

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ КОМПЛЕКСНОГО СТОВПЧАСТОГО ПАЛЬОВОГО ФУНДАМЕНТУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В даній роботі пропонується використати ідею комплексного фундаменту, що використовується для плитних ростверків, для стовпчастого пальового фундаменту. При масовому проектуванні, визначивши потрібну кількість паль, виходячи тільки з їх несучої здатності, намагаються розмістити їх в куці якомога компактніше, щоб скоротити витрати на ростверк, робота якого не враховується. Якщо розмістити палі на значній відстані одна від одної або компактно розмістити їх під колоною, але розміри ростверка прийняти доволі значними, це може компенсувати незначну кількість паль включенням у роботу ростверка.

Виконане математичне моделювання роботи пальового фундаменту за допомогою програмного комплексу SOFiSTiK. Проведене дослідження реалізації роботи пальового фундаменту з ґрунтовою основою в залежності від розміру ростверка, довжини, кількості, розміщення паль в ростверку та ґрунтових умов. Дослідженнями розглядається однорідний піщаний та глинистий ґрунт основи. Показане, що в випадку застосування комплексних пальових фундаментів з розрідженим розміщенням паль і збільшеною площею ростверку ефективність роботи фундаменту в цілому, а також окремих його елементів підвищується. З метою економії матеріалів можна зменшувати кількість паль в групі при збільшенні розмірів ростверку без втрати несучої здатності фундаменту.

Ключові слова: палі, ростверк підвищеної площі, несуча здатність, осідання, комплексний пальовий фундамент.

Abstract

In this work, it is proposed to use the idea of a complex foundation, which is used for slab grids, for a columnar pile foundation. In mass design, having determined the required number of piles, based only on their bearing capacity, they try to place them in the bushes as compactly as possible in order to reduce the costs of the grid, the work of which is not taken into account. If you place the piles at a considerable distance from each other or place them compactly under the column, but take the dimensions of the grid fairly large, this can compensate for the small number of piles by including the grid in operation.

Mathematical modeling of the operation of the pile foundation was carried out using the SOFiSTiK software complex. A study of the implementation of the work of the pile foundation with a soil foundation, depending on the grid size, length, number, placement of piles in the grid, and soil conditions, was carried out. The research examines the homogeneous sandy and clay soil of the base. It is shown that in the case of the use of complex pile foundations with sparse placement of piles and an increased grid area, the efficiency of the foundation as a whole, as well as its individual elements, increases. In order to save materials, it is possible to reduce the number of piles in a group while increasing the size of the grid without losing the load-bearing capacity of the foundation.

Keywords: piles, grid of an elevated area, bearing capacity, settlement, complex pile foundation.

Вступ

Численними дослідженнями доведено, що врахування роботи ростверка забезпечує значний резерв підвищення несучої здатності пальового фундаменту [2, 3]. Величина цього резерва залежить від виду паль і їх геометричних параметрів, відстані між ними, кількості паль в групі, ступеня піддатливості ґрунтової основи. Але поза увагою залишається ще значна кількість аспектів спільної роботи паль і ростверку у складі фундаменту, які потребують подальшого дослідження.

Зокрема, для пальово-плитних фундаментів останнім часом рядом авторів пропонується не рівномірне розміщення паль в межах плану плити ростверка, а їх концентрація в місцях прикладання навантаження [4]. При цьому частина ростверка працює з ґрунтом самостійно, спираючись на нього в проміжках між групами паль. Це дозволяє скоротити кількість паль у фундаменті. Такі фундаменти одержали назву комплексних.

В даній роботі пропонується використати ідею комплексного фундаменту не для плитного, а для стовпчастого фундаменту. При масовому проектуванні, визначивши потрібну кількість паль, виходячи тільки з їх несучої здатності, намагаються розмістити їх в куці якомога компактніше, щоб скоротити витрати на ростверк, робота якого не враховується [1]. Якщо розмістити палі на значній відстані одна від одної або компактно розмістити їх під колоною, але розміри ростверка прийняти доволі значними, це може компенсувати незначну кількість паль включенням у роботу ростверка.

Відомо, що паля є значно більш дорогою конструкцією, ніж ростверк, тому зменшення кількості паль при збільшенні габаритів ростверка в цілому може призвести до більш економічного рішення.

Для дослідження пропонується використати моделювання роботи палювих груп за допомогою одного з відомих програмних комплексів, які дозволяють змоделювати ґрунтове середовище з розміщеними в ньому стержнями паль, а саме SOFiSTiK. Програмний комплекс SOFiSTiK побудований на методі скінчених елементів і дозволяє створювати неоднорідні масиви ґрунтової основи з довільним характером нашарування ґрунтів.

В даній роботі поставлена задача дослідження ефективності використання комплексних палювих фундаментів, що містять зменшену кількість паль і розвинуті в плані ростверки. Одержане підтвердження припущення про можливість зменшувати кількість паль при збільшенні габаритів ростверку без суттєвої втрати несучої здатності куца.

План експерименту математичного моделювання

Для математичного моделювання роботи палювих фундаментів обрано програмний продукт SOFiSTiK, який базується на використанні чисельного методу скінчених елементів.

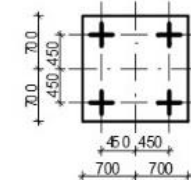
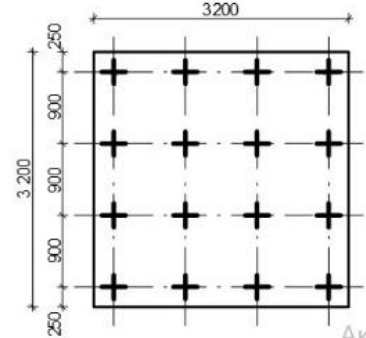
Проведене дослідження реалізації роботи палювого фундаменту з ґрунтовою основою в залежності від розмірів ростверку, довжини, кількості паль, їх розміщення у ростверку та ґрунтових умов. Дослідженнями розглядається однорідний піщаний та глинистий ґрунт основи.

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

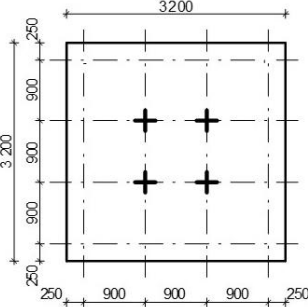
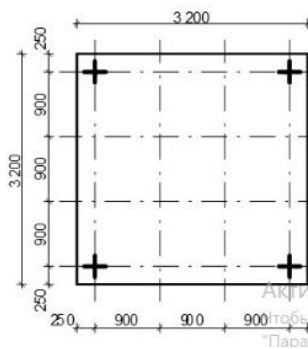
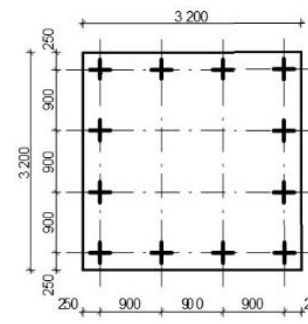
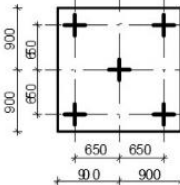
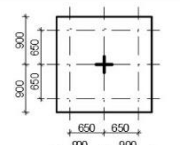
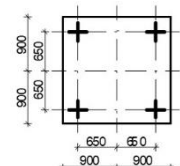
- модель ґрунту – пружно-пластична модель Кулона-Мора;
- модель палювого фундаменту під колоною – ростверк товщиною 0,7 м з підколонином розмірами в плані 0,5x0,5 м і забивні палі поперечного перерізу 0,3 x 0,3 м;
- палі довжиною 3,0 м;
- палі довжиною 10,0 м.

Варіювання кількістю паль і розмірами ростверку в плані здійснюється згідно з табл. 1. Кожна група дослідів повторюється двічі: для основи з піщаного ґрунту і для основи з глинистого ґрунту.

Таблиця 1 – Програма математичного моделювання роботи палювого фундаменту

Група дослідів	Довжина та поперечний розмір паль	Крок і кількість паль
1	$L = 3 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	
	$L = 10 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	
2	$L = 3 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	
	$L = 10 \text{ м}, d = 0,3 \text{ м}$	

Продовження таблиці 1

Група дослідів	Довжина та поперечний розмір паль	Крок і кількість паль
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	
5	L = 3 м, d = 0,3 м	
	L = 10 м, d = 0,3 м	
6	L = 3 м, d = 0,3 м	
	L = 10 м, d = 0,3 м	
7	L = 3 м, d = 0,3 м	
	L = 10 м, d = 0,3 м	
8	L = 3 м, d = 0,3 м	
	L = 10 м, d = 0,3 м	

Моделювання сумісної роботи ростверку і паль планується на однорідній піщаній та глинистій основі. Характеристики піщаного ґрунту: пісок дрібний, $\gamma = 18,6 \text{ кН/м}^3$, $e = 0,67$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 32^\circ$, $E = 28 \text{ МПа}$. Характеристики глинистого ґрунту: суглинок, $\gamma = 18,5 \text{ кН/м}^3$, $e = 0,75$, $c = 23 \text{ кПа}$, $\varphi = 21^\circ$, $E = 14 \text{ МПа}$.

Додатково до програми моделювання включені такі дослідження:

- моделювання роботи одиночних паль довжиною 3 та 10 м у відповідних грунтах;
- моделювання роботи ростверків відповідних розмірів як фундаменту мілкового закладання у відповідних грунтах.

Навантаження на фундамент передається у вигляді зосередженої сили, прикладеної до підколоннику (рис. 1).

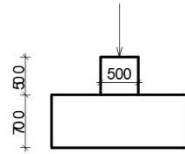


Рисунок 1 – Схема прикладання навантаження на ростверк

Програмний комплекс дозволяє одержати залежності навантаження-осідання, величини зусиль у палях, розподіл напружень і осідань по підшві ростверка.

Виклад основного матеріалу дослідження

При вирішенні поставленої задачі були використані результати математичного моделювання пальового фундаменту із забивних паль за допомогою програмного комплексу SOFiSTiK, який достатньо коректно показує дійсну роботу паль в ґрунті в межах діапазону лінійної залежності навантаження-осідання. Розглянуті варіанти кушів 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, з поперечним перерізом 0,3x0,3 м.

Розміри змодельованого ґрунтового масиву для максимального зменшення впливу крайових ефектів на осідання палі прийняті в плані 20x20 м, та завтовшки 20 м.

Побудовані моделі стовпчастого пальового фундаменту зображені на рисунку 2.

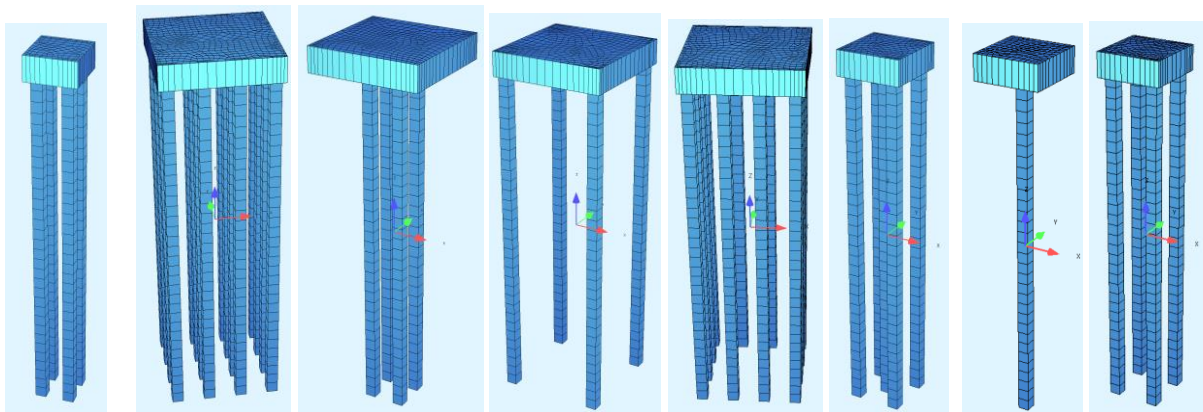


Рисунок 2 – Розрахункові моделі стовпчастого пальового фундаменту при довжині паль 10 м

Величина навантаження на моделі збільшувалась до тих пір, поки величина осідання не становила більше 40 мм.

На рис. 3, 4 для прикладу зображені результати моделювання фундаменту з 16 паль з розмірами ростверка 3,2x3,2 м (група дослідів 2) для паль довжиною 10 м при навантаженні на куш 1000 кН. З рисунку видно, що найбільше осідання спостерігається посередині ростверка, оскільки до нього прикладене зосереджене навантаження від колони. Відповідно найбільші напруження під підшовою ростверка спостерігаються по його периметру. Зусилля в палях розподіляються нерівномірно: найбільші зусилля сприймають кутові палі, найменші – центральні. Одержані результати з визначення напружено-деформованого стану відповідають відомим результатам попередніх дослідників [2, 3].

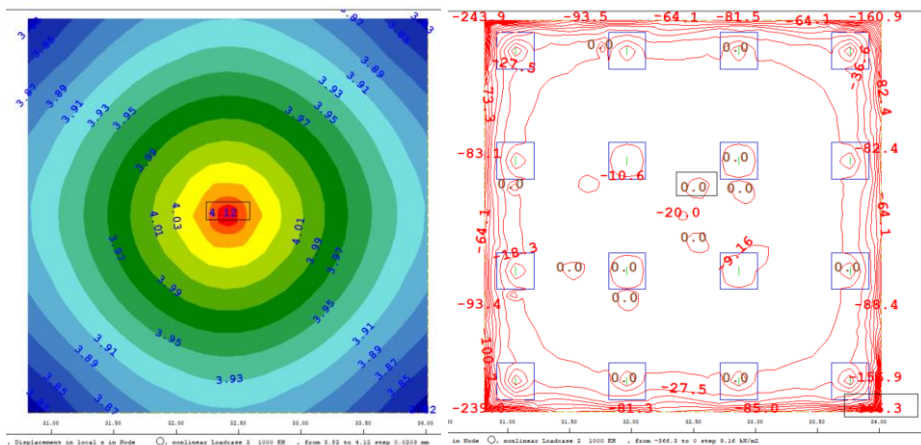


Рисунок 3 – Осідання ростверка та напруження під подошвою ростверка

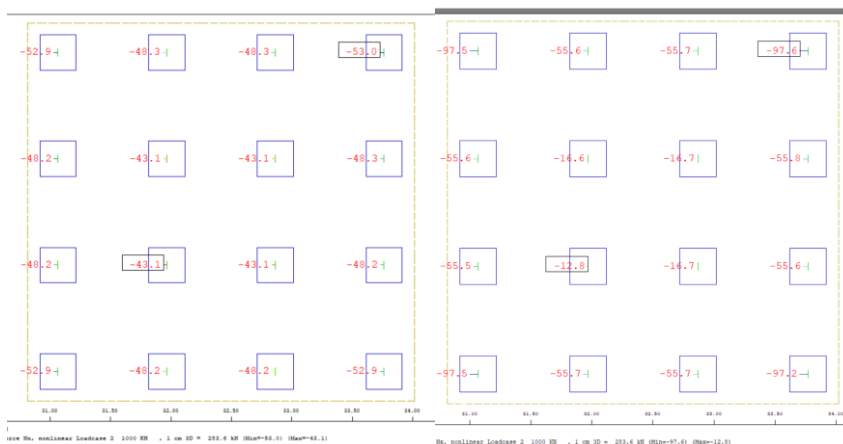


Рисунок 4 – Розподіл зусиль між палями для піщаного ґрунту та для глинистого ґрунту

Одержані графіки осідання-навантаження мають практично лінійний характер. В зв'язку з цим аналіз результатів розрахунків виконувався в межах навантаження на палю на межі пропорційності, p_e [1]. Для визначення цієї межі попередньо були виконані ручні розрахунки несучої здатності і осідань палей у відповідних ґрунтах. Результати розрахунків показали, лінійний характер залежності осідання-навантаження можна очікувати в межах навантаження, при якому осідання групи палей не перевищує 40 мм.

За несучу здатність одиначної палі також приймалися значення навантаження, що призвело до деформації 40 мм (критерій втрати несучої здатності при польових випробуваннях палей [5]).

Для детального аналізу було визначено навантаження на групу палей за результатами моделювання в SOFiStiK при осіданні 40 мм. Крім загального навантаження на куц визначались такі параметри:

- осереджене навантаження на палю фундаменту;
- сума зусиль, які сприймають палі в групі;
- навантаження, що сприймається ростверком;
- величина кушового ефекту (відношення навантаження на куц до суми несучих здатностей одиначних палей);
- частка навантаження, яка сприймається ростверком;
- ступінь реалізації несучої здатності палей (відношення осередженого навантаження на палю фундаменту до несучої здатності одиначної палі);
- ступінь реалізації несучої здатності ростверка (відношення, яке сприймає ростверк у складі фундаменту до навантаження, яке сприймає ростверк як фундамент мілкого закладання при такому ж значенні осідання).

Визначались також значення сумарної несучої здатності палей як одиначних, та несучої здатності ростверку як фундаменту мілкого закладання при такому ж осіданні. Результати моделювання наведені в таблицях 2 та 3.

Таблиця 2 – Порівняння роботи пальового фундаменту у піщаному ґрунті з роботою його окремих елементів при осіданні куща $s = 40,0$ мм

Довжина палів, м	№ схеми	Розміри ростверка,	Кількість палів в кущі, шт	При роботі кожного з елементів як окремого				При роботі у складі фундаменту							
				Несуча здатність одиначної палі, кН	Сума зусиль в палях, кН	Навантаження, що сприймається плиткою ростверку без палів, кН	Навантаження на куш як сума окремих елементів кН	Осереднене навантаження на палю фундаменту, кН	Сума зусиль в палях куща, кН	Навантаження, що сприймається ростверком, кН	Навантаження на куш, кН	Куцтовий ефект	Частка ростверку, %	Ступінь реалізації несучої здатності палів	Ступінь реалізації несучої здатності ростверку
3 м	1	1,4×1,4	4	560	2240	2000	4240	494,0	1976	464	2440	1,09	23,2	0,882	0,232
	2	3,2×3,2	16		8960	4700	13660	261,7	4187	2353	6540	0,73	36,0	0,467	0,501
	3	3,2×3,2	4		2240	4700	6940	361,0	1444	3586	5030	2,24	71,3	0,645	0,763
	4	3,2×3,2	4		2240	4700	6940	492,0	1968	3567	5530	2,47	64,5	0,879	0,759
	5	3,2×3,2	12		6720	4700	11420	310,6	3730	2520	6250	0,93	40,3	0,555	0,536
	6	1,8×1,8	5		2800	2600	5400	460,2	2301	1699	4000	1,43	42,5	0,822	0,653
	7	1,8×1,8	1		560	2600	3160	634,0	634,0	2156	2790	4,98	77,3	1,130	0,829
	8	1,8×1,8	4		2240	2600	4840	516,0	2065	1700	3765	1,68	45,2	0,921	0,654
10 м	1	1,4×1,4	4	1000	4000	2000	6000	594,0	2376	1624	4000	1,00	40,6	0,590	0,812
	2	3,2×3,2	16		16000	4700	20700	348,7	5579	3281	8860	0,55	37,0	0,348	0,698
	3	3,2×3,2	4		4000	4700	8700	549,0	2196	3804	6000	1,50	63,4	0,549	0,845
	4	3,2×3,2	4		4000	4700	8700	675,0	2700	3940	6640	1,66	59,4	0,675	0,839
	5	3,2×3,2	12		12000	4700	16700	426,2	5113	3237	8350	0,70	38,8	0,426	0,689
	6	1,8×1,8	5		5000	2600	7600	578,3	2890	1980	4870	0,97	40,7	0,578	0,761
	7	1,8×1,8	1		1000	2600	3600	808,0	808,0	2277	3085	3,09	73,9	0,808	0,876
	8	1,8×1,8	4		4000	2600	6600	640,0	2560	2040	4600	1,15	44,3	0,640	0,784

Таблиця 3 – Порівняння роботи пального фундаменту у глинистому ґрунті з роботою його окремих елементів при осіданні куща $s = 40,0$ мм

Довжина пал, мм	№ схеми	Розміри ростверка, м	Кількість пал в кущі, шт	При роботі кожного з елементів як окремого				При роботі у складі фундаменту							
				Несуча здатність одиночні палі, кН	Сума зусиль в палях, кН	Навантаження, що сприймається плитою ростверку без пал, кН	Навантаження на кущ, як сума окремих елементів, кН	Осереднене навантаження на палю фундаменту, кН	Сума зусиль в палях куща, кН	Навантаження, що сприймається ростверком, кН	Навантаження на кущ, кН	Кущовий ефект	Частка ростверку, %	Ступінь реалізації несучої здатності пал	Ступінь реалізації несучої здатності ростверку
3 м	1	1,4×1,4	4	470	1880	1000	2880	286,0	1142	378	1520	0,81	24,9	0,609	0,378
	2	3,2×3,2	16		7520	2340	9860	164,1	2624	787	3410	0,45	23,1	0,349	0,336
	3	3,2×3,2	4		1880	2340	4220	223,0	893	1657	2550	1,36	65,0	0,474	0,708
	4	3,2×3,2	4		1880	2340	4220	294,0	1180	1650	2830	1,50	58,3	0,626	0,705
	5	3,2×3,2	12		5640	2340	7980	202,7	2432	964	3400	0,60	28,4	0,431	0,412
	6	1,8×1,8	5		2350	1300	3650	264,2	1321	679	2000	0,85	34,0	0,562	0,526
	7	1,8×1,8	1		470	1300	1770	364,0	368,0	1048	1420	3,02	73,8	0,783	0,806
	8	1,8×1,8	4		1880	1300	3180	300,0	1200	743	1943	1,03	38,3	0,638	0,571
10 м	1	1,4×1,4	4	620	2480	1000	3480	470,0	1880	639	2520	1,02	25,4	0,758	0,639
	2	3,2×3,2	16		9920	2340	12260	323,2	5170	611	5780	0,58	10,6	0,521	0,261
	3	3,2×3,2	4		2480	2340	4820	456,0	1824	1644	3470	1,40	47,4	0,735	0,703
	4	3,2×3,2	4		2480	2340	4820	519,0	2076	1691	3770	1,12	44,9	0,837	0,723
	5	3,2×3,2	12		7440	2340	9780	368,5	4422	918	5340	0,72	17,2	0,594	0,392
	6	1,8×1,8	5		3100	1300	4400	451,0	2255	745	3000	0,97	24,8	0,727	0,573
	7	1,8×1,8	1		620	1300	1920	605,0	605,0	1082	1690	2,72	64,0	0,976	0,832
	8	1,8×1,8	4		2480	1300	3780	505,0	2020	791	2810	1,13	28,1	0,815	0,609

На рис. 5 та 6 наведена залежність загального навантаження на куц від кількості паль в групі та виду ґрунту при різній довжині паль. На рис. 5 залежності побудовані для куців з площею ростверка $3,2 \times 3,2 = 10,24 \text{ м}^2$, а на рис. 6 для куців з площею ростверка $1,8 \times 1,8 = 3,24 \text{ м}^2$. Таким чином залежності побудовані виходячи з компоновання куців при постійних розмірах ростверка.

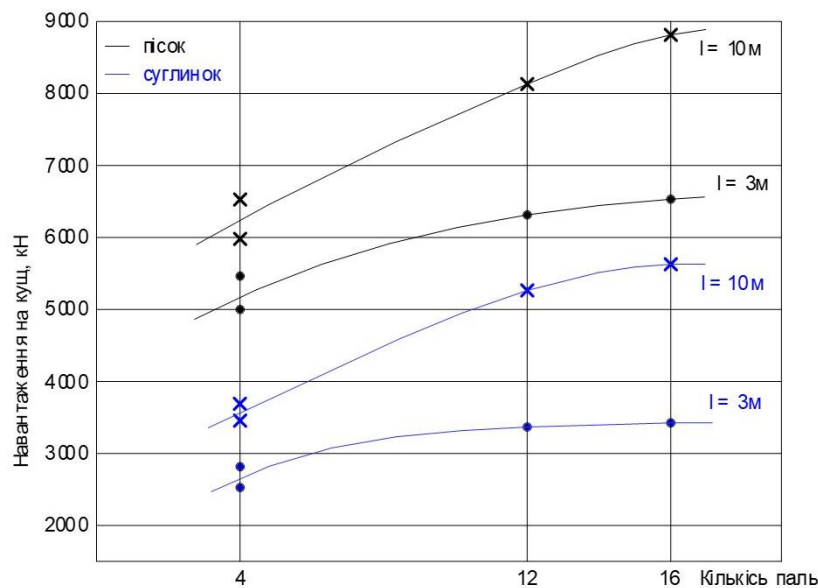


Рисунок 5 – Графіки залежності навантаження на куц з ростверком $3,2 \times 3,2 = 10,24 \text{ м}^2$ від кількості паль в групі та виду ґрунту при різній довжині паль

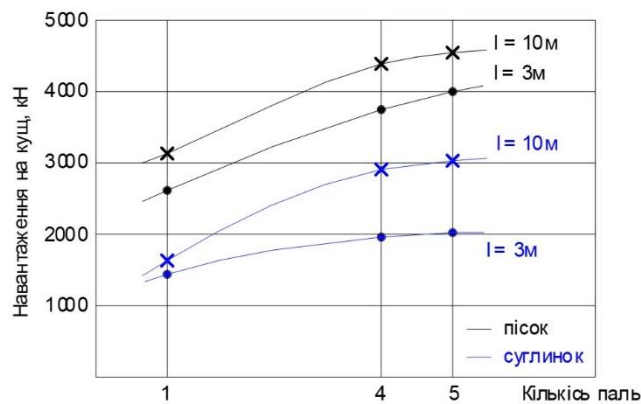


Рисунок 6 – Графіки залежності навантаження на куц з ростверком $1,8 \times 1,8 = 3,24 \text{ м}^2$ від кількості паль в групі та виду ґрунту при різній довжині паль

З рисунків видно, що зменшення кількості паль у 4-5 разів у межах постійної площі ростверка призводить до зменшення навантаження, яке сприймає куц, лише у 1,23-1,54 разів для триметрових паль і у 1,37-1,76 разів для десятиметрових. Це свідчить про більш ефективне використання паль при застосуванні комбінованого варіанта пального фундаменту. При цьому більший ефект виникає для коротких паль. З графіків також можна зробити висновок, що для глинистого, більш піддатливого ґрунту, ефективність зменшення кількості паль дещо менша.

На рис. 7 наведена залежність загального навантаження на куц від площі ростверка та виду ґрунту при різній довжині паль за умови сталої кількості паль в групі 4 шт.

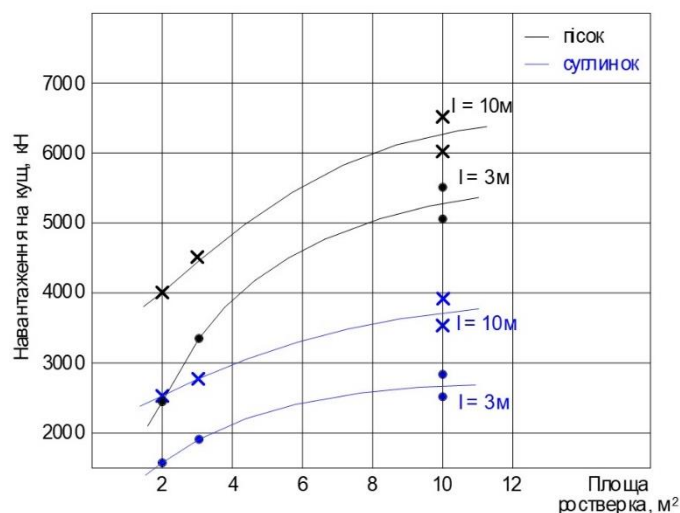


Рисунок 7 – Графіки залежності навантаження на куц з 4 паль від площі ростверка та виду ґрунту при різній довжині паль

Графіки рис. 7 показують, що за рахунок збільшення площі ростверка можна досягти при сталій кількості паль збільшення навантаження на куц у 1,4-2,1 раза (для коротких паль цей ефект більший, він також більший для піщаного ґрунту).

Програма дослідження дозволила також проаналізувати характер розміщення паль комбінованого фундаменту в межах ростверка:

- варіанти розміщення паль в середині куца (під місцем прикладання навантаження (групи дослідів 3 та 7));
- варіанти розміщення паль по периметру куца (групи дослідів 4, 5 та 8).

Аналіз результатів моделювання (табл. 2, 3 та рис. 5 – 7) показує більшу ефективність розміщення паль у комбінованому фундаменті по периметру куца.

Висновки

1. В випадку застосування комплексних пальових фундаментів з розрідженим розміщенням паль і збільшеною площею ростверку ефективність роботи фундаменту в цілому, а також окремих його елементів підвищується.
2. Зменшення кількості паль у 4-5 разів у межах постійної площі ростверка призводить до зменшення навантаження, яке сприймає куц, лише у 1,23-1,54 разів для триметрових паль і у 1,37-1,76 разів для десятиметрових. Це свідчить про більш ефективне використання паль при застосуванні комбінованого варіанта пальового фундаменту.
3. За рахунок збільшення площі ростверка можна досягти при сталій кількості паль збільшення навантаження на куц у 1,4-2,1 раза (для коротких паль цей ефект більший, він також більший для піщаного ґрунту у порівнянні з глинистим).
4. При незмінній кількості паль збільшення площі ростверка призводить до збільшення його частки у навантаженні на куц, досягаючи доволі великих значень 50-70%.
5. Аналіз результатів моделювання показує більшу ефективність розміщення паль у комбінованому фундаменті по периметру куца, ніж у його центральній частині.
6. При великій кількості паль ступінь реалізації їх несучої здатності коливається в діапазоні 0,3-0,6, при незначній кількості відповідно в діапазоні 0,5-1,1. Довжина паль впливає на реалізацію їх несучої здатності неоднозначно. В глинистих ґрунтах краще реалізують себе довгі палі, а в піщаних ґрунтах – короткі. При сталій кількості паль площа ростверка мало впливає на реалізацію їх несучої здатності.
7. При традиційному компактному розміщенні паль (групи дослідів 1, 2, 6) ступінь реалізації несучої здатності ростверку коливається в діапазоні 0,2-0,75, тоді як при розрідженому їх розміщенні в комбінованому фундаменті цей діапазон 0,65-0,85. В глинистих ґрунтах ступінь реалізації тиску під ростверком нижче, ніж в піщаних.

8. При сталій кількості паль збільшення площі ростверка суттєво збільшує реалізацію його несучої здатності.
9. З метою економії матеріалів можна зменшувати кількість паль в групі при збільшенні розмірів ростверку без втрати несучої здатності фундаменту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. 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).
2. Маєвська І. В., Блащук Н. В. Робота паль і ростверку у складі стовпчастих пальових фундаментів : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2023. 182 с.
3. Маєвська І. В., Блащук Н. В., Кремінська Ю. О. Особливості роботи пальових куців з коротких паль за даними числового моделювання. Основи та фундаменти: науково-технічний збірник. Вип.43. Київ : КНУБА, 2021. С.30-39.
4. Самородов О., Табачников С., Дитюк О., Бондар О. Польові дослідження напруженого стану системи «грунтова основа – комбінований пальово-плитний фундамент» багатофункціонального комплексу у місті Харкові. Основи та фундаменти: науково-технічний збірник. Вип.46. Київ : КНУБА, 2023. С.38-48.
5. ДСТУ Б В.2.1-1-95 (ГОСТ 5686-94) Основи та підвалини будинків і споруд. Грунти. Метод польових випробувань палями. [Чинний від 1996-04-01]. Київ : Мінрегіон України, 1994. 58 с. (Державний стандарт України).

Ганущак Юрій Володимирович — магістр, факультет будівництва цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: hanushchak1609@gmail.com.

Маєвська Ірина Вікторівна — доцент кафедри "Будівництва, міського господарства та архітектури". Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com. maevska@vntu.edu.ua.

Hanushchak Yurii — Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia E-mail: hanushchak1609@gmail.com

Maievskaja Irina – associate professor of the Department of "Building, Urban and Architecture". Vinnitsa National Technical University, Vinnytsia. E-mail: irina.mayevskaja@gmail.com maevska@vntu.edu.ua