

УДК 624.138.24

**ЧИСЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГРУНТОЦЕМЕНТНИХ ОСНОВ  
МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

**ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫХ  
ОСНОВАНИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**NUMERICAL STUDY OF SOIL-CEMENT BASES BY FINITE  
ELEMENT METHOD**

**Харченко М.О., к.т.н., Ларцева І.І., к.т.н., Марченко В.І., асист.,  
Пасюта А.С., магістр** (Полтавський національний технічний університет  
імені Юрія Кондратюка, м. Полтава)

**Харченко М.А., к.т.н., Ларцева И.И., к.т.н., Марченко В.И., ассист.,  
Пасюта А.С., магистр** (Полтавский национальный технический университет имени  
Юрия Кондратюка, г. Полтава)

**Kharchenko M.O., candidate of technical sciences, Lartseva I.I., candidate of  
technical sciences, Marchenko V.I., assistant, Pasyuta A.S., master degree**  
(Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava)

**Наведено результати чисельного експерименту методом скінченних  
елементів (МСЕ) з визначення геотехнічних характеристик слабкої основи,  
армованої ґрунтоцementeними елементами (ГЦЕ). За результатами  
досліджень запропонована методика аналітичного визначення механічних  
характеристик основ, армованих ГЦЕ.**

**Приведены результаты численного эксперимента методом конечных  
элементов (МКЭ) по определению геотехнических характеристик слабого  
основания, армированного ґрунтоцementeнными элементами (ГЦЭ). По  
результатам исследований предложена методика аналитического  
определения механических характеристик оснований, армированных ГЦЕ.**

**It's presented the results of numerical simulation by finite element method  
(FEM) to determine the geotechnical characteristics of a weak base that  
reinforced soil-cement elements (SCE). According to the research proposed a  
analytical method for determining the mechanical properties of the bases, that  
reinforced by SCE.**

**Ключові слова:**

**Ґрунтоцементна основа, метод скінченних елементів, міцність, деформативність.**

Грунтоцементное основание, метод конечных элементов, прочность, деформативность.  
Soil-cement base, finite element method, strength, deformability.

**Вступ.** Сьогодні при будівництві на просадочних і слабких ґрунтах, при реконструкції існуючих будівель і споруд досить часто для підсилення основи використовують армування ґрунту. Армування полягає в тому, що в існуючу основу вводять різними методами жорсткі елементи, які мають набагато вищі характеристики міцності та деформативності, ніж природний ґрунт. При цьому утворюється система «ґрунт – елементи армування», характеристики міцності та деформативності якої визначаються різними методами.

**Аналіз останніх досліджень.** Дослідження властивостей закріплених ґрунтів різними методами ведуться досить давно такими вченими як С.Д. Безрук, Н.М. Віленкін, Л.М. Гончаров, А.Л. Готман, М.Л. Зоценко, В.І. Крисан, Р.А. Мангушев, Б.А. Ржаніцин, П.А. Ребиндер, В.Е. Соколович, І.В. Степура, А.Н. Токін, В.С. Шокарев, А. Добсон, Л. Казагранде, Т.С. Янг й іншими. Все більшого поширення в Україні та в світі набуває закріплення слабких ґрунтів ґрунтоцементними елементами (ГЦЕ) з використанням бурозмішувальної або струминної технологій [1 – 6].

**Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття.** Інженерна методика розрахунку основ, армованих ГЦЕ, сьогодні розвинена не достатньо. Для її удосконалення потрібно визначити, як змінюються фізико-механічні характеристики ґрунтоцементної основи залежно від процента армування. Під поняттям «процент армування» прийнято відношення сумарної площі поперечних перерізів ГЦЕ до площі поперечного перерізу основи, що сприймає навантаження.

Тому **метою** роботи є визначення геотехнічних характеристик ґрунтоцементної основи залежно від процента армування.

**Виклад матеріалів досліджень.** Ґрунтоцементна основа – це композитний матеріал, що складається з масиву ґрунту та ГЦЕ. При цьому ГЦЕ мають набагато більшу міцність і жорсткість, ніж оточуючий їх ґрунт. Тому армування є засобом зміни в потрібному напрямку властивостей ґрунтової основи. Така основа одержує значні відмінності від початкового стану – анізотропність та неоднорідність її збільшуються.

Для визначення геотехнічних параметрів ґрунтоцементної основи (ГЦО) залежно від проценту армування  $i$  ( $E_{ГЦО} = f(i)$ ,  $\varphi_{ГЦО} = f(i)$ ,  $c_{ГЦО} = f(i)$ ) використано чисельне моделювання МСЕ за допомогою ПК «Plaxis 3D Foundation» (Version 1.6) у просторовій (3D) постановці. При цьому були змодельовані випробувальні та випробовування на одноплосинне зрушення зразків ґрунту, що армовані вертикальними ГЦЕ. Методика випробовувань відповідає ДСТУ Б 8.2.1-4-96 «Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості». У цих дослідженнях проведено аналіз зміни геотехнічних параметрів ГЦО для

процента армування  $i = 2,2 \dots 10,5\%$ , оскільки подальше його збільшення суттєво змінює сумісну роботу ГЦЕ і ґрунту.

Закріплення зразків ґрунту при моделюванні виконувалось за такими схемами (рис. 1): вертикальні ГЦЕ, кількість яких приймалася із умови створення необхідного проценту армування:  $i = 2,2$  (7 ГЦЕ); 4,4 (14 ГЦЕ); 6,6 (21 ГЦЕ) та 10,5% (36 ГЦЕ). Сітка скінченних елементів (СЕ) для процента армування  $i = 2,2 \%$  наведено на рис. 2.

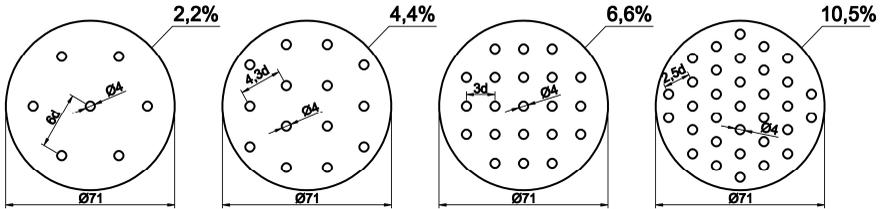


Рис. 1. Зразки закріпленого ґрунту:  $d$  – діаметр ґрунтоцементного елемента

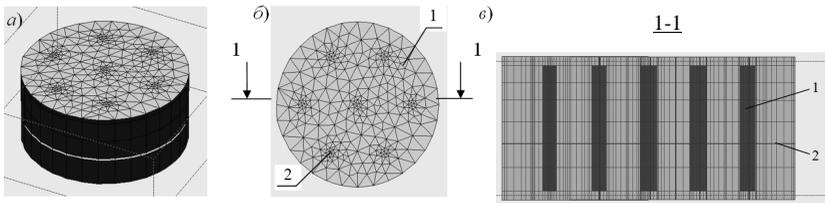


Рис. 2. Сітка СЕ для зразка з процентом армування  $i = 2,2 \%$  (7 ГЦЕ):  
а – загальний вигляд закріпленого зразка; б – вид зверху;  
в – поперечний переріз 1-1; 1 – ґрунт, 2 – елемент армування

Для компресійних випробовувань приймалися ГЦЕ висотою, що рівна висоті кільця –  $h=35$  мм. Для одноплощинного зрушення ГЦЕ були взяті висотою 33 мм, що на 2 мм коротше висоти зразка ( $h=35$  мм), для того, щоб запобігти безпосередньому сприйняттю вертикального навантаження більш жорсткими елементами закріплення.

Вихідні дані характеристик ґрунту та ґрунтоцементу зведено до табл. 1.

Таблиця 1

Вихідні дані чисельного експерименту

Матеріал	Питома вага $\gamma$ , $\text{кН/м}^3$	Модуль деформації $E$ , МПа	Коефіцієнт Пуассона $\nu$	Питома зчеплення $c$ , кПа	Кут внутрішнього тертя $\varphi$ , град.
Суглинок	18,0	5	0,35	11,8	6
Ґрунтоцемент	18,2	80	0,2	100	7

Примітка. Характеристики ґрунтоцементу прийняті за [1].

Модуль деформації  $E$  армованого зразка ґрунту визначали шляхом його ущільнення під тиском без можливості бічного розширення. Випробування виконували ступеневим прикладанням тиску  $\sigma = 0,025; 0,05; 0,10; 0,20; 0,30$  МПа. За одержаними результатами будували компресійну криву й розраховували значення модуля деформації  $E$  за формулою

$$E = \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i} \beta, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_i$  і  $\varepsilon_{i+1}$  – значення відносного стиску, що відповідають прикладеним тискам  $\sigma_i$  і  $\sigma_{i+1}$ ;  $\beta$  – коефіцієнт, який враховує відсутність поперечного розширення ґрунту в компресійному приладі і який обчислюють за формулою

$$\beta = 1 - \frac{2\xi^2}{1 + \xi}, \quad (2)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт бокового тиску ґрунту,  $\xi = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} = \frac{\sigma_z}{\sigma_y}$ ;  $\sigma_x, \sigma_z$  –

горизонтальні і вертикальні напруження в масиві армованого ґрунту при його завантаженні.

Коефіцієнт Пуассона  $\nu$  армованого зразка ґрунту визначено за формулою

$$\nu = \frac{\xi}{1 + \xi} \quad (3)$$

Компресійна крива досліджень (при проценті армування  $i = 2,2\%$ ) зображена на рис. 3.



Рис. 3. Компресійна крива досліджень (при проценті армування  $i = 2,2\%$ )

Результати досліджень зведено до табл. 2. За отриманими даними побудовано графік залежності модуля деформації армованої слабкої основи  $E_{\text{ГДО}}$  від проценту армування (рис. 4).

Результати чисельного експерименту визначення характеристик деформативності ґрунтоцементної основи

Найменування характеристики	Процент армування $i$ , %			
	2,2	4,4	6,6	10,5
Модуль деформації $E_{ґґО}$ за ДБН В.2.1-10-2009 «Основи та фундаменти споруд», МПа	6,7	8,3	10,0	12,9
Модуль деформації $E_{ґґО}$ за чисельним моделюванням, МПа	6,3	7,7	9,1	11,8
Коефіцієнт Пуассона $\nu_{ґґО}$	0,3	0,3	0,27	0,25

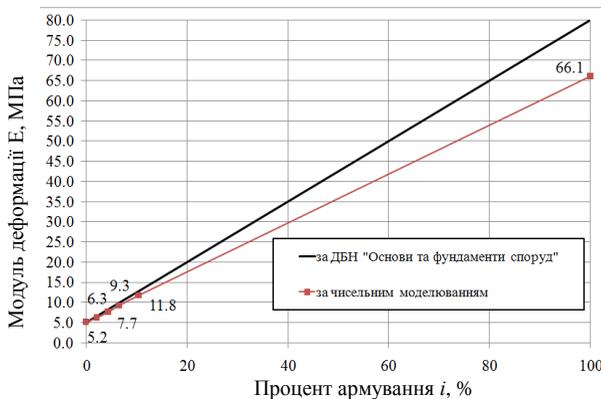


Рис. 4. Графік залежності модуля деформації ґрунтоцементної основи від проценту армування

Як видно з рис. 4, графік в діапазоні проценту армування  $i = 0 \dots 10\%$  лінійний і непогано корелюється за нормативною методикою згідно з ДБН В.2.1-10-2009 «Основи та фундаменти споруд»

$$E_{s,st} = \frac{A_{sc} \cdot E_{sc} + (A - A_{sc}) \cdot E_s}{A}, \quad (4)$$

де  $E_{s,st}$  – структурне зчеплення закріпленого масиву, МПа;  $E_{sc}$  – модуль деформації ґрунтоцементу, МПа;  $E_s$  – модуль деформації незакріпленого ґрунту, МПа;  $A_{sc}$  – загальна площа ґрунтоцементних елементів у зразку,  $\text{см}^2$ ;  $A$  – загальна площа зразка, що закріплюється,  $\text{см}^2$ .

Розрахункова схема (рис. 5, а) моделює зріз зразка ґрунту в приладі одноплосинного зрушення. Зрізна коробка приладу циліндричної форми діаметром 71 мм, висотою 35 мм, складається з двох частин: верхньої – рухомої, нижньої – нерухомої, що забезпечується накладанням в'язей. Проміжок між рухомою та нерухомою частинами зрізної коробки становить 1 мм, як і при лабораторних випробуваннях.

Прикладання вертикального  $p_1 = 0,05; 0,1; 0,15$  МПа та горизонтального  $p_2$  тисків наведена на рис. 5, б.

У результаті моделювання отримано дотичні напруження та відповідні їм деформації зрізу, за якими побудовані графіки залежностей «дотичні напруження – деформації» у логарифмічних координатах (рис. 6). Після обробки графіків за стандартною методикою визначалися характеристики міцності армованого ґрунту (табл. 2).

За даними таблиці 3 побудовані графіки залежності структурного  $c_{st}$  та питомого (довготривало)  $c$  зчеплення від процента армування (рис. 7). Як видно з цього рисунка, для процента армування в діапазоні  $i = 0...10\%$  графіки мають лінійний характер. При цьому питоме і структурне зчеплення ґрунтоцементної основи зростають зі збільшенням проценту армування. Кут внутрішнього тертя ґрунтоцементної основи майже не змінюється.

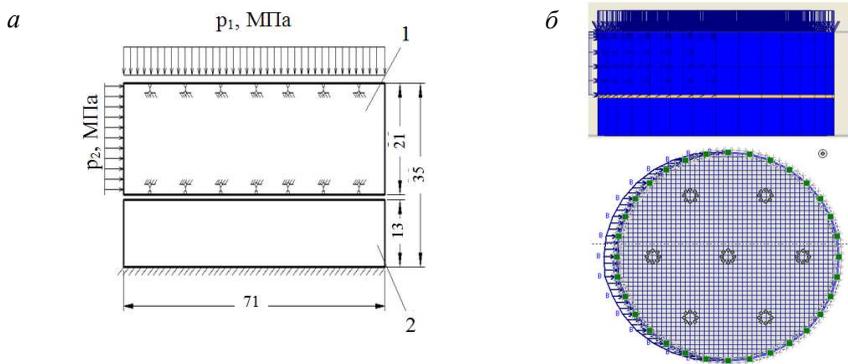


Рис. 5. Розрахункова схема одноплощинного зрушення: а – розрахункова схема; б – СЕ модель; 1 – верхня рухома та 2 – нижня нерухома частини зрізної коробки

Таблиця 3

Зіставлення міцності незакріпленого і закріпленого ґрунту за результатами моделювання одноплощинного зрушення

№	Процент армування $i, \%$	Характеристики міцності			
		за структурною міцністю		за довготривалою міцністю	
		$c_{st},$ кПа	$\varphi,$ град	$c,$ кПа	$\varphi,$ град
1	0	2,3	6	10,7	9
2	2,2	8,7	6	15,3	11
3	4,4	15,0	7	19,7	11
4	6,6	16,3	8	23	12
5	10,5	23,5	8	26	12

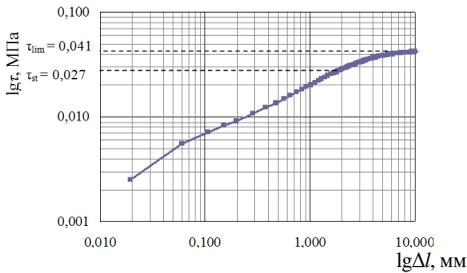


Рис. 6. Графік залежності дотичних напружень  $lg\tau$  від деформацій  $lg\Delta l$  при  $\sigma=0,05$  МПа (процент армування  $i=4,4\%$ )

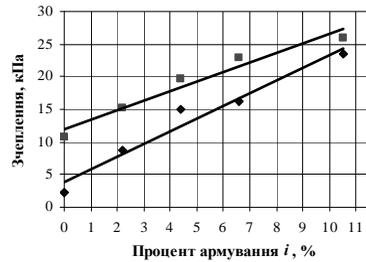


Рис. 7. Графіки залежності зчеплення ґрунту від процента армування:

- 1 – за структурною міцністю;
- 2 – за довготривалою міцністю

Таким чином, значення структурного і довготривалого зчеплення закріпленого масиву (при проценті армування не більше 10%) можна визначати як середньозважене між структурним зчепленням природного ґрунту та ґрунтоцементом за формулою (5):

$$c_{s,st} = \frac{A_{sc} \cdot c_{sc} + (A - A_{sc}) \cdot c_s}{A}, \quad (5)$$

де  $c_{s,st}$  – структурне зчеплення закріпленого масиву, кПа;  $c_{sc}$  – структурна міцність ґрунтоцементу, кПа ( $c_{sc,max}=210$  кПа);  $c_s$  – структурне зчеплення незакріпленого ґрунту, кПа;  $A_{sc}$  – загальна площа ґрунтоцементних елементів у зразку,  $cm^2$ ;  $A$  – загальна площа зразка, що закріплюється,  $cm^2$ .

**Висновки.** Чисельним експериментом за допомогою МСЕ на базі математичної моделі ґрунтоцементної основи отримано характеристики деформативності і міцності армованого ґрунту для процента армування не більше 10%, які аналітично можливо визначити за формулами (4) і (5) відповідно. Також визначено, що кут внутрішнього тертя ґрунтової основи при армуванні майже не змінюється.

1. 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. 2. Zotsenko M. Characteristics of manmade stiff grounds improved by drill-mixing methods / M. Zotsenko, Y. Vynnykov, I. Lartseva, V. Shokarev, V. Krysan // Proc. of the 15<sup>th</sup> European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Athens, Greece, 2011. – Amsterdam, Berlin, Tokyo, Washington: JOS Press. – 2011. – P. 1097 – 1102. 3. Армовані основи будівель та споруд. Монографія / М.Ф. Друкований, С.В. Матвеев, Б.Б. Корчевський та ін. – Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 2006. – 235 с. 4. Бадеев В.С. Взаимодействие фундаментов с основаниями, усиленными цементно-грунтовыми элементами: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.02. – ВГАСУ, 2005. – 24 с. 5. Золотозубов, Д.Г. Анализ работы армированных оснований при деформациях грунтовых массивов: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.23.02 / Д.Г. Золотозубов – Волгоград: ВГАСУ, 2011. – 20 с. 6. Yang T.S. Application Characteristics using Deep Cement Mixing Method in Various Soil conditions / T.S. Yang, G.H. Jeong, J.D. Koo // Proc. of the 1st International Symposium on Geotechnical Safety and Risk. – China: Shanghai, 2007. – pp. 617 – 629.