

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ПАЛЬ З ГРУНТОЦЕМЕНТУ У ПОРІВНЯННІ З БЕТОННИМИ ПАЛЯМИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація. Проведені аналітичні обрахунки деформації одиночних палей з ґрунтоцементу та бетону і виконане їх порівняння з результатами польових випробувань.

Проаналізований напружено-деформований стан (НДС) системи ґрунтоцементна палея - ґрунтове середовище у порівнянні з аналогічним НДС для бетонних палей. Проведене моделювання роботи групи ґрунтоцементних палей за допомогою програмного комплексу Plaxis 3D Foundation з варіюванням жорсткості та міцності ствола палі, діаметру палі, відстані між палями в групі. Проаналізований НДС системи ростверк - група ґрунтоцементних палей - ґрунтове середовище у порівнянні з аналогічним НДС палевого фундаменту з бетонних палей.

Ключові слова: ґрунтоцемент, міцність, модуль деформації, математичне моделювання, напружено-деформований стан.

Abstract. Analytical calculations of deformations of single piles of soil cement and concrete are carried out and their comparison with results of field tests is executed.

The stress-strain state (SSS) of the soil-cement pile-soil environment system is analyzed in comparison with the similar SSS for concrete piles. The modeling of the group of soil-cement piles was carried out with the help of the software complex Plaxis 3D Foundation with variation of rigidity and strength of the pile trunk, pile diameter, distance between piles in the group. The SSS system of the grid-group of soil-cement piles-soil environment is analyzed in comparison with the similar SSS of the pile foundation from concrete piles.

Keywords: soil cement; strength, module of deformation, mathematical modeling, stress-strain state.

Вступ

З розвитком технологій цементації ґрунтів останніми роками виник новий тип бурових палей, а саме – ґрунтоцементні бурові палі [1, 2]. Вони мають усі переваги бурових палей, але при цьому повністю виключено проблему додаткового забезпечення стійкості стінок свердловини в будь-яких інженерно-геологічних умовах будівництва. Крім того виключаються витрати бетону, додатковим матеріалом є тільки цемент, що забезпечує зменшення вартості.

Методика розрахунку ґрунтоцементних палей на теперішній час не відпрацьована. В літературі рекомендується польове випробування палей з дослідним визначенням механічних характеристик ґрунтоцементу [3, 4].

В літературі відсутні дані про роботу груп ґрунтоцементних палей.

Об'єми використання палей у сучасному будівництві постійно зростають, а тому пошук способів удосконалення їх конструкцій і методів виготовлення є актуальним завданням сьогодення.

Виклад основного матеріалу дослідження

У даній роботі були поставлені такі задачі:

- розглянути існуючі дані польових випробувань ґрунтоцементних палей, що були отримані за допомогою статичних вдавлювальних навантажень;
- провести аналітичні обрахунки деформацій одиночних палей і порівняти їх з результатами польових випробувань;
- провести моделювання роботи палей за допомогою програмного комплексу Plaxis 3D Foundation з варіюванням жорсткості та міцності ствола палі, характеристик ґрунтового середовища, довжини і діаметру палей;
- проаналізувати напружено-деформований стан (НДС) системи ґрунтоцементна палея-ґрунтове середовище у порівнянні з аналогічним НДС для бетонних палей;

- провести моделювання роботи групи ґрунтоцементних паль за допомогою програмного комплексу Plaxis 3D Foundation з варіюванням жорсткості та міцності ствола палі, довжини і діаметру паль, відстані між палями в групі;
- проаналізувати НДС системи ростверк-група ґрунтоцементних паль- ґрунтове середовище у порівнянні з аналогічним НДС для бетонних паль;
- визначити фактори, які забезпечують надійну роботу ґрунтоцементних паль, а також обмежують їх використання.

Недоліком ґрунтоцементних паль є їх низька міцність та жорсткість за матеріалом ствола, але в більшості випадків вона наближається, або навіть перевищує міцність по ґрунту. Проведені полтавськими вченими натурні дослідження показали, що міцність висячих ґрунтоцементних паль по ґрунту близька до міцності по ґрунту бетонних паль таких же розмірів. Отже дослідження в роботі було направлене на вивчення впливу жорсткості матеріалу ствола палі на характер її роботи з ґрунтом при навантаженні.

При вирішенні поставлених задач була зроблена добірка результатів натурних випробувань ґрунтоцементних паль, наведена у табл. 1.

Таблиця 1 – Геометричні та механічні параметри ґрунтоцементних паль, для яких були виконані польові статичні випробування

№ досліджу	Майданчики розміщення дослідних паль	Параметри паль					
		характеристики ґрунтоцементу		довжина, м	діаметр, м	Ґрунт під нижнім кінцем палі	Ґрунти по бічній поверхні палі
		R, МПа	E, МПа				
1	м. Суми, вул. Курська, 111	1,8	611	6,0	0,5	Суглинок, $I_L=0,2$; $E=19$ МПа	Суглинок, $I_L=0,2$; $E=3.7$ МПа
2	м. Полтава	4,2	300	8,0	0,5	Суглинок, $I_L=0,3$; $E=9.8$ МПа	Суглинок, $I_L=0,16-0,27$; $E=10$ МПа
3	м. Полтава, вул. Бідного, 12	4,8	350	6,0	0,5	Пісок, $E=26$ МПа	Пісок, суглинок, $I_L=0,62-0,66$; $E=4$ МПа
4	м. Полтава	2,5	300	6,0	0,5	Водонасичені лесові суглинки, $E=8$ МПа	Водонасичені лесові суглинки, $E=8$ МПа

Першим етапом дослідження була спроба побудувати графіки осідання-навантаження для ґрунтоцементних паль за допомогою існуючих нормативних методів, що враховують жорсткість матеріалу ствола. У чинних українських нормах це метод стержня в пружному півпросторі [2], у російських нормах [6] це метод розрахунку осідань для одиночних паль.

Для достовірності одержаних результатів порівняльні розрахунки виконані на прикладі майданчиків, де були виконані різними авторами натурні випробування ґрунтоцементних паль.

На рис. 1 наведені результати розрахунків залежності осідання від навантаження для першого майданчику за методикою українських норм. Розрахунки за методикою російських норм показали гірші результати, оскільки вона не враховує нелінійну роботу ґрунтового масиву.

На графіку суцільні лінії – результати натурних випробувань; пунктирні лінії – результати розрахунку за нормами. Наведені криві для неармованої ґрунтоцементної палі (синя), армованої ґрунтоцементної палі (чорна) та бетонної (червона). Як бачимо, розрахунки за нормами дають занижені результати, але якісний характер залежності несучої здатності від жорсткості матеріалу ствола вони дають.

За результатами виконаних розрахунків був проаналізований вплив відносної жорсткості матеріалу ствола і ґрунту навколо палі на її несучу здатність. В якості показника відносної жорсткості розглядалось співвідношення модуля деформації матеріалу ствола до приведенного модуля деформації ґрунту навколо палі: $E_{ств.}/E_{гр.}$.

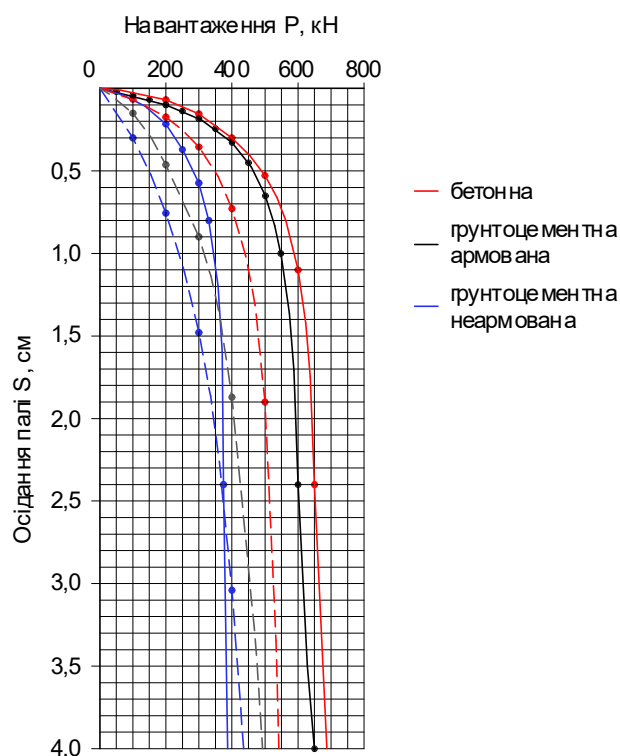


Рис. 1 - Залежність осідання – навантаження для дослідних палей майданчику №1 (з використанням методики українських норм [2]): суцільні лінії – результати натурних випробувань; пунктирні лінії – результати розрахунку за нормами

Для ґрунтоцементних палей без армування цей параметр знаходиться в межах 25-100, для армованих ґрунтоцементних палей – 100-150, для бетонних палей – 2000-4000.

На рис. 2 наведена залежність несучої здатності палей від відносної жорсткості $E_{ств.}/E_{гр.}$.

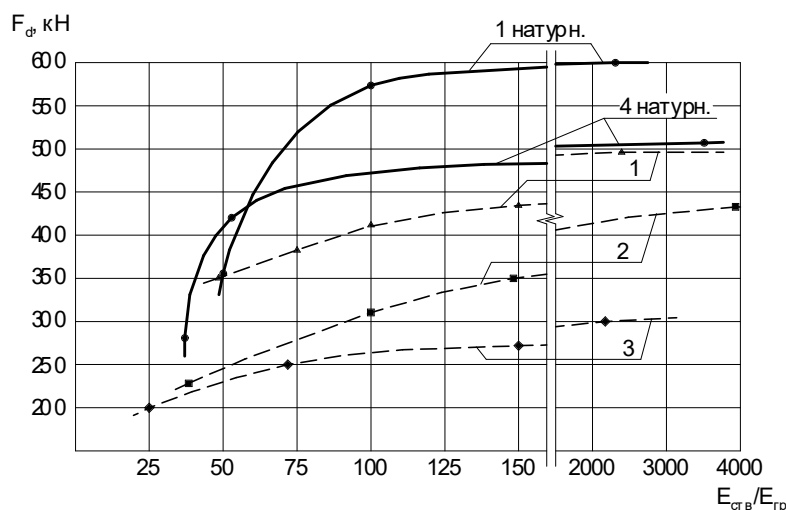


Рис. 2 – Залежність несучої здатності палей від співвідношення модуля деформації палі та оточуючого ґрунту, $E_{ств.}/E_{гр.}$ (цифрами вказані номери дослідних палей за табл. 1). Суцільні лінії – результати натурних випробувань; пунктирні лінії – результати розрахунку за нормами [2]

Збільшення жорсткості ствола ґрунтоцементної палі за рахунок армування доволі швидко призводить до збільшення її несучої здатності. Подальше зростання жорсткості за рахунок збільшення кількості цементу здійснюється повільно. В зв'язку з цим для використання ґрунтоцементних палей в якості несучих елементів оптимальним є варіант із вмістом цементу у суміші до 15-30% та армуванням ствола.

Наступним етапом дослідження було математичне моделювання роботи під навантаженням ґрунтоцементних паль в програмному комплексі «Plaxis 3D Foundation».

Метою чисельних досліджень є визначення особливостей напружено-деформованого стану системи пал-ґрунт при низькій міцності ствола, а також відмінностей роботи з ґрунтом ґрунтоцементної палі у порівнянні з звичайною бетонною палею.

При чисельно-математичному моделюванні поведінки паль під навантаженням були прийняті такі параметри:

- модель ґрунту – пружно-пластична модель Кулона-Мора;
- бурові палі діаметром 0,5 м;
- палі довжиною 6,0; 9,0 та 12,0 м;
- два варіанти ґрунту: піщаний з модулем деформації $E = 28$ МПа та глинистий з модулем деформації $E = 7$ МПа.

Програма моделювання наведена у таблиці 2. Модуль деформації матеріалу ствола був прийнятий 300 та 600 МПа для неармованих ґрунтоцементних паль різної міцності, 1200 та 2000 МПа для армованих паль і 30000 МПа для бетонних паль.

Таблиця 2 – Програма моделювання роботи ґрунтоцементних паль у ґрунті

Підгрупи	Довжина та поперечний розмір паль	Модуль деформації ґрунтоцементу, МПа	Питома вага ґрунтоцементу, кН/м^3	Коефіцієнт Пуасона ґрунтоцементу	Ґрунтові умови
I	L=6,0 м, d=0,5 м	300	18,5	0,25	Пісок дрібний, $\gamma = 18,6 \text{ кН/м}^3$, $e = 0,67$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 32^\circ$, $\nu = 0,3$, $E = 28 \text{ МПа}$
		600	19,5	0,25	
		1200	19,7	0,22	
		2000	19,9	0,22	
		30000 (бетон)	24	0,2	
	L=9,0 м, d=0,5 м	300	18,5	0,25	
		600	19,5	0,25	
		1200	19,7	0,22	
		2000	19,9	0,22	
		30000 (бетон)	24	0,2	
	L=12,0 м, d=0,5 м	300	18,5	0,25	
		600	19,5	0,25	
		1200	19,7	0,22	
		2000	19,9	0,22	
		30000	24	0,2	
II	L=6,0 м, d=0,5 м	150	17,3	0,25	Суглинок, $\gamma = 17,2 \text{ кН/м}^3$, $C = 17 \text{ кПа}$, $\varphi = 21^\circ$, $\nu = 0,35$, $E = 7 \text{ МПа}$
		300	17,5	0,25	
		600	18,1	0,25	
		1200	18,4	0,22	
		2000	18,6	0,22	
		30000 (бетон)	24	0,2	
	L=9,0 м, d=0,5 м	150	17,3	0,25	
		300	17,5	0,25	
		600	18,1	0,25	
		1200	18,4	0,22	
		2000	18,6	0,22	
		30000 (бетон)	24	0,2	
	L=12,0 м, d=0,5 м	150	17,3	0,25	
		300	17,5	0,25	
		600	18,1	0,25	
		1200	18,4	0,22	
		2000	18,6	0,22	
		30000 (бетон)	24	0,2	

На рис. 3 для прикладу наведені результати моделювання напружено-деформованого стану ґрунтоцементної палі довжиною 9 м з модулем деформації ґрунтоцементу 300 МПа, на рис. 4, 5 – графіки залежності осідання – навантаження.

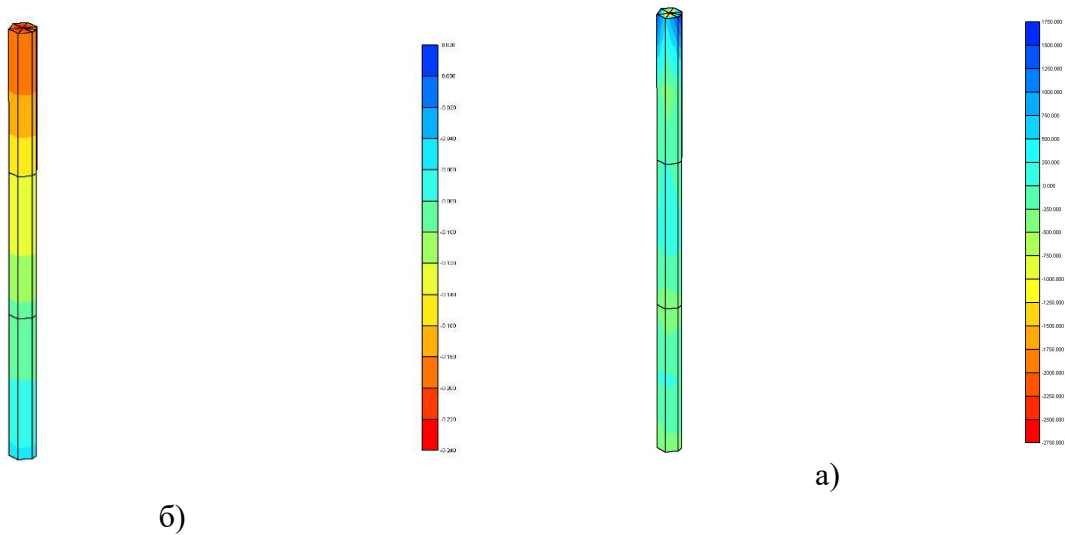


Рис. 3 – Результати моделювання напружено-деформованого стану ґрунтоцементної палі довжиною 9 м з модулем деформації ґрунтоцементу 300 МПа: а) розподіл вертикальних переміщень точок палі (в мм); б) розподіл нормальних напружень у тілі палі (в кПа)

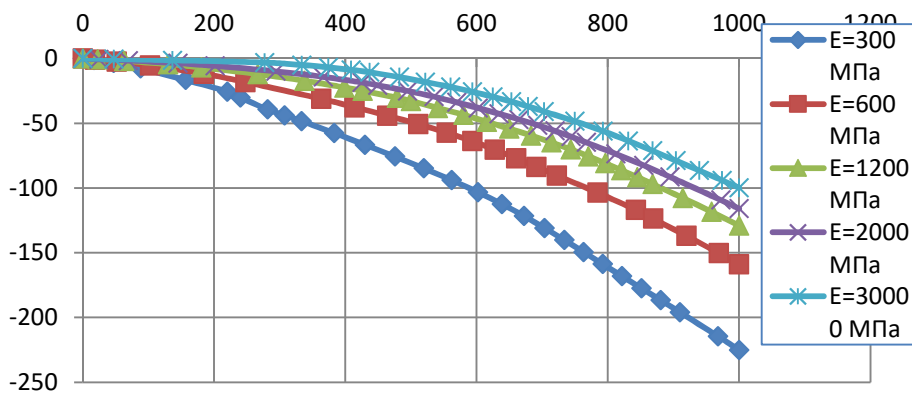


Рис. 4 - Залежність осідання (мм) від навантаження (кН) для палі довжиною 9 м при варіюванні модуля деформації матеріалу ствола для піщаного ґрунту

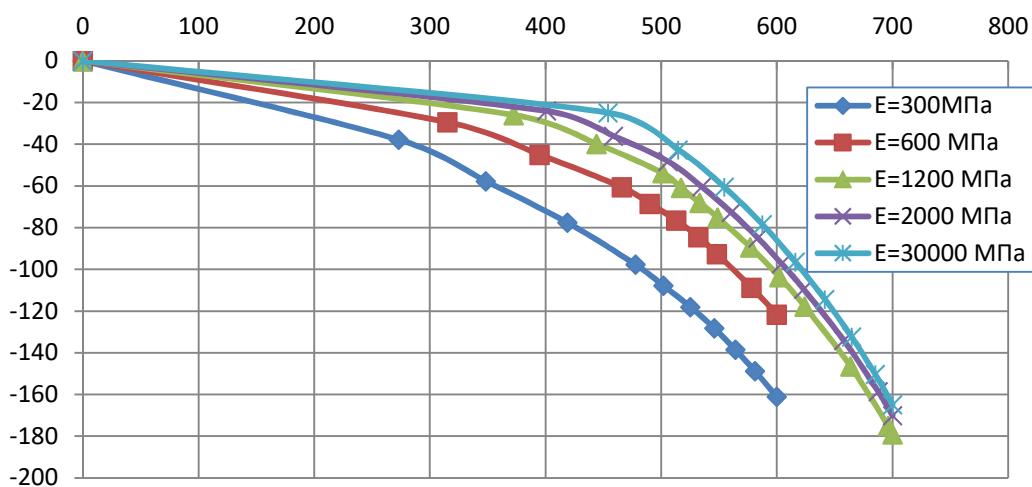


Рис. 5 - Залежність осідання (мм) від навантаження (кН) для палі довжиною 9 м при варіюванні модуля деформації матеріалу ствола для глинистого ґрунту

Результати визначення несучої здатності ґрунтоцементних паль, визначеної при осідання палі 40 мм, наведені у табл. 3 та на рис. 6.

Таблиця 3 - Результати визначення несучої здатності (кН) ґрунтоцементних паль

Ґрунт основи	Довжина палі, м	Модуль деформації матеріала ствола палі, МПа				
		300	600	1200	2000	30000
Пісок дрібний, $\gamma = 18,6 \text{ кН/м}^3$, $E = 28 \text{ МПа}$	6	300	390	440	470	510
	9	300	430	560	615	700
	12	300	450	620	750	900
Суглинок, $\gamma = 17,2 \text{ кН/м}^3$, $E = 7 \text{ МПа}$	6	260	315	340	350	360
	9	280	370	440	470	510
	12	300	420	550	600	670

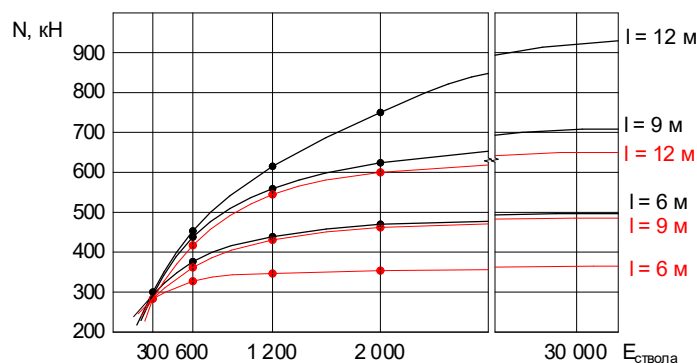


Рис. 6 - Залежність несучої здатності ґрунтоцементних паль від модуля деформації матеріала ствола палі, МПа

Несуча здатність ґрунтоцементної палі у піщаному ґрунті з відносно великим модулем деформації збільшується при збільшенні жорсткості матеріалу ствола більш суттєво, ніж в глинистому ґрунті з низьким модулем деформації. Для неармованих ґрунтоцементних паль з модулем деформації ґрунтоцементу 300 МПа несуча здатність мало залежить від довжини палі. При збільшенні жорсткості матеріалу палі (в тому числі і за рахунок введення армування) збільшення довжини призводить вже до відчутних результатів.

Третім етапом дослідження було математичне моделювання роботи під навантаженням пальового фундаменту з ґрунтоцементних паль в програмному комплексі «Plaxis 3D Foundation».

В даній роботі кількість паль у куці була прийнята сталою - 9 шт. Розглядалися ґрунтоцементні палі $\varnothing 0,5 \text{ м}$ і довжиною 6,0 м з кроком 3d, 5d, 7d на однорідній основі з глинистого ґрунту з модулем деформації $E = 7 \text{ МПа}$.

Для прикладу на рис. 7 наведені розрахункові моделі стовпчастого пальового фундаменту та ґрунтового масиву.

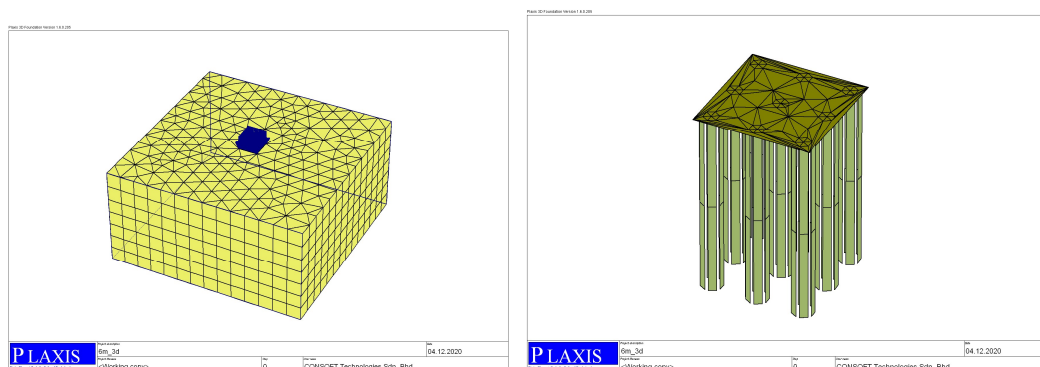


Рис. 7 - Розрахункові моделі стовпчастого пальового фундаменту

Результатом моделювання роботи пальових фундаментів є визначення напружень і переміщень у ґрунтовому масиві та побудова графіку осідання – навантаження.

На рис. 8 наведено мозаїки деформування системи «паль – ростверк – основа» для стовпчастого фундаменту з ґрунтоцементних паль $\varnothing 0,5$ м і довжиною 6,0 м з кроком 3d, 5d, 7d на однорідній основі з глинистого ґрунту з модулем деформації $E = 7$ МПа. При малому кроці паль фундамент працює з основою як єдиний масив, при збільшенні відстані між палями ґрунт під підшоною ростверку в міжпальовому просторі краще реалізує свою несучу здатність.

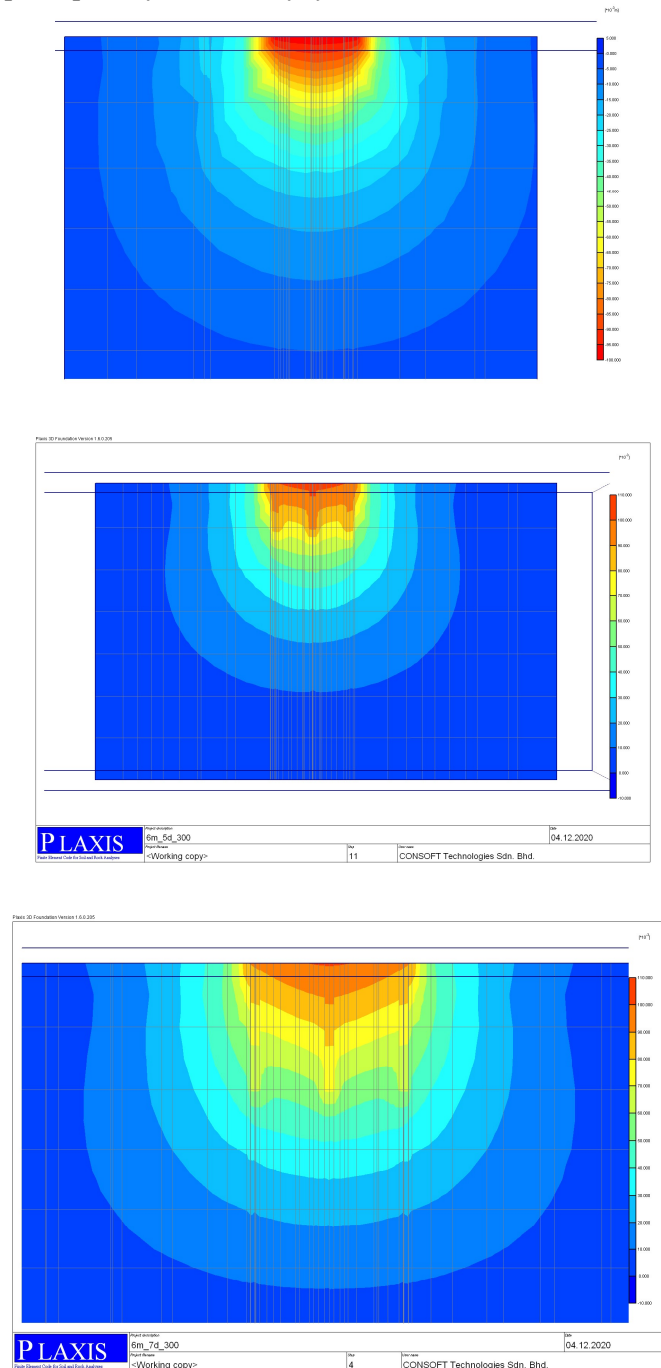


Рис. 8 - Мозаїки вертикальних деформацій ґрунту при модулі деформації ґрунтоцементних елементів $E = 300$ МПа при кроці паль 3d, 5d та 7d

На рис. 9 наведено графіки залежності несучої здатності пальового фундаменту від кроку паль і жорсткості матеріалу ствола. Величина несучої здатності наведена при осіданні фундаменту 100 мм.

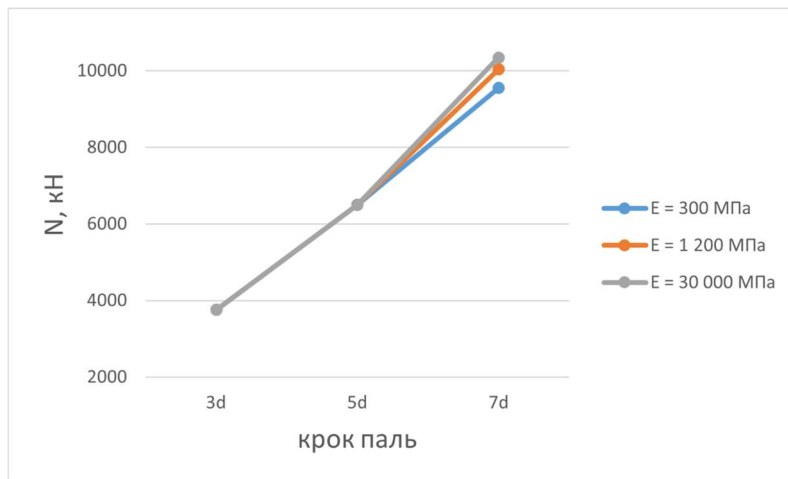


Рис. 9 - Графіки залежності несучої здатності стовпчастого пальового фундаменту від кроку і жорсткості ствола паль

Несуча здатність куца практично не змінюється при збільшенні жорсткості матеріалу паль, і залежить практично тільки від габаритів ґрунтопального масиву, що свідчить про роботу пальового фундаменту як умовного фундаменту мілкого закладання.

При аналізі результатів моделювання визначались:

- частка ростверку у навантаженні на фундамент;
- усереднене навантаження на палю у складі фундаменту для порівняння з несучою здатністю одиночної палі;
- реактивний опір під подошвою ростверка і ступінь його реалізації у порівнянні з реактивним опором під подошвою відповідного фундаменту мілкого закладання. На рис. 10, 11 наведені графіки залежності частки ростверку у навантаженні на стовпчастий палювий фундамент і усередненого навантаження на палю у складі фундаменту від довжини і кроку паль.

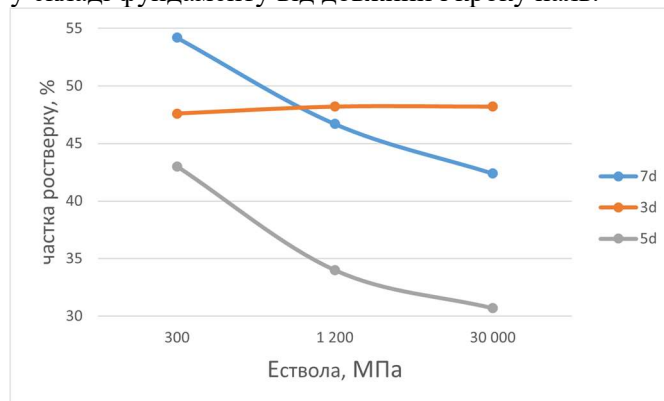


Рис. 10 - Графіки залежності частки ростверку у навантаженні на стовпчастий палювий фундамент від жорсткості і кроку паль

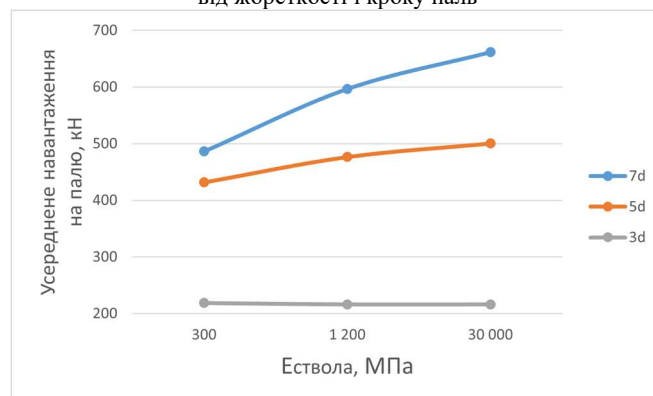


Рис. 11 - Графіки залежності усередненого навантаження на палю у складі стовпчастого пальового фундаменту від кроку та жорсткості матеріалу паль

Частка ростверку при кроці 3d практично не залежить від жорсткості матеріалу палі, а при збільшенні кроку залежить від осьової відстані між палями та їх жорсткості. При збільшенні осьової відстані між палями частка ростверку у навантаженні на фундамент збільшується, оскільки площа плити ростверку збільшилась. При збільшенні жорсткості палі частка ростверку зменшується, оскільки палі беруть на себе більше навантаження.

Навантаження, що припадає на ростверк пального фундаменту менше у порівнянні з навантаженням на ростверк, як фундамент мілкого закладання.

Висновки

1. Технологія влаштування ґрунтоцементних палей володіє рядом переваг у порівнянні з бетонними палями: економія матеріалів та можливість влаштовувати палі в слабких ґрунтах без додаткового кріплення стінок свердловин, висока продуктивність робіт.

2. Недоліком ґрунтоцементних палей є їх низька міцність за матеріалом ствола, але її можна підвищувати вібруванням матеріалу ствола, армуванням палей, збільшенням кількості цементу, використанням різних добавок.

3. Проаналізований вплив жорсткості матеріалу ствола ґрунтоцементної палі і ґрунту навколо палі на її несучу здатність. Несуча здатність ґрунтоцементної палі у піщаному ґрунті з відносно великим модулем деформації збільшується при збільшенні жорсткості матеріалу ствола більш суттєво, ніж в глинистому ґрунті з низьким модулем деформації. Для неармованих ґрунтоцементних палей з модулем деформації 300 МПа несуча здатність мало залежить від довжини палі. При збільшенні жорсткості матеріалу палі (в тому числі і за рахунок введення армування) збільшення довжини призводить вже до відчутних результатів.

4. Збільшення жорсткості ствола ґрунтоцементної палі за рахунок армування доволі швидко призводить до збільшення її несучої здатності. Подальше зростання жорсткості за рахунок збільшення кількості цементу здійснюється повільно. В зв'язку з цим для використання ґрунтоцементних палей в якості несучих елементів оптимальним є варіант із вмістом цементу у суміші до 15-30% та армуванням ствола.

5. У кушових палих фундаментах з ґрунтоцементних палей частка ростверку при кроці 3d практично не залежить від жорсткості матеріалу палі. При збільшенні осьової відстані між палями частка ростверку у навантаженні на фундамент збільшується. При збільшенні жорсткості палей частка ростверку зменшується, оскільки палі беруть на себе більше навантаження.

6. При малому кроці палей фундамент працює з основою як єдиний масив (умовний фундамент), при збільшенні відстані між палями ґрунт під подошвою ростверку в міжпальному просторі включається у роботу, а палі краще реалізують свою несучу здатність у порівнянні з одиночними. В будь-якому випадку несуча здатність куша перевищує суму несучих здатностей одиночних палей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Зоценко М. Л., Винников Ю. Л., Зоценко В. М. Бурові ґрунтоцементні палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом: монографія. Харків: «Друкарня Мадрид», 2016. 94 с.
2. Основи та фундаменти споруд: ДБН В.2.1-10-2009 зі зміною №1 та №2. - [Чинний від 2012-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 161 с. – (Національні стандарти України).
3. Петраш, Р. В. Спільна робота ґрунту та елементів армування, які виготовлені за бурозмішувальною технологією, дис. на здобуття наук. ст. канд. техн. наук: 05.23.02 / Р.В. Петраш. – Полтава: ПолтНТУ, 2009. – 190 с.
4. Зоценко М. Л. ґрунтоцементні палі, що виготовляються бурозмішувальним методом / Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2013. Вип. 3 (38), т.2 – с. 110 – 122.
5. ДСТУ Б В.2.1-27:2010 Основи та фундаменти споруд. Палі. Визначення несучої здатності за результатами польових випробувань. [Чинний від 2011-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 11 с.
6. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты : актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. – [Введен в действие с 2011-05-20]. – М.: Минрегион России, 2010. – 86 с.

Біда Максим Володимирович — студент групи Б-19м, факультет будівництва теплоенергетики та газопостачання, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: maksbida1608@gmail.com

Науковий керівник: **Мавєвська Ірина Вікторівна** — доцент кафедри "Будівництва, міського господарства та архітектури". Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com

Bida Maksim Volodimirovich- student of the group B-19m, faculty of heat and power engineering and gas supply, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: maksbida1608@gmail.com

Supervisor: ***Maievs kaya Irina Victorivna*** - associate professor of the Department of "Building, Urban and Architecture". Vinnitsa National Technical University, Vinnytsia, e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com