

## GILIŲJŲ PAMATŲ MODELIAVIMAS TAIKANT *MOHR-COULOMB* MODELĮ TANKIUOSE SMĖLIUOSE, ESANT DILATACIJAI

Darius Macijauskas<sup>1</sup>, Jonas Amšiejus<sup>2</sup>

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: <sup>1</sup>darius.macijauskas@stst.vgtu.lt; <sup>2</sup>ajonas@st.vgtu.lt

**Anotacija.** Straipsnyje nagrinėjamas giliųjų pamatų (standžių gręžtinių ir gręžtinių polių) apkrovos pasiskirstymas tarp pamato pado ir šonų, kai jie yra tankiuose vienalyčiuose smėliuose. Naudojant programinį paketą *Plakis 3D Foundation v2*, modeliuojama keičiant dilatacijos kampą ir vertinamas *Mohr-Coulomb* modelio tinkamumas giliųjų pamatų pagrindams modeliuoti. Skirtinguose kampuose yra nevienodas apkrovos pasiskirstymas tarp pado ir šonų, taip pat, didėjant kampui, didėja ir šoninė trintis. Tačiau *Mohr-Coulomb* grunto modelyje drenuojant grunto tūris didėja tol, kol vyksta skersinės deformacijos. Realiesiems gruntams tai nėra būdinga, nes dėl tam tikrų įtempių dilatacija nevyksta. Paklaida mažėja, kai mažėja santykinis giliojo pamato ilgis  $L/D$  ir dilatacijos kampas  $\psi$ .

**Reikšminiai žodžiai:** polis, gręžtinis pamatas, šoninė trintis, padas, dilatacija, tankus smėlis.

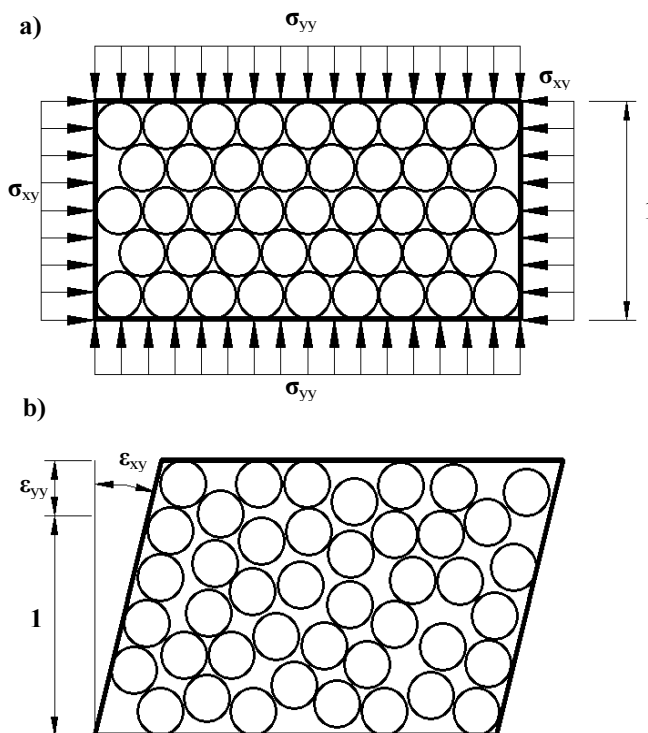
### Įvadas

Polio ribinę laikomąją galią sudaro šoninio paviršiaus ir pado laikomųjų galių suma, kai viena iš jų visiškai, o kita tam tikra dalimi mobilizuojasi. Skirtinguose literatūros šaltiniuose teigiama, jog apkrova į polio padą perduodama laipsniškai, šoniniam paviršiui pasiekus ribinius įtempius (Bowles 1997), arba dalis apkrovos polio padui perduodama iškart, vos tik uždėjus nors ir labai mažą apkrovą (Šimkus 1984; Šimkus *et al.* 1985).

Didinant apkrovą, šoniniame paviršiuje pasiekiami maksimalūs tangentiniai įtempiai, ir jie nedidėja, o kai kuriais atvejais netgi mažėja (Šimkus 1984; Šimkus *et al.* 1985).

Vienuose šaltiniuose teigiama, jog apkrovos ir nusėdžio bei apkrovos transformavimo kreivių nagrinėjimas (iš polių bandymų statine apkrova) parodo, kad maksimali trintis atsiranda, kai slydimas tarp polio ir grunto yra 5–10 mm (Whitaker, Cooke 1966; Coyle, Reese 1966), kituose – kad maksimali šoninė trintis išsivysto poliui nusėdus 5–20 mm, o tankiuose, mažai suspaudžiamuose gruntuose – 3–5 mm (Šimkus 1984; Šimkus *et al.* 1985).

Dilatacija – tai granulinių medžiagų savybė didinti tūrį dėl tangentinių įtempių poveikio. Tūris didėja dėl dalelių slinkimo viena ant kitos, kai medžiaga gerai sutankinta (1 pav.) (Reynolds 1884).



**1 pav.** Bendras dilatacijos modelis iš tankiai supakuotų sferų: a) prieš apkraunant bandinį; b) deformuotas bandinys

**Fig. 1.** General dilatancy model of well-packed spheres: a) before loading the specimen; b) deformed specimen

Dilatacijos kampo tangentas – tai santykis tarp santykinų linijinių deformacijų ir santykinų kampinių deformacijų.

$$\tan \psi = \frac{\Delta \varepsilon_{yy}}{\Delta \varepsilon_{xy}}, \quad (1)$$

čia:  $\Delta \varepsilon_{yy}$  – santykinės linijinės deformacijos;

$\Delta \varepsilon_{xy}$  – santykinės kampinės deformacijos.

Tačiau esant tam tikriems įtempiams tankus gruntas nustoja didinti tūrį (kai pasiekiamas ekstremalus poringumas), įtempiams didėjant – pradeda tūrį mažinti. Be to, gali būti pasiekiamas pačių dalelių struktūrinis stipris.

*Mohr-Coulomb* grunto modelis įvertina tamprias ir plastines grunto deformacijas. Šio modelio stiprumo kriterijus yra

$$|\tau| \leq |\sigma| \cdot \tan \varphi + c, \quad (2)$$

čia:  $\tau$  – tangentinis įtempis;  $\sigma$  – normalinis įtempis;  $\varphi$  – grunto vidinės trinties kampas;  $c$  – grunto sankabumas.

Takumo funkcija:

$$f = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi, \quad (3)$$

čia  $\sigma_1$  ir  $\sigma_3$  – pagrindiniai didžiausias ir mažiausias įtempiai.

Funkcija, aprašanti plastišką grunto elgseną:

$$g = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \sin \psi + \text{const}, \quad (4)$$

čia:  $\psi$  – grunto dilatacijos kampas (Brinkgreve, Swolfs 2007).

Tai, kad dilatacija vyksta tol, kol vyksta skersinės deformacijos – yra šio modelio apribojimas.

### Dilatacijos kampo skaičiavimas smėlio rūšims

Įvairių smėlio rūšių dilatacijos kampas priklauso nuo jų tankumo ir vidinės trinties kampo. Norint apytiksliai apskaičiuoti kvarcinio smėlio rūšių dilatacijos kampą, galima taikyti šią formulę:

$$\psi \approx \varphi - 30^\circ, \quad (5)$$

čia  $\varphi$  – grunto vidinės trinties kampas (Brinkgreve, Swolfs 2007).

Lietuvos Respublikoje esančias smėlio rūšis sudaro kvarco mineralai (70–80 %), lauko špatai (16–20 %), o likusią dalį – karbonatai. Todėl naudojantis (5) formule buvo skaičiuojamas maksimalus dilatacijos kampas.

## Diskretinis modelis

### Geometrija

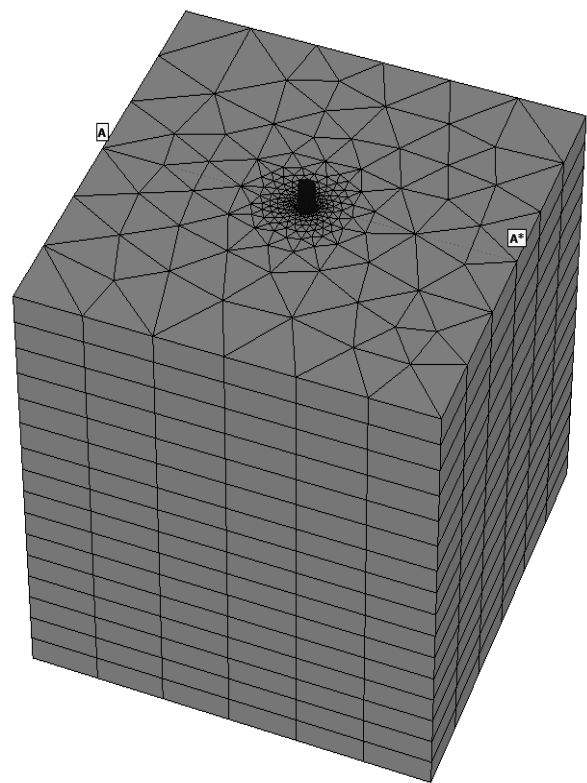
Analizuoti du pamatų tipai – 5 m ilgio ir 500 mm skersmens gręžtinis polis (P1) bei 1,5 m ilgio ir 500 mm skersmens standus gręžtinis pamatas (P2) (2 pav.).

Diskretinio modelio geometriniai duomenys pateikti 1 lentelėje.

**1 lentelė.** Geometriniai modelių duomenys

**Table 1.** Geometry data of models

Pamatas	Geologinio kūno matmenys, m			Pamato ilgis, m
	ilgis	plotis	aukštis	
P1	5,50	5,50	11,00	5,00
P2	3,00	3,00	6,00	1,50



**2 pav.** Pamatų P2 diskretinis modelis

**Fig. 2.** Discreet model of foundation P2

### Medžiagų modelis

Pagrindo modeliavimui naudojamas *Mohr-Coulomb* modelis. Atliekama netiesinė analizė.

Pamatui, kaip gelžbetoniniam elementui ir tiesiškai tampriai medžiagai, modeliuoti naudojamas *Linear Elastic* modelis.

### Medžiagų savybės

Abiejuose modeliuose P1 ir P2 remiamasi tomis pačiomis grunto ir pamato medžiagų charakteristikomis. Jos pateikiamos 2 lentelėje.

Kadangi pasirinkto diskretinio modelio grunto vidinės trinties kampas  $\varphi = 35^\circ$ , tai dilatacijos kampas priimamas kintamas –  $0^\circ$ – $5^\circ$  atskiruose modeliuose (atsižvelgiant į (5) formulę).

**2 lentelė.** Medžiagų savybių charakteristikos

**Table 2.** Characteristics of materials

Rodiklis	Žymėjimas	Reikšmė	Vienetai
DRENUOTAS SMĖLIS			
Deformacijų modulis	$E$	60	MPa
Vienetinis svoris	$\gamma$	19	kN/m <sup>3</sup>
Puasono koeficientas	$\nu$	0,3	–
Sankabumas	$c$	1,0	kPa
Trinties kampas	$\varphi$	35	°
Dilatacijos kampas	$\psi$	0–5	°
PAMATO MEDŽIAGA – BETONAS			
Deformacijų modulis	$E$	30	GPa
Vienetinis svoris	$\gamma$	24	kN/m <sup>3</sup>
Puasono koeficientas	$\nu$	0,167	–
PAMATO IR PAGRINDO SAŲVEIKOS ZONA			
Sąveikos koeficientas	$R_{inter}$	1	–

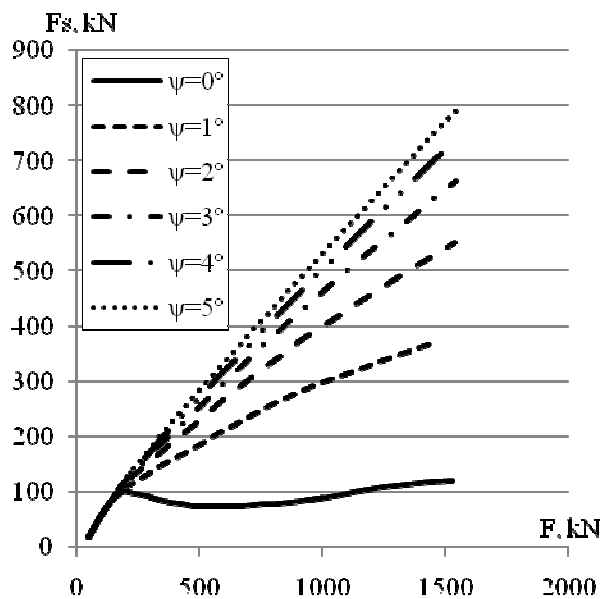
### Apkrovos

Apkrovos suteikiamos laipsniškai, P1 modelyje kas 50 kN, P2 modelyje kas 20 kN. Skaitinis eksperimentas baigiamas, kai pasiekiamas 10 % nusėdimas vertikalia kryptimi arba kai suyra gruntas.

### Apkrovos pasiskirstymas tarp pado ir šonų

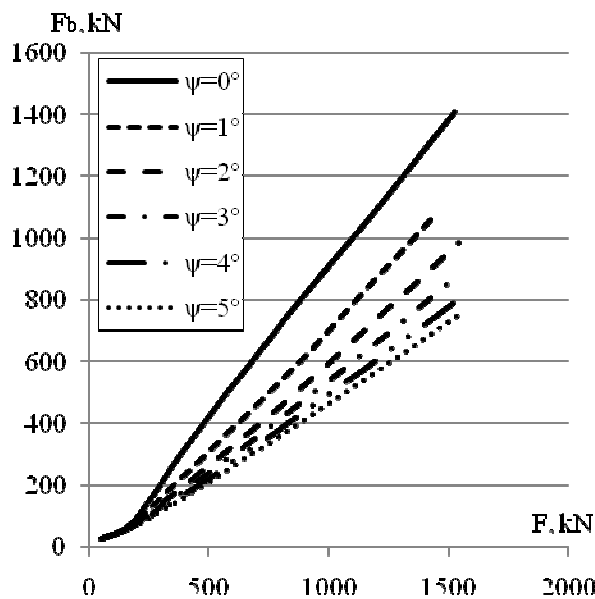
Apkrovos pasiskirstymas tarp pado ir šonų vaizduojamas grafiškai, horizontalioje ašyje atidedant visos ašinės apkrovos didėjimą, o vertikalioje – apkrovos didėjimą pade arba šone.

Paveiksluose atskirai vaizduojamas P1 (3 ir 4 pav.) ir P2 (5 ir 6 pav.) pamatų apkrovos perdavimas, esant skirtingiems dilatacijos kampams, išskaidant apkrovą į perduodamą šoniniu paviršiumi ir perduodamą pamato padu.



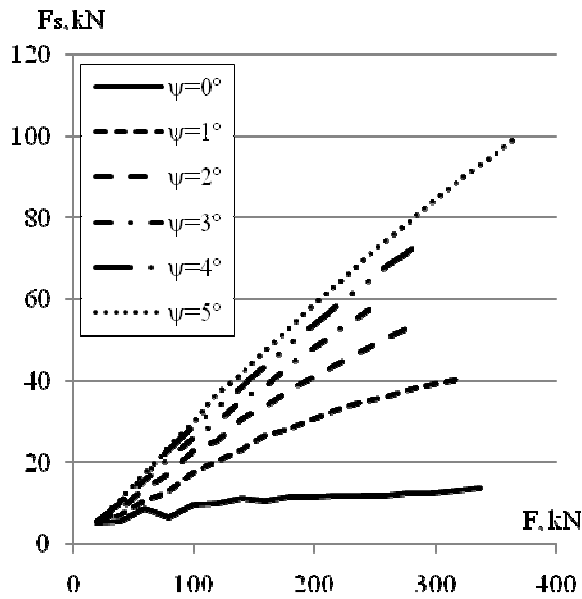
**3 pav.** P1 pamato šoninės trinties perimama apkrovos dalis, esant skirtingiems dilatacijos kampams

**Fig. 3.** Foundation P1 load part on skin friction in various dilatancy angles

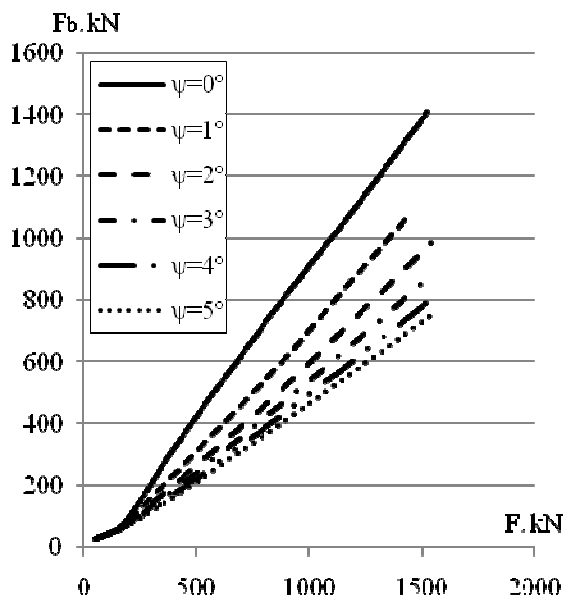


**4 pav.** P1 pamato padu perimama apkrovos dalis, esant skirtingiems dilatacijos kampams

**Fig. 4.** Foundation P1 load part on base in various dilatancy angles



5 pav. P2 pamato šoninės trinties perimama apkrovos dalis, esant skirtingiems dilatacijos kampams  
**Fig. 5.** Foundation P2 load part on skin friction in various dilatancy angles



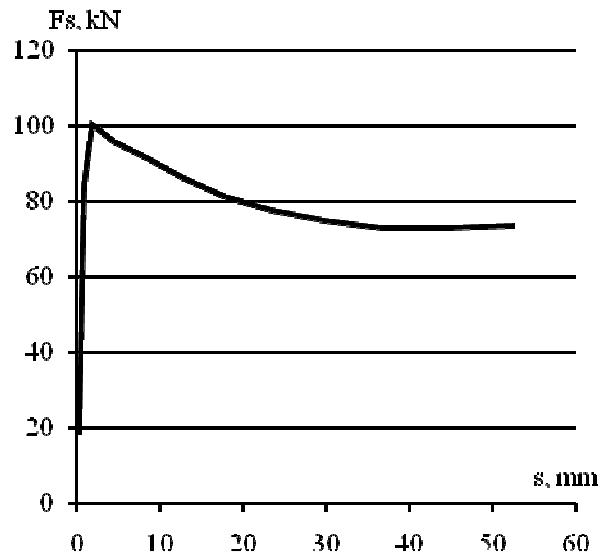
6 pav. P2 pamato padu perimama apkrovos dalis, esant skirtingiems dilatacijos kampams  
**Fig. 6.** Foundation P2 load part on base in various dilatancy angles

Pateiktuose paveiksluose aiškiai matoma, jog trintis didėja esant dilatacijai ir sėdant pamatui. Kuo dilatacija didesnė, tuo didesnę apkrovos dalį pamatas perima šonine trintimi.

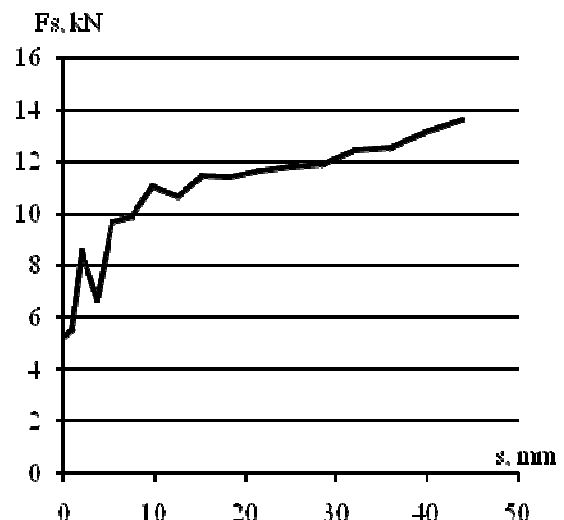
Lyginant P1 ir P2 apkrovos perdavimo kreives, pastebima, jog pamate P2 šoninės trinties kreivės krypties

tangentas yra mažesnis už pado kreivės krypties tangentą. Tuo tarpu poliniame pamate P1 – trintimi perimama apkrovos dalis netgi viršija dalį, perimamą padu.

Tankiame smėlyje be dilatacijos galima išskirti nuosėdžio dydį, kuomet išsivysto didžiausia trintis (7 ir 8 pav.).



7 pav. P1 pamato šoninės trinties mobilizavimas, kai dilatacija  $\psi = 0^\circ$   
**Fig. 7.** Mobilization of skin friction in foundation P1 when dilatancy angle  $\psi = 0^\circ$



8 pav. P2 pamato šoninės trinties mobilizavimas, kai dilatacija  $\psi = 0^\circ$   
**Fig. 8.** Mobilization of skin friction in foundation P2 when dilatancy angle  $\psi = 0^\circ$

P1 modelyje didžiausia trintis mobilizuojasi esant vos keliems milimetrams (2–3 mm), toliau sėdant poliui

perimama dalis šonine trintimi krinta nuo 100 kN iki 75 kN (15 %).

P2 standžiame giliajame pamate trintimi perimama apkrovos dalis grunte be dilatacijos didėja nuolat, iki jam suyrant.

### Išvados

1. Poliams modeliuoti, esant tankaus smėlio rūšims, kurioms būdinga dilatacija, *Mohr-Coulomb* grunto modelis nėra pats tinkamiausias, nes riboja dilatacijos vyksmą tol, kol yra skersinės deformacijos.

2. Giliems ir standiems pamatams minėtas modelis yra tinkamesnis, nes trintimi perimama apkrovos dalis yra mažesnė, lyginant su padu.

3. Kuo mažesnis santykinis ilgis  $L/D$ , tuo mažesnis dilatacijos kampo poveikis apkrovos pasiskirstymui tarp pamato pado ir šoninio paviršiaus.

4. Polinio pamato tankiame smėlyje, kurio dilatacija  $\psi = 0^\circ$ , maksimali šoninė trintis mobilizuojasi esant 2–3 mm nuosėdžiui. Tai nedaug skiriasi nuo J. Šimkaus eksperimentais gautų verčių.

### Literatūra

- Bowles, J. E. 1997. *Foundation Analysis and Design*. 5<sup>th</sup> ed. Singapore: McGraw-Hill Book Co. 1207 p. ISBN 0-07-118844-4.
- Brinkgreve, R. B. J.; Swolfs, W. M. 2007. *Plaxis 3D Foundation Version 2*. Delft: The Netherlands. ISBN-13: 978-90-76016-04-7.
- Coyle, H. M.; Reese, L. C. 1966. Load transfer of axially loaded piles in clay, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division* 92(2): 1–26.

Reynolds, O. 1884. On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact, with experimental illustrations, *Philosophical Magazine* 5(20): 469–481.

Šimkus, J. 1984. *Gruntų mechanika, pagrindai ir pamatai*. Vilnius: Mokslas. 271 p.

Šimkus, J.; Furmonavičius, L.; Zykus, J.; Zakarevičius, V.; Vaičaitis, J.; Alikonis, A. 1985. *Monolitiniai grunte betonuojamieji pamatai*. Vilnius: Mokslas. 112 p.

Whitaker, T.; Cooke, R. W. 1966. An investigation of the shaft and base resistances of large bored piles in London clay, in *Proc. of Conference: Large Bored Piles, London, United Kingdom, 1966*. London: ICE, 7–49.

### DEEP FOUNDATION MODELING WITH MORH-COULOMB MODEL IN DENSE SANDS WITH DILATANCY

D. Macijauskas, J. Amšiejus

#### Summary

The analysis of load distribution in deep foundations found in dense and indistinct sand between base and shaft is considered in this paper. The availability of designing deep foundations in sand with dilatancy was studied with changing dilatancy angle. For design, Plaxis 3D Foundation v2 Mohr-Coulomb model was used. Various load distributions between shaft and base were obtained when dilatancy angle varied from  $0^\circ$  to  $5^\circ$ . Skin friction increases significantly increasing dilatancy angle. However, in Mohr-Coulomb model, (drained conditions) soil will continue to dilate as long as shear deformations occurs. This error decreases in case relative foundation length  $L/D$  and dilatancy angle  $\psi$  decrease.

**Keywords:** pile, bored pile, skin friction, base, dilatancy, dense sand.