

ШТАМПОВІ ВИПРОБУВАННЯ ВОДОНАСИЧЕНОЇ ГЛИНИСТОЇ ОСНОВИ, АРМОВАНОЇ ВЕРТИКАЛЬНИМИ ГРУНТОЦЕМЕНТНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ, У ЛОТКУ

Наведено залежності впливу параметрів армування та характеристик ґрунтової основи на її несучу здатність і деформативність за результатами штампових випробувань у лотку.

Ключові слова: штампові випробування, лоток, несуча здатність основи, армування, ґрунтоцемент.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Армування основ вертикальними ґрунтоцементними елементами (ГЦЕ) – один з ефективних способів поліпшення характеристик слабких водонасичених ґрунтів, непридатних у природному стані для зведення на них будівель і споруд без спеціальних заходів. Проте, у зв'язку з особливостями деформування таких ґрунтів, проектувальникам важко підібрати оптимальні параметри армування, спрогнозувати поведінку армованої основи під навантаженням і т. ін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання цієї проблеми. Незважаючи на те, що метод перемішування ґрунтів з в'язкими речовинами для поліпшення характеристик масивів виник у США ще в 50-ті роки ХХ століття й активно розвивався в Скандинавських країнах і в Японії [1], сьогодні розробляються все нові сфери його застосування. Один із популярних у геотехніці напрямів є метод улаштування елементів підвищеної жорсткості в ґрунтовому масиві, так зване армування (раніше з цією метою використовувалися палі, вертикальні кам'яні колони в ґрунті, ґрунтові палі в пробитих свердловинах тощо) [2].

Такі елементи шляхом змішування в'язучих речовин із ґрунтом безпосередньо в масиві виготовляють кількома способами, серед яких бурозмішувальна технологія – одна з найдоступніших для вітчизняних будівельників [3 – 5]. У проведених на сьогодні дослідженнях досить широко розкрито питання впливу різних чинників на міцність ґрунтоцементу (вид ґрунту, його вологість, склад суміші і т. ін.) [3 – 6]. Досліджувалися також питання впливу параметрів армованої основи на її стан під тиском будівель і споруд, на базі яких розпочато розробку методики проектування армованих основ із необхідними характеристиками [6 – 9].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Проте параметри деформування водонасичених глинистих основ, армованих вертикальними ГЦЕ, при різних параметрах цього армування вивчено недостатньо. Потреба в експериментальному дослідженні виникає через специфічний характер деформування водонасичених основ, які проявляють реологічні властивості [10 – 11].

З метою виявлення впливу параметрів армування основи на її несучу здатність і деформативність та на характер деформування під тиском вирішено провести штампові випробування водонасиченої глинистої основи, армованої вертикальними ГЦЕ, в лотку.

Виклад основного матеріалу дослідження. Спираючись на відомі дослідження [6 – 9], як чинники, що суттєво впливають на несучу здатність і характер деформування армованої основи, виділено такі: щільність сухого ґрунту (характеристика природного стану основи), глибина та відсоток армування (параметри армування). Відсоток армування – це відношення об'єму армуючих елементів до всього об'єму армованого масиву. Програма лоткових досліджень розроблена, виходячи з варіювання одного параметра при постійних значеннях інших, тобто за планом однофакторного експерименту.

В усіх випадках значення постійних параметрів приймалися, виходячи з уже наявних досліджень [2 – 8]: співвідношення діаметра ГЦЕ та його довжини, ґрунтових умов, відсотка армування тощо. Крім того, для визначення ефекту від армування проведено три штампові випробування неармованої основи при різній щільності сухого ґрунту (досліди 8 – 10, табл. 2).

Таблиця 1 – Змінні фактори експерименту

№	Фактор	Кодоване значення	Абсолютне значення
1	Відсоток армування $i, \%$	-1	2,1
		0	4,4
		+1	7,1
2	Глибина армування $d, \text{см}$	-1	5
		0	10
		+1	15
3	Щільність сухого ґрунту $\rho_d, \text{г/см}^3$	-1	1,46
		0	1,52
		+1	1,58

Таблиця 2 – План лоткового експерименту

№ досліду	Фактор		
	1	2	3
1	-1	+1	-1
2	0	+1	-1
3	+1	+1	-1
4	0	-1	-1
5	0	0	-1
6	0	+1	0
7	0	+1	+1
8	-	-	-1
9	-	-	0
10	-	-	+1

Випробування проводилися в лабораторному лотку з прозорою передньою стінкою з оргскла товщиною 40 мм (рис. 1). Лоток пошарово заповнювали ґрунтовою пастою, яку попередньо готували шляхом подрібнення, просіювання та доведення до необхідної вологості з легкого пилюватого лесоподібного суглинку. Вологість ґрунту залежно від заданої щільності розраховувалася, виходячи з умови доведення ґрунту до коефіцієнта водонасичення $S_r = 0,85$. Товщина кожного шару становила 15 мм.

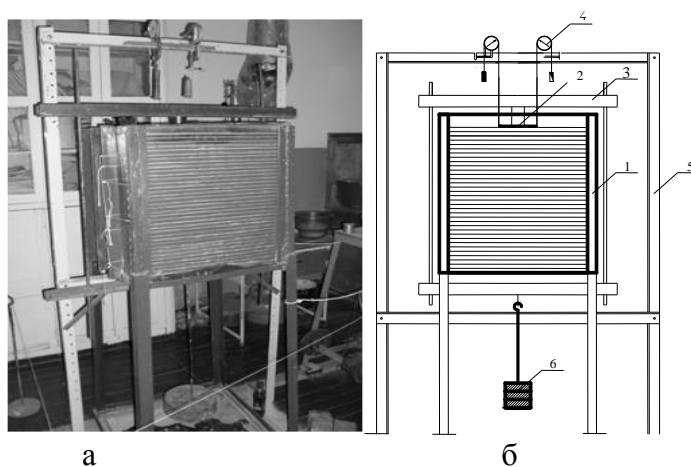


Рисунок 1 – Загальний вигляд (а) і схема (б) дослідного лотка:
1 – лоток; 2 – жорсткий штамп; 3 – система навантаження;
4 – прогиноміри; 5 – реперна рама; 6 – підвіска з вантажами

Армування основи виконувалося шляхом заповнення попередньо влаштованих свердловин діаметром 5 мм ґрунтоцементною сумішшю. Склад суміші: ґрунт; цемент (20% від маси сухого ґрунту); вода (вода-цементне співвідношення – 3:1). Схеми армування приймалися, виходячи з рівномірного розподілення елементів за площею штампа (рис. 2). Згідно з визначенням проф. М.Л. Зоценка [3], ПЦЕ можна вважати елементами армування за умови виключення безпосереднього контакту між ними та штампом. Тому поверх армованого масиву влаштовувався буферний шар зі щебеню фракції 3 – 5 мм.

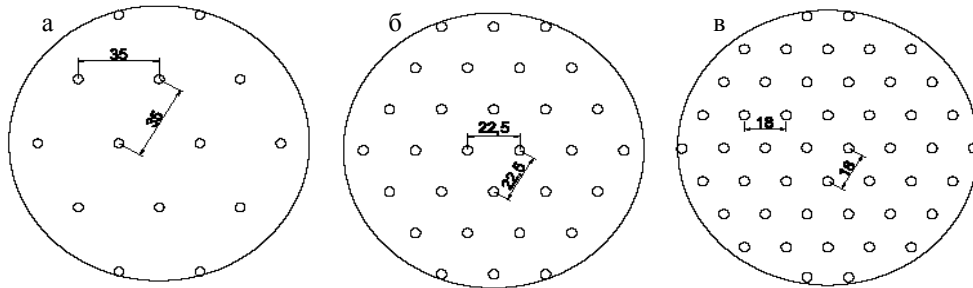


Рисунок 2 – Схеми розміщення елементів армування в основі штампа при:
а – відсотку армування $i = 2,1\%$; б – $i = 4,4\%$; в – $i = 7,1\%$

Випробування проводилося круглим сталевим штампом діаметром 130 мм і товщиною 8 мм посередині лотка, а також (для фіксації характеру деформування ґрунту основи за глибиною) біля прозорої стінки лотка напівкруглим штампом такого ж діаметра. Навантаження на штамп прикладалося ступенями за допомогою підвіски (рис. 1, б). Кожний ступінь тиску витримувався до умовної стабілізації осідань, що фіксувалися двома прогиномірами через 30 с, 1 хв, 5 хв, 10 хв, 15 хв і далі через кожні 15 хв, що дозволяє виявити характер деформування залежно від часу. Статичні випробування припинялися після вичерпання основою несучої здатності, критерієм чого було швидке наростання деформації без стабілізації при постійному тиску. Кожний дослід (табл. 2) повторювався двічі, а для аналізу бралися середні значення отриманих деформацій.

Штампові випробування аналогічних основ також проведені на циклічне навантаження за такою методикою: на ступенях навантаження, що відповідають 80% від першого та другого критичних тисків (за результатами попередніх дослідів), основу розвантажували, а потім знову завантажували. Кількість циклів «завантаження – розвантаження» залежала від приросту деформації основи при розвантаженні та завантаженні: якщо такий приріст не спостерігався або не перевищував 0,01 мм, то випробування припиняли.

За результатами випробувань побудовано графіки залежності середнього осідання основи штампа від тиску. На рис. 3 – 5 наведені такі графіки при зміні різних параметрів дослідів: відсотка армування (рис. 3); глибини армування (рис. 4); щільності сухого ґрунту (рис. 5).

На кожному з графіків виділено по дві характерні «переломні» точки, перша з яких відповідає закінченню лінійної стадії деформування основи – перший критичний тиск p_1 (кПа), а друга – вичерпання основою несучої здатності – другий критичний тиск p_2 (кПа). Залежність величин критичних тисків від кожного з вищевказаних параметрів можна описати апроксимуючими залежностями, зведеними в таблицю 3.

Апроксимацію залежностей критичних тисків від кожного із трьох чинників проведено степеневою функцією виду

$$y = a + b \cdot (x/x_0)^n, \quad (1)$$

де y – несуча здатність основи, що оцінюється за першим p_1 (кПа) чи другим p_2 (кПа) критичними тисками; a (кПа) та b (кПа) – емпіричні коефіцієнти залежностей; x – параметр армованої основи (відсоток i (%), глибина d (см) армування чи щільність сухого ґрунту ρ_d (г/см³); $x_0 = 1$ (відсотки – у виразах залежності тисків від відсотка армування i ; сантиметри – у формулах залежності тисків від глибини армування d ; грами на кубічний сантиметр – у виразах залежності тисків від щільності сухого ґрунту); n – показник степеня функції.

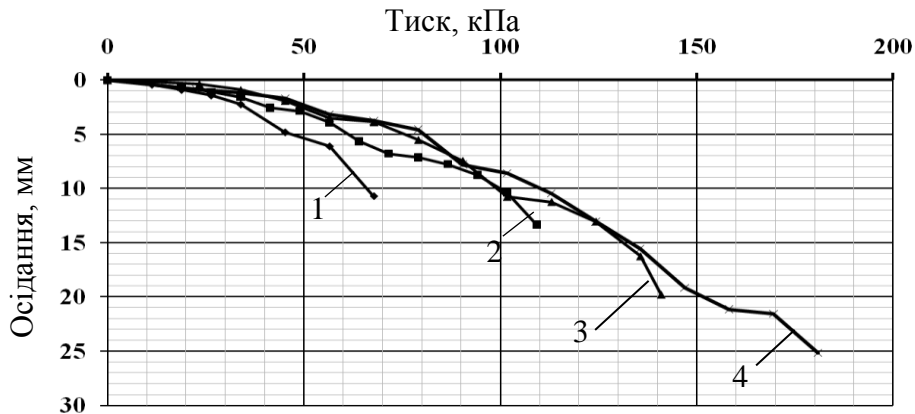


Рисунок 3 – Графіки розвитку осідань основи штамп при ступеневому завантаженні:
 1 – неармована основа; 2 – основа з 2,1% армування;
 3 – основа з 4,4% армування; 4 – основа з 7,1% армування

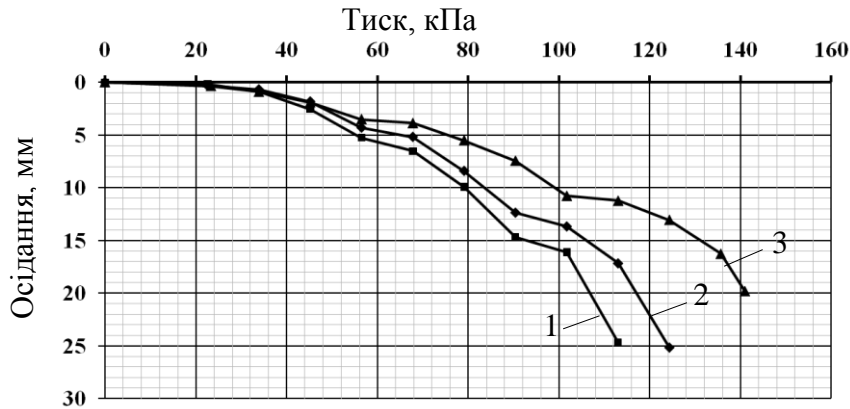


Рисунок 4 – Графіки розвитку осідань основи штамп при ступеневому завантаженні: 1 – глибина армування – 50 мм;
 2 – глибина армування – 100 мм; 3 – глибина армування – 150 мм

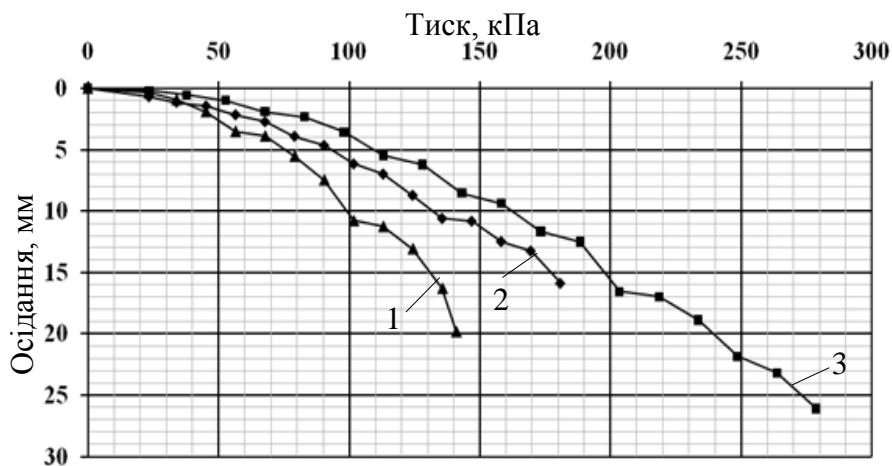


Рисунок 5 – Графіки розвитку осідань основи штамп при ступеневому завантаженні: 1 – щільність сухого ґрунту $\rho_d = 1,46 \text{ г/см}^3$; 2 – щільність сухого ґрунту $\rho_d = 1,52 \text{ г/см}^3$;
 3 – щільність сухого ґрунту $\rho_d = 1,58 \text{ г/см}^3$

Таблиця 3 – Апроксимація дослідних даних степеневою функцією

Фактор	Перший критичний тиск, кПа		Другий критичний тиск, кПа	
Відсоток армування i , %	$p_1 = 22,314 + 8,003 \cdot i / i_0$		$p_2 = 55,906 + 31,489 \cdot (i / i_0)^{0,65}$	
	Коефіцієнт кореляції	Коефіцієнт варіації	Коефіцієнт кореляції	Коефіцієнт варіації
	$r = 0,998$	$v = 0,04$	$r = 0,999$	$v = 0,023$
Глибина армування d , см	$p_1 = 21,550 + 2,350 \cdot d / d_0$		$p_2 = 55,653 + 18,427 \cdot (d / d_0)^{0,53}$	
	$r = 0,999$	$v = 0,015$	$r = 0,994$	$v = 0,044$
	$p_1 = 265,33 - 220 \cdot \rho_d / \rho_{d,0}$		$p_2 = 875,53 - 690,83 \cdot \rho_d / \rho_{d,0}$	
Щільність сухого ґрунту ρ_d , г/см ³	$r = 0,997$	$v = 0,032$	$r = 0,995$	$v = 0,032$

Ці залежності показують зростання обох критичних тисків при збільшенні відсотка армування, глибини армування та щільності ґрунту.

Оцінювання впливу цих же чинників на значення критичних тисків виконано також за результатами багатофакторного аналізу дослідних даних рівнянням регресії у вигляді лінійної функції трьох факторів:

$$y = A_0 + A_1 \cdot (x_1 / x_{1,0}) + A_2 \cdot (x_2 / x_{2,0}) + A_3 \cdot (x_3 / x_{3,0}), \quad (2)$$

де y – несуча здатність основи, яку оцінюють за першим p_1 (кПа) чи другим p_2 (кПа) критичними тисками; A_0, A_1, A_2, A_3 (кПа) – емпіричні коефіцієнти; x_1 – відсоток армування i (%); x_2 – глибина армування d (см); x_3 – щільність сухого ґрунту ρ_d (г/см³); $x_{1,0} = 1\%$; $x_{2,0} = 1$ см; $x_{3,0} = 1$ г/см³. Отримані залежності зведені в таблицю 4.

Таблиця 4 – Апроксимація дослідних даних лінійним рівнянням регресії

Перший критичний тиск, кПа		
$p_1 = -307,59 + 7,58 \cdot i / i_0 + 2,39 \cdot d / d_0 + 202,73 \cdot \rho_d / \rho_{d,0}$		
Коефіцієнт кореляції	Критерій Фішера	
$r = 0,996$	Отриманої залежності	Табличний
	$F = 123,43$	$F_T = 8,94$
Другий критичний тиск, кПа		
$p_2 = -954,09 + 12,12 \cdot i / i_0 + 3,52 \cdot d / d_0 + 673,11 \cdot \rho_d / \rho_{d,0}$		
$r = 0,993$	$F = 74,57$	$F_T = 8,94$

Приклади графіків розвитку деформацій у часі наведено на рисунку 6. Вони демонструють затухання осідань основи штампа на кожному ступені тиску (рис. 1, б). Зокрема, на рис. 6, а наведені графіки розвитку осідання основи штампу на неармованій основі, з якого видно, що на кожному ступені тиску час досягнення стабілізації більший, ніж на попередньому. Швидкість деформації основи також підвищувалася з кожним ступенем тиску.

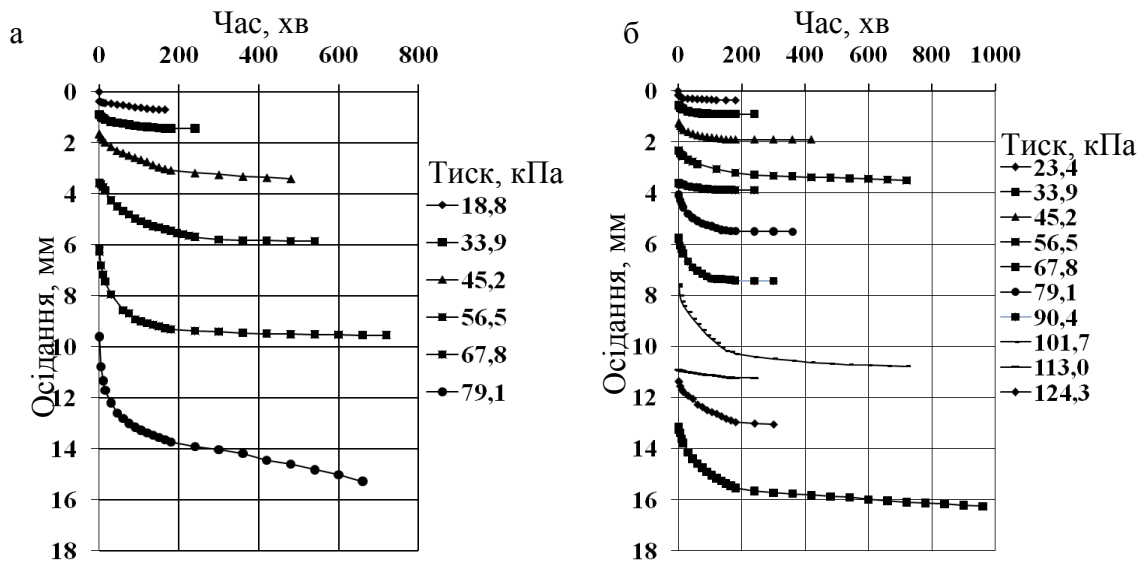


Рисунок 6 – Графіки розвитку осідань у часі на кожному ступені тиску для основи зі щільністю сухого ґрунту $\rho_d = 1,46 \text{ г/см}^3$:
 а – неармована основа; б – основа з армуванням $i = 4,4\%$

Біля прозорої стінки лотка проведено випробування напівкруглим штампом, що дозволило спостерігати та шляхом фотографування фіксувати деформований стан основи за глибиною. Порівняння фотографій на різних стадіях випробувань показує збільшення глибини зони деформування основи штампа (H_c) в момент досягнення нею другого критичного тиску p_2 в результаті її армування (рис. 7). При цьому, чим більший відсоток армування, тим більша величина H_c (рис. 8).

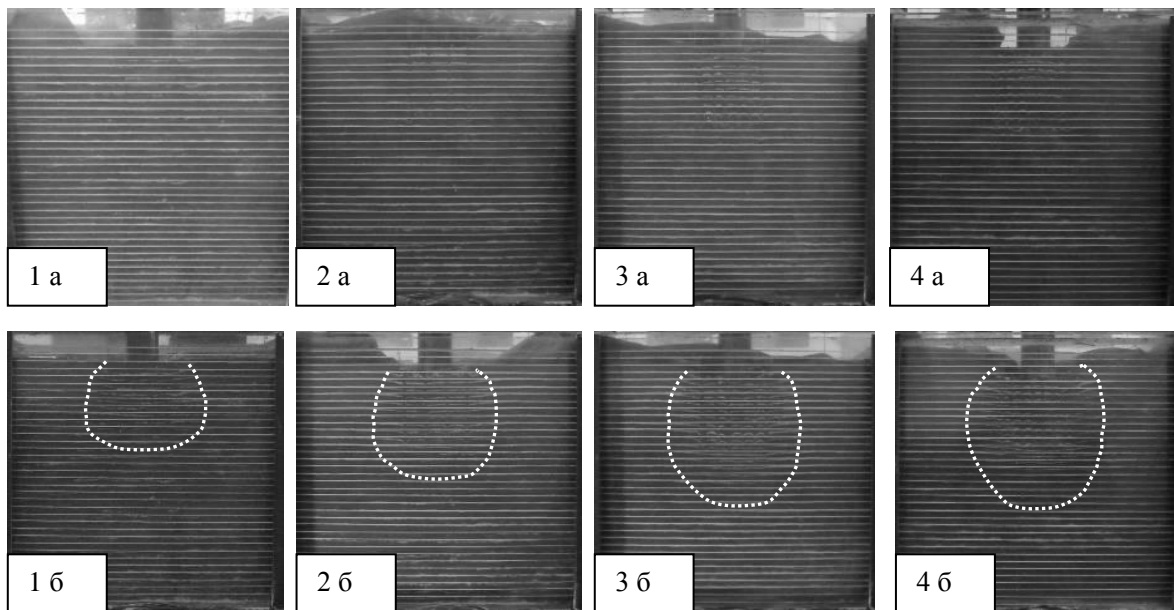


Рисунок 7 – Деформований стан основи жорсткого штампа до її навантаження (а) та після вичерпання її несучої здатності (б): 1 – неармована основа; 2 – основа з відсотком армування $i = 2,1\%$; 3 – основа з $i = 4,4\%$; 4 – основа з $i = 7,1\%$

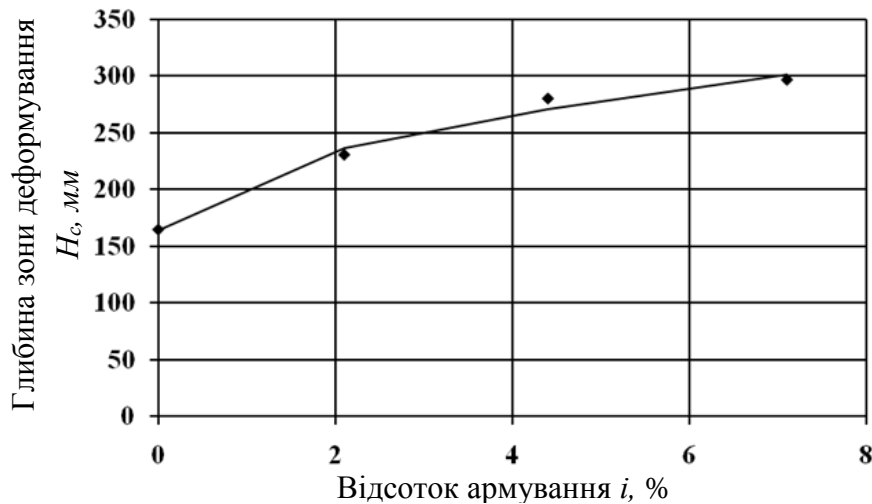


Рисунок 8 – Залежність глибини зони деформування основи штампу від відсотка армування

Отримані дослідні дані залежності глибини зони деформування H_c від відсотка армування основи i можна апроксимувати степеневою функцією (1), де y – глибина зони деформування H_c (мм); a (мм) та b (мм) – емпіричні коефіцієнти; x – відсоток армування i ; $x_0 = 1\%$; n – показник степеня функції. Залежність описується рівнянням

$$H_c = 164,29 + 49,41 \cdot (i/i_0)^{0,52} \quad (3)$$

при коефіцієнтах кореляції $r = 0,993$ і варіації $v = 0,035$.

За підсумками випробувань на циклічне навантаження, проведених при відсотковій армування основи $i = 4,4\%$ та щільності сухого ґрунту $\rho_d = 1,46 \text{ г/см}^3$, побудовано графіки залежності осідань основи від тиску (рис. 9).

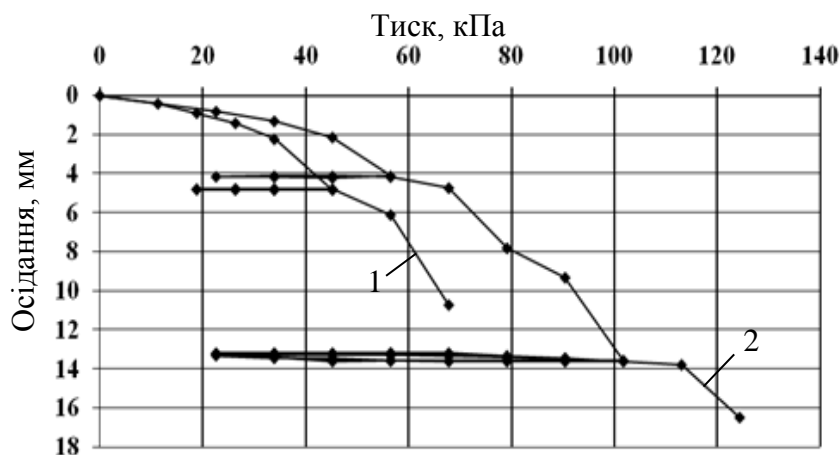


Рисунок 9 – Графіки залежності осідань основи штампу від тиску при циклічному завантаженні: 1 – неармована основа; 2 – основа з відсотком армування $i = 4,4\%$.

Аналізуючи ці графіки, можна відзначити, що армована основа проявляє пружні властивості, тобто відновлення частини деформацій при кількох циклах завантаження – розвантаження, тоді як неармована основа такого ефекту не проявляє. Крім того, при повторенні кількох циклів (у нашому випадку чотирьох) відбувається зміцнення основи, про що свідчить зменшення приросту деформації на наступному ступені тиску (рис. 9).

Висновки. Отримані результати дають можливість виділити такі особливості деформування водонасиченої глинистої основи після її армування вертикальними ГЦЕ:

- перший критичний тиск підвищується за залежністю, близькою до лінійної, як від відсотка та глибини армування, так і від щільності сухого ґрунту;
- несуча здатність основи підвищується: від відсотка та глибини армування – за степеневою функцією, а від щільності сухого ґрунту – за лінійною;
- затухання осідань штампа на армованій основі відбувається швидше, ніж неармованої при однакових тисках, при цьому швидкість деформування армованої основи менша, ніж неармованої;
- при розвантаженні армована основа проявляє пружні властивості: відновлення частини деформацій, тоді як для неармованої такого ефекту не виявлено;
- при циклічному навантаженні за умови неперевикнення другого критичного тиску відбувається ущільнення ґрунту як армованої, так і неармованої основи, що призводить до підвищення опору деформуванню на наступних ступенях тиску;
- глибина зони деформування армованої основи в момент досягнення другого критичного тиску більша порівняно з неармованою, зі збільшенням відсотка армування глибина цієї зони зростає за степеневою залежністю.

Література

1. Bruce, D.A. *An introduction to the deep soil mixing methods as used in geotechnical applications. Report FHWA-RD-99-138 / D.A. Bruce.* – U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, 2000. – 143 p.
2. Bahar, R. *Settlements of silos founded on compressible soils reinforced by stone columns / R. Bahar, O. Sadaoui, E. Vincens // Proc. of the Intern. geotechnical conf. «Geotechnical challenges in megacities».* – Moscow, 2010. – P. 965 – 970.
3. *Characteristics of manmade stiff grounds improved by drill-mixing method / M. Zotsenko, Yu. Vynnykov, I. Lartseva, V. Shokarev, V. Krysan // Proc. of the 15th European conf. on soil mechanics and geotechnical engineering.* – Athens, 2011 – P. 1097 – 1102.
4. Зоценко, Н.Л. *Закрепление оснований цементацией буромесительным методом / Н.Л. Зоценко, И.И. Ларцева, В.И. Марченко // Тр. Междунар. конф. по геотехнике «Геотехнические проблемы мегаполисов».* Т. 5. – М.: ПИ «Геореконструкция», 2010. – С. 1781 – 1788.
5. *Опыт закрепления грунтов цементогрунтовыми элементами / [Б.Н. Исаев, С.Ю. Бадеев, А.Г. Лунев и др.] // Основания, фундаменты и механика грунтов.* – 2010. – №5. – С. 29 – 32.
6. Зоценко, Н.Л. *Сравнительная оценка эффективности армирования основания по данным штамповых испытаний и математического моделирования / Н.Л. Зоценко, Н.И. Лапин, Р.В. Петраш // Основания, фундаменты и механика грунтов.* – 2008. – №4. – С. 17 – 20.
7. *Soft soils improvement solution. Design based on the laboratory test results on scale model / A. Chirică, A. Olteanu, M.S. Serbulea & I. Boti // Proc. of the 17th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.* – Alexandria, 2009. – P. 405 – 408.
8. *Расчет вертикально армированного грунтового основания плитных фундаментов / Л.В. Нурджин, В.В. Теслецкий, М.Л. Нурджин, М.В. Юрьев // Сб. тр. научн.-техн. конф. «Актуальные вопросы геотехники при решении сложных задач нового строительства и реконструкции».* – СПб.: СПбГАСУ, 2010. – С. 143 – 147.
9. *Мирсаяпов, И.Т. Экспериментальные исследования вертикально армированного грунтового массива / И.Т. Мирсаяпов, А.О. Попов // Научно-практические и теоретические проблемы геотехники: межвуз. тематич. сб. тр.* – СПб.: СПбГАСУ, 2008. – С. 66 – 70.
10. *Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти: підручник / [М.Л. Зоценко, В.І. Коваленко, А.В. Яковлев та ін.].* – Полтава: ПолтНТУ, 2004. – 568 с.
11. *Мангушев Р.А. Геотехника Санкт-Петербурга: монография / Р.А. Мангушев, А.И. Осокин.* – М.: Изд-во АСВ, 2010. – 264 с.

Надійшла до редакції 19.12. 2011

© В.І. Марченко

В.И. Марченко, аспирант

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

**ШТАМПОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ВОДОНАСЫЩЕННОГО
ГЛИНИСТОГО ОСНОВАНИЯ, АРМИРОВАННОГО
ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ, В ЛОТКЕ**

Представлены зависимости влияния параметров армирования и характеристик грунтового основания на его несущую способность и деформативность по результатам штамповых испытаний в лотке.

***Ключові слова:** штамповые испытания, лоток, несущая способность основания, армирование, грунтоцемент.*

V. Marchenko, postgraduate student

Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk

**PLATE BEARING TESTS OF SATURATED CLAY GROUND
REINFORCED BY VERTICAL SOIL-CEMENT UNITS
IN THE LABORATORY TRAY**

Influences of reinforcement parameters and characteristics of soil on ground bearing capacity and deformability on results of plate bearing tests in the tray are presented.

***Key words:** plate bearing tests, tray, bearing capacity of ground, reinforcement, soil-cement.*