

УДК 624.131.543

д.т.н. Должиков П. М.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна),
д.т.н. Кірко О. Е.
(СНУ ім. В. Даля, м. Антрацит, Україна),
к.т.н. Кіріяк К. К.
(ЦНТП «Інжзахист», м. Ялта, АР Крим)

ВИЗНАЧЕННЯ СТРУКТУРНИХ І ЗСУВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТІВ, ЯКІ ЗАКРІПЛЕНІ МЕТОДОМ НАПІРНОЇ ЦЕМЕНТАЦІЇ

В основу статті покладено комплексне дослідження зсувних ґрунтів, яке включає в себе аналітичні, лабораторні та натурні дослідження, виконані з метою визначення ефективності ін'єкційного закріплення зсувонебезпечних ґрунтових структур.

Ключові слова: зсувний схил, метод напірної цементациї, закріплення масив, зсувні параметри, фільтраційна консолідація, одноплощинне зрушення.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.

Велика частина території України знає дії екзогенних геологічних процесів, що зумовлено її геологічною будовою та геоморфологічними умовами. Широке розповсюдження серед зазначених небезпечних геологічних процесів мають зсувні процеси, розвиток і поширення цих явищ обумовлено впливом ендегенних, екзогенних та техногенних чинників, особливо на південному березі Криму (ПБК). Поширення зсувних процесів на ПБК пов'язано з сукупністю природно історичних факторів і останнім часом переважно з діяльністю людини, зокрема з нераціональною забудовою, часткового або повним переплануванням схилів і будівництвом на них різних об'єктів господарювання. В даний час в Криму настає пік регіональної активізації зсувних процесів, який прогнозувався на 2012–2014 роки [1], тому вивчення впливу ін'єкції на зсувні ґрунти, при стабілізації зсувонебезпечних процесів методом напірної цементациї, є актуальним науково-технічним завданням.

Вивченням посилення зсувних ґрунтів різними методами виконувалися деякими вченими. У роботі І.І. Ларцевої представлені дослідження з визначення характеристик міцності ґрунтів, закріплених вертикальними ґрунтоцементними елементами за допомогою бурозмішувальної техноло-

гії [2]. Скінчено-елементний аналіз напружено-деформованого стану зсувного схилу після ін'єкційного закріплення виконувалася у роботі [3]. Основні аспекти формування зсувних відкладів вивчалися та розглядалися Л.А. Аносовою [4]. Значний інтерес представляють роботи з обґрунтування параметрів способу підвищення стійкості зсувонебезпечних схилів за допомогою струминної технології закріплення ґрунтів [5].

Для більш глибокого вивчення впливу напірної цементациї на зміну фізико-механічних і деформаційних властивостей зсувних ґрунтів необхідно визначити вплив вологості зразків ґрунту на зміну об'ємної маси скелету зсувних суглинків в залежності від тиску нагнітання ін'єкційного розчину.

Мета роботи — визначення впливу напірної цементациї на зміну зсувних та структурних параметрів зсувних ґрунтів. Для її виконання поставлені такі завдання:

1. Визначити закономірність ущільнення глинистого ґрунту в залежності від вологості;
2. Виконати дослідження зсувних ґрунтів при їх ін'єкційній стабілізації.

© Должиков П. М., 2014

© Кірко О. Е., 2014

© Кіріяк К. К., 2014

Викладання матеріалу та його результати. Для оцінки ущільнення ґрунтів в лабораторних умовах зазвичай застосовується метод стандартного ущільнення. Він полягає у визначенні величин об'ємної маси скелету ґрунту з різною вологістю, що досягається в результаті ущільнення ударами падаючого грузу. За отриманими даними будують криву стандартного ущільнення, тобто графік залежності об'ємної маси скелету ґрунту від вологості $\gamma_{ск} = f(W)$. Тому основне завдання лабораторних дослідів полягало у вивченні ущільнення глинистого ґрунту при його різній вологості, що значно перевищує оптимальну і змінюється в межах від 0,2 до 0,3, тобто при ступені вологості $G = 0,7 - 1,0$.

Дослідження ущільнення водонасичених глинистих ґрунтів виконувалися в модернізованому приладі стандартного ущільнення та проводилися на зразках суглинку з об'ємною масою скелета ґрунту в природному стані $\gamma_{ск} = 1,55 - 2,0 \text{ г/см}^3$, вологістю на межі розкочування $W_p = 0,14 - 0,22$, вологістю на межі плинності $W_l = 0,26 - 0,34$.

Роз'ємний циліндр заповнювали ґрунтом непорушеної структури шляхом врізання його в моноліт ґрунту. Ґрунт в кільці зволожували розрахунковою кількістю води до ступеня вологості $G \neq 0,7$, далі витримували в ексікаторі не менше доби, а потім ущільнювали 30 ударами грузу, який падає з висоти 30 см. Після ущільнення верхнє і нижнє кільця роз'ємного циліндра знімали, а ґрунт, що залишився, ретельно підрізали в рівень з краями робочого кільця. Одночасно відбирали проби з верхньої та нижньої частини для визначення вологості ґрунту. Потім кільце з ущільненим ґрунтом зважували і визначали об'ємну масу скелета ґрунту. Після ущільнення робочі кільця з ґрунтом поміщали в компресійні або зрізні прилади для визначення деформаційних і міцнісних характеристик. Паралельно проводилося визначення стис-

ливості і міцності ґрунту непорушеної структури.

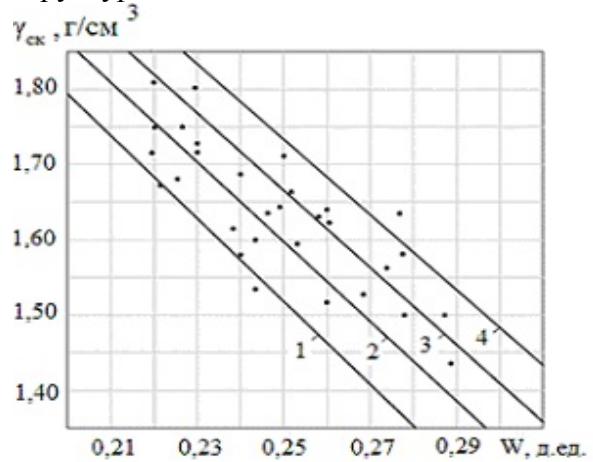


Рисунок 1 — Зміна об'ємної маси скелету ґрунту після ущільнення в залежності від вологості: 1–4 — при ступені вологості відповідно 0,85; 0,9; 0,95; 1,00

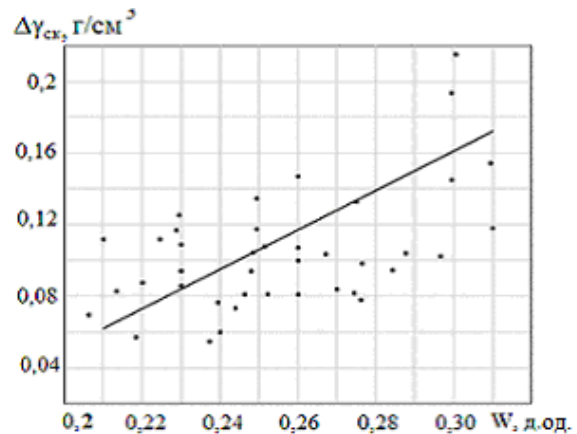


Рисунок 2 — Зміна прирощення об'ємної маси скелету ґрунту в залежності від вологості

На рисунку 1 наведена сукупність експериментальних точок, що характеризують зміну об'ємної маси скелету $\gamma_{ск}$ зразків ґрунту в залежності від їх вагової вологості W і ступеня вологості G до ущільнення, причому більшість точок відноситься до зразків ґрунту з $G \neq 0,85$. Отримані значення в даному випадку можуть бути віднесені до правих низхідних гілок кривих стандартного ущільнення.

Дані наведені на рисунку 1, при їх розгляді спільно з рисунком 2, на якому відображена зміна збільшень об'ємної маси

скелету $\Delta\gamma_{ск}$ зразків ґрунту після ущільнення залежно від вологості, показують, що значення об'ємної маси скелету ґрунту в результаті ущільнення суттєво збільшилося — в більшості випадків на $0,05-0,1 \text{ г/см}^3$. У той же час, для цих ґрунтів з вологістю близькою до оптимальної, значення $\Delta\gamma_{ск}$ при ущільненні зростають на $0,15-0,2 \text{ г/см}^3$. Однак, суворої закономірності у підвищенні об'ємної маси скелету ґрунту, при ущільненні залежно від вологості за наведеним на рисунку 2, не спостерігається. Більш детальний аналіз величини приросту об'ємної маси скелету ґрунту при ущільненні вказує на зростання її при зменшенні вихідних значень $\gamma_{ск}$. Так, наприклад, для зразків ґрунту з $\gamma_{ск} = 1,5-1,8 \text{ г/см}^3$ $\Delta\gamma_{ск}$ становить $0,18-0,16 \text{ г/см}^3$, а при $\gamma_{ск} = 1,9 \text{ г/см}^3$ значення $\Delta\gamma_{ск} = 0,05-0,08$, тобто ступінь підвищення ущільнення більш щільного ґрунту знижується.

Нескладно отримати, що зміна об'ємної маси скелету ґрунту за рахунок зміни ступеня вологості ΔG і вагової вологості ΔW дорівнює:

$$\Delta\gamma'_{ск} = \frac{W\gamma_s^2\Delta G}{\Delta G\gamma_w(G\gamma_w + \gamma_s W) + G^2\gamma_w^2 + W\gamma_s^2}, \quad (1)$$

$$\Delta\gamma''_{ск} = \frac{\gamma_s\gamma_w\Delta W}{\gamma_s^2 W(W - \Delta W) + \gamma_s\gamma_w(2W - \Delta W) + \gamma_w^2}, \quad (2)$$

де $\Delta\gamma''_{ск}$ — зміна об'ємної маси скелету ґрунту за рахунок ущільнення частинок ґрунту; $\Delta\gamma'_{ск}$ — зміна об'ємної маси скелету ґрунту за рахунок збільшення ступеня вологості, причому, як було сказано вище

$$\Delta\gamma_{ск} = \Delta\gamma'_{ск} + \Delta\gamma''_{ск}. \quad (3)$$

Також виконувались випробування з визначення опору ґрунту зсуву, які проводились в зрізних приладах за схемою повільного зсуву в умовах завершеної консолідації з попереднім ущільненням ґрунтів, яке здійснювалося тиском $0,1, 0,2, 0,3 \text{ МПа}$ при повному водонасиченні зразків. Згідно

з отриманими даними зчеплення c ущільненого водонасиченого глинистого ґрунту збільшилося в $1,45-2,0$ рази, кут внутрішнього тертя φ — на $2-3^\circ$. Наприклад, для зразків ґрунту з вологістю $W = 0,2$ і вихідною величиною $\gamma_{ск} = 1,55 \text{ г/см}^3$ значення c зросло з $0,0275 \text{ МПа}$ до $0,0325 \text{ МПа}$, а величина φ з $26,5^\circ$ до $29,90^\circ$ (рис. 3).

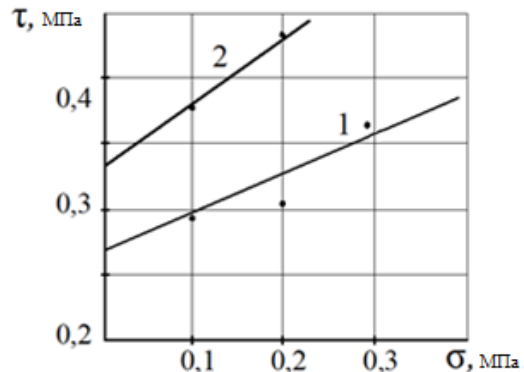


Рисунок 3 — Зміна зсувних властивостей ґрунту: 1 — до закріплення; 2 — після закріплення

Дослідження зсувних ґрунтів при їх ін'єкційній стабілізації проводилися на спеціальному експериментальному стенді. Експериментальний стенд призначений для вивчення основних властивостей дисперсних порід при їх консолідації цементним розчином. Такі дослідження були проведені на зразках світло-бурого та сірого суглинку. Результати експериментальних досліджень на зразках суглинку у вигляді графічних залежностей представлені на рисунках 4–6. При цьому на кожному рисунку окремі криві відповідають різним початковим об'ємним масам скелету: $\gamma_{ск} = 1,5; 1,65; 2,0 \text{ кг/см}^2$ (при $P = 0 \text{ МПа}$).

Знайдені експериментально залежності коефіцієнта консолідації (рис. 6), зчеплення (рис. 4) та кута внутрішнього тертя (рис. 5) від тиску нагнітання цементного розчину показані штриховою лінією. За результатами досліджень проводився кореляційно-регресійний аналіз дослідних даних за допомогою ПЕОМ. Відповідні їм регресійні криві показані на рисунках суцільною лінією.

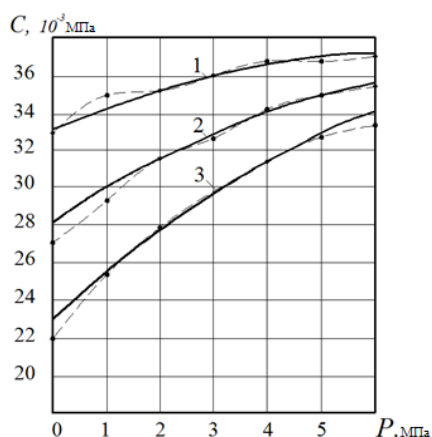


Рисунок 4 — Залежність зчеплення суглинка від тиску нагнітання розчину при початковій об'ємній масі скелету: 1 — 2,0 г/см³; 2 — 1,65 г/см³; 3 — 1,5 г/см³

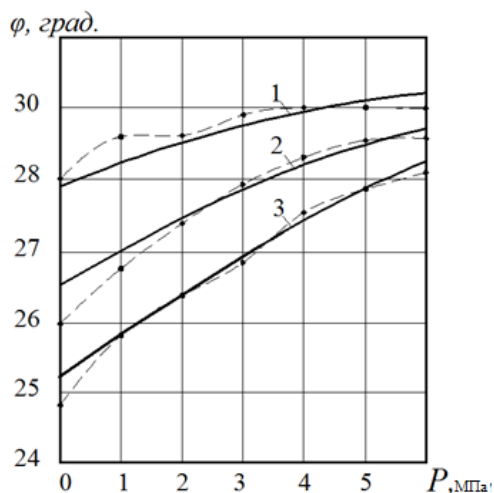


Рисунок 5 — Залежність кута внутрішнього тертя суглинка від тиску нагнітання розчину при початковій об'ємній масі скелету: 1 — 2,0 г/см³; 2 — 1,65 г/см³; 3 — 1,5 г/см³

Математична обробка результатів експериментів виконувалася за допомогою регресійного аналізу з використанням програмних комплексів для персональних комп'ютерів Microsoft® Excel та Mathcad® 14, у результаті чого були отримані емпіричні параметри (табл. 1). На підставі отриманих результатів було доведено поліпшення властивостей ґрунту при напірній цементації, а саме — зчеплення, кута внутрішнього тертя і коефіцієнта консолідації, отримані емпіричні залежності (4–6).

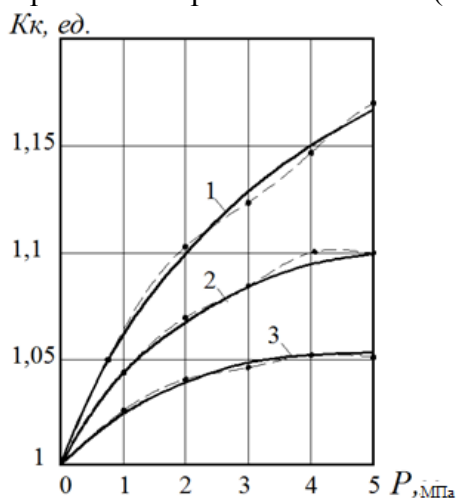


Рисунок 6 — Залежність коефіцієнта консолідації суглинка від тиску нагнітання розчину при початковій об'ємній масі скелету: 1 — 2,0 г/см³; 2 — 1,65 г/см³; 3 — 1,5 г/см³

$$c_2 = \alpha_2 P^2 + \beta_2 P + \gamma_2, \quad (4)$$

$$\varphi_2 = \alpha_3 P^2 + \beta_3 P + \gamma_3, \quad (5)$$

$$K_k = aP^3 + c. \quad (6)$$

Таблиця 1 — Емпіричні параметри щодо визначення зчеплення, кута внутрішнього тертя та коефіцієнта консолідації ущільнених ґрунтів

Початкова об'ємна маса скелету (суглинок), г/см ³	Емпіричні параметри			
	$\alpha_2, 10^{-3} \text{MPa}^{-1};$ $\alpha_3, \text{град/MPa}^2;$ $a, \text{м/добу}$	$\beta_2, 10^{-3} \text{MPa}^{-1};$ $\beta_3, \text{град/MPa}^2;$ $b, \text{м/добу}$	$\gamma_2, 10^{-3};$ $\gamma_3, \text{град/MPa}^2;$ $c, \text{м/добу}$	Коефіцієнти кореляції, $r_1; r_2; r_3$
1,5	-0,08; -0,02; 0,06	1,15; 0,33; 0,60	33,25; 27,91; 0,99	0,88; 0,93; 0,88
1,65	-0,12; -0,07; 0,04	1,98; 0,86; 0,59	28,18; 25,99; 0,99	0,85; 0,88; 0,92
2,0	-0,22; -0,05; 0,03	3,22; 0,85; 0,43	22,10; 24,84; 0,99	0,83; 0,92; 0,93

Таким чином, лабораторними методами доведена зміна прирощення об'ємної маси скелету $\Delta\gamma_{ск}$ зразків ґрунту при фільтраційній консолідації в залежності від вологості. Встановлено, що значення об'ємної маси скелету зсувних ґрунтів у результаті ущільнення при оптимальній вологості збільшуються на 0,15–0,20 г/см³. Доведена зміна зсувних характеристик обводнених ґрунтів посиленних методом напірної цементації: зчеплення ущільненого водонасиченого глинистого ґрунту збільшилося у 1,45–2,0 рази, кут внутрішнього тертя на 2–3°, модуль деформації збільшується в 1,3–1,8 рази. Встановлені емпіріо-аналітичні залежності дозволяють визначити зміну фізико-механічних характерис-

тик і коефіцієнта консолідації ґрунту в залежності від тиску нагнітання розчину.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Метод напірної цементації показав, що при закріпленні зсувних суглинків за рахунок збільшення об'ємної маси скелету ґрунту при фільтраційній консолідації в залежності від вологості досягається його ущільнення. Зсувні параметри ґрунту змінюються залежно від тиску нагнітання ін'єкційного розчину і початкової об'ємної маси зразків ґрунту. Отже, при збільшенні коефіцієнта консолідації ґрунту за рахунок ін'єкції досягається його стабілізація. Таким чином, застосування методу напірної цементації для стабілізації зсувонебезпечних та зсувних схилів показує значну ефективність.

Бібліографічний список

1. Рудько Г. И. Оползни и другие геодинамические процессы горноскладчатых областей Украины (Крым, Карпаты) : монография / Г. И. Рудько, И. Ф. Ерьш. — К.: Задруга, 2006. — 624 с.
2. Ларцева І. І. Визначення характеристик міцності ґрунтів, закріплених вертикальними ґрунтоцементними елементами / І. І. Ларцева // Світ ГЕОТЕХНІКИ. — 2012. — № 5. — С. 21–26.
3. Кирияк К. К. Моделирование оползневого склона методом конечных элементов / К. К. Кирияк // Сб. науч. тр. ДонГТУ. — Алчевск: ДонГТУ, 2011. — Вып. 35. — С. 257–266.
4. Аносова Л. А. Закономерности формирования оползневых отложений / Л. А. Аносова, И. Г. Коробанова, А. К. Копылова. — М.: Изд-во «Наука», 1996. — Т.1. — 184 с.
5. Максимова-Гуляева Н. А. Обґрунтування параметрів способу підвищення стійкості зсувонебезпечних схилів за допомогою струминної технології закріплення ґрунтів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.15.09 «Геотехнічна і гірнична механіка» / Н. А. Максимова-Гуляева. — Дніпропетровськ: Нац. гірн. ун-т., 2006. — 22 с.

Рекомендовано до друку д.т.н., проф. ДонДТУ Антощенко М. І., д.т.н., проф. НГУ Шашенко О. М.

Стаття надійшла до редакції 10.06.14.

д.т.н. Должиков П. Н. (ДонГТУ, г. Алчевск, Украина), д.т.н. Кипко А. Э (ВНУ им. В. Даля, г. Антрацит, Украина), к.т.н. Кирияк К. К. (ЦНТУ «Инжзащита», г. Ялта, АР Крым)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ И СДВИГОВЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ЗАКРЕПЛЕННЫХ МЕТОДОМ НАПОРНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ

В основу статьи положены комплексное исследование оползневых грунтов, которое включает в себя аналитические, лабораторные и натурные исследования, выполненные с целью определения эффективности инъекционного закрепления оползневых грунтовых структур.

Ключевые слова: оползневой склон, метод напорной цементации, закрепленный массив, сдвиговые параметры, фильтрационная консолидация, плоскости сдвига.

Dolzhikov P. N. Doctor of Engineering Sciences (DonSTU, Alchevsk, Ukraine), Kipko A. E. Doctor of Engineering Sciences (Dal ENU, Antratsit, Ukraine), Kiriya K. K. Candidate of Engineering Sciences (CSTS "Inzhzashchita", Yalta, Crimea)

THE DEFINITION OF STRUCTURAL AND SHIFTING PROPERTIES OF SOILS STEADY BY TECHNIQUE OF PRESSURE-PROOF CEMENTATION

A complex investigation of sliding soils, including analytical, laboratory and natural investigations, completed with the aim of defining the efficiency of injection ground stabilization of sliding soil structures is put down in the article.

Key words: sliding slope, pressure-proof cementation technique, ground stabilization massif shifting soil parameters, filtration consolidation, flat surface shift.