santykis su C yra tarp 10 – 30 %, stiprio pokytis svyruoja 5 % intervale ir nėra tendencingas reiškiny.

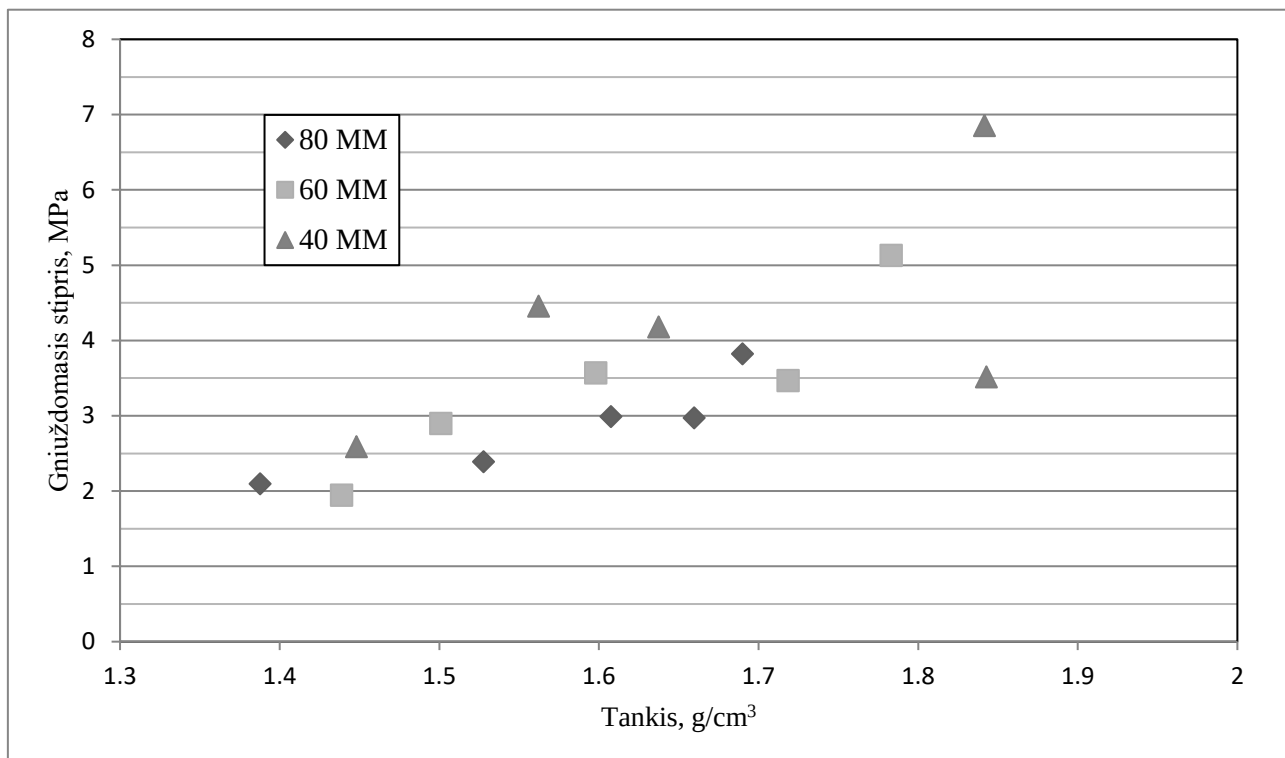


27 pav. Smėlio ir lakiųjų pelenų poveikis tankiui ir gniuždomajam stipriui: 1 – Sa poveikis tankiui; 2 – Sa poveikis stipriui; 3 – LP poveikis tankiui; 4 – LP poveikis stipriui

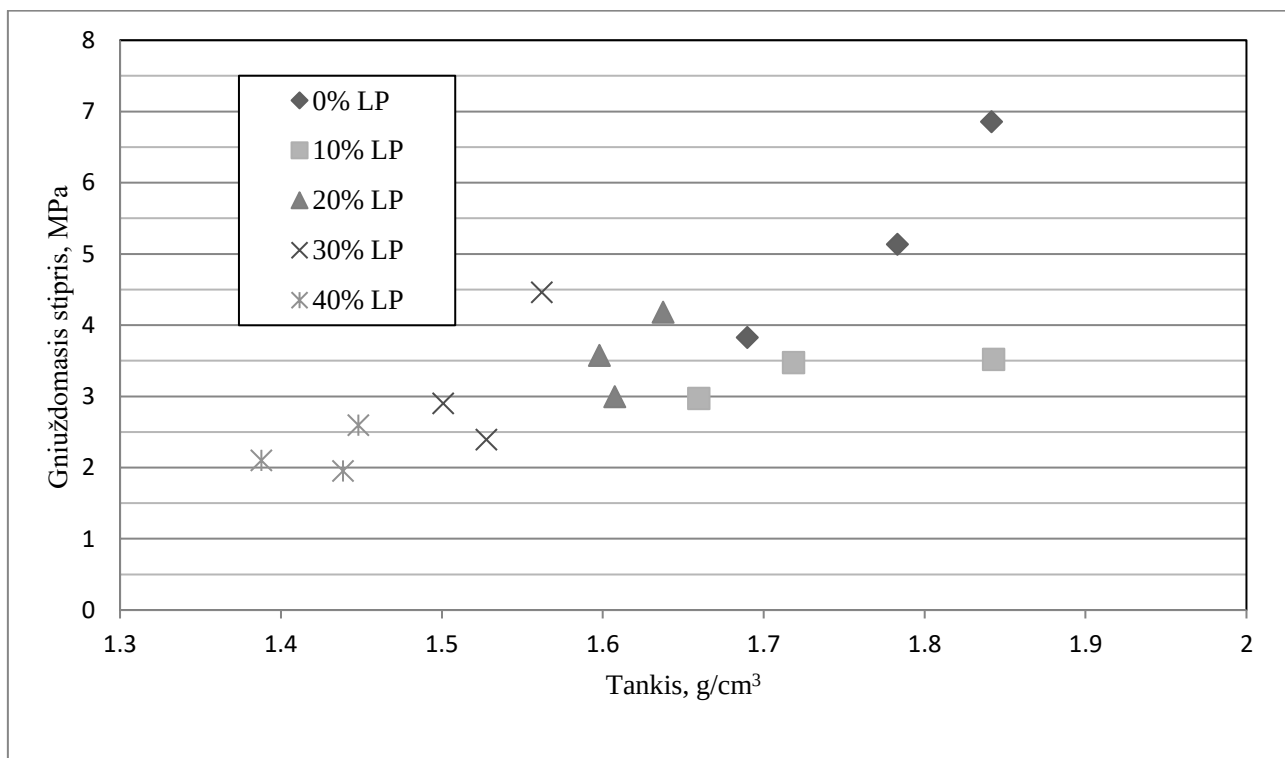
3.4. Tankio ir gniuždomojo stiprio priklausomybės nuo smėlio ir lakiųjų pelenų

Tankio ir gniuždomojo stiprio priklausomybės nuo smėlio ir lakiųjų pelenų pateiktos 28 pav. ir 29 pav. Didinant smėlio kiekį mišiniuose, didėja bandinių tankis ir stipris, o didinamas LP kiekis mažina tankį. Esant 10 – 30 % LP kiekiui, LP stipriui įtakos neturi. Mažiausias tankis gautas bandinyje, kuriame yra 80 % MM + 20 % Sa, o mažiausias stipris – 60 % MM + 40 % Sa.

Didžiausias tankis ir stipris – 40 % MM + 60 % Sa. Nors tam tikros tendencijos yra, bet bandinių tankis aiškos įtakos stipriui neturi.



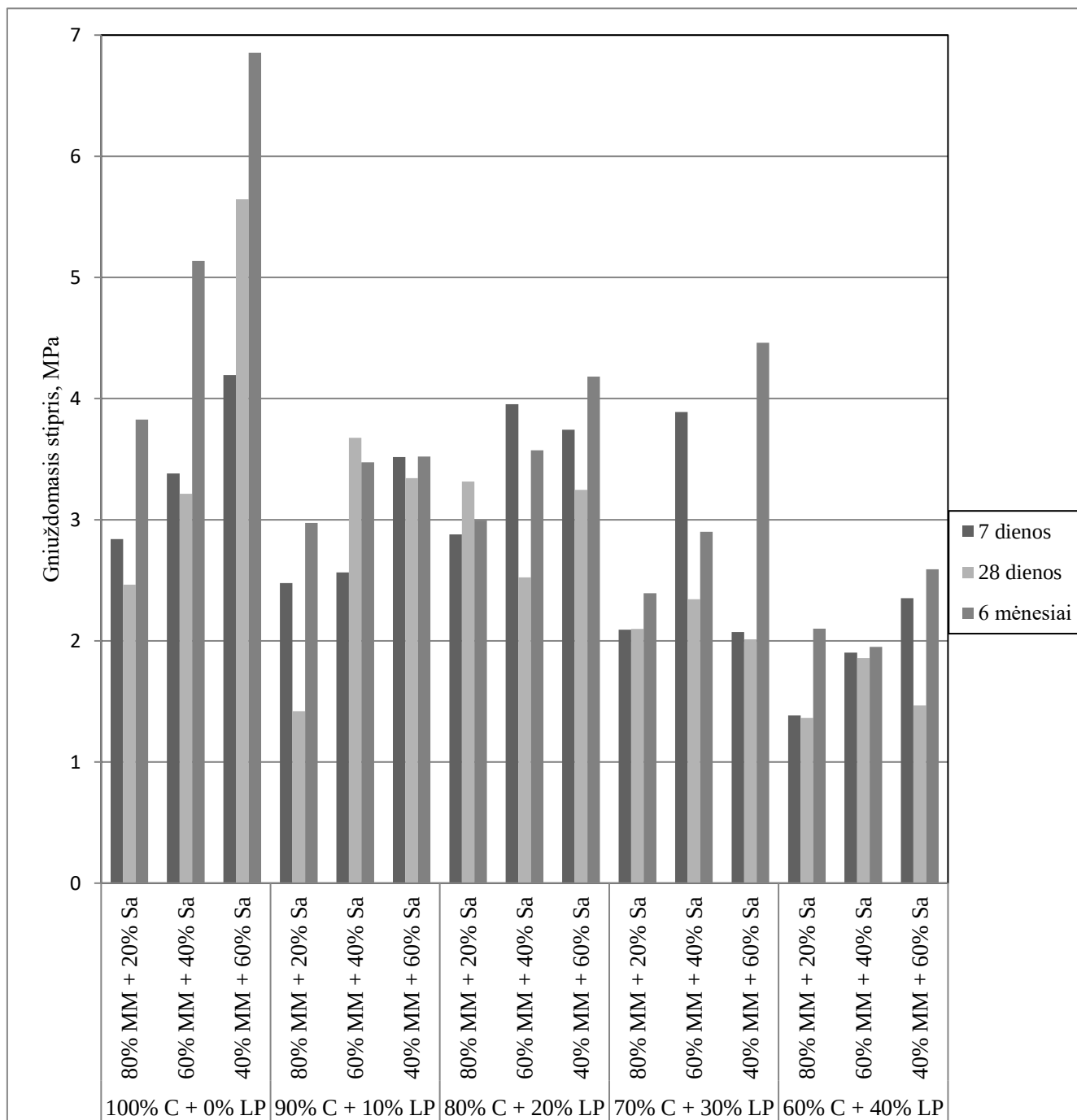
28 pav. Tankio ir gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo smėlio priemaišų molyje



29 pav. Tankio ir gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo lakiųjų pelenų priedo prie cemento

Visų tirtų bandinių gniuždomojo stiprio rezultatai pateikti 30 pav. Išryškėja etaloninių bandinių (100 % C + 0 % LP) didesnis stipris. Jei gniuždomojo stiprio rezultatai po pusės metų būtų

galutiniai, tai 100 % C + 0 % LP ir 40 % MM + 60 % Sa gruntbetonis per 28 paras įgavo daugiau nei 80 % savo galutinio stiprio, kas atitiktų teorinius rezultatus (6 lentelė). Rezultatai, kuriuose didesnis molio molinio grunto kiekis ar LP kiekis, šio kriterijaus neatitinka. Kada gruntbetonyje yra 10 – 30 % LP, gniuždomasis stipris aiškos tendencijos neatspindi. Rezultatų sumažėjimas atsiranda LP kiekį padidinus iki 40 %.



30 pav. Gniuždomojo stiprio suvestinis grafikas

6 lentelė. Stiprio vertė po 28 parų procentais nuo galutinio stiprio

C + LP santykis	MM + Sa santykis	Stipris (MPa) po 28 parų	Stipris (MPa) po 6 mėn	Stiprio vertė po 28 parų nuo galutinio stiprio, %
100% C + 0% LP	80% MM + 20% Sa	2,4634	3,8259	64,39
	60% MM + 40% Sa	3,2144	5,1351	62,60
	40% MM + 60% Sa	5,6444	6,8542	82,35
90% C + 10% LP	80% MM + 20% Sa	1,4190	2,9730	47,73
	60% MM + 40% Sa	3,6752	3,4737	105,80
	40% MM + 60% Sa	3,3434	3,5206	94,97
80% C + 20% LP	80% MM + 20% Sa	3,3161	2,9922	110,82
	60% MM + 40% Sa	2,5243	3,5732	70,64
	40% MM + 60% Sa	3,2470	4,1811	77,66
70% C + 30% LP	80% MM + 20% Sa	2,0978	2,3923	87,69
	60% MM + 40% Sa	2,3431	2,9003	80,79
	40% MM + 60% Sa	2,0135	4,4602	45,14
60% C + 40% LP	80% MM + 20% Sa	1,3638	2,0998	64,95
	60% MM + 40% Sa	1,8587	1,9512	95,26
	40% MM + 60% Sa	1,4667	2,5917	56,59

3.5. Suirimo plokštuma

Suardžius bandinius, galima matyti mišinių išsimašymą ir pasiskirstymo tolygumą (31 pav.) Išdžiuvusio gruntbetonio spalvai didžiausią įtaką turi molio miltelių kiekis (32 pav.) Kuo mišinyje daugiau MM, tuo gruntbetonis tamsesnis ir rudesnis. Didėjant LP kiekiui, gruntbetonis tampa tamsesnis. Bandinių išlaikymo trukmė spalvai įtakos neturi, bet kuo daugiau MM mišinyje, tuo gruntbetonis atrodo drėgnesnis (ryškesnės spalvos). Priešingas poveikis matomas didinant cemento kiekį – kuo daugiau cemento, tuo bandiniai atrodo labiau išdžiuvę ir šviesesni.



31 pav. LP dalelių forma ir atspalvis skerspjūvyje



32 pav. Gruntbetonio spalva: 1 – 100 % C + 0 % LP ir 40 % MM + 60 % Sa; 2 – 100 % C + 0 % LP ir 80 % MM + 20 % Sa; 3 – 60 % C + 40 % LP ir 40 % MM + 60 % Sa; 4 – 60 % C + 40 % LP ir 80 % MM + 20 % Sa.

Bandinio paviršiaus spalva, nebūtinai sutampa su suirimo plokštumos spalva (33 pav.). Gruntbetonis iš išorės gali atrodyti šviesus, sausas, o jo vidus ryškios tamsios spalvos. Ši tendencija pastebima, kai yra didesni LP ir MM priemaišų kiekiai. Suirimo plokštumoje aiškiai matomos

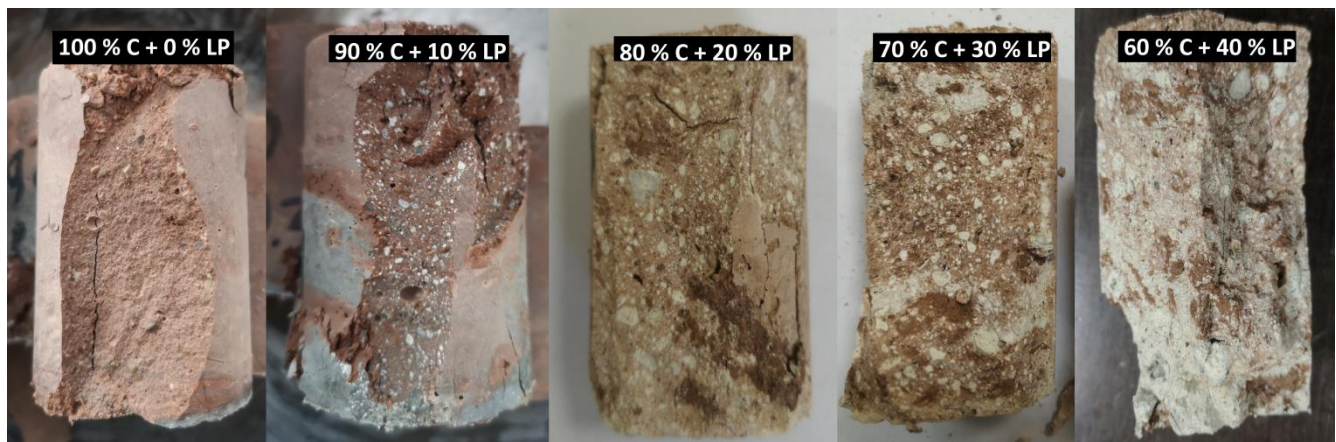
lakiųjų pelenų dalelės. Didinant MM kiekį, mišinį sunkiau išmaišyti ir pastebimas dalelių susitelkimas.



33 pav. Suardytas bandinys

- 100 % C + 0 % LP bandiniuose – gruntbetonio struktūra vienspalvė ir vienalytė. Galima išvelgti pavienias stambesnes smėlio daleles;
- 90 % C + 10 % LP bandiniuose – matomi spalvų perėjimai. Aiškiai matomos smulkios (1 – 2 mm) LP dalelės, kurios yra kampuotos;
- 80 % C + 20 % LP bandiniuose – bendra mišinio struktūra vienoda tik išsiskiria LP dalelės, kurios, lyginant su 90 % C + 10 % LP gruntbetonio suirimo plokštuma, stambesnės (1–4 mm). Didesnio skersmens LP dalelės yra pavienės. Skiriasi LP dalelių atspalviai (34 pav.);
- 70 % C + 30 % LP bandiniuose – skerspjuvyje vis dar didesnę dalį sudaro cemento, molio miltelių ir smėlio mišinio spalvos, bet LP dalelės susijungusios į didesnius darinius. Netaisyklingos formos LP dariniai gali būti per visą bandinio plotį (4,5 cm). Didžiąją dalį matomų LP dalelių sudaro smulkios (1–2 mm), o dideli dariniai yra pavieniai;
- 60 % C + 40 % LP bandiniuose – skerspjuvio vaizdas kardinaliai skiriasi nuo kitų gruntbetonio santykių. Skerspjuvio vaizde tik nedidelę dalį sudaro cemento, molio miltelių ir smėlio mišiniai, o dominuoti pradeda LP dariniai. Šie dariniai yra

netaisyklingos formos ir skirtingų atspalvių. Nors LP santykis cemento ir lakiųjų pelenų suspensijoje buvo 40 %, skerspjūvį užpildo apie 70 – 90 % LP dalelių. Suirimas įvyksta per LP dalelių koncentracijos vietas.



34 pav. Skirtingų mišinių suirimo plokštuma

IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

Atlikus literatūros šaltinių analizę, laboratorinius bandymus ir išanalizavus bandymų rezultatus, galima daryti tokias išvadas:

1. Didinant lakiųjų pelenų (LP) dalį cemento ir LP mišinyje, mažėja bandinių tankis ir stipris;
2. Įtakos bandinių gniuždomajam stipriui turi smėlio priemaišų moliniame grunte kiekis. Didinamas smėlio kiekis, gerina grunto stiprumines savybes;
3. Cemento suspensijoje LP santykis didinamas nuo 10 iki 30 % aiškos įtakos stipriui neturi. Akivaizdus stiprio rezultatų sumažėjimas atsiranda, kai lakiųjų pelenų santykis cemento suspensijoje pasiekia 40 %. Remiantis nustatytais rezultatais lakiųjų pelenų kiekio priedą prie cemento racionalu būtų apriboti iki 30 % nuo mišinio masės;
4. Bandinio suirimo plokštumoje matoma lakiųjų pelenų koncentracija, kai LP kiekis cemento suspensijoje siekia 40 %;
5. Po 28 parų, lyginant su rezultatais gautais po 7 parų, bandinių gniuždomasis stipris sumažėjo, o sustiprėjimas įvyko po 6 mėnesių. Po 28 parų gniuždomasis stipris niekur nebuvo mažesnis nei 1,3 MPa;
6. Net ir mažiausios gniuždomojo stiprio vertės po pusės metų viršijo 1,7 MPa. Geotechnikoje, atliekant grunto stiprinimą tokio stiprio pakanka, kad galima būtų teigti, jog gruntas yra sustiprintas.

Dėl šalyje paskelbto karantino, nepavyko atlikti vienašio gniuždymo bandymų po metų. Nenustatytas mineralinės vatos gamyboje gautų LP poveikis molinių gruntų stiprinimui 1 metų laikotarpyje. Siūloma esant galimybėms atlikti tyrimus su likusiais neišbandytais bandiniais.

Mindaugas Zakarka



LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Amšiejus, J., Mackevičius, R., Medzvieckas, J., Sližytė, D. & Stragys, V. (2006). *Gruntų mechanika*. Vilnius: Technika.. 21.
- Balkevičius, V., Christauskas, J., Gailius, A., Špokauskas, A., & , Siaurys, V. (2007). Analysis of some properties of model system from low-melting illite clay and fibrous mineral wool waste. *Materials science-Poland*, 25(1): 209-217. <http://dSPACE1.vgtu.lt/handle/1/219>
- Basu, M., Pande, M., Bhadoria, P. B. S. & Mahapatra, S. C. (2009). Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. *Progress in Natural Science*, 19(10) 1173-1186. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.12.006>
- Bhatt, A., Priyadarshinia, S., Mohanakrishnan, A. A., Abri, A., Sattler, M. & Techapaphawit, S. (2019). Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review. *Case Studies in Construction Materials*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00263>
- Bocullo, V. (2019). *Geopolimerinio betono iš pramonės atliekų struktūros ir savybių tyrimas*. Dissertation Kaunas University of Technology. Retrieved from <http://ktu.edu>
- Česnauskas V. (2018). *Biomass fly ash additive for portland cement and slag cement*. Dissertation Kaunas University of Technology. Retrieved from <http://ktu.edu>
- Cristelo, N., Glendinning, S., Fernandes, L. & Teixeira Pinto, A. (2011). Deep soft soil improvement by alkaline activation. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement*, 164(2):73-82. <https://doi.org/10.1680/grim.900032>
- Cristelo, N., Soares, E., Rosa, I., Miranda, T., Oliveira, D. V., Silva, R. A. & Chaves, A. (2013). Rheological properties of alkaline activated fly ash used in jet grouting applications. *Construction and Building Materials*. 925-933. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.063>
- Essler R. & Yoshida H (2004). Jet grouting. In: Moseley MP, Kirsch K (eds) *Ground improvement*, 2nd edn. Taylor & Francis, New York, 160–196.
- European commission (2010). Being wise with waste: the EU's approach to waste management. *Publications Office of the European Union*. 10.2779/93543
- Fuller, A., Stegmaier, M., Schulz, N., Menke, M., Schellhorn, H., Knödler, F., Maier, J. & Scheffknecht, G. (2018). Use of wood dust fly ash from an industrial pulverized fuel facility for rendering. *Construction and Building Materials*, 825-848. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.016>
- Geivelis, E. (2015). *Kelių sankasos gruntų stabilizavimo tyrimai*. Master's Thesis of Aleksandras Stulginskis University. Retrieved from <http://dSPACE.lzuu.lt/>
- Gamage, N., Liyanage, K., Fragomeni, S. & Setunge, S. (2011). Overview of different types of fly ash and their use as a building and construction material.
- Giergiczny, Z. (2019). Fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105826>
- Grinys, A., Bocullo, V. & Gumuliauskas, A. (2014). Research of Alkali Silica Reaction in Concrete With Active Mineral Additives. *Journal Of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 1(6), 34–41. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.sace.6.1.6354>
- Guneyisi, E.; Gesoglu, M.; Mermerdas K. 2007. Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin. *Materials and Structures*, 41(5). 937–949. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9296-z>
- Hemalatha T. & Ramaswamy A. (2017). A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production*, 546-559. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.114>
- Yao, Z. T., Ji, X. S., Sarker, P. K., Tang, J. H., Ge, L. Q., Xia, M. S. & Xi, Y. Q. (2015). A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth Science Reviews*, 141, 105–121.
- Kamon, M., Katsumi, T. & Sano, Y. (2000) MSW fly ash stabilized with coal ash for geotechnical application. *Journal of Hazardous Materials*, 76(2-3), 265-283. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00203-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00203-X)

- Kinnunen, P., Yliniemi, J., Talling, B. & Illikainen, M. (2016). Rockwool waste in fly ash geopolymer composites. *Journal of Material Cycles Waste Management*, 19, 1220–1227. <https://doi.org/10.1007/s10163-016-0514-z>
- Kolias, S., Kasselouri-Rigopoulou, V., Karahalios, A. (2004). Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. *Cement and Concrete Composites*, 301-313. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.019>
- Kumar, D., Kumar, N. & Gupta, A. (2014). Geotechnical properties of fly ash and bottom ash mixtures in different proportions. *International Journal of Science and Research*.
- Lahtinen, P. (2001). Fly ash mixtures as flexible structural materials for low-volume roads (Finnra Reports 70/2001). Department of Civil and Environmental Engineering, Helsinki.
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2013). Cementas. 1 dalis. Įprastinių cementų sudėtis, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai (LST EN 197-1 2013).
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2017). Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Laboratoriniai grunto bandymai. 4 dalis. Granulimetrinės sudėties nustatymas (LST CEN ISO/TS 17892-4:2017).
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2018). Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Laboratoriniai grunto bandymai. 12 dalis. Takumo ir plastiškumo ribų nustatymas (LST CEN ISO/ TS 17892-12:2018).
- Loya, M. I. M. & Rawani, A. M. (2014). A review: promising applications for utilization of fly ash. *Int. J. Adv. Technol. Eng. Sci.*, 2 (2014), 143-149.
- Mahvash, S., López-Querol, S. & Bahadori-Jahromi, A. (2017). Effect of class F fly ash on fine sand compaction through soil stabilization. *Heliyon*, 3(3), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00274>
- Maldaris, D. (2017). Biomasės pelenų sudėties ir jų panaudojimo galimybių analizė. Master's Thesis of Applied Ecology study program.
- Marinković, S. & Dragaš, J. (2018). Fly ash. *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*, 325-360. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00011-0>
- Mishra, N. K. & Rath, S (2011). Cost effectiveness of clayey soil & moorum, treated with fly ash-lime for construction of low volume roads. *International Journal of Civil and Structural Engineering*. 370-381. 10.6088/ijcser.00202010117
- Organisation for Economic Co-operation and Development (2019). Waste Management and the Circular Economy in Selected OECD Countries. *Evidence from Environmental Performance Reviews*. OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264309395-en>.
- Ozolinčius, R., Armolaitis, K., Mikšys, V. & Varnagirytė-Kabašinskienė, I. (2011). *Kompensuojamojo tręšimo MIŠKO KURO pelenais Rekomendacijos*.
- Page, R. J., Ong, J. C. W., Osborne, N. & Shirlaw, N. (2005). *Jet grouting for excavations in soft clay-design and construction issues*. Conference: International Conference on Deep Excavations (ICDE) 2006At: Singapore.
- Parsons, R. L., Kneebone, E. (2005). Field performance of fly ash stabilised subgrades. *Ground Improvement*, 33–38.
- Pentti, L. (2001). Fly ash mixtures as flexible structural materials for low-volume roads. Finnra Reports 70/2001 Helsinki.
- Pundinaitė-Barsteigienė, M., Bačinskas, D., Spudulis, E., Rumšys, D. (2017). MSWI bottom ash utilization in concrete mixes. *Science – future of Lithuania*, 9(5): 524–530. <https://doi.org/10.3846/mla.2017.1081>
- Rudžionis, Ž., Ivanauskas, E. (2004). Investigations into effective fly ash used in concrete. *Journal of Civil Engineering and Management*, 10(4), 303-309. <https://doi.org/10.1080/13923730.2004.9636323>
- Rutkauskas, A. (2018). *Influence of mineral additives on the resistance of concrete to alkali-silica reaction*. Dissertation Vilnius Gediminas Technical University. Retrieved from <http://dspace.vgtu.lt>
- Sližytė, D., Medzvieckas, J. & Mackevičius, R. (2012). *Pamatai ir pagrindai: vadovėlis*. Vilnius: Technika.. 211-217.

- Stonys, R., Kuznetsov, D., Krasnikovs, A., Škamat, J., Baltakys, K., Antonovič, V., Černašėjus, O. (2016). Reuse of ultrafine mineral wool production waste in the manufacture of refractory concrete. *Journal of Environmental Management*, 149-156. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.045>
- Supancic K., Obernberger I. (2011). *Wood ash utilisation as a stabiliser in road construction – first results of large-scale tests*. Institute of Process and Particle Engineering. <https://www.bios-bioenergy.at>
- Tokyay, M. (2016). *Cement and concrete mineral admixtures*. Middle East Technical University, Turkey.
- Turner, JP. (1997). Evaluation of western coal fly ashes for stabilization of low-volume roads. *Testing Soil Mixed with Waste or Recycled Materials*. 157-171. <https://doi.org/10.1520/STP15649S>
- Vaitkus, A., Grazulyte, J., Vorobjovas, V., Šernas, O., Kleizienė, R. (2017). Potential of MSWI bottom ash to be used as aggregate in road building materials. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 77–86. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2018.401>
- Väntsi, O., Kärki, T. (2014). Mineral wool waste in Europe: a review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 62–72. <https://doi.org/10.1007/s10163-013-0170-5>
- Zabihi-Samani M., Mokhtari S. P., Raji F. (2018). Effects of fly ash on mechanical properties of concrete. *Journal of applied engineering sciences*, 8(21) 35-40. <https://doi.org/10.2478/jaes-2018-0016>
- Zakarka, M., Mackevičius, R., Skuodis, Š., Sližytė, D. ir Kudžma, A. (2019). Stabilization of clay powder with mineral wool fly ash. *Engineering Structures and Technologies*, 11(4), 106–113. <https://doi.org/10.3846/est.2019.12021>
- Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., Yu, W. H., et al. (2016). Fly ash-based geopolymer: Clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 253–267. Elsevier Ltd.
- Zokaitė, K. (2015). *Geotechnical properties of triassic clay-cement mix*. Master's Thesis of Vilnius University. Retrieved from <https://epublications.vu.lt>
- Žabelovič, A. (2017). *Lakiųjų pelenų panaudojimo gruntbetonyje tyrimas*. Master's Thesis of Vilnius Gediminas Technical University. Retrieved from <http://dspace.vgtu.lt>

**A PRIEDAS. MAGISTRANTO PUBLIKUOTI STRAIPSNIAI IR
SKAITYTI PRANEŠIMAI**

STABILIZATION OF CLAY POWDER WITH MINERAL WOOL FLY ASH

Mindaugas ZAKARKA , Rimantas MACKEVIČIUS , Šarūnas SKUODIS *,
Danutė SLIŽYTĖ , Andrius KUDŽMA 

Faculty of Civil Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania

Received 03 January 2020; accepted 29 January 2020

Abstract. The aim of this article – to determine short term and long term strengthening of clay soil, by strengthening it with fly ash obtained during the production of mineral wool. This article introduces research which is used to determine the optimal ratio of fly ash in cement suspension for strengthening of clay soil. Samples which were investigated in this research work prepared by mixing Portland cement, mineral wool fly ash, clay powder, sand and water. All investigated samples compressive strength after 6 months exceeded 1.7 MPa. It is enough of such strength in geotechnics to conduct strengthening of soil and it is possible to argue that soil is strengthened.

Keywords: clay, soil stabilization, fly ash, soil improvement, mineral wool, comprehensive strength.

Introduction

When the level of economy and consumerism rises, the problem of waste treatment is becoming more and more apparent. In Europe there are approximately 16 tonnes of waste per capita during the year, and approximately 6 tonnes are recycled (European Commission, 2010). One of methods to treat waste is incineration, during which the by-products are obtained – bottom ash and fly ash (FA). The ash is obtained during waste incineration, bio-fuel burning, mineral wool production, etc. Bottom ash may be used in construction (Zabihi-Samani et al., 2018), especially in the roads (Vaitkus et al., 2017), included into the production process or disposed in mines. FA utilization problem is more complicate, because FA accounts for 15% of total ash (Pundinaitė-Barsteigienė et al., 2017). Not all FA may be used because of poor quality (Giergiczny et al., 2019). Collection, transportation and work with FA is more complicate than with bottom ash because of fine particles (Supancic & Obernberger, 2011). FA may change the fine particles of other materials and has binding properties (Rutkauskas, 2018).

One of methods to use FA in geotechnics is to change a part of cement into FA and to apply such mix in order to strengthen weak soil (Pentti, 2001), by using jet grouting. During jet grouting, into cement suspension a certain part of cement is being changed into FA. Depending on type

and ratio of FA different short term and long term values of strength are obtained (Essler & Yoshida, 2004; Hemalatha & Ramaswamy, 2017). It is important, that it is possible to strengthen clay soils with FA high in calcium as well (Kolias et al., 2004). Another possibility is to refuse using cement and use only FA (Cristelo et al., 2013). The results of this test are very advantageous, but the effect which is obtained differs from jet grouting with cement suspension. By using cement suspension, 80–85% of grouted concrete strength value is reached during 28 days (Sližytė et al., 2010). When a binder is FA, values of strength constantly grow and strengthening does not stop during the one year period (Cristelo et al., 2011; Marinković & Dragaš, 2018).

Another method to strengthen soils is relevant in road construction, in order to install strong soil layer (Turner, 1997; Zokaitė, 2015). Strong soil layer allows to reduce the thickness of the asphalt layer (Parsons & Kneebone, 2005). It is possible to strengthen soil with FA without cement admixture (Mishra & Rath, 2011; Supancic & Obernberger, 2011). This method solves the problem of FA utilisation, but it is possible to apply it only to low intensity roads. Another problem appears due to rising dust during work. Also it is possible to mix the layer of weak soil with cement or with cement and FA. The advantage of this method is that clay soils can be mixed with cement as well.

*Corresponding author. E-mail: sarunas.skuodis@vgtu.lt

One of the main problems while working with FA is that their composition is very different and it depends on incinerated materials (Vaitkus et al., 2017; Rudžionis & Ivanauskas, 2004). The properties of FA which were collected even in the same factory but in different times may differ (Rutkauskas, 2018), therefore FA collected during the production of mineral wool gain and advantage due to constant and more predictable composition. During production of mineral wool, bottom ash is returned to production process, it is possible to recycle used wool as well (Väntsi & Kärki, 2014; Balkevičius et al., 2007). Only FA stay as a by-product, it is not returned to production process due to fine particles.

Usually FA collected in thermoelectric power plant are used in tests, therefore the tests conducted using FA collected in mineral wool production is a new experience. FA from mineral wool production, in comparison with thermoelectric power plant FA, have 5% less SiO_2 , 5% more Fe_2O_3 , 13% less CaO , 9% more MgO , 6% more Na_2O , etc. (Česnauskas, 2018). Stabilisation of weak clay soils is a relevant problem which needs to be solved. The aim of this article – to determine short term and long term strengthening of clay soil, by strengthening it with fly ash obtained during the production of mineral wool. This article introduces research which is used to determine the optimal ratio of fly ash in cement suspension for strengthening of clay soil.

1. Testing methodology

Samples were prepared by mixing Portland cement, FA, clay powder, sand and water. FA used for tests were obtained from mineral wool production process as the waste, the chemical composition of which is presented in Table 1 (Stonys et al., 2016). Samples are produced using Portland concrete CEM I 42,5 R, which corresponds to LST EN 197-1:2013 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2013), clay powder, the chemical composition of which is presented in Table 2. Used sand, the grading curve of which is shown in Figure 1, coefficient of uniformity $C_u = 2.77$ and coefficient of curvature $C_c = 0.90$. Granulometric composition was determined according to specifications of standards LST CEN ISO/TS 17892-4:2017 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2017) and LST CEN ISO/TS 17892-12:2018 (Lietuvos standartizacijos departamentas, 2018).

To each different composition of mixture three sets of cylindric samples were prepared, the diameter of which 4.5 cm, height 7.0 cm. Overall 15 different compositions were investigated in tests, these compositions are presented in Table 3. At first five ratios of cement and fly ashes were prepared: 100% C with 0% FA, 90% C with 10% FA, 80% C with 20% FA, and 70% C with 30% FA. Three clay mixtures were mixed as well, which are made of 80% CP and 20% Sa, 60% CP and 40% Sa and 40% CP and 60% Sa. Plastic and liquid limits of clay soils are presented in Figure 2.

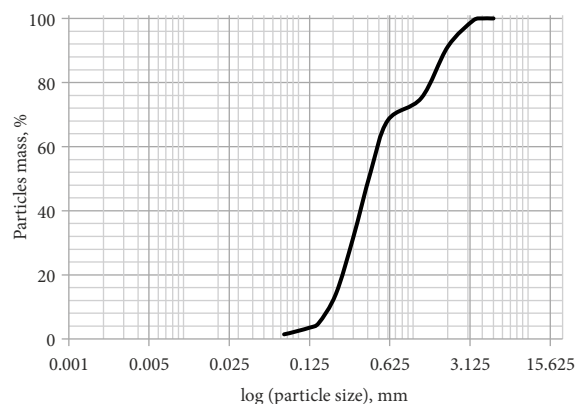


Figure 1. Granulometric composition of investigated sand

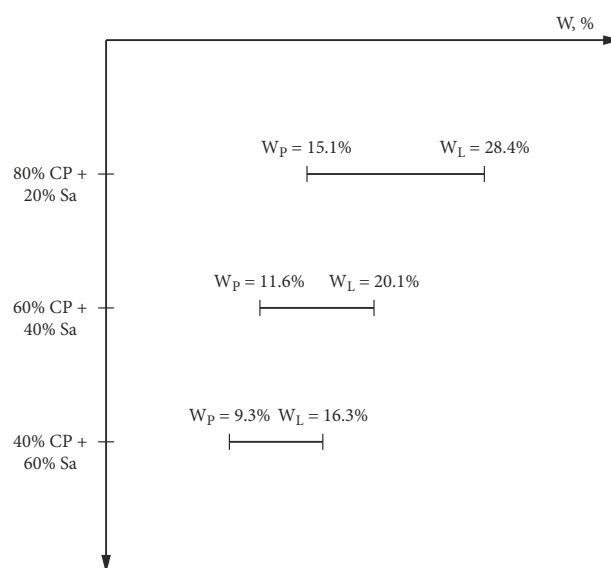


Figure 2. Plastic and liquid limits of clay mixtures

Table 1. Chemical composition of fly ash, %

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	SO_3	Cl	other	LOI
40.6	2.14	6.91	3.52	11.1	6.71	6.34	0.23	2.41	4.58	4.67	10.79

Table 2. Chemical composition of clay powder, %

SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5
55.0–62.1	15.7–17.7	0.7–0.9	6.1–7.9	0.1–0.2	2.2–3.2	0.3–1.8	0.1–0.3	2.9–3.5	0.1–0.2

Table 3. Composition of samples

Sample No.	C quantity, %	FA quantity, %	W/(C+FA)	CP quantity, %	Sa quantity, %
1	100	0	1	80	20
2	100	0	1	60	40
3	100	0	1	40	60
4	90	10	1	80	20
5	90	10	1	60	40
6	90	10	1	40	60
7	80	20	1	80	20
8	80	20	1	60	40
9	80	20	1	40	60
10	70	30	1	80	20
11	70	30	1	60	40
12	70	30	1	40	60
13	60	40	1.5	80	20
14	60	40	1.5	60	40
15	60	40	1.5	40	60

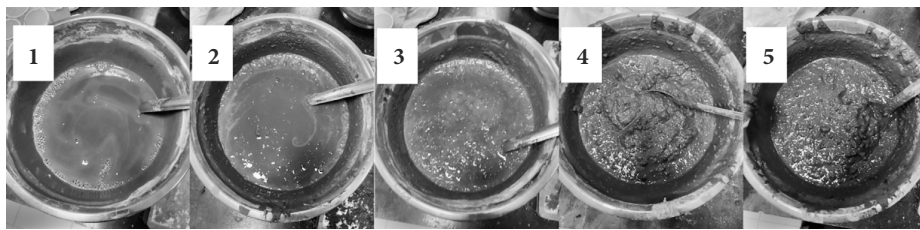


Figure 3. Cement and fly ash (C+ FA) suspension: 1 – 100% C + 0%; FA; 2 – 90% C + 10% FA; 3 – 80% C + 20% FA; 4 – 70% C + 30% FA; 5 – 60% C + 40% FA

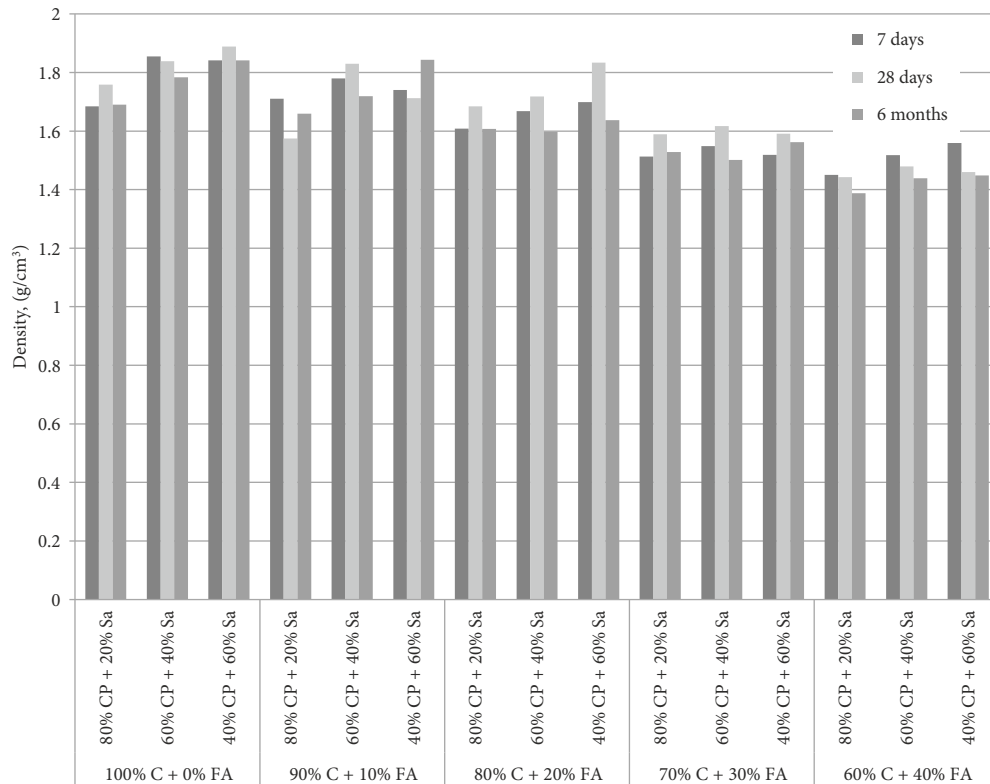


Figure 4. Density of investigated samples

Suspension of cement and fly ashes (C + FA) was mixed with water in ratio 1:1, but when the quantity of FA was increased the suspension thickened and was not suitable to work (Figure 3), i. e. at 60% C + 40% FA ratio was increased till 1:1.5. For different types of FA different water ratios are required in order to achieve maximum values of compressive strength (Fuller et al., 2018).

Samples after 24 hours were removed from forms and kept in a humid environment in exicators. After 7, 28 and 180 days density and compressive strength were determined to them.

2. Analysis of obtained results

Before determining uniaxial compressive strength the density of samples was determined (Figure 4). It was obtained by measuring dimensions of samples and by weighing them. Density of samples of the same composition which were tested after different period of time, differs in average by 3.6%, and the biggest distinction is 7.9%. The minimum density equals to 1.388 g/cm^3 , which was reached after 6 months for 60% C + 40% FA and 80% CP + 20% Sa. The maximum density equals to 1.889 g/cm^3 , which was

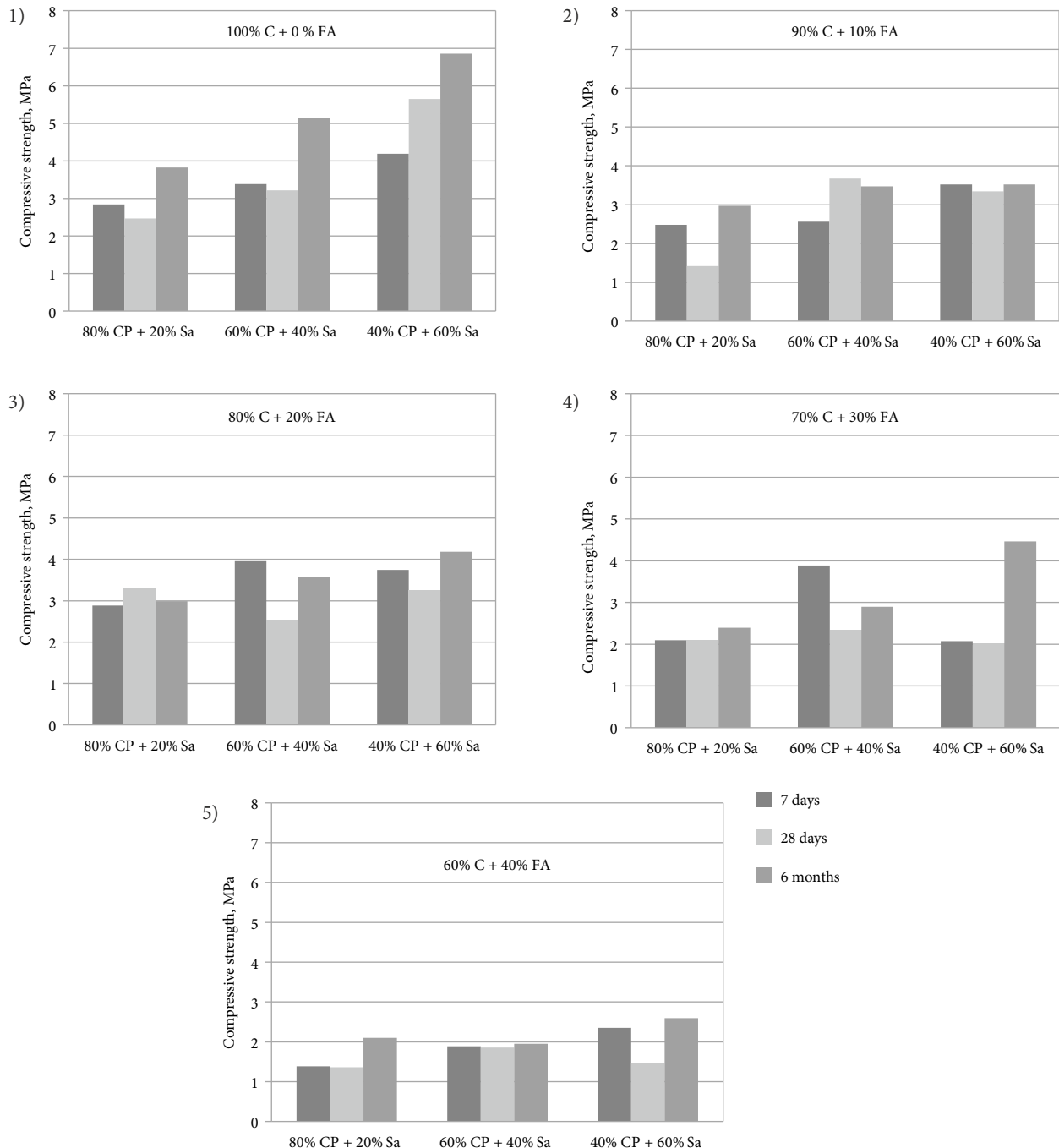


Figure 5. Compressive strength of samples: 1 – 100% C + 0% FA; 2 – 90% C + 10% FA; 3 – 80% C + 20% FA; 4 – 70% C + 30% FA; 5 – 60% C + 40% FA

reached after 28 days when there were 100% of cement and 40% CP + 60% Sa.

As standard results the data is used obtained from samples in which there is no FA. These results of uniaxial compression tests are the most clear and the most predicted (Figure 5). At 100% C + 0% FA and 40% CP + 60% Sa, values of strength increased evenly when evaluating the results during different periods of time. When 100% C samples were mixed with 80% CP + 20% Sa and 60 CP + 40% Sa, strength values after 28 days in comparison with 7 days values weakened, and after 6 months strengthened. While increasing ratio of FA from 10 to 30%, results of samples strength vary slightly and do not show big change of compressive strength.

Twelve of the fifteen mixtures had a lower strength after 28 days (in comparison with 7 days) (Figure 6). The greatest weakening was 43%. Strength of mixtures comprised from 80% C + 20% FA and 80% CP + 20% Sa; 100% C and 40% CP + 60% Sa; 90% C + 10% FA and 60% CP + 40% Sa, after 28 days in comparison with 7 days increased (the greatest strengthening 43%). After 6 months strength of thirteen of the fifteen mixtures increased, comparing to the strength after 28 days. The samples comprised of 90% C + 10% FA ir 60% CP + 40% Sa; 80% C + 20% FA

ir 80% CP + 20% Sa weakened. After 28 days the samples strengthened comparing to the results after 7 days. Strength of thirteen of fifteen mixtures increased comparing to the strengths after 7 days (increasing up to 115%). The results of samples were weaker, when the samples comprised of 70% C + 30% FA and 60% CP + 40% Sa; 80% C + 20% FA ir 60% CP + 40% Sa (the greatest weakening 38%).

The effect of sand and fly ash on samples density is shown in Figure 7. The effect of sand on density, comparing 80% CP + 20% Sa and 60% CP + 40% Sa, increased by 4.15%. Comparing 80% CP + 20% Sa and 40% CP + 60% Sa – density increased by 5.29%. The effect of fly ash on density, comparing it with samples in which there is 100% cement and 10% FA is added constantly, decreases by 3.7%; 6.9%; 13.6% and 18.5%.

Strength of samples, while comparing 80% CP + 20% Sa and 60% CP + 40% Sa, increased by 34.2%, and comparing 80% CP + 20% Sa and 40% CP + 60% Sa – 79.2% (Figure 7). Strength, when comparing with 100% C and adding 10% FA each time, decreases by 34.4%; 30.4%; 38.6% and 56.4% (Figure 7). When ratio of FA with C is between 10–30%, change of strength ranges in the interval of 5% and is not a tendency.

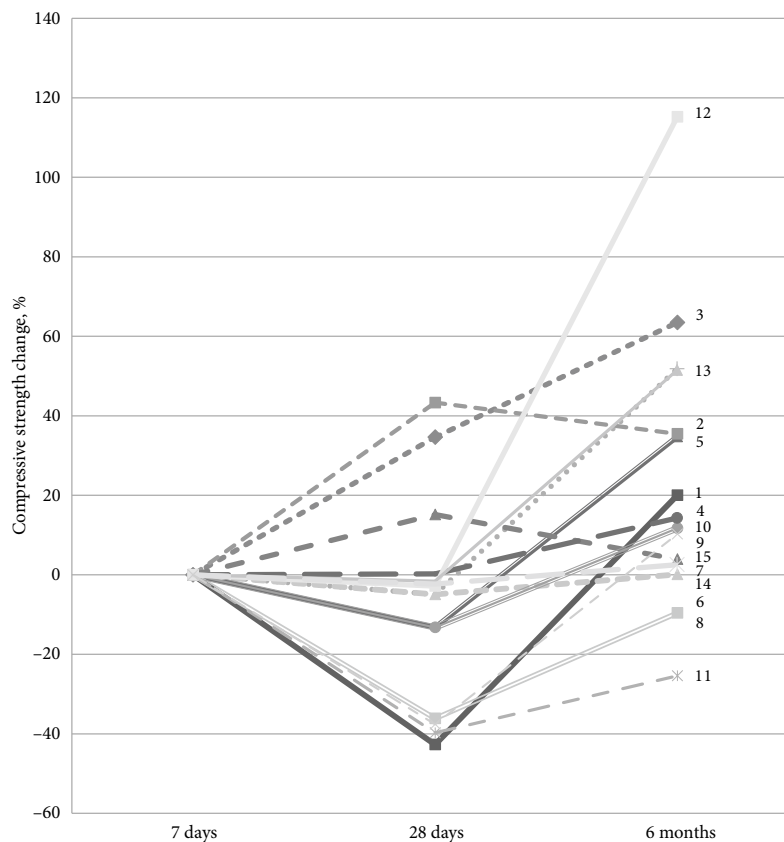


Figure 6. Relative change in strength after 28 days and 6 months in comparison with strength after 7 days: –1 – 100% C + 0% FA and 80% CP + 20% Sa; 2 – 100% C + 0% FA and 60% CP + 40% Sa; 3 – 100% C + 0% FA and 40% CP + 60% Sa; 4 – 90% C + 10% FA and 80% CP + 20% Sa; 5 – 90% C + 10% FA and 60% CP + 40% Sa; 6 – 90% C + 10% FA and 40% CP + 60% Sa; 7 – 80% C + 20% FA and 80% CP + 20% Sa; 8 – 80% C + 20% FA and 60% CP + 40% Sa; 9 – 80% C + 20% FA and 40% CP + 60% Sa; 10 – 70% C + 30% FA and 80% CP + 20% Sa; 11 – 70% C + 30% FA and 60% CP + 40% Sa; 12 – 70% C + 30% FA and 40% CP + 60% Sa; 13 – 60% C + 40% FA and 80% CP + 20% Sa; 14 – 60% C + 40% FA and 60% CP + 40% Sa; 15 – 60% C + 40% FA and 40% CP + 60% Sa

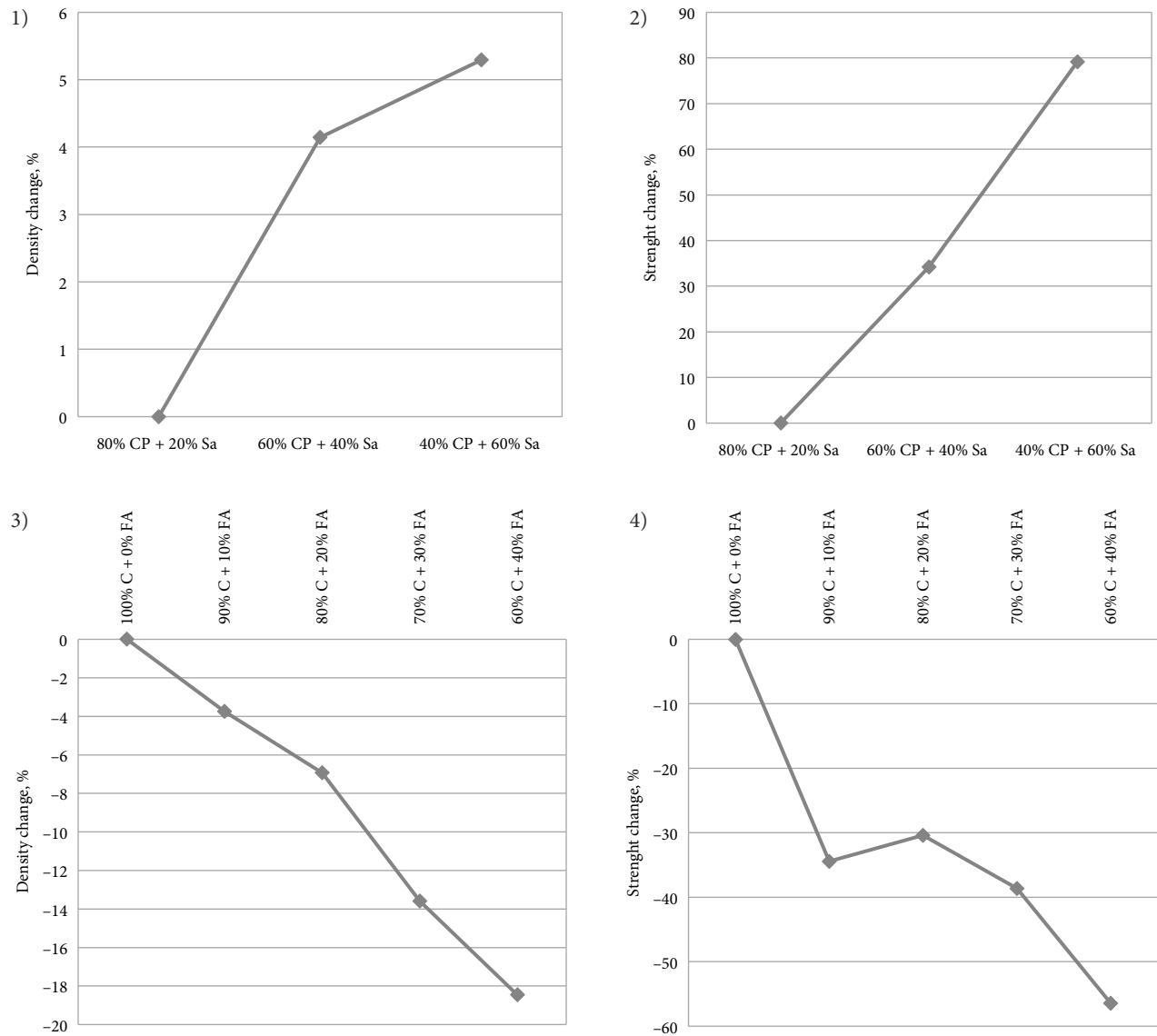


Figure 7. Effect of sand and fly ash on density and strength of samples after 6 months: 1 – Sa effect on density; 2 – Sa effect on strength; 3 – FA effect on density; 4 – FA effect on strength

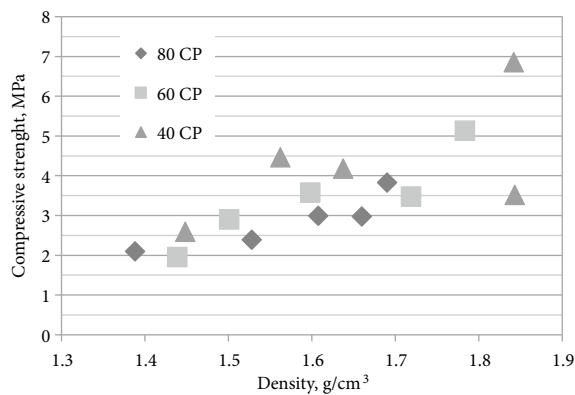


Figure 8. Density and compressive strength dependence on sand admixtures in clay

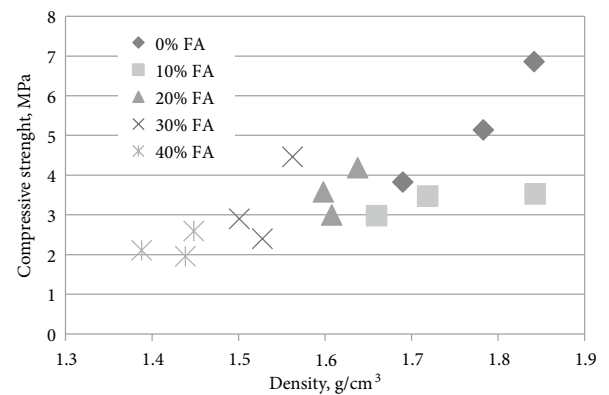


Figure 9. Density and compressive strength dependence on fly ash admixture in cement

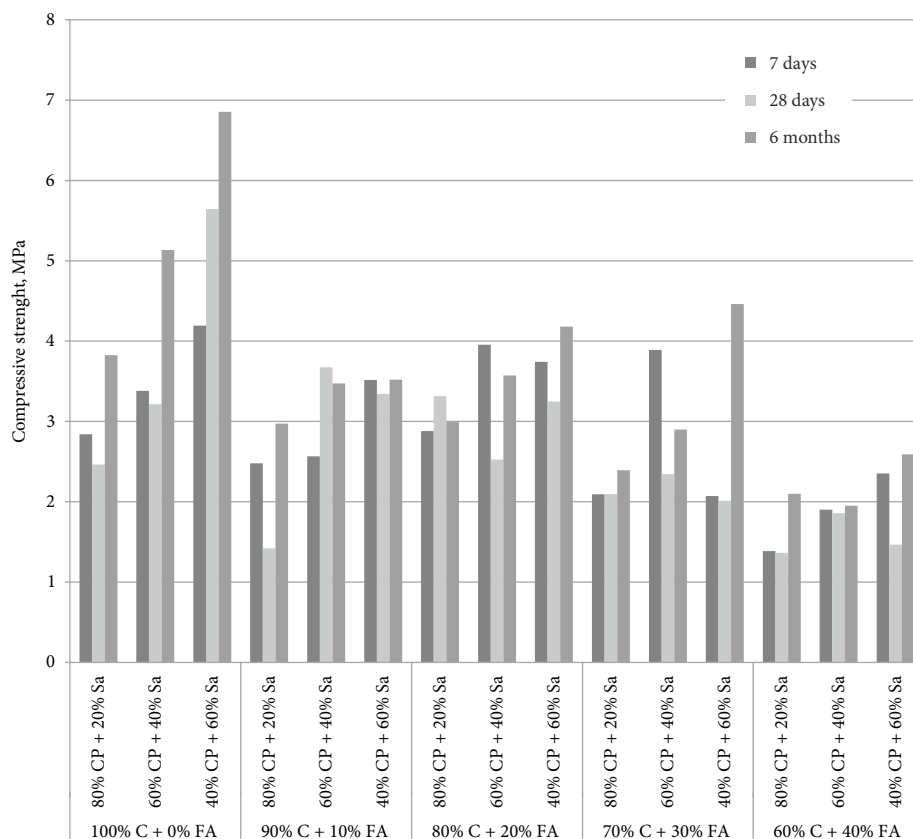


Figure 10. Compressive strength summary graph

Dependencies of density and compressive strength on sand and fly ashes are presented in Figures 8 and 9. By increasing quantity of sand in mixtures, density and strength of samples increases, and by increasing quantity of FA density decreases. When there is a 10–30% FA quantity, FA does not have effect on strength. The results of compressive strength of all tested samples are presented in Figure 10.

Notations

Abbreviations

- C – Portland cement;
- CP – Clay powder;
- FA – Fly ash;
- Sa – Sand;
- W – Water;
- W_p – Plastic water content limit;
- W_L – Liquid water content limit.

Conclusions

After the tests and analysis of tests results such conclusions can be made:

1. Increasing FA quantity in cement and FA mixture, density and strength of samples decreases;
2. Quantity of sand admixtures in clay soil has a huge effect on compressive strength of samples;

3. In suspension of cement FA ratio increased from 10 to 30% does not have clear effect on strength. An obvious decrease in results of strength occurs when fly ash ratio in cement suspension reaches 40%. According to the determined results it would be rational to limit fly ash quantity admixture in cement by 30% from mass of mixture;
4. After 28 days, while comparing with the results obtained after 7 days, compressive strength of samples decreased, and strengthening occurred after 6 months. Temporary weakening of compressive strength everywhere was no less than 1.3 MPa;
5. Even the minimal values of compressive strength after 6 months exceeded 1.7 MPa. It is enough of such strength in geotechnics to conduct strengthening of soil and it is possible to argue that soil is strengthened.

References

- Balkevičius, V., Christauskas, J., Gailius, A., Špokauskas, A., & Siaurys, V. (2007). Analysis of some properties of model system from low-melting illite clay and fibrous mineral wool waste. *Materials Science-Poland*, 25(1), 209–217.
- Česnauskas, V. (2018). *Biomass fly ash additive for Portland cement and slag cement* (Dissertation). Kaunas University of Technology. <http://ktu.edu>
- Cristelo, N., Glendinning, S., Fernandes, L., & Teixeira Pinto, A. (2011). Deep soft soil improvement by alkaline activation.

- Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement*, 164(2), 73–82.
<https://doi.org/10.1680/grim.900032>
- Cristelo, N., Soares, E., Rosa, I., Miranda, T., Oliveira, D. V., Silva, R. A., & Chaves, A. (2013). Rheological properties of alkaline activated fly ash used in jet grouting applications. *Construction and Building Materials*, 48, 925–933.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.063>
- Essler, R., & Yoshida, H. (2004). Jet grouting. In M. P. Moseley & K. Kirsch (Eds.), *Ground improvement* (2nd ed., pp. 160–196). Taylor & Francis.
https://doi.org/10.4324/9780203305201_chapter_5
- European Commission. (2010). *Being wise with waste: the EU's approach to waste management*. Publications Office of the European Union.
- Fuller, A., Stegmaier, M., Schulz, N., Menke, M., Schellhorn, H., Knödler, F., Maier, J., & Scheffknecht, G. (2018). Use of wood dust fly ash from an industrial pulverized fuel facility for rendering. *Construction and Building Materials*, 189, 825–848.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.016>
- Giergiczny, Z. (2019). Fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105826>
- Hemalatha, T., & Ramaswamy, A. (2017). A review on fly ash characteristics – Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production*, 147, 546–559.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.114>
- Lahtinen, P. (2001). *Fly ash mixtures as flexible structural materials for low-volume roads* (Finnra Reports 70/2001). Department of Civil and Environmental Engineering, Helsinki.
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2013). *Cementas. 1 dalis. Įprastinių cementų sudėtis, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai* (LST EN 197-1 2013).
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2017). *Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Laboratoriniai grunto bandymai. 4 dalis. Granulimetrinės sudėties nustatymas* (LST CEN ISO/TS 17892-4:2017).
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2018). *Geotechniniai tyrinėjimai ir bandymai. Laboratoriniai grunto bandymai. 12 dalis. Takumo ir plastiškumo ribų nustatymas* (LST CEN ISO/TS 17892-12:2018).
- Kolias, S., Kasselouri-Rigopoulou, V., & Karahalios, A. (2004). Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 301–313.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.019>
- Marinković, S., & Dragaš, J. (2018). Fly ash. In *Waste and supplementary cementitious materials in concrete* (pp. 325–360).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00011-0>
- Mishra, N. K., & Rath, S. (2011). Cost effectiveness of clayey soil & moorum, treated with fly ash-lime for construction of low volume roads. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 2(1), 370–381.
- Parsons, R. L., & Kneebone, E. (2005). Field performance of fly ash stabilised subgrades. *Ground Improvement*, 9(1), 33–38.
<https://doi.org/10.1680/grim.2005.9.1.33>
- Pundinaitė-Barsteigienė, M., Bačinskas, D., Spudulis, E., & Rumšys, D. (2017). MSWI bottom ash utilization in concrete mixes. *Science – Future of Lithuania*, 9(5), 524–530.
<https://doi.org/10.3846/mla.2017.1081>
- Rudžionis, Ž., & Ivanauskas, E. (2004). Investigations into effective fly ash used in concrete. *Journal of Civil Engineering and Management*, 10(4), 303–309.
<https://doi.org/10.1080/13923730.2004.9636323>
- Rutkauskas, A. (2018). *Influence of mineral additives on the resistance of concrete to alkali-silica reaction* (Dissertation). Vilnius Gediminas Technical University. <http://dspace.vgtu.lt>
- Slizytė, D., Dagys, A., Medzvieckas, J., & Milvydas, R. (2010, May 19–21). Using of jet grouting piles reinforced with central bars for low retaining walls. In *Proceedings of The 10th International Conference "Modern Building Materials and Techniques"* (pp. 1168–1173). Vilnius, Lithuania.
- Stonys, R., Kuznetsov, D., Krasnikovs, A., Škamat, J., Baltakys, K., Antonovič, V., & Černašėjus, O. (2016). Reuse of ultrafine mineral wool production waste in the manufacture of refractory concrete. *Journal of Environmental Management*, 176, 149–156. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.045>
- Supancic, K., & Obernberger, I. (2011). *Wood ash utilisation as a stabiliser in road construction – first results of large-scale tests*. Institute of Process and Particle Engineering.
<https://www.bios-bioenergy.at>
- Turner, J. P. (1997). Evaluation of western coal fly ashes for stabilization of low-volume roads. In M. Wasemiller & K. Hoddnott (Eds.), *Testing soil mixed with waste or recycled materials* (pp. 157–171). ASTM International.
<https://doi.org/10.1520/STP15649S>
- Vaitkus, A., Grazulyte, J., Vorobjovas, V., Šernas, O. & Kleizienė, R. (2017). Potential of MSWI bottom ash to be used as aggregate in road building materials. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 13(1), 77–86.
<https://doi.org/10.3846/bjrbe.2018.401>
- Väntsi, O., & Kärki, T. (2014). Mineral wool waste in Europe: a review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16, 62–72.
<https://doi.org/10.1007/s10163-013-0170-5>
- Zabihi-Samani, M., Mokhtari, S. P., & Raji, F. (2018). Effects of fly ash on mechanical properties of concrete. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 8(21), 35–40.
<https://doi.org/10.2478/jaes-2018-0016>
- Zokaitė, K. (2015). *Geotechnical properties of triassic clay-cement mix*. (Master's Thesis). Vilnius University.
<https://epublications.vu.lt>

Grunto, veikiamo periodinėmis apkrovomis, elgsenos tyrimai

Šarūnas Skuodis,

Rokas Karpis,

Mindaugas Zakarka,

Modestas Gedvilas,

Vytautas Raginis,

Kornelija Orlova,

Mantas Katauskas

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
Statybos fakultetas,
Gelžbetoninių konstrukcijų
ir geotechnikos katedra,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius, Lietuva
El. paštas sarunas.skuodis@vgtu.lt*

Skuodis Š., Karpis R., Zakarka M., Gedvilas M., Raginis V., Orlova K., Katauskas M. Grunto, veikiamo periodinėmis apkrovomis, elgsenos tyrimai. *Geologija. Geografija*. 2018. T. 4(4). ISSN 2351-7549.

Straipsnyje yra apžvelgtos grunto liekamosios deformacijos ir įvertintas liekamasis grunto deformacijų modulis esant skirtingam grunto apkrovimų ciklų kiekiui. Šie tyrimai leidžia prognozuoti inžinerinio geologinio pagrindo, kuris perima apkrovas, elgseną esant skirtingam apkrovimo ciklų kiekiui (intensyvumui). Bandymai atlikti su triašio slėgio aparatu, imituojant automobilių kelių sukeltas ir perduodamas apkrovas pagrindams. Gruntas ištirtas esant skirtingiems apkrovų intensyvumams ir grunto gyliams. Gauti rezultatai parodė, kad liekamasis grunto deformacijų modulis labai priklauso nuo grunto bandinio apkrovimo ciklų kiekio ir apkrovų intensyvumo. Nustatyta, kad bendrosios tirtų grunto deformacijos nebuvo didesnės nei 2,0 %. Matuojant bandinio vertikalias deformacijas ties bandinio viduriu, liekamosios deformacijos nebuvo didesnės nei 0,5 %. Gauti rezultatai yra labai vertingi prognozuojant / modeliuojant inžinerinio geologinio pagrindo elgseną esant skirtingam apkrovų ciklų kiekiui ir intensyvumui. Rezultatus galima lengvai pritaikyti tokio paties grunto sluoksnio skirtingiems gyliams (įvertinti liekamąjį grunto sustiprėjimą).

Raktažodžiai: deformacijų modulis, liekamasis deformacijų modulis, liekamosios deformacijos, ciklinės apkrovos, triašio slėgio bandymas

IVADAS

Dažniausiai gruntai ir jų inžinerinės geologinės sąlygos (Dundulis ir kt., 2008) yra tiriamos statinėmis apkrovomis. Atliekant inžinerinius geologinius tyrimus plačiai naudojami statiniai kūginės penetracijos bandymai (Žaržojus, Dundulis, 2010). Kartais, jei yra neįmanoma ištirti grunto kūginės penetracijos, taikomas dinaminis zondavimas (Žaržojus ir kt., 2013; Žaržojus, Kelevišius, 2016). Greta tyrimų

vietos yra tiriamas gruntas jį išgręžiant ir paimant nesuardytos struktūros grunto bandinius, kurie vėliau bandomi laboratorinėmis sąlygomis. Laboratorijoje nustatomos fizinės ir mechaninės savybės. Mechaninės savybės dažniausiai yra tiriamos su kompresiniu (odometriniu) aparatu (Amšiejus ir kt., 2010; Skuodis ir kt., 2014; Skuodis ir kt., 2017), tiesioginio kirpimo (Medzvieckas ir kt., 2017; Dirgėlienė ir kt., 2017) arba triašio slėgio prietaisais (Dirgėlienė, 2013; Lekstutytė ir kt., 2018).

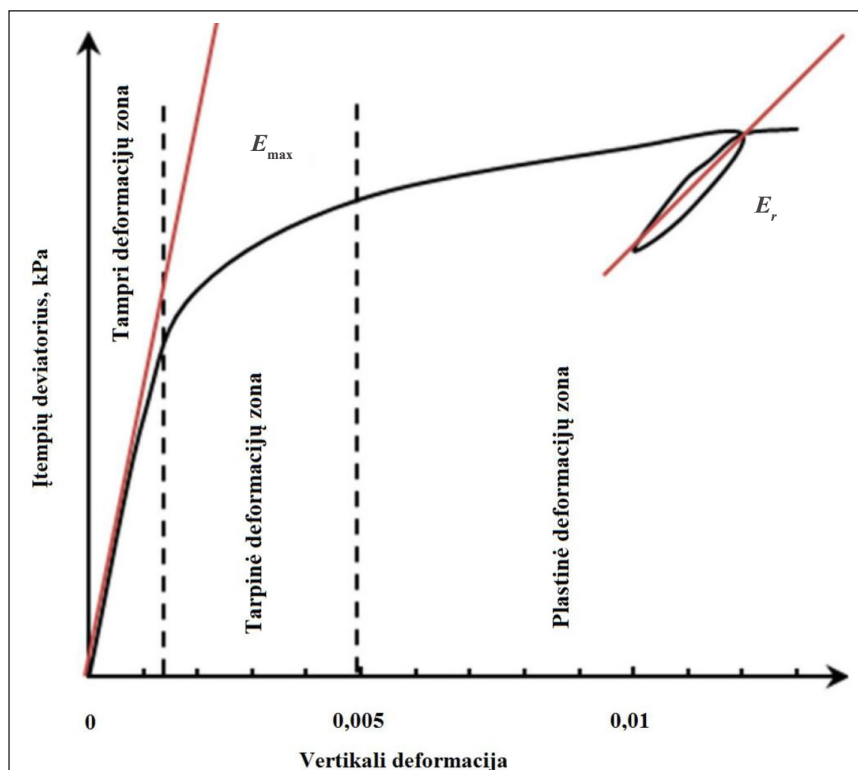
Tiriant gruntą su triašio slėgio aparatu galima nustatyti daug grunto mechaninių savybių. Taip pat gruntas gali būti tiriamas imituojant drenuojančias / nedrenuojančias ir / arba konsoliduotas / nekonsoliduotas sąlygas (Muraro ir kt. 2018; Giger ir kt., 2018). Triašio slėgio aparatu yra įmanoma imituoti ciklines, dinamines, periodines arba kartotinais kintamas apkrovas (Chen ir kt., 2018; Jamali ir kt., 2018; Polito, Moldenhauer, 2018). Bandant grunto bandinius ne statinėmis apkrovų sąlygomis galima nustatyti liekamąsias grunto deformacines savybes (Arshad ir kt., 2018; George ir kt., 2018). Taigi, žinant geotechninės konstrukcijos eksploatacijos elgseną, galima parinkti tinkamą metodą grunto deformacinių savybių tyrimams (1 pav.), nes deformacinių savybių rodikliai skirtingose deformacijų zonose yra nevienodi.

Šio straipsnio tikslas – nustatyti grunto veikiamo periodinėmis apkrovomis elgseną su triašio slėgio aparatu. Šie tyrimai leidžia nustatyti grunto liekamąjį deformacijų modulį ir jo priklausomybę nuo apkrovų ciklų.

EKSPERIMENTINIO BANDYMO APRAŠYMAS

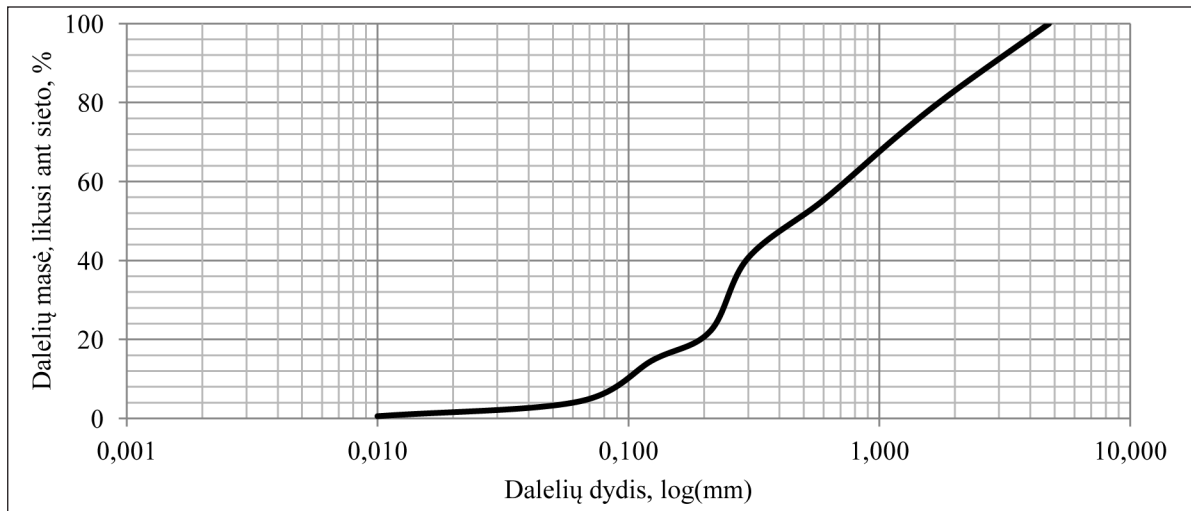
Tyrimuose naudotas gruntas – žvyringas smėlis (grSa). Šio grunto granulometrinė kreivė pateikta 2 pav. Nustatytas vienodumo koeficientas $C_u = 8,35$ ir sanklodos rodiklis $C_c = 0,77$. Šio grunto kietųjų dalelių tankis $\rho_s = 2,7219 \text{ g/cm}^3$. Prieš plaunant grunto bandinį, bendra tiriamo grunto masė buvo 218,87 g. Po plovimo grunto bandinio masė – 201,72 g. Nustatyta, kad šio grunto sudėtyje yra dulquio ir molio, kurio masė – 18,23 g, t. y. 8,33 %.

Su šiuo gruntu atlikti triašio slėgio bandymai taikant periodines apkrovas. Tirtas 100 mm skersmens ir 200 mm aukščio grunto bandinys. Pasirinktos bandymų sąlygos – izotropiniai neprisotinti, nekonsoliduoti ir drenuoti bandymai (LST EN 13286-7:2004). Šios bandymų sąlygos imituoja automobilių kelių apkrovas su pasirinktu 1 Hz dažniu (pravažiuojanti pirma ir antra automobilio ašis). Kad būtų įmanoma tiksliai išmatuoti kiekvieno ciklo amplitudžių didžiausias



1 pav. Skirtumai tarp grunto deformacijų zonų ir deformacijų modulių (Sas ir kt., 2016)

Fig. 1. Differences between soil deformation zones and Young's modulus (Sas et al., 2016)

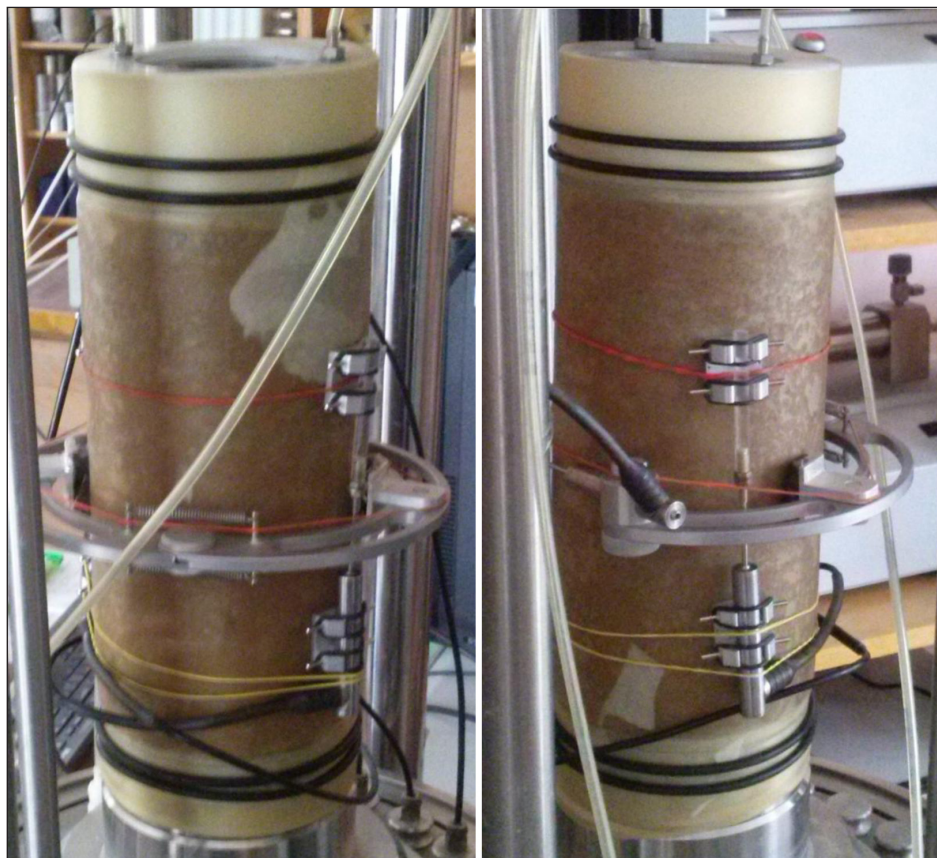


2 pav. Tirto grunto granulimetrinė sudėtis

Fig. 2. Granulometric curve of investigated soil

ir mažiausias vertes, bandymui buvo naudojamas duomenų įrašymo intervalas – 50 duomenų per vieną sekundę. Bandymų metu atkurtas grunto drėgnis $w = 8,00\%$. Bandiniai paruošti su pradinio grunto tankiu $\rho = 2,32 \text{ g/cm}^3$. Ant paruošto

bandinio papildomai sumontuotas radialinis poslinkių indikatorius, matuojantis bandinio plėtimąsi arba traukimąsi, bei du papildomi vertikalių deformacijų indikatoriai, matuojantys bandinio vidurio suspaudimą (3 pav.). Papildomų indikatorių



3 pav. Papildomų indikatorių montavimas prieš bandymą

Fig. 3. Mounting additional indicators before test

pozicijos atitinka reikalavimus, pateiktus LST EN 13286-7:2004.

Bandyme taikytas celės slėgis $\sigma_3 = 70$ kPa, o deviatorinis įtempių pokytis $\sigma_d = 10\text{--}200$ kPa. Bandymų pradžioje atlikta 20 000 periodinių ciklinių apkrovimų ir ištirta grunto elgsena veikiant gruntą 1 Hz dažniu su kintamu įtempiu deviatoriumi $\sigma_d = 10\text{--}200$ kPa. Esant skirtingam ciklų kiekiui, pagal LST EN 13286-7:2004, nustatytas liekamas deformacijų modulis: $E_r = (\sigma_1^{r2} + \sigma_1^r \sigma_3^r - 2\sigma_3^{r2}) / (\sigma_1^r \varepsilon_1^r + \sigma_3^r \varepsilon_1^r - 2\sigma_3^r \varepsilon_3^r)$. Po 20 000 ciklų gruntas tirtas atskirai po 100 ciklų, keičiant celės slėgį ir įtempių deviatorių (1 lentelė).

Atlikus bandymus pagal 1 lentelėje nurodytas sąlygas, apskaičiuotas liekamas deformacijų modulis E_r ir liekamosios vertikalios ε_1^r ir radialinės ε_3^r deformacijos (pagal LST EN 13286-7:2004). Atliekant skaičiavimus vertinti paskutiniai 10 ciklų rezultatai.

REZULTATŲ ANALIZĖ

Atlikus visus numatytus bandymų etapus, grunto bandinys nesuiro (4 pav.). Vertinant grunto bandinio formos pokyčius po bandymo, galima konstatuoti, kad bandinys per visą bandinio aukštį suspaudė mažiau nei 2,0 %. Vertikalios deformacijos ties bandinio viduriu nebuvo didesnės nei 0,5 %. Taip pat bandinys šiek tiek išsiplėtė ties bandinio viduriu (pradėjo formuotis statinės forma).

Vertikalios deformacijos, kurios buvo tiriamos per visą bandinio aukštį, pradėjo stabilizuotis esant 5 000 apkrovimo ciklų ir praktiškai nepakito iki 20 000 apkrovimo ciklų (5 pav.). Didžiausios deformacijos aptiktos tiriant gruntą nuo 1 iki 10 apkrovimo ciklo. Per visą apkrovimo ciklą buvo sukuriamas deviatorinis įtempių pokytis $\sigma_d = 10\text{--}200$ kPa. Norint išsamiau įvertinti grunto elgseną, reikia atsižvelgti į rezultatus, pateiktus 2 lentelėje.

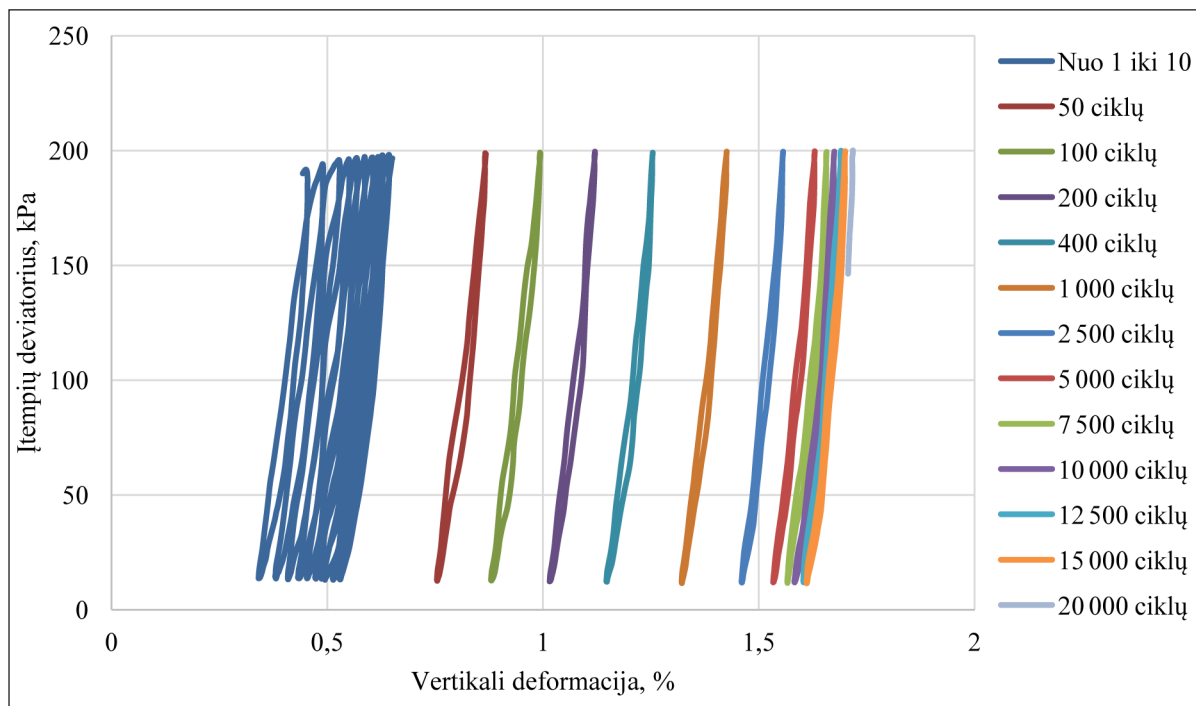
1 lentelė. Bandymų metodika esant ciklų skaičiui 20 001–21 900

Table 1. Testing methodology for cycles 20 001–21 900

Ciklai Cycles, N (–)	Celės slėgis Cell pressure σ_3 , kPa	Mažiausias įtempių deviatorius Stress deviator (minimum) $\sigma_{d, \min}$, kPa	Didžiausias įtempių deviatorius Stress deviator (maximum) $\sigma_{d, \max}$, kPa
20 100	20	10	20
20 200	20	10	35
20 300	20	10	50
20 400	20	10	70
20 500	35	10	35
20 600	35	10	50
20 700	35	10	70
20 800	35	10	90
20 900	35	10	120
21 000	50	10	50
21 100	50	10	70
21 200	50	10	90
21 300	50	10	120
21 400	50	10	160
21 500	70	10	70
21 600	70	10	90
21 700	70	10	120
21 800	70	10	160
21 900	70	10	200



4 pav. Grunto bandinio forma po bandymų
Fig. 4. Shape of soil sample after tests



5 pav. Vertikalių deformacijų pokytis, priklausomai nuo apkrovimo ciklų
Fig. 5. Vertical strain progress according to loading cycles

Analizuojant rezultatus, pateiktus 2 lentelėje, pastebima, kad liekamasis tamprumo modulis E_r labai priklauso nuo ciklų skaičiaus N ir atsirandančių deformacijų veikiant kintamam įtempių deviatoriui. Liekamosios deformacijos, kurios matuotos ties bandinio viduriu, neviršijo 0,5 %

dančių deformacijų veikiant kintamam įtempių deviatoriui. Liekamosios deformacijos, kurios matuotos ties bandinio viduriu, neviršijo 0,5 %

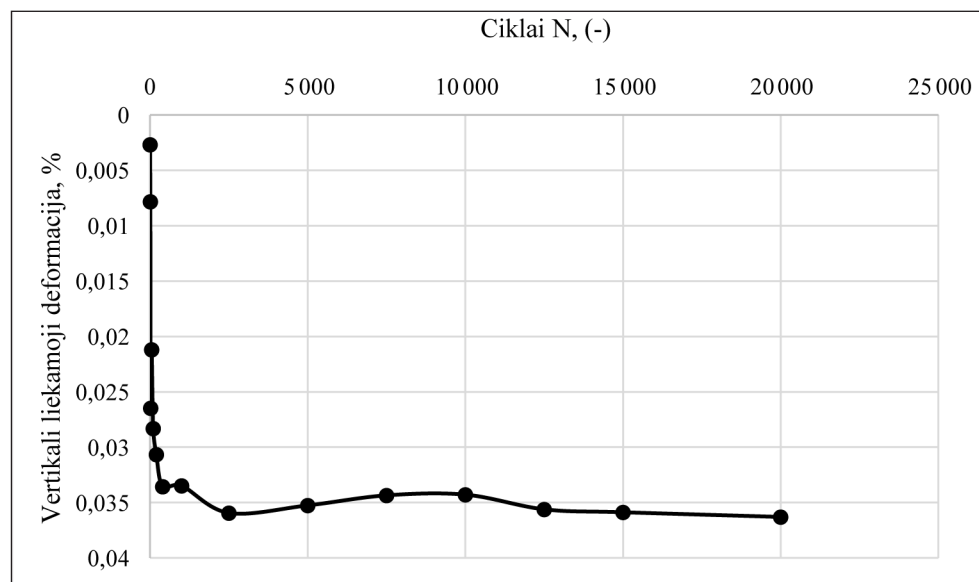
2 lentelė. Grunto, apkrauto 20 000 ciklų apkrova elgsenos rezultatai

Table 2. Results of soil behaviour loaded with 20 000 cycles

Ciklai Cycles, N (-)	Celės slėgis Cell pressure, σ_3 (kPa)		Įtempių deviatorius Stress deviator, σ_d (kPa)		Liekamosios deformacijos Residual strains, %		Liekamosios ciklo deformacijos Residual cycle strains, %		Liekamasis tam- prumo modulis Residual Young's modulus, Mpa
	min	max	min	max	ϵ_1^r	ϵ_3^r	ϵ_1^p	ϵ_3^p	E_r
1	62,45	65,12	13,68	190,01	0,000690	0,000190	0,002687	0,000059	259,47
10	63,34	65,80	13,42	195,48	0,000489	0,000186	0,007833	0,000165	565,33
20	64,60	69,58	12,80	199,59	0,000349	0,000189	0,026478	0,000458	406,59
50	66,65	69,28	12,85	198,74	0,000378	0,000129	0,021198	0,000478	988,14
100	67,80	69,48	12,58	199,08	0,000838	0,000198	0,028314	0,000691	383,49
200	68,06	70,37	12,50	199,14	0,000578	0,000164	0,030661	0,001298	602,00
400	68,94	70,58	12,29	198,94	0,000475	0,000203	0,033561	0,001510	595,02
1 000	69,72	70,81	11,89	199,15	0,000332	0,000076	0,033480	0,001898	847,34
2 500	69,72	71,04	12,05	199,54	0,000855	0,000443	0,035945	0,001708	268,23
5 000	69,73	70,86	11,75	199,71	0,000998	0,000169	0,035260	0,002043	492,38
7 500	69,72	70,99	11,63	199,25	0,001018	0,000224	0,034355	0,002176	210,96
10 000	69,73	71,13	11,94	199,65	0,000686	0,000209	0,034290	0,002266	697,27
12 500	69,73	71,04	11,72	199,59	0,000625	0,000150	0,035616	0,002297	372,21
15 000	69,73	71,05	11,57	199,63	0,000390	0,000094	0,035880	0,002145	739,19
20 000	69,72	70,80	24,55	199,40	0,000574	0,000111	0,036302	0,002566	1103,91

(6 pav.). Ši tendencija aptikta ir analizuojant atskirų ciklų liekamąsias deformacijas. Tiriama grunto bandinio plėtimosi liekamosios deformacijos

taip pat nebuvo žymios. Vertinant atskirų ciklų liekamąsias plėtimosi deformacijas ties bandinio viduriu, pastebima, kad nuo 5 000 iki 20 000



6 pav. Vertikalių liekamųjų deformacijų (ties bandinio viduriu) pokytis, priklausomai nuo apkrovimo ciklų

Fig. 6. Residual vertical strain (in the middle of the sample) progress according to loading cycles

ciklų šios deformacijos nusistovėjo ir praktiškai nekito.

Pagal gautą rezultatų kreivės pobūdį (6 pav.), tirtas gruntas priskiriamas C3 klasei (vadovaujantis LST EN 13286-7:2004), t. y. stabili deformacinė kreivė. Priskyrimas C3 klasei atliekamas pagal charakteristinės liekamosios ašinės deformacijos vertinimą prie 100 ir 20 000 apkrovimo ciklų ($\epsilon_1^c = \epsilon_1^p(20\ 000) - \epsilon_1^p(100)$). Nagrinėjamu atveju, $\epsilon_1^c = 0,007988$, tai yra daugiau nei 0,006.

Kadangi bendroji tirta žvyringo smėlio (grSa) bandinio aukščio vertikali deformacija buvo mažesnė nei 2,0 % (5 pav.), grunto bandinys papildomai ištirtas pagal bandymų metodiką, nurodytą 1 lentelėje. Nustatytas tiriamo grunto liekamasis deformacijų modulis (3 lentelė), esant skirtingiems imituojamų apkrovų intensyvumams ir grunto gyliams.

Nustatytas grunto liekamasis deformacijų modulis kinta, nes su celės slėgiu yra imituojamas skir-

tingas tiriamo grunto gylis ($\sigma_3 = 20\text{--}70$ kPa). Bandyme imituojant skirtingą gylį, gruntas ištirtas ir su skirtingais apkrovų intervalais ($\sigma_d = 10\text{--}200$ kPa). Analizuojant liekamojo deformacijų modulio vertes pastebėta, kad mažiausios reikšmės gaunamos, kai bandinys yra veikiamas įtempių deviatoriumi, kuris yra praktiškai tokio pačio dydžio kaip celės slėgis. Nustatytos didžiausios liekamojo deformacijų modulio vertės, kai įtempių deviatorius bandymų metu yra nuo 1,4 iki 2,5 kartų didesnis nei celės slėgis.

IŠVADOS

Apibendrinant gautus rezultatus galima teigti:

1. Liekamasis deformacijų modulis labai priklauso nuo deformacijų dydžio esant skirtingiems apkrovimo ciklams.

2. Tiriamo grunto atveju, grunto deformacijų elgsena priskiriama stabilioms deformacijoms,

3 lentelė. Grunto liekamojo deformacijų modulio nustatymas

Table 3. Soil residual Young's modulus determination

Ciklai Cycles, N (–)	Celės slėgis Cell pressure, σ_3 (kPa)		Įtempių deviatorius Stress deviator, σ_d (kPa)		Liekamosios deformacijos Residual strains, %		Liekamasis tamprumo modulis Residual Young's modulus, MPa
	min	max	min	max	ϵ_1^r	ϵ_3^r	E_r
20 100	20,04	20,28	9,82	19,29	0,000889	0,000277	22,25
20 200	19,94	19,94	10,54	34,13	0,001689	0,000277	16,78
20 300	19,95	20,03	10,78	48,84	0,001010	0,000272	90,68
20 400	19,95	20,00	11,42	69,22	0,001338	0,000212	55,29
20 500	34,81	35,79	10,30	34,36	0,001534	0,000395	18,57
20 600	34,69	35,37	10,62	49,03	0,000549	0,000268	149,56
20 700	34,17	35,68	11,20	69,14	0,000863	0,000166	85,34
20 800	34,12	35,72	11,67	88,92	0,001391	0,000225	65,39
20 900	34,00	35,73	12,34	119,24	0,000631	0,000113	188,62
21 000	49,82	51,02	10,59	49,29	0,000994	0,000147	83,34
21 100	49,82	50,85	11,05	69,27	0,000883	0,000138	112,60
21 200	49,83	50,05	11,19	89,00	0,001411	0,000178	74,51
21 300	49,82	50,64	11,67	119,06	0,000446	0,000080	691,89
21 400	49,82	50,68	12,08	159,25	0,000643	0,000209	239,81
21 500	69,73	71,19	10,48	69,44	0,000695	0,000156	186,30
21 600	69,73	71,10	10,90	89,34	0,000986	0,000138	372,14
21 700	69,83	70,79	11,39	119,23	0,000588	0,000087	1714,93
21 800	69,73	70,68	11,97	159,13	0,000624	0,000111	329,35
21 900	69,72	70,72	12,25	199,43	0,000633	0,000212	500,28

pagal vertikalios liekamosios deformacijos ties bandinio viduriu ir apkrovų ciklų skaičių.

3. Pagal charakteristinės liekamosios ašinės deformacijos vertinimą, tiriamas gruntas priskiriamas C3 klasei.

4. Atliekant inžinerinius geologinius ir geotechninius tyrinėjimus tose vietose, kur vėliau grunto sluoksniai bus apkraunami ciklinėmis arba kartotinai kintamomis apkrovomis yra racionalu ištirti liekamąjį grunto deformacijų modulį.

5. Liekamasis deformacijų modulis taip pat labai priklauso nuo tiriamo grunto gylio apkrovų.

6. Siūloma atsakingas automobilių kelių ir geležinkelių atkarpas ištirti šiame straipsnyje pristatytu metodu, nes Lietuvoje tokie tyrimai dar tik pradedami. Gauti rezultatai yra labai vertingi prognozuojant inžinerinio geologinio pagrindo elgseną esant skirtingam apkrovų ciklų kiekiui ir intensyvumui.

PADĖKA

Tyrimų autoriai dėkingi Vilniaus Gedimino technikos universiteto Civilinės inžinerijos mokslo centrui už suteiktą tyrimų bazę ir bandymuose naudotas medžiagas.

Gauta 2019 01 07
Priimta 2019 02 06

LITERATŪRA

1. Amšiejus J., Kačianauskas R., Norkus A., Tumonis L. 2010. Investigation of the sand porosity via oedometer testing. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 5(3): 139–147.
2. Arshad A. K., Shaffie E., Ismail F., Hashim W., Rahman Z. A. 2018. Resilient modulus of crushed granite aggregate base for use in mechanistic pavement design. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 9(9): 1151–1160.
3. Chen R., Yao W., Lu F., Xia K. 2018. Evaluation of the stress equilibrium condition in axially constrained triaxial SHPB tests. *Experimental Mechanics*. 58(2018): 527–531.
4. Dirgėlienė N. 2013. *Grunto tyrimas triašio slėgio aparatu*. Vilnius: Technika. 43 p.
5. Dirgėlienė N., Skuodis Š., Grigusevičius A. 2017. Experimental and numerical analysis of direct shear test. *Procedia Engineering, Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2016*. Amsterdam: Elsevier Ltd. 172(2017): 218–225.
6. Dundulis K., Kacynski R. R., Krauzlis K. S., Žaržojus G. 2008. Engineering geological properties of Vilnius and Warsaw region tills as building subsoils. *Geologija*. 50: S11–S15.
7. George V., Kumar A. 2016. Studies on modulus of resilience using cyclic tri-axial test and correlations to PFWD, DCP, and CBR. *International Journal of Pavement Engineering*. 19(11): 976–985.
8. Giger S. B., Ewy R. T., Favero V., Stankovic R., Keller L. M. 2018. Consolidated-undrained triaxial testing of Opalinus Clay: Results and method validation. *Geomechanics for Energy and the Environment*. 14(2018): 16–28.
9. Jamali H., Tolooiyan A., Dehghani M., Asakereh A., Kalantari B. 2018. Long-term dynamic behaviour of Coode Island Silt (CIS) containing different sand content. *Applied Ocean Research*. 73(2018): 59–69.
10. Lekstutytė I., Gadeikis S., Žaržojus G., Skuodis Š. 2018. Medininkų ledynmečio periodo moreninių gruntų mechaninės savybės. *Geologija. Geografija*. 4(2): 69–78.
11. LST EN 13286-7:2004. *Birieji ir hidrauliniais rišikliais sujungti mišiniai. 7 dalis. Biriųjų mišinių periodinės apkrovos triašis bandymas*.
12. Medzvieckas J., Dirgėlienė N., Skuodis Š. 2017. Stress-strain states differences in specimens during triaxial compression and direct shear tests. *Procedia Engineering, Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2016*. Amsterdam: Elsevier Ltd. 172(2017): 739–745.
13. Muraro S., Mašin D., Jommi C. 2018. Applicability of hypoplasticity to reconstituted peat from drained triaxial tests. *Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 42(2018): 2049–2064.
14. Polito C., Moldenhauer H. 2018. Energy dissipation and pore pressure generation in stress- and strain-controlled cyclic triaxial tests. *Geotechnical Testing Journal* (in press).
15. Sas W., Gluchowski A., Gabrys K., Sobol E., Szymanski A. 2016. Studies on cyclic and dynamic loading on cohesive soil in road engineering. *Proceedings of 13th Baltic Sea Geotechnical Conference "Historical Experience and Challenges of Geotechnical Problems in Baltic Sea Region"*. Lithuanian Geotechnical Society. Lithuania, 22–24 September. p. 85–92.
16. Skuodis Š., Markauskas D., Norkus A., Žaržojus G., Dirgėlienė N. 2014. Testing and numerical simulation of Holocene marine sand uniaxial compression at Lithuanian coast. *Baltica*. 27(1): 33–44.
17. Skuodis Š., Karaman A. H., Dirgėlienė N. 2017. Comparison of one-step and step-wise compression tests. *Geologija, Geografija*. 3(1): 1–10.
18. Žaržojus G., Dundulis K. 2010. Problems of correlation between dynamic probing test (DPSH) and cone penetration test (CPT) for cohesive soils of Lithuania. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 5(2): 69–75.

19. Žaržojus G., Kelevišius K. 2016. Smėlio tyrimai patobulintu dinaminiu penetrometru. *Geologija. Geografija*. 2(2): 84–91.
20. Žaržojus G., Kelevišius K., Amšiejus A. 2013. Energy transfer measuring in dynamic probing test in layered geological strata. *Procedia Engineering, Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2016*. Amsterdam: Elsevier Ltd. 57(2013): 1302–1308.

Šarūnas Skuodis, Rokas Karpis, Mindaugas Zakarka,
Modestas Gedvilas, Vytautas Raginis, Kornelija Orlova,
Mantas Katauskas

INVESTIGATION OF SOIL BEHAVIOUR AFFECTED WITH CYCLIC LOADS

Summary

This paper presents the results of a cyclic triaxial test on soil, namely gravely sand. These tests are very important for the evaluation of engineering geological and geotechnical conditions when the strata is loaded with cyclic loads. The provided research work shows the resilient Young's modulus change according to cycles quantity, stress deviator change and applied cell pressure. During the investigations, the constant cycles frequency (1 Hz) was applied. This frequency imitates moving road loads (moving car's first and second axis

load on road construction). Cycles quantity could be used for ranking materials on the basis of their plastic deformability. During this research it was obtained that investigated soil behaviour acts as stable deformation behaviour (plastic shakedown). The conditioning phase was realised using stress deviator values from 10 to 200 kPa with total cycles quantity 20 000. Analysing soil behaviour at the conditioning phase it was obtained that total sample deformation is less than 2.0% and resilient strain in the middle of the sample is less than 0.5%. According to characteristic permanent axial strain, investigated soil is classified as C3 class. The repeated loading phase was realised using stress deviators from 10 to 200 kPa with cell pressure from 20 to 70 kPa. Repeated loading for resilient testing showed that the resilient Young's modulus depends on applied cell pressure and stress deviator minimum and maximum values. The investigated soil sample shape after tests was almost the same as before the tests. Obtained results are very valuable when it is necessary to evaluate soil behaviour under different cyclic loading and load stresses. Also, when repeated loading tests are provided with different cell pressures it is possible to imitate soil layer behaviour in different depths.

Keywords: Young's modulus, resilient Young's modulus, resilient strains, cyclic load, triaxial test

Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“ STATYBA

Konstrukcijos ir taikomoji mechanika

<https://liedm.zoom.us/j/91592490692>

2020-04-24, 9:00 val.

Dalyvių ir pranešimų sąrašas

Pranešimo laikas	Vardas, Pavardė	Tema
9:00 – 9:10	prof. habil. dr. Gintaris Kaklauskas	Įžanginis žodis
9:10 – 9:20	Povilas Dabrila	Inovatyvios vantinio tilto formos konstravimas
9:20 – 9:30	Mindaugas Zakarka	Molinių gruntų stiprinimas naudojant mineralinės vatos lakiuosius pelenus
9:30 – 9:40	Giedrius Jočbalis	Dalelės - paviršiaus kontakto modeliavimas esant dideliems greičiams
9:40 – 9:50	Giedrius Vanagas	Statybos projektų kokybės užtikrinimo būdai taikant BIM
9:50 – 10:00	Linas Plioplys, Mantas Garnevičius	Betono ir sintetinio makro-plaušo sukibties savybių nustatymas ir modeliavimas
10:00 – 10:10	Gennaro Mattei	Assessment of the susceptibility of the road network to flooding according to rainfall and geographical parameter
10:10 – 10:20	Skaistė Padegimaitė	Dispersiškai armuoto lengvojo betono mišinio kūrimas ir gniuždomojo stiprio tyrimai
10:20 – 10:30	Tautvydas Zakaras	Lenkiamųjų aliumininių profiliuotųjų stiprinimo galimybių tyrimai
10:30 – 10:40	Kornelija Orlova	Smėlinių gruntų klasifikacija pagal CPT duomenis
10:40 – 10:50	Šarūnas Galčius	Vieningos duomenų valdymo aplinkos (CDE) diegimas projektavimo įmonėje
10:50 – 11:00	Haji Akbar Sultani	Efficiency analysis of composite reinforcement systems of bending concrete members
11:00 – 11:10	Oleksandr Hubanov	Numerical experiment for simulation of chordae