

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.131.5:539.4

В. Г. ШАПОВАЛ¹, Г. П. ІВАНОВА^{2*}, С. Р. ЖИЛІНСЬКА³, О. А. ПАЩЕНКО⁴

¹ Кафедра «Будівництва, геотехніки і геомеханіки», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (095) 471-81-92, ел. пошта shapvv27@gmail.com, ORCID 0000-0003-2993-1311

^{2*} Кафедра «Будівництва, геотехніки і геомеханіки», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (050) 452 99 45, ел. пошта ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916

³ Кафедра «Будівництва, геотехніки і геомеханіки», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49000 тел. +38 (067) 705 57 33, ел. пошта Zhylynska.S.R@nmu.one, ORCID 0000-0003-3597-8298

⁴ Кафедра «Нафтогазової інженерії та буріння», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Д. Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (050) 363 16 00, ел. пошта pashenko.o.a@nmu.one, ORCID 0000-0003-3296-996X

МОЖЛИВІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ КРИТЕРІЮ О. ШАШЕНКА ДО ПРОГНОЗУ МІЦНОСТІ СУПІЩАНИХ ҐРУНТІВ

Мета. Експериментальні залежності «руйнівна дотична напруга – вертикальне навантаження» має вигляд криволінійної лінії, яку іноді називають огинаючою Кулона – Мора. При цьому критерій міцності Кулона – Мора дає значення руйнівного дотичного напруження відмінне від нуля, що, у свою чергу, призводить до завищення утримуючих сил при розрахунку стійкості і міцності ґрунтових основ і споруд. Аналіз показав, що проблема обліку фізичної нелінійності міцнісних властивостей глинистих ґрунтів актуальна, а одним із шляхів її вирішення є використання широко відомого в механіці гірських порід критерію міцності О. Шашенка. Мета наукової статті полягає в наступному – за відомими експериментальними результатами консолидовано-дренованих випробувань супіщаного ґрунту в приладі одноплощинного зсуву, необхідно: виконати апроксимацію експериментальних даних з використанням, як лінійної залежності (критерій міцності Кулона – Мора) так і нелінійної залежності (критерій міцності О. Шашенка); виконати оцінку точності апроксимації з використанням відносної середньоквадратичної похибки та екстраполювати результати апроксимації в область малих тисків. **Методика.** За відповідними рекомендаціями були визначені властивості ґрунтів та їх класифікація. Також, згідно рекомендаціям визначено міцність ґрунту при його природній вологості та водонасиченого. Отримані результати наведено у табличному вигляді. Було визначено матеріальні константи, які входять до критеріїв Кулона – Мора і О. Шашенка. Проведена оцінка відповідності критеріїв міцності експериментальним даним, та виконано екстраполяцію цих критеріїв в області малих тисків. **Результати.** В області зміни експериментальних даних залежності «руйнівне навантаження – вертикальний тиск на ґрунт», встановлена в рамках критерію міцності О. Шашенка, має кращу відповідність експерименту, ніж аналогічна залежність за критерієм міцності Кулона – Мора. Запропонований О. Шашенком критерій міцності ґрунту цілком може бути використаний для прогнозу міцності супіщаних ґрунтів. **Наукова новизна.** Виконано апроксимацію експериментальних результатів консолидовано-дренованих випробувань супіщаного ґрунту в приладі одноплощинного зсуву з використанням критеріїв міцності Кулона – Мора та О. Шашенка. **Практична значимість.** Проведено порівняльний аналіз результатів та обґрунтовано використання саме критерію міцності О. Шашенка для прогнозу міцності супіщаних ґрунтів.

Ключові слова: критерій міцності; нелінійність; ґрунтова основа; кут внутрішнього тертя; питоме зчеплення; напруження; супіщаний ґрунт

Вступ

Відомо, що експериментальні залежності «руйнівна дотична напруга – вертикальне навантаження» має вигляд криволінійної лінії, яку іноді називають огинаючої Кулона – Мора.

Згідно даних Н. А. Цитовича (1963) при нульовому вертикальному навантаженні на зразок, руйнівне дотичне напруження в глинистих ґрунтах також дорівнює нулю. При цьому критерій міцності Кулона – Мора дає в цій точці значення руйнівного дотичного напруження,

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

що дорівнює питомому зчепленню (тобто відмінне від нуля, рис. 1) (Гольдштейн, 1973). Це, у свою чергу, призводить до завищення утри-

муючих сил при розрахунку стійкості і міцності ґрунтових основ і споруд (Швец, Шаповал, Петренко, Андреев, & al., 2008).

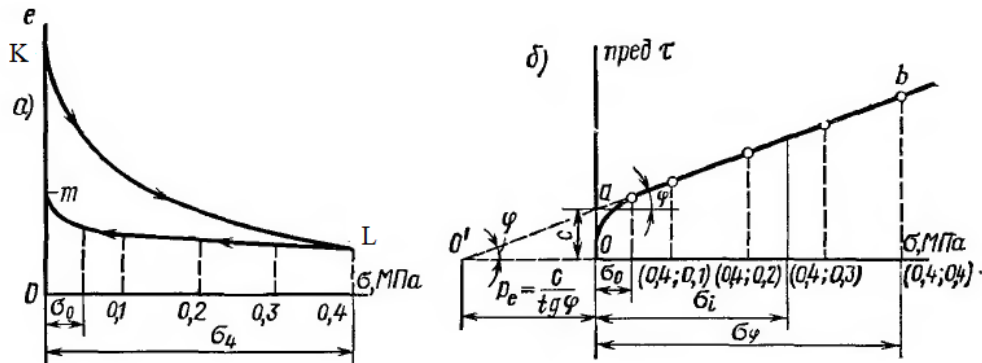


Рис. 1. Криві граничних опорів зсуву зв'язних глинистих ґрунтів в умовах відкритої системи (консолідовано-дренованих; дані Н. А. Цитовича, 1963):

а) залежності пористості ґрунту від навантаження (крива KL) та розвантаження (крива mL); б) крива зсуву

В результаті аналізу був зроблений висновок про те, що проблема обліку фізичної нелінійності міцнісних властивостей глинистих ґрунтів актуальна (Shashenko, Shapoval, Kovrov, Skobenko, Tiutkin, & al., 2019), а одним із шляхів її вирішення є використання широко відомого в механіці гірських порід критерію міцності О. Шашенка (Шашенко, Майхерчик, & Сдвижкова 2005; Шашенко, Пустовойтенко, & Сдвижкова, 2016; Shapoval, Shashenko, Nariieiev, Khalymendyk, & Andriev, 2020).

Мета

Мета наукової статті полягає в наступному – за відомими експериментальними результатами консолидовано-дренованих випробувань супіщаного ґрунту в приладі одноплощинного зсуву необхідно:

- виконати апроксимацію експериментальних даних з використанням лінійної залежності (критерій міцності Кулона – Мора);
- виконати апроксимацію експериментальних даних з використанням нелінійної залежності (критерій міцності О. Шашенка);
- виконати оцінку точності апроксимації з використанням відносної середньоквадратичної похибки.
- виконати екстраполяцію результатів апроксимації в області малих тисків.

Методика

Для визначення властивостей ґрунту та його класифікації були використані рекомендації

(ДСТУ Б В.2.1-2-96, 1996; ДСТУ Б В.2.1-17-2009, 2009). Фізичні властивості випробуваного супіску представлені у табл. 1. Міцність ґрунту визначалася відповідно до рекомендацій (ДСТУ Б.В.2.1-4-96, 1996), результати її визначення при природній вологості ґрунту представлені в табл. 2.

Аналіз представлених у табл. 1 даних дозволяє зробити висновок, що властивості випробуваного супіщаного ґрунту є типовими для Придніпровського регіону.

Для визначення матеріальних констант критерію міцності Кулона – Мора (Цитович, 1963; Гольдштейн, 1973; Шутенко, Рудь, Кичаева, & al., 2015), який має вигляд (1) використовуємо загальноприйнятну методику (ДСТУ Б В.2.1-5-96, 1996):

$$\tau = \sigma \times \operatorname{tg}(\varphi) + c, \quad (1)$$

де τ – руйнівне дотичне напруження; σ – вертикальне навантаження на ґрунтовий зразок, φ і c – матеріальні константи (відповідно кут внутрішнього тертя і питоме зчеплення), що підлягають визначенню, критерію міцності Кулона – Мора.

При цьому для визначення матеріальних констант критерію міцності О. Шашенка, який має вигляд (2) використовуємо методику, викладену в (Шаповал, Іванова, Жилінська, Іваськевич, & Лавренюк, 2019):

$$\tau = \sqrt{\sigma \cdot c \cdot \operatorname{tg}(\varphi) + c^2}, \quad (2)$$

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

де τ – руйнівне дотичне напруження; σ – вертикальне навантаження на ґрунтовий зразок, φ і c – матеріальні константи критерію міцності О. Шашенка, що підлягають визначенню.

З цього випливає, що залежність міцності ґрунту від вертикального тиску на зразок у ра-

мках критерію міцності Кулона – Мора має вигляд:

$$\tau = \sigma \cdot 0,4793 + 0,0512, \quad (3)$$

де $\operatorname{tg}(\varphi) = 0,4793$, звідки $\varphi = 25,61^\circ$ і $c = 0,0512$ МПа.

Таблиця 1

Фізичні властивості супіщаного ґрунту

ПЕ № 3 Супіски палево-жовті та жовті (Свердловина 20)									
Найменування характеристики	Значення характеристики								
	1	2	3	4	8	10	1	2	4
Лабораторний номер									
Глибина відбору проби, м	8,20	8,60	9,0	9,4	17,0	19,0	20,0	21,0	30,0
Вологість на межі текучості, д.од.	0,19	0,19	0,23	0,21	0,19	0,21	0,20	0,18	0,20
Вологість на межі розкошування, д.од.	0,16	0,16	0,17	0,17	0,15	0,17	0,16	0,15	0,15
Число пластичності, д.од.	0,03	0,03	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05
Вологість природна, д.од.	0,04	0,04	0,06	0,04	0,06	0,09	0,14	0,09	0,12
Вологість водонасичення, д.од.	0,23	0,25	0,27	0,27	0,24	0,20	0,20	0,16	0,17
Показник текучості, д.од.	-4	-4	-1,83	-3,25	-2,25	-2,00	-0,50	-2,00	-0,60
Щільність частинок ґрунту, г/см ³	2,67	2,67	2,61	2,67	2,67	2,67	2,67	2,67	2,67
Щільність ґрунту, г/см ³	1,68	1,63	1,68	1,58	1,70	1,85	1,94	2,00	2,03
Щільність сухого ґрунту, г/см ³	1,62	1,57	1,52	1,52	1,60	1,70	1,70	1,83	1,81
Пористість, д.од.	0,39	0,41	0,43	0,43	0,40	0,36	0,36	0,31	0,32
Коефіцієнт пористості у природному додаванні, д.од.	0,65	0,70	0,76	0,76	0,66	0,57	0,57	0,46	0,47
Ступінь вологості, д.од.	0,16	0,15	0,21	0,14	0,24	0,42	0,66	0,53	0,68
Нестача водонасичення, д.од.	0,19	0,21	0,21	0,23	0,18	0,11	0,06	0,07	0,05

Таблиця 2

Результати випробувань супіщаного ґрунту природної вологості в приладі одноплощинного зсуву

ПЕ № 3 Супіски палево-жовті та жовті									
Опір зрізу зразка у природному стані (зсув консолидований)									
Вертикальне навантаження σ , МПа	Руйнівне навантаження τ , МПа								
	0,200	–	0,132	0,163	–	0,148	0,128	0,123	0,148
0,400	–	0,252	0,275	–	0,265	0,225	0,234	0,265	0,269
0,600	–	0,350	0,271	–	0,361	0,313	0,323	0,359	0,352
Значення характеристик міцності (стандартна методика; критерій міцності Кулона – Мора)									
Кут внутрішнього тертя φ , градуси	–	29	27	–	28	25	27	28	27
Питоме зчеплення c , МПа	–	0,027	0,062	–	0,045	0,037	0,027	0,026	0,048

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

При цьому залежність міцності ґрунту від вертикального тиску на зразок у рамках критерію міцності О. Шашенка має вигляд:

$$\tau = \sqrt{\sigma \cdot 0,2289 - 0,0259}, \quad (4)$$

де $c^2 = -0,0259$, звідки $c = \pm 0,161i$ МПа; $\operatorname{tg}(\varphi) = \mp 1,422i$, тоді $\varphi = \mp(90 + 50,04i)$, $i = \sqrt{-1}$ – мнима одиниця (Корн, Г., & Корн, Т., 1973).

Результати

Отримані значення матеріальних констант, які входять у критерій міцності О. Шашенка є або уявними (питоме зчеплення) або комплексними (кут внутрішнього тертя) числами.

Результати апроксимації залежностей «руйнівне навантаження – вертикальне навантаження на зразок» представлені на рис. 2.

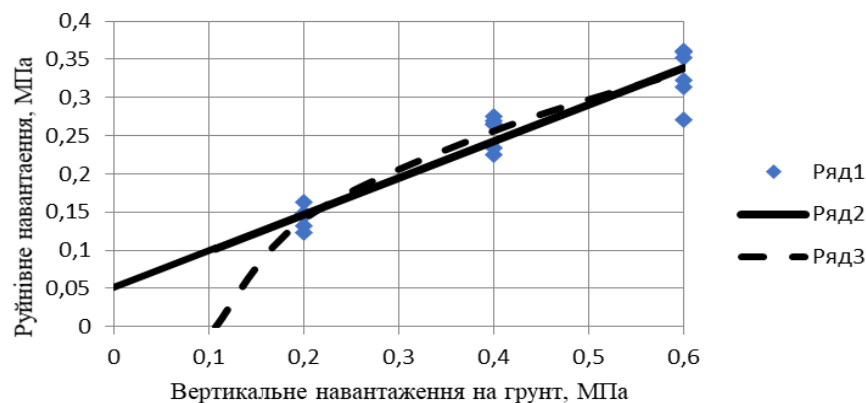


Рис. 2. Результати визначення кривих «руйнівне навантаження – вертикальний тиск на зразок»: Ряд 1 – експеримент; Ряд 2 – критерій міцності Кулона – Мора; Ряд 3 – критерій міцності О. Шашенка

Далі було виконано екстраполяцію критеріїв міцності в область малих тисків (рис. 2). Виявилося, що при вертикальному навантаженні, меншому 0,1 МПа критерій міцності О. Шашенка дає нам негативні значення руйнівного навантаження, що суперечить сучасним уявленням про природу руйнування ґрунтів і гірських порід.

У зв'язку з цим на інтервалі тисків ($\sigma \in \{0,0 \dots 6,0\}$) МПа критерій міцності О. Шашенка слід подати у вигляді:

$$\tau = \begin{cases} 0 & \text{при } \sigma \leq 0,113; \\ \sqrt{\sigma \cdot 0,2289 - 0,0259} & \text{при } \sigma > 0,113. \end{cases} \quad (6)$$

Оцінка відповідності критеріїв міцності експериментальним даним виконувалась за формулою:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\frac{\tau_{\sigma} - \tau_p}{\tau_{\sigma}} \right)^2}, \quad (5)$$

де ε – відносна середня квадратична похибка між експериментальними ($\tau_{\sigma,i}$) та розрахованими ($\tau_{p,i}$) значеннями руйнівних дотичних напружень; i – номер випробування; n – загальна кількість випробувань.

Виявилося, що у разі критерію міцності Кулона – Мора $\varepsilon = 0,101$, а у разі критерію О. Шашенка $\varepsilon = 0,094$. На цій основі було зроблено висновок про те, що в галузі зміни експериментальних даних ($\sigma \in \{2,0 \dots 6,0\}$) МПа. Найточнішим є критерій міцності О. Шашенка.

У ході подальшого аналізу нами було виконано зіставлення залежностей кута внутрішнього тертя (рис. 3) та питомого зчеплення (рис. 4) від тиску на ґрунт.

Визначення «дотичних» кута внутрішнього тертя та питомого зчеплення в точці з поточною координатою « σ » виконувалось за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \operatorname{arctg} \left\{ \frac{\partial \tau}{\partial \sigma} \right\} \\ c &= \tau - \sigma \cdot \frac{\partial \tau}{\partial \sigma} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

З рис. 3 видно, що встановлений у межах критерію міцності Кулона – Мора кут внутрішнього тертя залежить від тиску ґрунт.

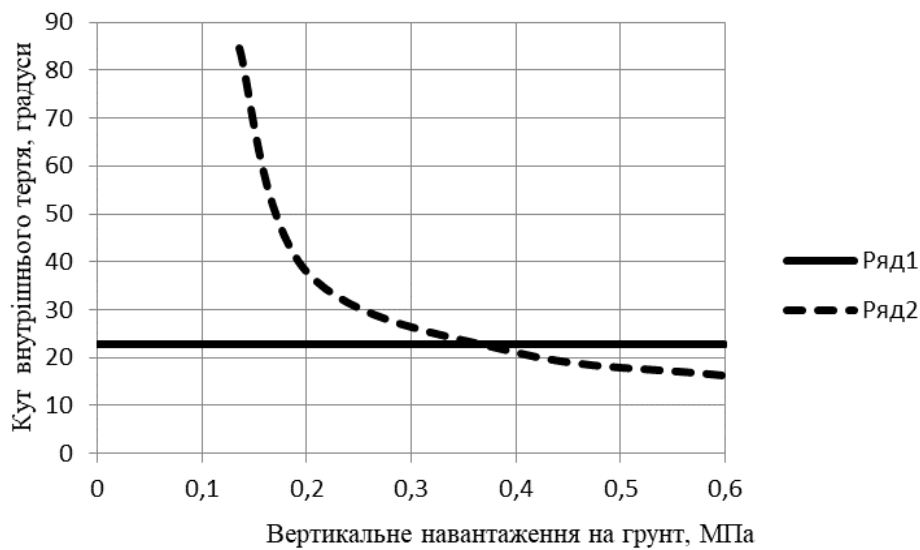


Рис. 3. Результати визначення кривих «кут внутрішнього тертя – вертикальний тиск на зразок»: Ряд 1 – критерій міцності Кулона – Мора; Ряд 2 – критерій міцності О. Шашенка

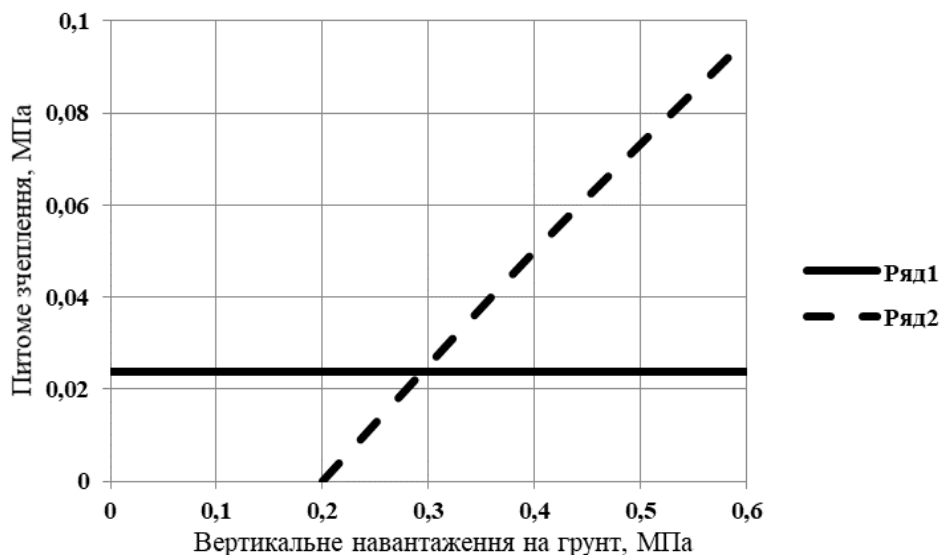


Рис. 4. Результати визначення кривих «питоме зчеплення – вертикальний тиск на зразок»: Ряд 1 – критерій міцності Кулона – Мора; Ряд 2 – критерій міцності О. Шашенка

При цьому, розрахований у межах критерію міцності «дотичний» кут внутрішнього тертя залежить від нормального тиску на ґрунт. У цьому випадку має місце чітка тенденція зменшення кута внутрішнього тертя при зростанні навантаження на ґрунт.

Аналіз графіків (рис. 4) показує, що встановлене у межах критерію міцності Кулона – Мора питоме зчеплення залежить від тиску ґрунт.

При цьому розраховане в рамках критерію міцності «дотичне» питоме зчеплення залежить від нормального тиску на ґрунт. У цьому випадку має місце чітка тенденція зростання питомого зчеплення при зростанні навантаження на ґрунт.

Слід також зазначити, що в розглянутому випадку отримані з використанням критерію міцності О. Шашенка, результати мають хорошу відповідність сучасним уявленням про руй-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

нування ґрунтів при зрушенні в області зміни експериментальних даних (тобто при $\sigma \in \{2, 0 \dots 6, 0\}$ МПа).

Наукова новизна та практична значимість

В статті виконано апроксимацію експериментальних результатів консолидовано-дренованих випробувань супіщаного ґрунту в приладі одноплощинного зсуву з використанням критерію міцності Кулона – Мора та критерію міцності О. Шашенка. Проведено порівняльний аналіз результатів та обґрунтовано використання саме критерію міцності О. Шашенка для прогнозу міцності супіщаних ґрунтів.

Висновки

Представлені в цій роботі матеріали досліджень дозволили зробити наступні висновки:

1. Встановлено, що запропонований О. Шашенком критерій міцності ґрунту цілком може бути використаний для прогнозу міцності супіщаних ґрунтів.

2. Показано, що в області зміни експериментальних даних залежність «руйнівне навантаження – вертикальний тиск на ґрунт», встановлена в рамках критерію міцності О. Шашенка, має кращу відповідність експерименту, ніж аналогічна залежність, встановлена в рамках критерію міцності Кулона – Мора.

3. Встановлено, що екстраполяція експериментальних даних у область малих тисків з використанням критерію міцності О. Шашенка дає найгірші результати, ніж використання для аналогічних цілей критерію міцності Кулона – Мора.

Загалом було зроблено висновок, що критерій міцності О. Шашенка цілком може бути використаний для прогнозу міцності супіщаних ґрунтів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Shapoval, V., Shashenko, O., Napieiev, S., Khalymendyk, O., & Andrieiev, V. (2020). Stability assessment of the slopes and side-hills with account

of the excess pressure in the pore liquid. *Mining of Mineral Deposits*, 14 (1), 91-99.

Shashenko, O., Shapoval, V., Kovrov, O., Skobenko, A., Tiutkin, O., & al. (2019). Determining the influence of physical nonlinearity of soil strength properties on the estimated base resistance. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/7 (102), 19-26.

Гольдштейн, М. Н. (1973). *Механические свойства грунтов. Напряженно-деформативные и прочностные характеристики*. Москва: Стройиздат.

ДСТУ Б В.2.1-17-2009 (2009). *Ґрунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей*. Київ: Мінрегіонбуд України.

ДСТУ Б В.2.1-2-96 (1996). *Ґрунти. Класифікація*. Київ: Мінрегіонбуд України.

ДСТУ Б.В.2.1-4-96 (1996). *Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості*. Київ: Мінрегіонбуд України.

ДСТУ Б В.2.1-5-96 (1996). *Ґрунти. Метод статистичної обробки результатів визначення характеристик*. Київ: Мінрегіонбуд України.

Корн, Г., & Корн, Т. (1973). *Справочник по математике*. Москва: Наука.

Цытович, Н. А. (1963). *Механика грунтов*. Ленинград: Госстройиздат.

Шаповал, В. Г., Иванова, Г. П., Жилінська, С. Р., Іваськевич, О. М., & Лавренюк, В. М. (2019). Методика визначення нормативних та розрахункових матеріальних констант, які входять у критерій міцності О. М. Шашенка. *Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference International Trends in Science and Technology October 31. Warsaw, Poland*, s. 24-29.

Шашенко, А. Н., Майхерчик, Т., & Сдвижкова Е. А. (2005). *Геомеханические процессы в породных массивах*. Днепропетровск: Национальный горный университет.

Шашенко, А. Н., Пустовойтенко, В. П., & Сдвижкова, Е. А. (2016). *Геомеханика*. Киев: Новый друк.

Швец, В. Б., Шаповал, В. Г., Петренко, В. Д., Андреев, В. С., & al. (2008). *Фундаменты промышленных, гражданских и транспортных сооружений на слоистых грунтовых основаниях*. Днепропетровск: Нова ідеологія.

Шутенко, Л. Н., Рудь, А. Г., Кичаева, О. В., & al. (2015). *Механика грунтов, основания и фундаменты*. Харьков: ХНУГХ им. А. Н. Бекетова.

V. G. SHAPOVAL¹, G. P. IVANOVA^{2*}, S. R. ZHYLINSKA³, O. A. PASHCHENKO⁴

^{1*} Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology, av. Dmytra Yavornytskoho 19, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (095)-471-81-92, e-mail shapvv27@gmail.com, ORCID 0000-0003-2993-1311

² Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology, av. Dmytra Yavornytskoho 19, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (050)-452-99-45, e-mail ivanova.h.p@nmu.one, ORCID 0000-0003-4219-7916.

³ Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, Dnipro University of Technology, av. Dmytra Yavornytskoho 19, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (067) 705 57 33, e-mail Zhylinska.S.R@nmu.one, ORCID 0000-0003-3597-8298

⁴ Department of Oil and Gas Engineering Department, Dnipro University of Technology, av. Dmytra Yavornytskoho 19, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (050) 363 16 00, e-mail pashenko.o.a@nmu.one, ORCID 0000-0003-3296-996X

POSSIBILITY OF APPLICATION OF O. SHASHENKO'S CRITERION TO THE FORECAST OF STRENGTH OF SANDY LOAM SOILS

Purpose. Experimental dependences "destructive tangential stress – vertical load" has the form of a curvilinear line, which is sometimes called the Coulomb – Mohr envelope. In this case, the Coulomb – Mohr strength criterion gives a value of the destructive tangential stress other than zero, which, in turn, leads to an overestimation of the holding forces when calculating the stability and strength of soil foundations and structures. The analysis showed that the problem of considering physical nonlinearity of the strength properties of clay soils is relevant, and one of the ways to solve it is to use the well-known in the mechanics of soil strength O. Shashenko's criterion. The purpose of the scientific article is the following – according to the known experimental results of consolidated – drained tests of sandy loam soil in the device of single-plane shear, it is necessary: to perform approximation of experimental data using linear dependence (Coulomb – Mohr strength criterion) and nonlinear dependence (O. Shashenko's strength criterion); to estimate the accuracy of the approximation using the relative standard error and to extrapolate the approximation results to the region of low pressures. **Methodology.** According to the relevant recommendations, the properties of soils and their classification were determined. Also, according to the recommendations, the strength of the soil at its natural moisture and when water-saturated were determined. The obtained results are presented in tabular form. Material constants that are included in the Coulomb – Mohr and O. Shashenko's criteria were determined. The conformity of the strength criteria to the experimental data was evaluated, and extrapolation of these criteria in the field of low pressures was performed. **Results.** In the field of change of experimental data, the dependence "destructive load – vertical pressure on the soil", established within O. Shashenko's criterion of strength, has a better fit of the experiment than a similar dependence on the criterion of Coulomb – Mohr. The criterion of soil strength proposed by O. Shashenko can be used to predict the strength of sandy soils. **Scientific novelty.** Approximation of experimental results of consolidated-drained tests of sandy soil in the device of single-plane shear using the strength criteria of Coulomb – Mohr and O. Shashenko is performed. **Practical value.** A comparative analysis of the results is carried out and the use of O. Shashenko's strength criterion for forecasting the strength of sandy soils is substantiated.

Keywords: strength criterion; nonlinearity; soil base; angle of internal friction; specific adhesion; tension; sandy soil

REFERENCES

- Shapoval, V., Shashenko, O., Hapiev, S., Khalymendyk, O., & Andrieiev, V. (2020). Stability assessment of the slopes and side-hills with account of the excess pressure in the pore liquid. *Mining of Mineral Deposits*, 14 (1), 91-99. (in English)
- Shashenko, O., Shapoval, V., Kovrov, O., Skobenko, A., Tiutkin, O., & al. (2019). Determining the influence of physical nonlinearity of soil strength properties on the estimated base resistance. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/7 (102), 19-26. (in English)
- Goldshhteyn, M. N. (1973). *Mekhanicheskie svoystva gruntov. Napryazhenno-deformativnye i prochnostnye kharakteristiki*. Moskva: Stroyizdat. (in Russian)

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

- DSTU B V.2.1-17-2009 (2009). *Grunty. Metody laboratornoho vyznachennia fizychnykh vlastyvostei*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- DSTU B V.2.1-2-96 (1996). *Grunty. Klasyfikatsiia*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- DSTU B.V.2.1-4-96 (1996). *Grunty. Metody laboratornoho vyznachennia kharakterystyk mitsnosti i deformovanosti*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- DSTU B V.2.1-5-96 (1996). *Grunty. Metod statystychnoi obrobky rezultativ vyznachennia kharakterystyk*. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian)
- Korn, G., & Korn, T. (1973). *Spravochnik po matematike*. Moskva: Nauka. (in Russian)
- Tsytoich, N. A. (1963). *Mekhanika gruntov*. Leningrad: Gosstroyizdat. (in Russian)
- Shapoval, V. H., Ivanova, H. P., Zhylynska, S. R., Ivaskevych, O. M., & Lavreniuk, V. M. (2019) Metodyka vyznachennia normatyvnykh ta rozrakhunkovykh materialnykh konstant, yaki vkhodiat u kryterii mitsnosti O. M. Shashenka. *Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference International Trends in Science and Technology October 31. Warsaw, Poland*, s. 24-29. (in Ukrainian)
- Shashenko, A. N., Maykherchik, T., & Sdvizhkova Ye. A. (2005). *Geomekhanicheskie protsessy v porodnykh massivakh*. Dnepropetrovsk: Natsionalnyy gornyy universitet. (in Russian)
- Shashenko, A. N., Pustovoytenko, V. P., & Sdvizhkova, Ye. A. (2016). *Geomekhanika*. Kiev: Novyy druk. (in Russian)
- Shvets, V. B., Shapoval, V. G., Petrenko, V. D., Andreev, V. S., & al. (2008). *Fundamenty promyshlennykh, grazhdanskikh i transportnykh sooruzheniy na sloistykh gruntovykh osnovaniyakh*. Dnepropetrovsk: Nova ideolohiia. (in Russian)
- Shutenko, L. N., Rud, A. G., Kichaeva, O. V., & al. (2015). *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty*. Kharkov: KhNUGKh im. A. N. Beketova (in Russian)

Надійшла до редколегії 04.04.2022.

Прийнята до друку 25.04.2022.