

РІЗНИЦЯ В РОБОТІ КОРОТКИХ І ДОВГИХ ПАЛЬ У СКЛАДІ СТОВПЧАСТОГО ПАЛЬОВОГО ФУНДАМЕНТУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У даній роботі виконане математичне моделювання роботи пальового фундаменту за допомогою програмного комплексу PLAXIS 3D Foundation. Подано порівняння роботи пальових куців з коротких та довгих палей. Визначено, що короткі палі у складі куца в піщаному ґрунті працюють більш ефективно, ніж довгі.

В випадку застосування коротких палей можна з метою економії матеріалів зменшити кількість палей в групі при збереженні розмірів ростверку з незначною втратою несучої здатності. Але перетворення пальового фундаменту на умовний з метою визначення несучої здатності коректно лише при кроці палей $3d$, тобто при доволі частому їх розташуванні.

Ключові слова: короткі палі, ростверк, несуча здатність, осідання, напружено-деформований стан.

Abstract

In this work it is supposed to perform mathematical modeling work of the pile foundation by means of a software complex PLAXIS 3D Foundation. Comparison of the work of pile bushes from short and long piles is given. It was determined that short piles in the composition of the bush in sandy soil work more efficiently than long ones.

In the case of short piles, in order to save materials, you can reduce the number of piles in the group while maintaining the size of the grille with a slight loss of load-bearing capacity. But the transformation of the pile foundation into a conditional one in order to determine the bearing capacity is correct only at the step of the piles $3d$, at a fairly frequent location.

Keywords: short piles, grillage, bearing capacity, sinking, stress-strain state.

Вступ

Найявні інженерні методи розрахунку осідання і несучої здатності палей і пальових фундаментів базуються на припущеннях, в яких не враховані ті чи інші важливі аспекти напружено-деформованого стану системи «паля – ґрунтова основа». Спрошеність розрахункових схем, призначених для ручних розрахунків, призводить до невідповідності отриманих за розрахунками величин даним натурних спостережень [1-3]. Тобто актуальним питанням залишається удосконалення методики визначення несучої здатності куців палей при вертикальному навантаженні, що ґрунтується на основних закономірностях взаємодії палей і пальових фундаментів з основою, забезпечує прийнятну точність результатів і є достатньо простою і наочною [4].

Використання ресурсів несучої здатності палей є одним із передових способів досягнення економії при влаштуванні пальових фундаментів. Попередні дослідження показали, що при роботі куца з короткими палями група працює як суцільний ґрунто-пальовий масив. При підтвердженні цієї гіпотези можна було б зменшувати кількість палей в межах габаритів ростверку без суттєвої втрати несучої здатності куца.

На теперішній час комп'ютерні технології відкрили двері для використання складних математичних залежностей високих порядків при вирішенні задач з механіки ґрунтів. Програмний комплекс Plaxis, який побудований на методі скінчених елементів, і дозволяє створювати неоднорідні структури ґрунтової основи з довільним характером нашарування ґрунтів за даними геологічних колонок; виконувати автоматичну розбивку розрахункової області на кінцеві елементи з можливістю спільного і локального подрібнення сітки; моделювати технологічні етапи будівництва і системи навантаження зосередженими та розподіленими довільно орієнтованими навантаженнями; моделювати пальові елементи, моделювати зони взаємодії ґрунту і конструкції за допомогою спеціальних контактних елементів.

План експерименту математичного моделювання

При математичному моделюванні за початкову експериментальну модель нового пальового фундаменту були прийняті такі параметри:

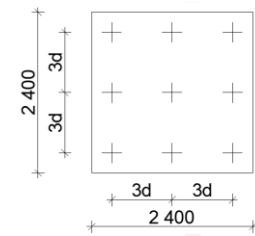
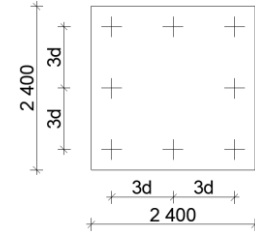
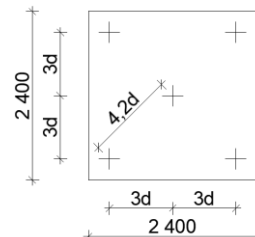
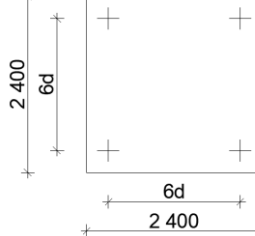
- модель ґрунту – пружно-пластична модель Кулона-Мора;
- модель пального фундаменту під колону – ростверк розміром в плані 2,4х2,4 м, товщиною 0,9 м і палі поперечного перерізу 0,3 х 0,3 м;
- палі довжиною 3,0 м з кроком 3d, 4,2 d і 6d;
- палі довжиною 10,0 м з кроком 3d, 4,2d і 6d;
- величина навантаження, яка сприймається плитою ростверку, розраховується як добуток реактивного опору ґрунту, який знаходиться під підшовою ростверку, на площу ростверку (без врахування площі палі);
- величина навантаження, яка сприймається палями, розраховується як різниця загального навантаження на стовпчастий паливий фундамент і величини навантаження, яка сприймається плитою ростверку.

Моделювання сумісної роботи ростверку і палі планується на однорідній піщаній основі. Характеристики піщаного ґрунту: пісок дрібний, $\gamma = 18,6$ кН/м³, $e = 0,67$, $c = 2$ кПа, $\phi = 32^\circ$, $E = 28$ МПа.

Варіювання кількістю палі здійснюється в межах сталих габаритів ростверку [5].

Програму моделювання наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Програма математичного моделювання роботи пального фундаменту

Група дослідів	Довжина та поперечний розмір палі	Крок і кількість палі
1	$L = 3$ м, $d = 0,3$ м	
	$L = 10$ м, $d = 0,3$ м	
2	$L = 3$ м, $d = 0,3$ м	
	$L = 10$ м, $d = 0,3$ м	
3	$L = 3$ м, $d = 0,3$ м	
	$L = 10$ м, $d = 0,3$ м	
4	$L = 3$ м, $d = 0,3$ м	
	$L = 10$ м, $d = 0,3$ м	

Додатково до програми моделювання включені такі дослідження:

- моделювання роботи одиночних палі довжиною 3 та 10 м;
- моделювання роботи ростверку розмірами 2,4х2,4 м як фундаменту мілкового закладання;

- моделювання роботи умовного фундаменту мілкого закладання при довжині паль 3 та 10 м. При моделюванні умовного фундаменту він представляється як суцільний фундамент призматичної форми з розмірами в плані і по глибині, що відповідають розмірам умовного фундаменту, визначеними за рекомендаціями норм [4] для розрахунку осідання пальового фундаменту.

Виклад основного матеріалу дослідження

При вирішенні поставленої задачі були використані результати математичного моделювання пальового фундаменту із забивних паль за допомогою програмного комплексу Plaxis 3D Foundation, який достатньо коректно показує дійсну роботу паль в ґрунті. Розглянуті варіанти куців паль різної довжини і кількості у групі.

Для проведення моделювання були прийняті забивні палі із бетону C20/25 (B25), довжиною 3 м та 10 м, поперечним перерізом 0,3х0,3 м.

Розміри змодельованого ґрунтового масиву для максимального зменшення впливу крайових ефектів на осідання палі прийнята в плані 20х20м, та завтовшки 20м. Одна з побудованих моделей ґрунтового масиву та розрахункова модель стовпчастого пальового фундаменту зображені на рисунку 1.

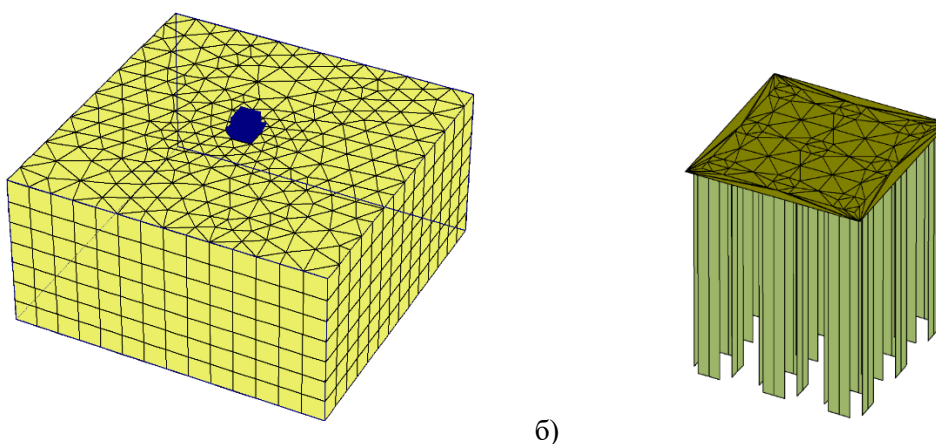


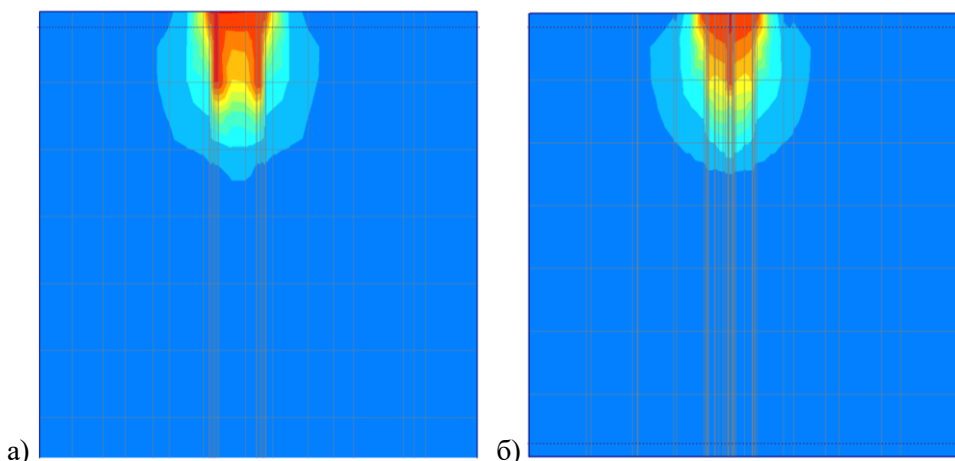
Рисунок. 1 – Розрахункові моделі стовпчастого пальового фундаменту:
а) ґрунтовий масив; б) палі довжиною 3 м при кроці 3d

При моделюванні роботи пальового фундаменту були враховані наступні фази роботи:

- робота ґрунтової товщі без фундаментів (початкова фаза);
- влаштування стовпчастого пальового фундаменту (перша фаза);
- робота стовпчастого пальового фундаменту під дією вертикального навантаження (друга фаза).

Величина навантаження на моделі збільшувалась до тих пір, поки величина осідання не становила 10 см.

На рис. 2-3 зображені мозаїки вертикальних деформацій ґрунту при навантаженні пальового фундаменту розмірами 2,4 м х 2,4 м.



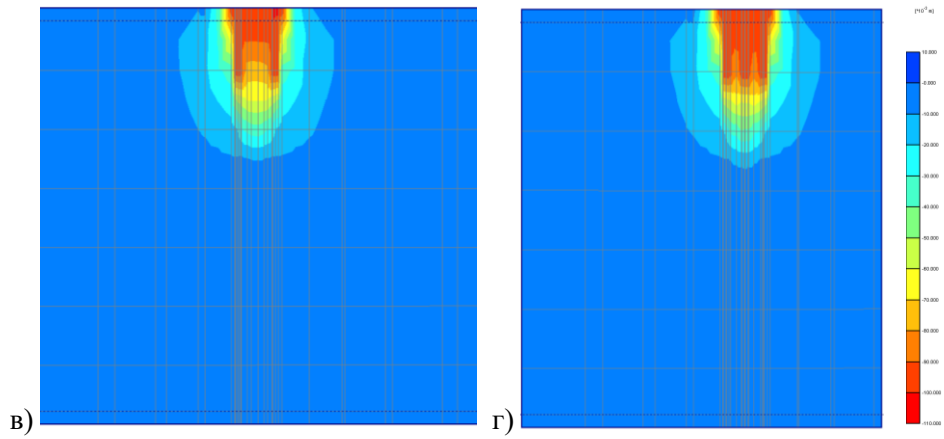


Рисунок 2 – Мозаїка вертикальних деформацій ґрунту при навантаженні пальового фундаменту з розмірами ростверку 2,4 м x 2,4 м; довжина паль 3 м; кількість паль: а) 4 шт; б) 5 шт; в) 8 шт; г) 9шт.

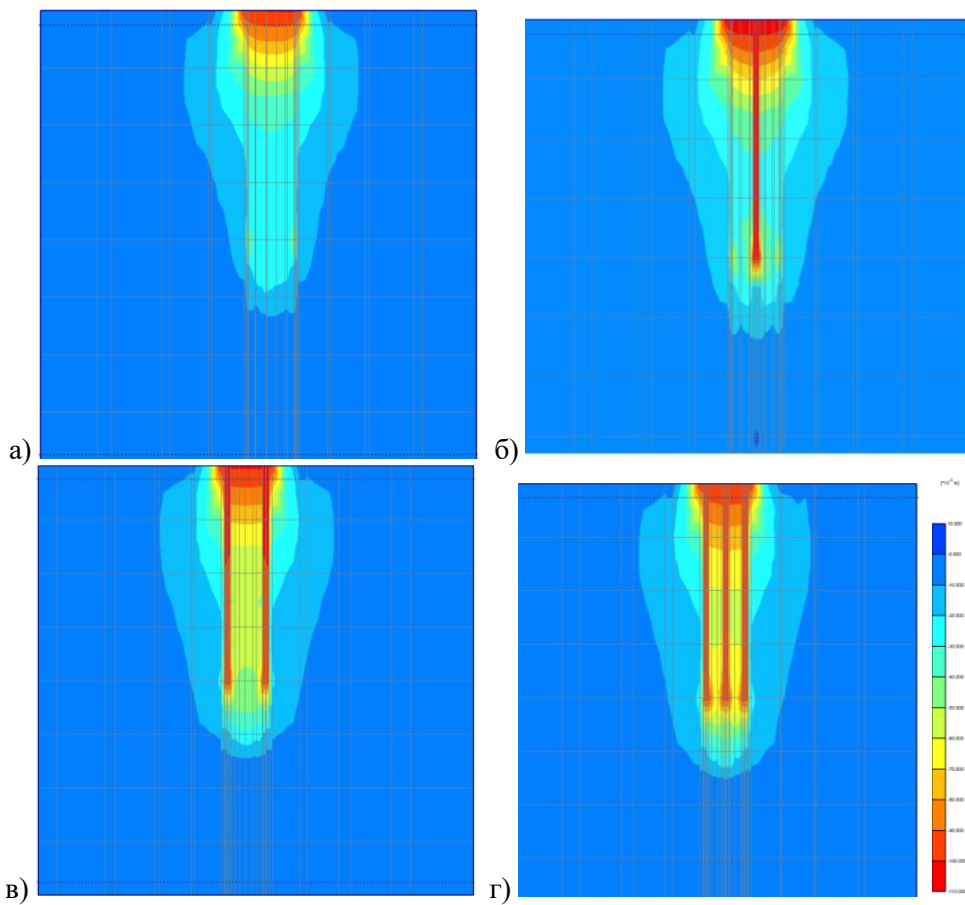


Рисунок 3 – Мозаїка вертикальних деформацій ґрунту при навантаженні пальового фундаменту з розмірами ростверку 2,4м x 2,4м; довжина паль 10 м; кількість паль: а) 4 шт; б) 5 шт; в) 8 шт; г) 9шт.

При кроці паль 3d напруження розподіляється по всій довжині паль, включаючи в роботу міжпальовий простір, але при довгих палях навантаження передається на глибоко розташовані шари ґрунту.

На рис. 4-5 представлені результати мозаїки вертикальних деформацій ґрунту при навантаженні умовного фундаменту, довжина паль 3 м та 10 м відповідно.

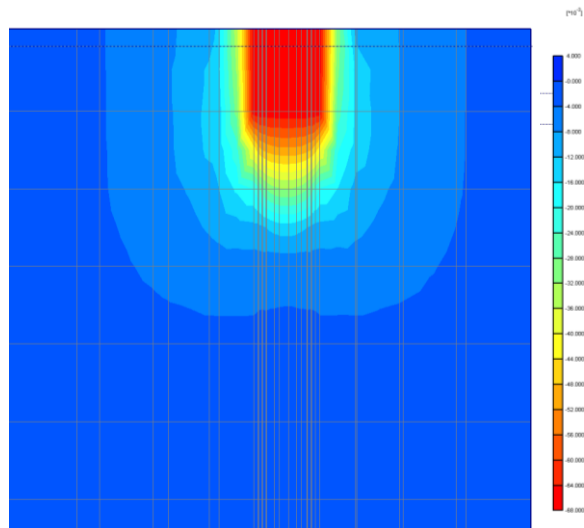


Рисунок 4 - Мозаїка вертикальних деформацій ґрунту при навантаженні умовного фундаменту при довжині паль 3 м

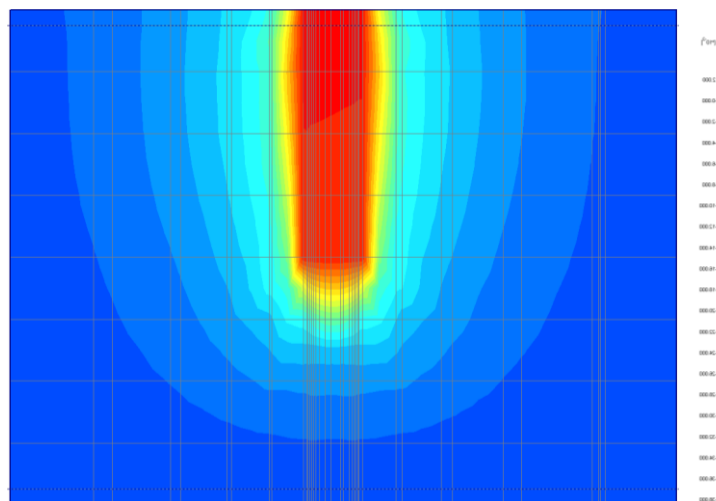


Рисунок 5 - Мозаїка вертикальних деформацій ґрунту при навантаженні умовного фундаменту при довжині паль 10 м

При моделюванні умовного фундаменту зона підвищених деформацій розповсюджується на більшу глибину, ніж при моделюванні пальового фундаменту.

На рис. 6 - 7 представлені результати графіків залежності осідання-навантаження, визначених математичним моделюванням для дослідних пальових фундаментів.

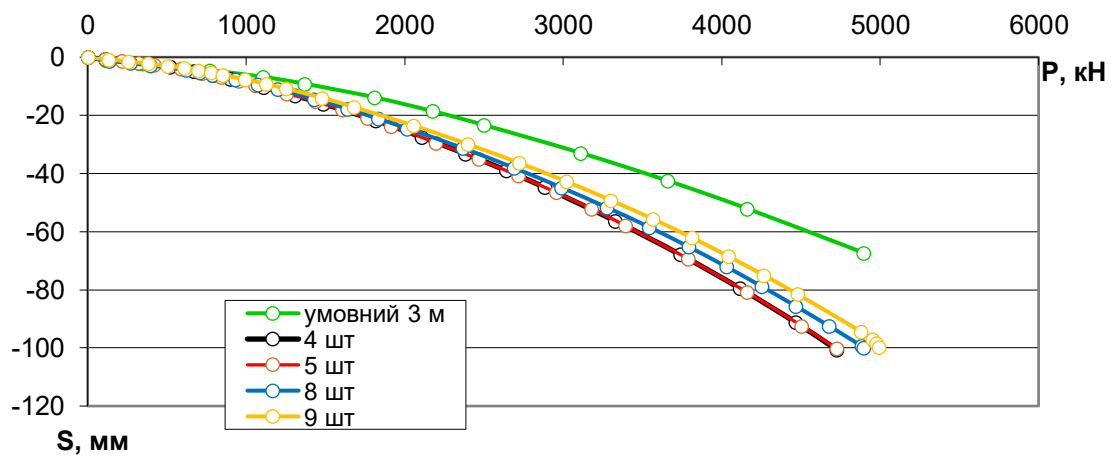


Рисунок 6 – Графіки залежності навантаження – осідання для паль довжиною 3 м

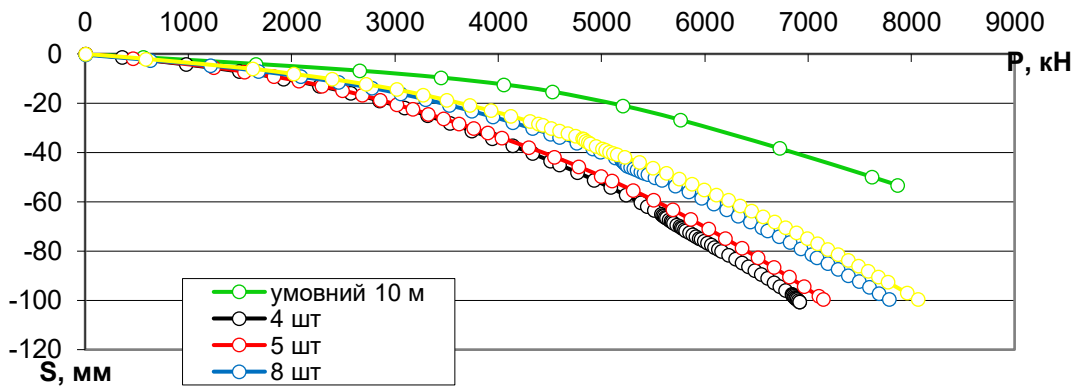


Рисунок 7 – Графіки залежності навантаження – осідання для паль довжиною 10 м

З рисунків видно, що для коротких паль зменшення кількості паль в групі не призводить до суттєвої втрати несучої здатності, тоді як для довгих паль такі втрати є значними. Заміна куща з коротких паль умовним ґрунто-пальовим масивом призвела до незначного збільшення несучої здатності групи, для довгих паль поведінка умовного фундаменту суттєво відрізняється від поведінки пальового фундаменту, оскільки в роботу втягується ґрунтовий масив нижче нижніх кінців паль.

На рис. 8 представлені графіки залежності осідання-навантаження для одиночних паль довжиною 3м та 10 м в піщаних ґрунтових умовах.

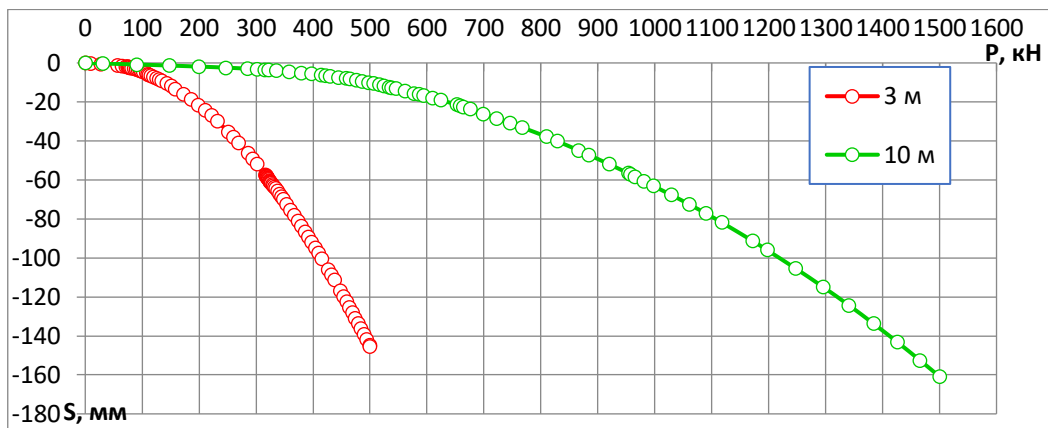


Рисунок 8 – Графік залежності осідання – навантаження для одиночних паль різної довжини в піщаному ґрунті

На рис. 9 представлений графік залежності осідання-навантаження для ростверку, як фундаменту мілкого закладання в піщаному ґрунті.

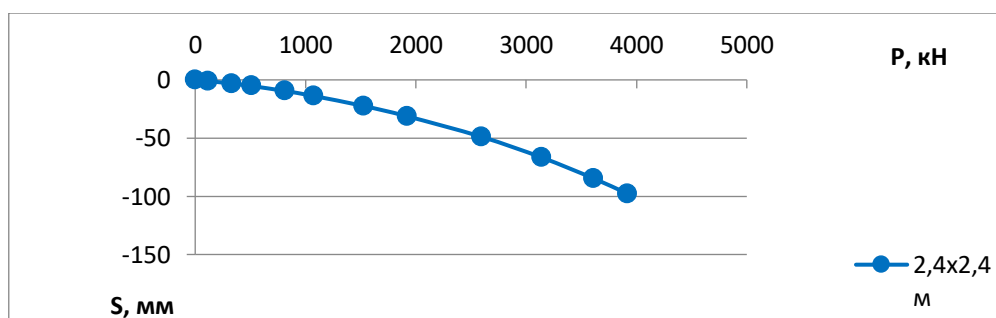


Рисунок 9 – Графік залежності осідання – навантаження для ростверку

Для більш детального аналізу була визначена несуча здатність груп паль за результатами моделювання в Plaxis при осіданні 60 мм. Для порівняння наведені значення сумарної несучої здатності паль як одиночних, несучої здатності ростверку як фундаменту мілкого закладання при такому ж

осіданні. Результати моделювання наведено в таблиці 2. В останньому стовпчику таблиці 2 несуча здатність куща представлена як сума несучих здатностей окремих його елементів.

Тиск під подошвою ростверка, як фундаменту мілкого закладання при осіданні $s = 60$ мм (рис. 9), складає 502 кПа.

Таблиця 2 - Результати моделювання стовпчастого пального фундаменту

Довжина палі	Кількість паль	Несуча здатність при $S = 60$ мм				
		Несуча здатність куща, кН	Σ несуча здатність паль, кН	Кущовий ефект	Несуча здатність ростверку, кН	Σ несуча здатність паль+ростверк
3 м	4 шт.	3340	1272	2,63	2890	4162
	5 шт.	3393	1590	2,13	2890	4480
	8 шт.	3542	2544	1,39	2890	5434
	9 шт.	3740	2862	1,30	2890	5752
	Умовний фундамент	4319				
10 м	4 шт.	5236	3880	1,35	2890	6770
	5 шт.	5472	4850	1,13	2890	7740
	8 шт.	5962	7760	0,77	2890	10650
	9 шт.	6163	8730	0,71	2890	11620
	Умовний фундамент	8064				

На рис. 10 наведена залежність несучої здатності куща від кількості паль в групі при різній довжині паль.

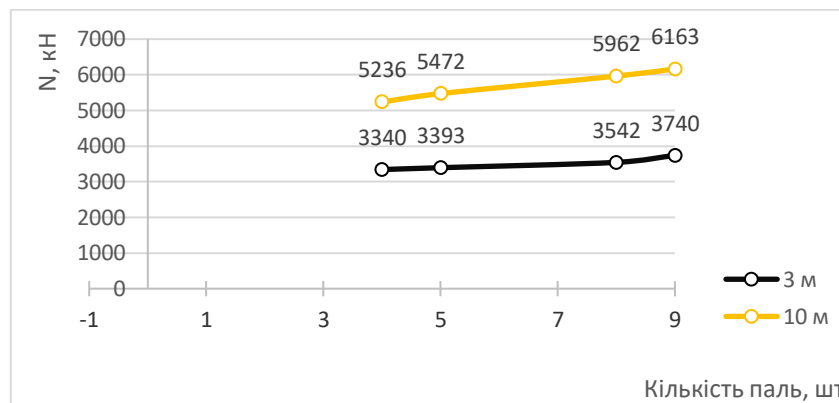


Рисунок 10 – Графіки залежності несучої здатності куща від кількості паль в групі при різній довжині паль

Аналіз результатів показує, що в випадку застосування коротких паль можна з метою економії матеріалів зменшити кількість паль в групі при збереженні розмірів ростверку з незначною втратою несучої здатності. Але перетворення пального фундаменту на умовний з метою визначення несучої здатності коректно лише при кроці паль 3d, тобто при доволі частому їх розташуванні. Для довгих паль навіть при частому кроці паль умовний фундамент працює краще, ніж паливий.

З таблиці 2 видно, що сума несучих здатностей паль як одиночних для кущів з коротких паль менше за несучу здатність групи. Кущовий ефект (відношення несучої здатності групи до суми несучих здатностей паль для коротких паль складає від 1,3 до 2,6. Для довгих паль в піщаному ґрунті кущовий ефект при малому кроці може бути негативним і складає від 0,71 до 1,35. Кущ несе менше навантаження ніж сума несучих здатностей 10 м паль при їх кількості 8-9 шт, тобто при частому їх розташуванні.

Визначати несучу здатність пального фундаменту як суму несучих здатностей паль і ростверку як фундаменту мілкого закладання некоректно. Це призводить до завищених результатів.

Для виявлення причин зміни несучої здатності групи при зміні довжини і кількості паль було виконане визначення опору під подошвою ростверку і навантаження, яке припадає на палі за результатами моделювання (визначення виконувались при осіданні групи 100 мм. Між палями групи навантаження розподілялось умовно рівномірно.

Результати такої роботи наведені у таблиці 3, де можна бачити для кожного куща сумарне навантаження (N , кН), сумарне навантаження на ростверк ($N_{\text{роств}}$, кН), тиск під подошвою ростверка

($P_{\text{роств}}$, кПа), середнє навантаження на палю в групі (кН). Площа ростверку, яка працює з ґрунтом визначалась за виїняток площі паль, що входять у групу. В таблиці також наведені несуча здатність одиночних паль 3 та 10 м довжиною і несуча здатність фундаменту мілко́го закладання розмірами 2,4x2,4 м при осіданні 100 мм.

В таблиці 3 та на рис. 11 наведена також частка ростверку у несучій здатності фундаменту.

Як бачимо частка ростверку у несучій здатності фундаменту зменшується із збільшенням кількості паль. Довжина паль впливає на частку ростверку несуттєво. При малій кількості паль частка ростверку практично не залежить від їх довжини.

Маючи тиск під подошвою ростверку в групі і несучу здатність ростверку як фундаменту мілко́го закладання, а також несучу здатність одиночної палі і середнє навантаження на палю в групі, можна проаналізувати ступінь реалізації несучої здатності окремих елементів пального фундаменту.

Таблиця 3 – Результати моделювання стовпчастого пального фундаменту для паль, влаштованих без виїмання ґрунту, ґрунт однорідний – пісок дрібний, розміри ростверку 2,4x2,4 м (при $s = 100$ мм)

Кіл. паль і площа ростверку, м^2	Реактивний тиск під ростверком як фонд. мілко́го закладання, кПа	L = 3 м Несуча здатність одиночної палі $P=415$ кН				L = 10 м Несуча здатність одиночної палі $P=1220$ кН			
		N, кН	$\frac{N_{\text{роств.}}}{P_{\text{роств}}}$, кН/кПа	Частка роствер %	Серед. навант. на палю, кН	N, кН	$\frac{N_p}{P_p}$, кН/кПа	Частка ростверку %	Серед. навант. на палю, кН
9 (3d) $A_p = 4,95$	680	5000	$\frac{480,2}{97,0}$	9,6	502,2	8064	$\frac{1115,2}{225,3}$	13,8	772,1
8 (3d-6d) $A_p = 5,04$	680	4896	$\frac{526,7}{104,5}$	10,8	546,2	7782	$\frac{1248,4}{247,7}$	16,0	816,7
5 (4,2d) $A_p = 5,31$	680	4723	$\frac{894,2}{168,4}$	18,9	765,8	7142	$\frac{1587,7}{299,0}$	22,2	1110,9
4 (6d) $A_p = 5,4$	680	4720	$\frac{1124,8}{208,3}$	23,8	898,8	6912	$\frac{1721,0}{318,7}$	24,9	1297,8

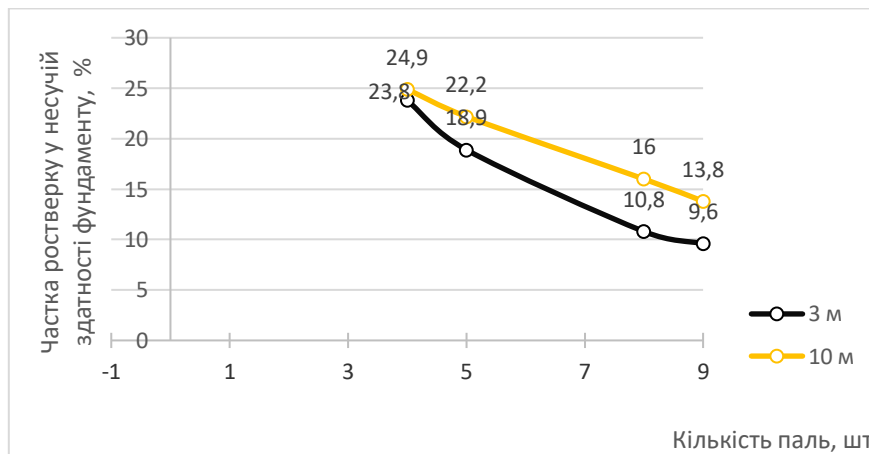


Рисунок 11 - Залежність частки ростверку у несучій здатності фундаменту від кількості і довжини паль

У таблиці 4 та на рис. 12 та 13 наведена залежність ступеню реалізації несучої здатності ростверку і паль у складі пального фундаменту.

Як бачимо з таблиці і рисунків, із зменшенням кількості паль у групі краще реалізують себе як палі, так і ростверк. Ступінь реалізації тиску під ростверком знаходиться в межах 0,2-0,5, а от ступінь реалізації несучої здатності паль суттєво відрізняється для коротких і довгих паль. Довгі палі у складі куша або реалізуються не повністю при кількості паль 9 шт. (крок 3d), або їх несуча здатність в групі наближається до несучої здатності одиночної палі. Для коротких паль ступінь реалізації несучої здатності палі перевищує одиницю. Отже, короткі палі працюють у куші краще, ніж одиночні і тим краще, чим менше їхня кількість (і відповідно більше відстань між ними).

Таблиця 4 – Ступінь реалізації несучої здатності паль та тиску під ростверком пального фундаменту у піщаному ґрунті

Кількість паль	Крок паль	L = 3 м		L = 10 м	
		для палі	для ростверку	для палі	для ростверку
9	3d	1,21	0,14	0,63	0,33
8	3d-6d	1,32	0,15	0,67	0,36
5	4,2d	1,85	0,25	0,91	0,44
4	6d	2,16	0,31	1,06	0,47

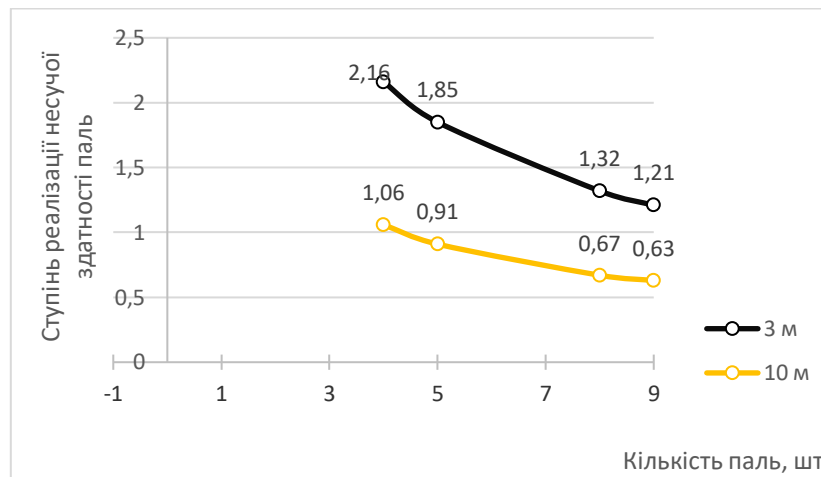


Рисунок 12 - Залежність ступеню реалізації несучої здатності паль у складі пального фундаменту від кількості і довжини паль

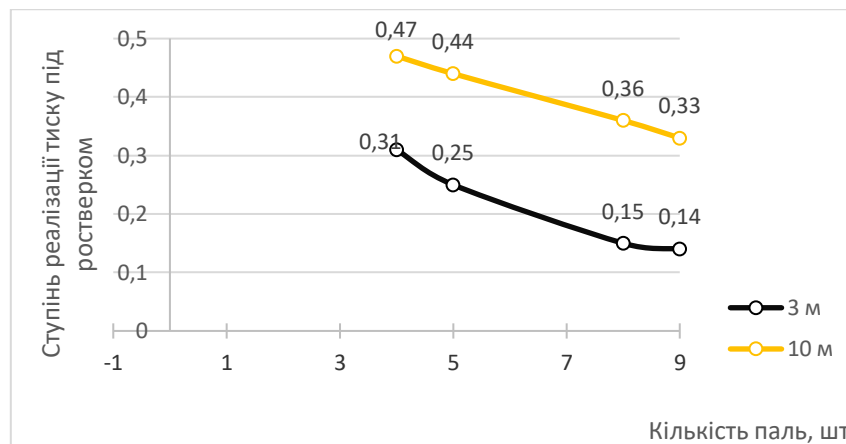


Рисунок 13 – Залежність ступеня реалізації тиску під підшовою ростверку у складі стовпчастого пального фундаменту від кількості і довжини паль

Висновки

Отже на основі проведених досліджень поведінки паль під навантаженням можна зробити наступні висновки:

- короткі палі у складі куца в піщаному ґрунті працюють більш ефективно, ніж довгі. Для коротких паль ступінь реалізації несучої здатності перевищує одиницю і знаходиться в межах 1.2-2,1, для довгих паль відповідний показник 0,63-1,06, збільшуючись по мірі зменшення кількості паль у групі;
- в випадку застосування коротких паль можна з метою економії матеріалів зменшити кількість паль в групі при збереженні розмірів ростверку з незначною втратою несучої здатності. Але перетворення пального фундаменту на умовний з метою визначення несучої здатності коректно лише при кроці паль 3d, тобто при доволі частому їх розташуванні. Для довгих паль навіть при частому кроці паль умовний фундамент працює краще, ніж паловий;
- частка роботи ростверку у складі пального фундаменту збільшується із зменшенням кількості паль і відповідно зі збільшенням відстані між ними, ця частка суттєво не залежить від довжини паль;

- із зменшенням кількості паль у групі краще реалізують себе як палі, так і ростверк. Ступінь реалізації тиску під ростверком знаходиться в межах 0,2-0,5, а ступінь реалізації несучої здатності паль суттєво відрізняється для коротких і довгих паль. Довгі палі у складі куща або реалізуються не повністю при кількості паль 8-9 шт. (крок 3d), або їх несуча здатність в групі наближається до несучої здатності одиночної палі;
- визначати несучу здатність пальового фундаменту як суму несучих здатностей паль та плити некоректно, це призводить до завищення несучої здатності групи;
- результати визначення несучої здатності паль у програмному комплексі Plaxis 3D Foundation доцільно використовувати у проектній практиці для корегування значень, визначених теоретичним шляхом за рекомендаціями норм [4].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Маєвська І. В. Вплив виду ґрунту на сумісну роботу паль і ростверку в кущовому пальовому фундаменті / І. В. Маєвська, Н. В. Блащук, К. А. Чобанова // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2013. – №2(15). – С.40-47.

2. Малишев О.М. Сумісна робота паль і ростверку у стовпчастому пальовому фундаменті/ О.М. Малишев, С.О. Цимбал, І.В. Маєвська, Н.В. Блащук // Тези регіональної науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців ВНТУ, м. Вінниця, ВНТУ, 2017 р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2018/paper/viewFile/3694/31033103>.

3. Блащук Н.В. Маєвська І.В., Попович М.М. Перерозподіл зусиль між елементами стовпчастого пальового фундаменту/„Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві”, н/т збірник ВНТУ, Вінниця. – 2018. – №1(24). – С.36-44.

4. 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).

5. Маєвська, І. В., Кремінська, Ю. О. Планування експерименту досліджень нового пальового фундаменту з коротких паль. Інноваційні технології в будівництві (2020): тези доп. наук.-техн. конф. (Вінниця, 10-12 листопада 2020 р.). Вінниця, 2020. С. 1-6.

Кремінська Юлія Олександрівна — студентка групи Б-20м, факультет будівництва теплоенергетики та газопостачання, Вінницький національний технічний університет, Вінниця; e-mail: 1b16b.kreminska@gmail.com

Науковий керівник: **Маєвська Ірина Вікторівна** — к. т. н, доцент, кафедра будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, Вінниця. e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com maevska@vntu.edu.ua

Kreminska Yuliia — Department of Building Heating and Gas Supply, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. E-mail: 1b16b.kreminska@gmail.com

Supervisor: **Irina V. Mayevska** — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of Construction, Municipal Economy and Architecture, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. E-mail: irina.mayevskaja@gmail.com maevska@vntu.edu.ua