

Civil engineering
Statybos inžinerijaGRUNTO SANKASOS, VEIKIAMOS AUTOMOBILIŲ KELIŲ APKROVOMIS,
ĮTEMPIŲ ANALIZĖMindaugas ZAKARKA **Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

Gauta 2021 m. gegužės 18 d.; priimta 2021 m. lapkričio 30 d.

Santrauka. Straipsnyje yra apžvelgiamos kelio konstrukcijai tenkančios automobilių apkrovos ir apskaičiuoti vertikalūs ir horizontalūs įtempiai, atsirandantys grunto sankasose. Šie skaičiavimai leidžia prognozuoti nuo automobilių apkrovų atsirandančių papildomų įtempių sklidimo gylį bei intensyvumą. Skaičiavimai atlikti pagal keturis Lietuvoje galiojančius norminius dokumentus, kurie apibrėžia kelio konstrukcijai tenkančias apkrovas. Gauti rezultatai parodė, kad didžiausią įtaką įtempių intensyvumui ir sklidimo atstumui turi plotas, į kurį išskirstyta apkrova. Nustatyta, kad didžiausias horizontalus įtempis, tenkantis grunto sankasai, yra ne didesnis nei 70 kPa, o didžiausias įtempių sklidimo atstumas neviršija 0,9 m. Rezultatus galima pritaikyti atliekant statinius grunto bandymus su triašio slėgio aparatu, kada norima atkurti horizontalius sankasoje vyraujančius įtempius. Rekomenduojama šoninį slėgį parinkti nuo 20 kPa iki 70 kPa. Su šiuo šoniniu slėgiu nustatytos grunto mechaninės savybės būtų reprezentatyvios, taikant gautus bandymų rezultatus sankasų projektavimo srityje.

Reikšminiai žodžiai: įtempių analizė, apkrovų parinkimas, grunto sankasa, automobilių keliai, vertikalūs įtempiai, horizontalūs įtempiai.

Įvadas

Vertinant grunto sankasos elgseną, turi būti parinktos tinkamos prielaidos sudarant grunto inžinerinių geologinių ir geotechninių tyrimų programą. Šią programą reglamentuoja STR 1.04.02:2011. Vienas iš svarbiausių veiksnių, lemiančių tinkamą grunto sankasos elgsenos prognozavimą, – apkrovų parinkimas atliekant sankasos grunto sluoksnių bandymus (Giwangkara et al., 2020). Grunto bandymuose taikomas apkrovas galima parinkti apskaičiuojant įtempių sklidimą vertikalia ir horizontalia kryptimi (Frazee, 2021). Vertikalūs įtempiai nusako papildomų apkrovų sankasoje gylį nuo jų veikiančių automobilių apkrovų. Atliekant bandymus su triašio slėgio aparatu (Dirgėlienė, 2013), pagal horizontalius įtempius ir jų sklidimą sankasoje parenkami grunto šoniniai slėgiai. Tinkamas apkrovų parinkimas su triašio slėgio aparatu leidžia nustatyti aktualias grunto mechanines savybes sankasose, nes mechaninių savybių kitimas priklauso ir nuo apkrovų intensyvumo. Pavyzdžiui, atliekant nesankabių gruntų bandymus su didėjančiomis apkrovomis, purių gruntų vidinės trinties kampas didėja, o tankių – mažėja (Ghazavi et al., 2008; Bareither et al., 2008). Taip pat grunto mechaninių savybių verčių patikimumas priklauso nuo bandymų kiekio (Skuodis et al., 2016).

Šio straipsnio tikslas – įvertinti automobilių kelių sukeliamas apkrovas grunto sankasose ir apskaičiuoti susidarančius vertikalius ir horizontalius įtempius. Pagal apskaičiuotus vertikalius įtempius galima nustatyti įtempių sklidimo gylį, o pagal horizontalius įtempius parinkti tinkamą (reprezentuojantį sankasos apkrovas) šoninį slėgį atliekant bandymus su triašio slėgio aparatu.

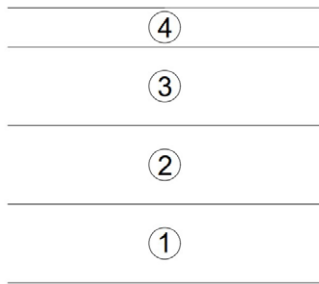
1. Kelio konstrukcijos apkrovos

Lietuvoje kelio konstrukcijos apkrovos gali būti parenkamos pagal LST EN 1991-2, KPT SDK 19, KTR 1.01:2008 ir STR 2.05.04:2003. LST EN 1991-2 (Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 2 dalis) apibrėžia automobilių kelių eismo apkrovas, kurios atsiranda dėl automobilių, sunkvežimių ir specialių transporto priemonių. Važiuojamoji dalis, kuri apkrauta šiomis apkrovomis, dalijama į skaičiuojamąsias juostas (1 pav.). 1-ąja juosta vadinama juosta, kuriai tenka nepalankiausias apkrovimas, antrąja – mažiau nepalankus, o 4-oji juosta vadinama liekamuoju plotu. Juostai tenkantis apkrovų modelis susideda iš dviejų dalinių apkrovų: koncentruotos ašies apkrovos (tandeminės apkrovos), kuri dalinama į du ratus, ir tolygiai paskirstytos apkrovos.

*Autorius susirašinėti. El. paštas mindaugas.zakarka@vilniustech.lt

Jų reikšmės pateikiamos 1 lentelėje. Šios apkrovos veikia kvadratinį rato sąlyčio paviršių, kurio kraštinė lygi 0,4 m. Atliekant patikrinimus, tandeminė apkrova užkraunama pačioje nepalankiausioje vietoje – gretimose juostose, kada atstumas tarp ašių lygus 0,5 m (2 pav.).

Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklėse (KPT SDK 19) projektinei apkrovai nustatyti pateikiami du metodai. Pirmasis taikomas, kai žinomas vidutinis sunkiojo transporto eismo intensyvumas per parą. Antrasis laikomas prioritetiniu, kada nustatoma projektinė apkrova magistralėms ir krašto ke-



1 paveikslas. Juostų numeravimo bendriausiuoju atveju pavyzdys (LST EN 1991-2, 2006): 1 – juosta, kuriai tenka nepalankiausia apkrova; 2 – mažiau nepalanki apkrova; 3 – mažiau nepalanki apkrova; 4 – liekamasis plotas
Figure 1. Example of the lane numbering in the most general case (LST EN 1991-2, 2006): 1 – the lane giving the most unfavourable effect; 2 – the lane giving the second most unfavourable effect; 3 – the lane giving the third most unfavourable effect; 4 – remaining area

1 lentelė. Kelio konstrukcijai tenkančios apkrovos pagal LST EN 1991-2
Table 1. The road loads according to LST EN 1991-2

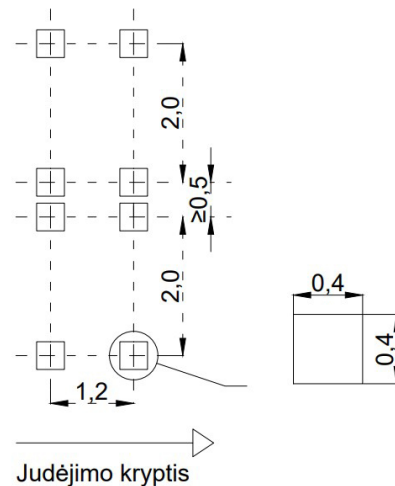
Standartas:	LST EN 1991-2				
Vieta	Ašies apkrova (tandeminė apkrova), kN	Ratui tenkanti apkrova, kN	Tolygiai paskirstyta apkrova, kN/m ²	Apkrova išskirstyta į kvadratą, kurio kraštinė 0,4 m	Atramai tenkanti apkrova, kPa
1-oji juosta	300,0	150,0	9,0		938,9
2-oji juosta	200,0	100,0	2,5		625,4
3-oji juosta	100,0	50,0	2,5		312,9
Liekamasis plotas	0	0	2,5		0,4

2 lentelė. Kelio konstrukcijai tenkančios apkrovos pagal KPT SDK 19
Table 2. The road loads according to KPT SDK 19

Transporto priemonės klasė	4 a. krovininis automobilis	Atramai tenkanti apkrova, kPa	2 a. autobusai	Atramai tenkanti apkrova, kPa	3 a. krovininis automobilis su 3 a. priekaba	Atramai tenkanti apkrova, kPa	
Vidutinis visiškai pakrautos tr. pr. svoris, t	27,3		16,6		36,2		
Svorio pasiskirstymas, %	1 ašis	20,7	394,7	34,7	402,4	17,7	444,7
	2 ašis	20,6	392,8	65,3	757,2	20,3	510,0
	3 ašis	30,7	585,4	-	-	18,3	459,8
	4 ašis	28,0	533,9	-	-	15,9	399,5
	5 ašis	-	-	-	-	13,9	349,2
	6 ašis	-	-	-	-	13,9	349,2

Pastaba: apkrovos išskirstytos į apskritimą, kurio skersmuo 0,3 m (iš viso 16 transporto priemonių klasių).

liams. Šiam metodui reikalingos transporto priemonių ašių apkrovos. Ašių apkrovos nustatomos pagal svėrimo eisme (dinaminis svėrimas) arba svėrimo postuose (statis svėrimas) duomenis. Taip pat ašių apkrovos gali būti nustatomos pagal transporto priemonių klases ir teorinį svorio pasiskirstymą ašims. Šie duomenys pateikti kaip šešiolika skirtingo svorio transporto priemonių, kurios turi skirtingą ašių kiekį ir skirtingą svorio pasiskirstymą į ašis (2 lentelė). KPT SDK 19 neapibrėžia atstumo tarp



2 paveikslas. 1-ojo apkrovų modelio taikymas (LST EN 1991-2, 2006)

Figure 2. Application of load Model 1 (LST EN 1991-2, 2006)

ašių, todėl skaičiuojant buvo pasirinktas nepalankiausias atstumas, kurį nurodo LST EN 1991-2. Ašies apkrovą priimta išskirti į apskritimo paviršių, kurio skersmuo 0,3 m.

Kelių techninis reglamentas KTR 1.01:2008 „Automobilių keliai“ pateikia labai neišsamias leidžiamąsias ašies apkrovas. Projektinės apkrovos automobilio ašiai dydis priklauso nuo kelio tipo. Tiesiant ir rekonstruojant magistralinius ir krašto kelius, apkrova automobilio ašiai – 115 kN, tiesiant ir rekonstruojant kitus kelius – 100 kN (3 lentelė). Dėl trūkstamo išsamesnio apkrovų apibrėžimo tenka daryti prielaidas. Jos pasirenkamos tokios pat, kaip ir KPT SDK 19 atveju – atstumas tarp ašių lygus 0,5 m, o plotas, į kurį išskirstyta apkrova, 0,3 m skersmens apskritimas.

Statybos techninis reglamentas STR 2.05.04:2003 „Poveikiai ir apkrovos“ skirtas garažuose ir transporto priemonių eismo plotuose naudojimo apkrovoms skaičiuoti. Pastatų eismo ir stovėjimo plotai skirstomi į F ir G kategorijas. F kategorijai priskiriamos lengvosios transporto priemonės (≤ 30 kN bendrasis transporto priemonės svoris), o G kategorijai vidutinių transporto priemonių eismo ir stovėjimo plotai (> 30 kN bendrasis transporto priemonės svoris ≤ 160 kN, dviem ašims). Reglamente pateikiamas apkrovos modelis susideda iš dviejų apkrovų: ašiai tenkančios koncentruotos apkrovos ir tolygiai išskirstytos apkrovos, kurios skiriasi priklausomai nuo kategorijos (4 lentelė). Taip pat nuo kategorijos skiriasi plotas, į kurį išskirstyta apkrova: F kategorijai kvadratas, kurio kraštinė 0,1 m, o G kategorijai kvadratas, kurio kraštinė 0,2 m. STR 2.05.04:2003 neapibrėžia atstumo tarp ašių, todėl skaičiuojant buvo pasirinktas nepalankiausias atstumas 0,5 m, kurį nurodo LST EN 1991-2.

3 lentelė. Kelio konstrukcijai tenkančios apkrovos pagal KTR 1.01:2008

Table 3. The road loads according to KTR 1.01:2008

Standartas:	KTR 1.01:2008
Koncentruota apkrova, kN	Atramai tenkanti apkrova, kPa
115,0	813,9
100,0	707,5

Pastaba: apkrovos išskirstytos į apskritimą, kurio skersmuo 0,3 m.

4 lentelė. Kelio konstrukcijai tenkančios apkrovos pagal STR 2.05.04:2003

Table 4. The road loads according to STR 2.05.04:2003

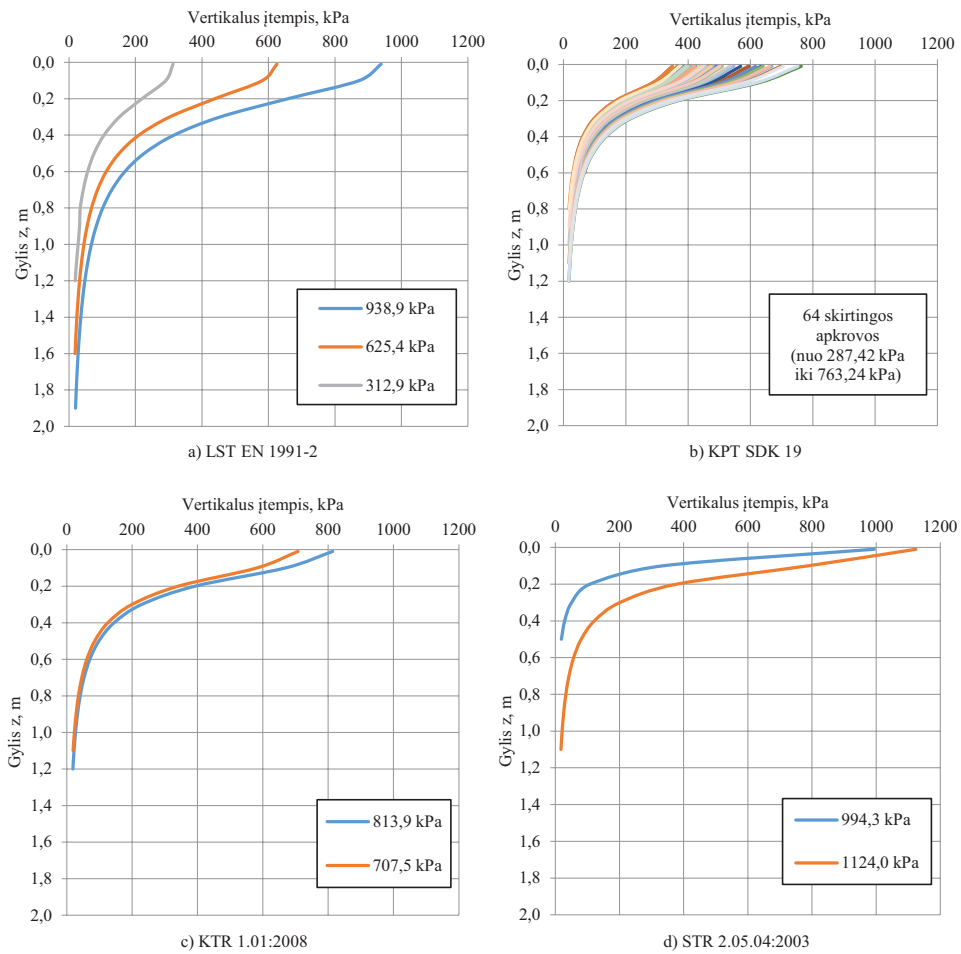
Standartas:	STR 2.05.04:2003				
	Kategorija	Ašies apkrova (tandeminė apkrova), kN	Ratui tenkanti apkrova, kN	Tolygiai paskirstyta apkrova, kN/m ²	Apkrova, išskirstyta į kvadratą, kurio kraštinė, m
F	20,0	10,0	2,5	0,1	994,3
G	90,0	45,0	5,0	0,2	1124,0

2. Įtempių sklidimas

Automobilių apkrovos sankasoje sukelia papildomus vertikalinius ir horizontalius įtempius. Pagal apskaičiuotus vertikalinius įtempius galima nustatyti įtempių sklidimo atstumą (gylį). Skaičiavimai atlikti taikant Businesso sprendinį. Didžiausios vertikalios įtempio reikšmės gaunamos ties apkrovos pridėjimo ašimi. Didėjant gyliui arba tolstant nuo apkrovos pridėjimo ašies, įtempis mažėja. Jis laikomas nuslopusiu, kada tampa lygus arba mažesnis nei 10 % nuo pradinės reikšmės. Apskaičiuoti įtempių sklidimo rezultatai pagal LST EN 1991-2, KPT SDK 19, KTR 1.01:2008 ir STR 2.05.04:2003 yra pateikti 3 paveiksle.

Didžiausias vertikalus įtempis (1124 kPa) susiformuoja atliekant skaičiavimus pagal STR 2.05.04:2003 pateiktas apkrovas (3 pav., d dalis). Tačiau šio įtempio sklidimas yra sekiausias – 10 % nuo pradinės vertikalios įtempio reikšmės nustatyta 0,42 m gilyje. Giliausiai sklinda vertikalus įtempis, apskaičiuotas pagal LST EN 1991-2 pateiktas apkrovas (3 pav., a dalis). Šio įtempio 10 % nuo pradinės vertikalios įtempio reikšmės nustatyta 0,83 m gilyje. Didžiausią įtaką įtempio sklidimo gyliui turi plotas, į kurį išskirstyta apkrova. Kuo plotas mažesnis, tuo įtempio sklidimo gylis trumpesnis.

Principinė horizontalių įtempių sklidimo kreivė yra aptarta Šimkaus (1984), t. y. horizontalūs įtempiai sklinda ne tik vertikalia kryptimi, bet ir horizontalia kryptimi. Dėl šios priežasties, norint nustatyti didžiausias įtempių reikšmes, neužtenka atlikti skaičiavimus tik ties apkrovos pridėjimo ašimi. Horizontalių įtempių rezultatų analizė pateikta 4 pav., kur a, c, e ir g dalys reprezentuoja vienos apkrovos sukeltus įtempius. Tais atvejais, kai horizontalūs įtempiai gali sumuotis (jei šalia viena kitos veikia kelios apkrovos), horizontalių įtempių reikšmės išauga (4 pav., b, d, f, h dalys). Esant skirtingiems gyliams ir atstumams nuo ašies, 4 pav. pateiktose skirtingose dalyse tam tikros horizontalių įtempių kreivės nėra vientisos (nutrūksta), nes įtempiai užgęsta (artimi nuliui arba tampa lygūs nuliui). Pagal LST EN 1991-2 nurodymus viena nuo kitos nutolusios apkrovos gali būti ne mažiau nei per 0,5 m. Didžiausios reikšmės nustatytos ties sankasos paviršiumi pagal STR 2.05.04:2003 pateiktas apkrovas ir yra lygios 769,33 kPa (4 pav., g dalis). Tačiau horizontalia kryptimi šis įtempis užgęsta esant 0,1 m. Kaip ir vertikalūs, horizontalūs įtempiai giliausiai sklinda pagal LST EN 1991-2 pateiktas apkrovas (4 pav., a dalis).



3 paveikslas. Vertikalių įtempių sklidimas
Figure 3. Vertical stresses distribution

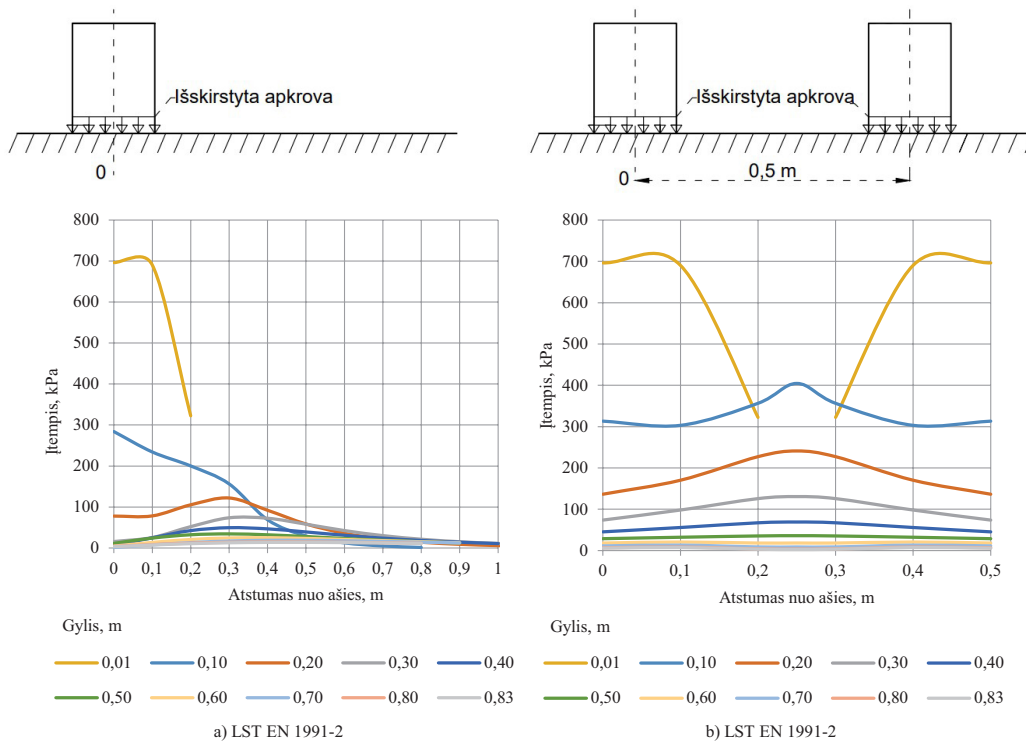
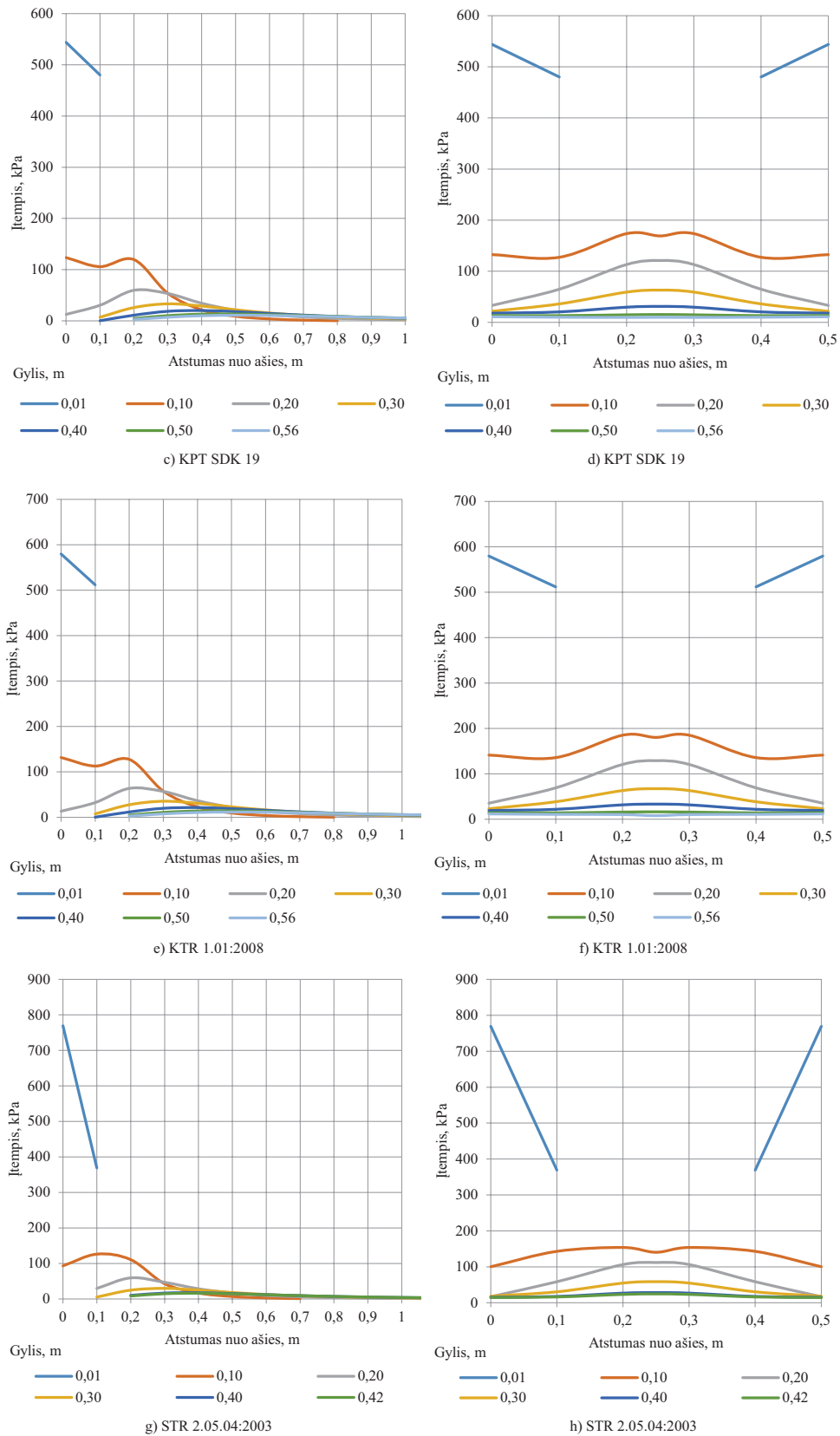


Figure 4. To be continued



4 paveikslas. Horizontalių įtempių sklidimas
 Figure 4. Horizontal stresses distribution

5 lentelė. Kelio konstrukcijoje atsirandančių horizontalių įtempių didžiausios reikšmės
Table 5. Maximum values of horizontal stresses in the road structure

Kelio sankasos konstrukcijos dalis	Gylis, m	Skirtingais standartais nustatomi horizontalūs įtempiai, kPa			
		LST EN 1991-2	KPT SDK 19	KTR 1.01:2008	STR 2.05.04:2003
Kelio dangos konstrukcija	0,01	696,31	543,83	579,72	769,33
	0,10	404,57	173,55	185,00	153,84
	0,20	241,14	120,93	128,91	111,93
	0,30	130,69	63,00	67,16	58,59
Grunto sankasos konstrukcija	0,40	69,15	31,17	33,23	28,42
	0,50	36,08	15,26	16,27	–
	0,60	20,75	–	–	–
	0,70	13,26	–	–	–
	0,80	8,45	–	–	–

Horizontalių įtempių reikšmės sankasoje aktualios sudarant grunto inžinerinių geologinių ir geotechninių tyrimų programą. Sankasos grunto sluoksnių bandymams atlikti svarbus tinkamas apkrovų parinkimas. Bandymus atliekant triašio slėgio aparatu, pagal horizontalių įtempių reikšmes parenkamas šoninis slėgis, kuriuo veikiamas gruntas. Darant prielaidą, kad 0,4 m viršutinė sankasos dalis yra kelio dangos konstrukcija ir dangos pagrindas, didžiausias horizontalus įtempis neviršija 70 kPa (5 lentelė). Giliausiai sklindantis ir didžiausias reikšmes turi horizontalūs įtempiai, apskaičiuoti pagal LST EN 1991-2 pateiktas apkrovas.

Taigi, pagal 5 lentelėje pateiktus horizontalius įtempius racionalu atlikti grunto triašio slėgio bandymus naudojant šoninį slėgį nuo 20 iki 70 kPa. Esant poreikiui galima naudoti tarpines šoninio slėgio apkrovas nuo 35 iki 50 kPa. Tarpinių apkrovų dydis ir kiekis turi būti parenkamas pagal konkretų atvejį.

Išvados

Atlikus įtempių sklidimo analizę pagal skirtingas metodus, galima daryti šias išvadas:

- 1) įtempių intensyvumui ir sklidimo atstumui didžiausią įtaką turi plotas, į kurį išskirstyta apkrova;
- 2) didžiausi vertikalūs ir horizontalūs įtempiai gauti ties sankasos paviršiumi pagal STR 2.05.04:2003 apskaičiuotas apkrovas;
- 3) didžiausias įtempių sklidimo atstumas vertikalėms ir horizontalėms įtempiams nustatytas pagal LST EN 1991-2 apskaičiuotas apkrovas;
- 4) atliekant statinius grunto bandymus su triašio slėgio aparatu ir atkuriant horizontalius sankasoje vyraujančius įtempius, rekomenduojama šoninį slėgį parinkti nuo 20 kPa iki 70 kPa. Esant šiam šoniniam slėgiui nustatytos grunto mechaninės savybės būtų reprezentatyvios, taikant gautus bandymų rezultatus sankasų projektavimo srityje.

Literatūra

- Bareither, C. A., Edil, T. B., Benson, C. H., & Mickelson, D. M. (2008). Geological and physical factors affecting the friction angle of compacted soils. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 134(10), 1476–1489.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:10\(1476\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:10(1476))
- Dirgėlienė, N. (2013). *Grunto tyrimas triašio slėgio aparatu: metodikos nurodymai*. Technika.
<http://dspace1.vgtu.lt/handle/1/1592>
- Fraze, G. R. (2021). New formulations of boussinesq solution for vertical and lateral stresses in soil. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 26(2).
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000567](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000567)
- Ghazavi, M., Hosseini, M., & Mollanouri, M. (2008, October). A comparison between angle of repose and friction angle of sand. In *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics* (pp. 1272–1275), Goa, India.
- Giwangkara, G. G., Mohamed, A., Nor, H. M. D., & Khalid, N. H. A. (2020). The analysis of stress distribution on the physical model of road base layer. *The International Journal of Integrated Engineering*, 12(8), 348–355.
<https://doi.org/10.30880/ijie.2020.12.08.033>
- Lietuvos automobilių kelių direkcija. (2019). *Automobilių kelių standartizuotų dangų konstrukcijų projektavimo taisyklės KPT SDK 19*. Vilnius.
- Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija. (2003). *Poveikiai ir apkrovos (STR 2.05.04:2003)*. Vilnius.
- Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija. (2008). *Kelių techninis reglamentas „Automobilių keliai“ (KTR 1.01:2008)*. Vilnius.
- Lietuvos Respublikos aplinkos ministerija. (2011). *Inžineriniai geologiniai ir geotechniniai tyrimai (STR 1.04.02:2011)*. Vilnius.
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2012). *Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 2 dalis. Tiltų eismo apkrovos (LST EN 1991-2)*. Vilnius.
- Skuodis, Š., Norkus, A., Dirgėlienė, N., & Rimkus, L. (2016). Determining characteristic sand shear parameters of strength via a direct shear test. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(2), 271–278.
<https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1073174>
- Šimkus, J. (1984). *Gruntų mechanika, pagrindai ir pamatai*. Mokslas.

ANALYSIS OF THE TRAFFIC LOAD-INDUCED STRESSES OF EMBANKMENT

M. Zakarka

Abstract

This article represents traffic loads on the road structure distribution and evaluation of the vertical and horizontal stresses formation in the soil embankment. This evaluation allows to predict the depth and intensity of the propagation of additional stresses resulting from traffic loads. The calculations were performed in accordance with four normative documents applied in Lithuania, which define the loads on the road structure. The obtained results showed that the area to which the load is distributed has the greatest influence on the intensity of stresses and the distance of propagation. The maximum horizontal stress in the embankment was found to be no more than 70 kPa and the maximum stress propagation depth did not exceed 0.9 m. The results can be applied to a triaxial test apparatus to restore horizontal stresses in the embankment. It is recommended to select a lateral pressure from 20 kPa to 70 kPa for tests provided with triaxial test device. The mechanical properties of the soil determined with triaxial test device and recommended lateral pressure would be representative of the test results obtained in the field of embankment.

Keywords: stresses determination, stresses analysis, soil embankment, roads, vertical stresses, horizontal stresses.