

*М.Л. Зоценко, д.т.н., професор, Т.М. Нестеренко, аспірантка
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВІБРУВАННЯ НА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТОЦЕМЕНТУ З МІЛКОГО ОДНОРІДНОГО ПІСКУ ТА ГЛИНИСТОГО ҐРУНТУ

Експериментально визначено оптимальний час вібрування зразків ґрунтоцементу з мілкою однорідного піску та проведено порівняльний аналіз фізико-механічних властивостей зі зразками із глинистого ґрунту при однакових умовах проведення експериментів

Ключові слова: ґрунтоцмент, вібрування, кубикова міцність, щільність скелета ґрунтоцемента.

*Н.Л. Зоценко, д.т.н., професор, Т.Н. Нестеренко, аспірантка
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВИБРИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТОЦЕМЕНТА С МЕЛКОГО ОДНОРОДНОГО ПЕСКА И ГЛИНИСТОГО ГРУНТА

Експериментально определено оптимальное время вибрирования образцов ґрунтоцемента из мелкого однородного песка и проведен сравнительный анализ физико-механических свойств с образцами из глинистого ґрунта при одинаковых условиях проведения экспериментов.

Ключевые слова: ґрунтоцмент, вибрирование, кубиковая прочность, плотность скелета ґрунтоцемента.

*N. Zotsenko, Dr. of Tech.sci, professor, T. Nesterenko, postgraduate student
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*

COMPARISON ANALYSIS INFLUENCE OF VIBRATING ON MECHANICAL CHARACTERISTIC SOILCEMENT OF SHALLOW HOMOGENEOUS SAND AND CLAY GRUNT

We determine optimum time of forming soilcement models of shallow homogeneous sand. We cite comparison analysis of mechanical characteristic soilcement grunt in identical conditions in identical conditions of shallow homogeneous sand and clay.

Keywords: soilcement, vibrating, prism strength, frame density of soilcement.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими практичними завданнями. Одним з ефективних напрямів зниження вартості фундаментобудування є використання ґрунтів, які залягають в основі об'єктів будівництва, як матеріалу для зведення фундаментів. Улаштування ґрунтоцментних паль можливе в різноманітних ґрунтах: від мулів і торфів до «слабких» скельних порід, незалежно від їх хімічного складу, вологості, рослинних залишків, проникності та інших характеристик. Ґрунтоцментні палі досить ефективні при укріпленні фундаментів та їх основ, особливо за умов щільної забудову. Такий вид паль застосовують для зміцнення слабких ґрунтів безпосередньо в масиві без його виймання, для запобігання обвалів схилів, а також для збільшення несучої здатності паль на горизонтальне та вертикальне навантаження [1, 2].

У ґрунтоцментних паль, не зважаючи на велику кількість переваг, є і недоліки, такі як пористість та порівняно невелика міцність за матеріалом.

Як відомо, міцність ґрунтоцементу залежить від таких факторів, як гранулометричний та мінералогічний склад ґрунту, кількість, склад і активність в'язучого, формувальна вологість суміші, ступінь розпушення ґрунту і рівномірність перемішування компонентів, режим, умови, термін тужавіння, різноманітні добавки [3, 4]. Також суттєвий вплив може спричинити ущільнення за допомогою вібраційної дії [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання проблеми. Застосування вібраційного методу ущільнення ґрунтоцементу зменшує сили внутрішнього тертя між частинками суміші за рахунок енергії коливань, суміш, що ущільнюється, набуває підвищеної рухомості, коли переходить у стан «важкої рідини», й ущільнюється за рахунок витіснення з неї води та бульбашок повітря [6]. Ущільнення ґрунтоцементних паль може бути здійснено глибинними вібраторами [7] чи навісним вібратором [8], запропонованим автором цієї роботи.

Результати лабораторних досліджень показали ефективність вібрування ґрунтоцементної суміші, яку виготовлено на основі глинистого ґрунту, з метою збільшення міцності ґрунтоцементу. Проведені дослідження показали, що вібрування ґрунтоцементної суміші практично удвічі збільшило міцність ґрунтоцементу при 90 діб його тужавінні у вологих умовах [9].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Основною причиною високої пористості паль із ґрунтоцементу, виготовлених за струменевою і бурозмішувальною технологіями, є високий вміст води у природному ґрунті. Саме вона відіграє вирішальну роль у формуванні водоцементного відношення ґрунтоцементної суміші. При тужавінні ґрунтоцементу розвивається процес гідратації цементу, який поглинає до 40% води від ваги цементу, а уся залишкова вода та повітря створюють пори у ґрунтоцементі.

Дослідження фізико-механічних властивостей ґрунтоцементу із різних типів ґрунтів, наприклад на основі мілкого однорідного піску, залежно від режимів вібрування є досить актуальною роботою.

Метою цієї роботи є експериментальне визначення оптимального часу вібрування зразків ґрунтоцементу з мілкого однорідного піску та проведення порівняльного аналізу їхніх фізико-механічних властивостей зі зразками із глинистого ґрунту за однакових умов проведення експериментів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Формувалися зразки ґрунтоцементу у формі кубиків з розмірами граней 100 мм у металевих формах на стандартному лабораторному вібростенді з частотою коливань $n = 50$ Гц та амплітудою коливань під навантаженням $A = 0,5$ мм. Як ґрунт використано мілкий однорідний пісок. Уміст портландцементу М400 складав 20% від маси сухого ґрунту. Виготовлялися кубики двома партіями із заданою вологістю ґрунту $W = 0,23$ та $0,30$, для яких водоцементне відношення суміші складало $B/C = 1,75$ та $2,1$ відповідно. У кожній партії 6 серій по 12 зразків, разом 72 зразки. Загальна кількість зразків – 144.

Кожній серії відповідав певний час вібраційної дії на зразок. Так для першої серії зразки формувалися без вібрації, тобто безпосереднім накладанням текучої суміші у форму до рівня торця форми. Усі інші серії виготовлялися з використанням вібраційної дії. Для цього металеві форми заповнювалися ґрунтоцементною сумішшю до рівня її торців і піддавалися вібруванню, час якого складав для серій: другої – 60 с, третьої – 120 с, четвертої – 180 с, п'ятої – 240 с, шостої – 300 с. Ураховуючи досвід формування зразків ґрунтоцементу [5], обмежимося максимальним часом вібрування на зазначений вид ґрунту – 300 с.

Для зразків ґрунтоцементу визначалися наступні фізичні характеристики: вологість W – у долях одиниці за методом висушування при температурі 105°C ; щільність ρ , т/м^3 , – після встановленого терміну тужавіння у вологих умовах за

методом фіксованого об'єму; щільність частинок ґрунтоцементу ρ_s , т/м³, – за методом пікнометрії.

Вібраційне ущільнення зразків ґрунтоцементу забезпечило збільшення щільності скелета ґрунтоцементу r_d на 0,6 – 3% залежно від початкових значень, що у свою чергу привело до підвищення їхньої кубикової міцності у віці 28 діб на 3 – 43%.

Для ґрунтоцементів не існує нормативів для визначення кубикової міцності, тому випробовування проводилися за ДСТУ Б В.2.7-14:2009. «Бетони, методи визначення міцності за контрольними зразками». Після тужавіння зразків ґрунтоцементу у водному середовищі протягом 28 та 90 діб для визначення кубикової міцності їх випробовували на лабораторному пресі на одновісне стиснення. Результати експериментальних досліджень наведені у таблиці 1 та представлені графічно на рисунках 1 і 2.

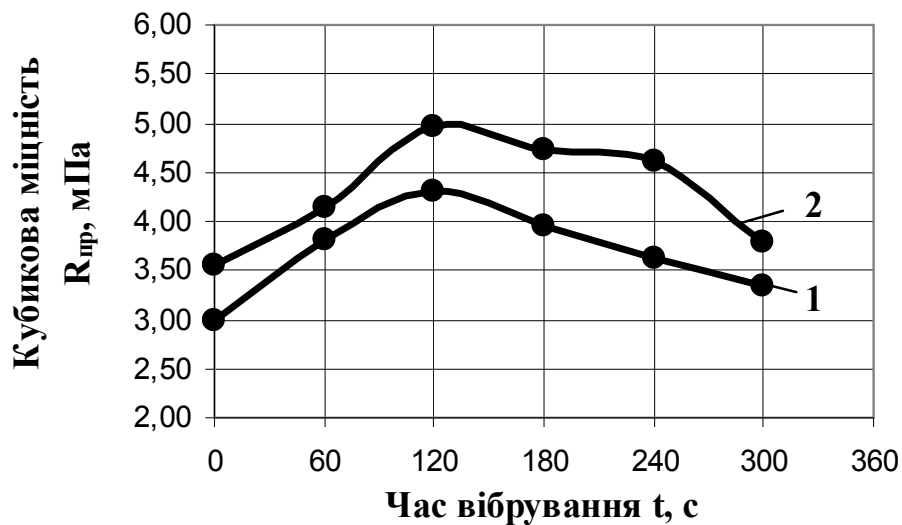


Рисунок 1 – Залежність міцності зразків ґрунтоцементу від часу вібрування (тип ґрунту – мілкий однорідний пісок; термін тужавіння – 28 діб):
1 – В/Ц = 2,1; 2 – В/Ц = 1,75

Таблиця 1 – Усереднені показники для зразків ґрунтоцементу після 28 діб тужавіння. Тип ґрунту – мілкий однорідний пісок

| В/Ц суміші | Час вібродії t, с | Щільність скелету r_d , т/м ³ | Вологість W | Кубикова міцність R, МПа | Коеф. варіації ν |
|-------------|-------------------|--|-------------|--------------------------|----------------------|
| 2,1 | 0 | 1,66 | 0,14 | 3,00 | 0,063 |
| 2,1 | 60 | 1,68 | 0,12 | 3,82 | 0,039 |
| 2,1 | 120 | 1,71 | 0,11 | 4,30 | 0,065 |
| 2,1 | 180 | 1,68 | 0,11 | 3,95 | 0,051 |
| 2,1 | 240 | 1,67 | 0,11 | 3,62 | 0,069 |
| 2,1 | 300 | 1,66 | 0,11 | 3,35 | 0,063 |
| 1,75 | 0 | 1,68 | 0,15 | 3,56 | 0,06 |
| 1,75 | 60 | 1,7 | 0,13 | 4,13 | 0,082 |
| 1,75 | 120 | 1,77 | 0,12 | 4,96 | 0,053 |
| 1,75 | 180 | 1,77 | 0,12 | 4,74 | 0,033 |
| 1,75 | 240 | 1,75 | 0,11 | 4,61 | 0,093 |
| 1,75 | 300 | 1,74 | 0,11 | 3,78 | 0,044 |

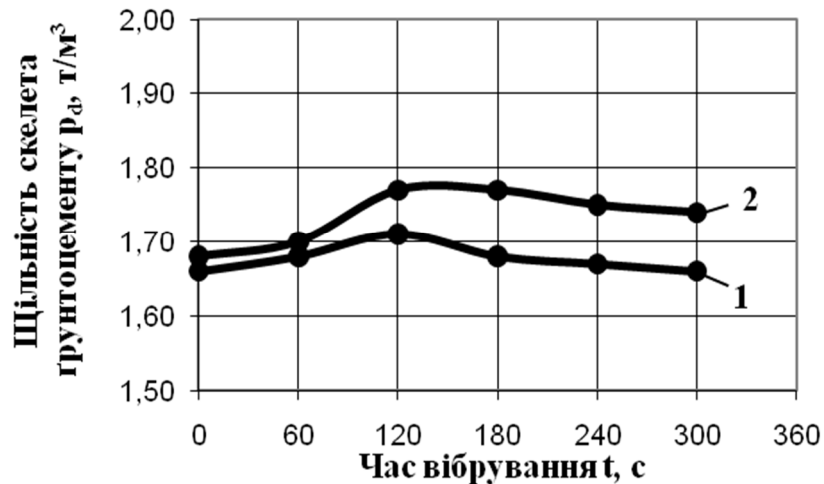


Рисунок 2 – Залежність щільності скелета зразків ґрунтоцементу від часу вібрування (тип ґрунту – м'який однорідний пісок; термін тужавіння – 28 діб):
1 – $V/C = 2,1$; 2 – $V/C = 1,75$

Як витікає з проведених досліджень (таблиця 1) для такого виду ґрунту – м'якого однорідного піску, зразки після вібрування мають покращені фізико-механічні показники порівняно зі зразками, отриманими без вібрування. Найкращі їхні значення, отримані при прикладенні вібраційної дії протягом 120 с, наведені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Порівняльні фізико-механічні характеристики зразків ґрунтоцементу із м'якого однорідного піску (термін тужавіння 28 – діб)

| Серія | Щільність скелета зразків ґрунтоцементу $\rho_d, \text{т/м}^3$ | | Вологість W | | Кубикова міцність $R, \text{МПа}$ | |
|-------|--|------------------|----------------|------------------|-----------------------------------|------------------|
| | без вібрування | вібрування 120 с | без вібрування | вібрування 120 с | без вібрування | вібрування 120 с |
| 1 | 1,66 | 1,71 | 0,14 | 0,11 | 3,00 | 4,30 |
| 2 | 1,68 | 1,77 | 0,15 | 0,12 | 3,56 | 4,96 |

Після статистичної обробки результатів експерименту залежності кубикової міцності ґрунтоцементу від часу вібрування t та водоцементного співвідношення V/C у суміші встановлено таке рівняння:

$$R = 0,83 + 0,72 \cdot (\hat{A} / \hat{O})^2 + 0,0019 \cdot t. \quad (1)$$

Коефіцієнт кореляції для цього рівняння $r = 0,81$, критерій Фішера $F_{\text{крит.}} = 6,93$, $t_{\text{крит.}} = 3,05$, при рівні значимості $\alpha = 0,01$.

При статистичній обробці результатів залежності щільності ґрунтоцементу від часу вібрування t та водоцементного співвідношення V/C в суміші встановлено таке рівняння:

$$\rho_d = 0,28 + 0,332 \cdot (\hat{A} / \hat{O})^2 + 0,001 \cdot t. \quad (2)$$

Коефіцієнт кореляції для цього рівняння $r = 0,91$, критерій Фішера $F_{\text{крит.}} = 6,93$, $t_{\text{крит.}} = 3,05$, при рівні значимості $\alpha = 0,01$.

Порівняємо результати наведеного вище експерименту з даними експерименту, виконаного за тих же умов з глинистого ґрунту [5]. Результати експериментальних досліджень для глинистого ґрунту наведені у таблиці 3 та представлені графічно на рисунках 3 і 4.

Таблиця 3 – Усереднені показники для зразків ґрунтоцементу після 28 діб тужавіння. Тип ґрунту – глинистий ґрунт

| В/Ц суміші | Час вібродії t, с | Щільність скелета r_d , т/м ³ | Вологість W, % | Кубикова міцність R, МПа | Коеф. варіації v |
|-------------|-------------------|--|----------------|--------------------------|------------------|
| 2,1 | 0 | 1,19 | 28,86 | 2,43 | 0,19 |
| 2,1 | 60 | 1,23 | 28,93 | 3,29 | 0,13 |
| 2,1 | 120 | 1,29 | 29,46 | 3,48 | 0,16 |
| 2,1 | 180 | 1,38 | 27,87 | 3,97 | 0,08 |
| 2,1 | 240 | 1,39 | 29,53 | 3,9 | 0,11 |
| 2,1 | 300 | 1,37 | 28,83 | 4,13 | 0,03 |
| 2,1 | 360 | 1,37 | 28,58 | 3,8 | 0,12 |
| 2,1 | 420 | 1,35 | 28,92 | 3,59 | 0,17 |
| 1,75 | 0 | 1,38 | 26,40 | 2,5 | 0,19 |
| 1,75 | 60 | 1,44 | 25,98 | 3,15 | 0,17 |
| 1,75 | 120 | 1,46 | 26,18 | 3,52 | 0,12 |
| 1,75 | 180 | 1,48 | 26,39 | 4,18 | 0,07 |
| 1,75 | 240 | 1,49 | 26,13 | 4,01 | 0,07 |
| 1,75 | 300 | 1,48 | 26,28 | 4,44 | 0,12 |
| 1,75 | 360 | 1,47 | 26,13 | 4,15 | 0,13 |
| 1,75 | 420 | 1,46 | 26,36 | 3,6 | 0,09 |

З наведених у таблиці 3 результатів експерименту для глинистого ґрунту витікає, що кубикова міцність зразків залежно від збільшення часу прикладення вібрації зростає, а потім поступово починає падати. Пік кубикової міцності зразків припадає на час вібрування 300 с. Очевидно, що далі зі збільшенням часу вібрування зразків розпочинається процес розшарування ґрунтоцементної суміші. Міцність ґрунтоцементних зразків при збільшенні часу вібрування від 180 с до 300 с зростає лише на 4 – 6%, тому з точки зору економії енергії для зазначеного типу ґрунту доцільно приймати час вібрування 180 с. Дані про покращення характеристик ґрунтоцементу із глинистих ґрунтів від впливу вібрування протягом 120 с наведені у таблиці 4.

Таблиця 4 – Порівняльні фізико-механічні характеристики зразків із глинистого ґрунту (термін тужавіння – 28 діб)

| Серія | Щільність скелета зразків ґрунтоцементу ρ_d , т/м ³ | | Вологість W | | Кубикова міцність R, МПа | |
|-------|---|------------------|----------------|------------------|--------------------------|------------------|
| | без вібрування | вібрування 180 с | без вібрування | вібрування 180 с | без вібрування | вібрування 180 с |
| 1 | 1,19 | 1,38 | 0,29 | 0,28 | 2,43 | 3,97 |
| 2 | 1,38 | 1,48 | 0,26 | 0,26 | 2,50 | 4,18 |

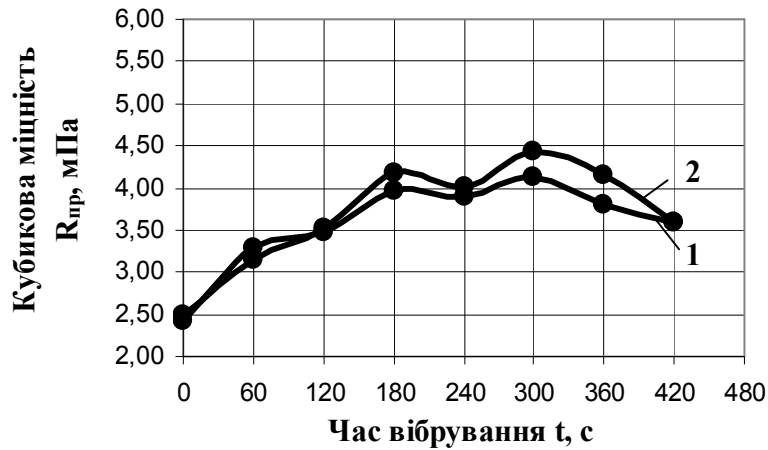


Рисунок 3 – Залежність міцності зразків ґрунтоцементу від часу вібрації (глинистий ґрунт; термін тужавіння – 28 діб): 1 – В/Ц = 2,1; 2 – В/Ц = 1,75

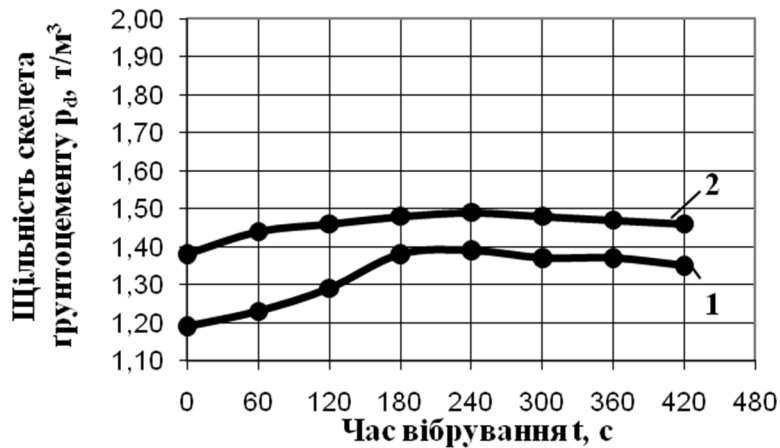


Рисунок 4 – Залежність щільності скелета зразків ґрунтоцементу від часу вібрації (глинистий ґрунт; термін тужавіння – 28 діб): 1 – В/Ц = 2,1; 2 – В/Ц = 1,75

При статистичній обробці результатів залежності кубикової міцності ґрунтоцементу від часу вібрації та співвідношення води до цементу у суміші встановлено таке рівняння:

$$R = 3,4 + 0,093 \cdot (\hat{A} / \hat{O})^2 + 0,0028 \cdot t. \quad (3)$$

Коефіцієнт кореляції для цього рівняння $r = 0,69$, критерій Фішера $F_{\text{крит.}} = 6,51$, $t_{\text{крит.}} = 2,98$, при рівні значимості $\alpha = 0,01$.

При статистичній обробці результатів залежності щільності ґрунтоцементу від часу вібрації та співвідношення води до цементу у суміші встановлено таке рівняння:

$$r_d = 1,71 + 0,101 \cdot (\hat{A} / \hat{O})^2 + 0,0003 \cdot t. \quad (2)$$

Коефіцієнт кореляції для цього рівняння $r = 0,89$, критерій Фішера $F_{\text{крит.}} = 6,51$, $t_{\text{крит.}} = 2,98$, при рівні значимості $\alpha = 0,01$.

Порівняння результатів експериментів, одержаних для зразків ґрунтоцементу з мілкого однорідного піску та з глинистого ґрунту, виконаних за тих же умов, наведено на рисунках 5 і 6.

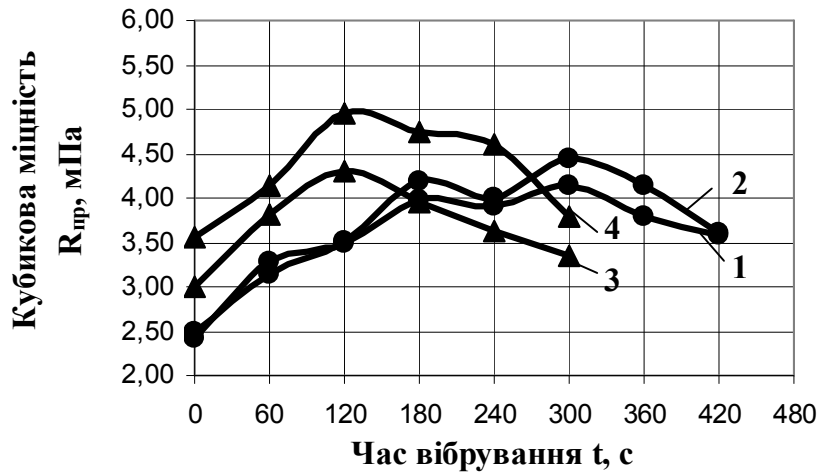


Рисунок 5 – Залежність міцності зразків ґрунтоцементу від часу вібрування (термін тужавіння – 28 діб): 1 – із глинистого ґрунту з $V/C = 2,1$; 2 – із глинистого ґрунту з $V/C = 1,75$; 3 – із мілкого однорідного піску з $V/C = 2,1$; 4 – із мілкого однорідного піску з $V/C = 1,75$

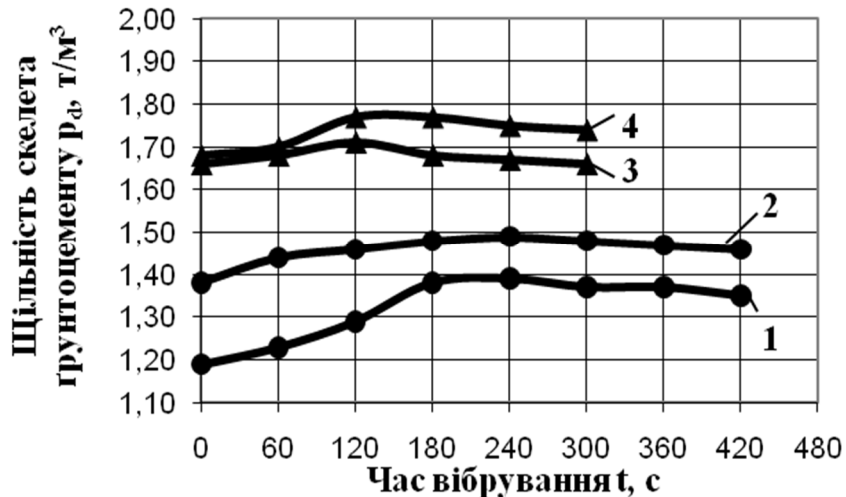


Рисунок 6 – Залежність щільності скелета зразків ґрунтоцементу від часу вібрування (термін тужавіння – 28 діб): 1 – із глинистого ґрунту з $V/C = 2,1$; 2 – із глинистого ґрунту з $V/C = 1,75$; 3 – із мілкого однорідного піску з $V/C = 2,1$; 4 – із мілкого однорідного піску з $V/C = 1,75$

Із графіків (рисунок 5) видно, що криві 3 і 4, котрі описують міцність зразків ґрунтоцементу на основі мілкого однорідного піску, мають кращі показники міцності, ніж криві 1 і 2 для зразків з глинистого ґрунту. Початкові показники кубикової міцності для зразків ґрунтоцементу із мілкого однорідного піску при 0 с прикладення вібраційного впливу більші на 23,46% та на 42,4 %, ніж показники для зразків із глинистого ґрунту відповідно при $V/C = 2,1$ та $V/C = 1,75$. Максимальна кубикова міцність досягається при прикладенні вібраційного впливу протягом 120 с для зразків із мілкого однорідного піску та 300 с для зразків із глинистого ґрунту. Максимальна кубикова міцність зразків із мілкого однорідного піску на 4 та 10,5 % вище від міцності зразків з глинистого ґрунту при $V/C = 2,1$ та $V/C = 1,75$ відповідно. Щільність скелета зразків ґрунтоцементу з глинистого ґрунту на 16 – 28 % нижче, ніж з мілкого однорідного піску.

Висновок. Виготовлені зразки ґрунтоцементу з м'якого однорідного піску від початку мають більші фізико-механічні параметри, ніж з глинистого ґрунту, легше і швидше ущільнюються. Оптимальний час вібраційного ущільнення складає 120 с для зразків із м'якого однорідного піску та 180 с для зразків із глинистого ґрунту.

Література

1. Токин, А.Н. Закрепление ґрунтов буромесительным способом / А.Н. Токин, А.Н. Шапошников // Ускорение научно-технического прогресса фундаментостроения: новейшие методы исследования строительных свойств ґрунтов, прогрессивные способы возведения фундаментов и устройства оснований: сб. научн. трудов. – Т. I. – М.: Стройиздат, 1987. – С. 254 – 255.
2. Токин, А.Н. Фундаменты из цементогрунта / А.Н. Токин. – М.: Стройиздат, 1984. – 184 с.
3. До оцінки механічних властивостей ґрунтоцементу в залежності від вмісту його складових / М.Л. Зоценко, О.В. Борт, М.В. Бідношия, Р.В. Петраш // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2007. – Вип. 19. – С. 44 – 53.
4. Виленкина, Н.М. Цементогрунтовые камни / Н.М. Виленкина. – М.: Гостстройиздат, 1961 – 86 с.
5. A laboratory model study of the performance of vibrated stone columns in soft clay / V. Sivakumar, D. Glynn, J. Black, J. McNeill // Geotechnical Engineering in Urban Environments. Proc. of the 14th European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Madrid, 24 – 27 September 2007). – Millpress Science Publishers Rotterdam, 2007. – V. III – P. 1545 – 1550.
6. Савинова, О.А. Теория и методы вибрационного формирования железобетонных изделий / О.А. Савинова, Е.В. Лавринович. – Ленинград.: Стройиздат, 1972. – С. 152.
7. Гольдштейн, Б.Г. Глубинные вибраторы для уплотнения бетона. Конструкция, теория и расчет. / Б.Г. Гольдштейн, Л.П. Петрунькин. – М.: Машиностроение, 1966. – 172 с.
8. Нестеренко, Т.М. Розроблення навісного глибинного вібратора для ущільнення ґрунтоцементних паль / Т.М. Нестеренко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – Вип. 1(31). – С. 257 – 262.
9. Нестеренко, Т.М. Вплив вібрування на механічні характеристики ґрунтоцементу / Т.М. Нестеренко // Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво) / Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. – Вип. 75. Кн. 2. – К.: ДП НДІБК, 2011. С. 656 – 660.

Надійшла до редакції 15.09.2012
© М.Л. Зоценко, Т.М. Нестеренко