

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ КОРОТКИХ І ДОВГИХ ПАЛЬ У СТОВПЧАСТИХ ПАЛЬОВИХ ФУНДАМЕНТАХ ШЛЯХОМ ФІЗИЧНОГО МАЛОМАСШТАБНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі наведені результати фізичного моделювання роботи паль та низького ростверку у складі пальового фундаменту на маломасштабних моделях. Метою досліджень є порівняння роботи коротких та довгих паль у складі фундаменту, враховуючи роботу ростверку. Наведені результати фізичного моделювання з варіюванням довжини паль, кроку паль, розмірів ростверка та кількості паль у ростверку. За результатами моделювання виконаний аналіз результатів з визначенням впливу геометричних параметрів пальового фундаменту на несучу здатність фундаменту в цілому та окремих його елементів. Проаналізована зміна частки ростверку у несучій здатності фундаменту та питомої несучої здатності коротких та довгих паль.

Виявлено, що короткі палі краще реалізують себе у складі стовпчастого пальового фундаменту, в результаті чого при проєктуванні можна замінювати довгі палі на короткі з меншою загальною довжиною, що призведе до зменшення вартості фундаменту.

Ключові слова: новий пальовий фундамент, короткі палі, довгі палі, ростверк, маломасштабні моделі, несуча здатність, частка ростверку, питома несуча здатність.

Abstract

The paper presents the results of physical modeling of the operation of piles and low grillage as part of a pile foundation on small-scale models. The purpose of the research is to compare the operation of short and long piles as part of the foundation, taking into account the operation of the grillage. The results of physical modeling are presented with variations in the length of piles, pile pitch, grillage dimensions and the number of piles in the grillage. Based on the modeling results, an analysis of the results was performed to determine the influence of the geometric parameters of the pile foundation on the bearing capacity of the foundation as a whole and its individual elements. The change in the share of the grillage in the bearing capacity of the foundation and the specific bearing capacity of short and long piles was analyzed.

It was found that short piles are better implemented as part of a columnar pile foundation, as a result of which long piles can be replaced with short ones with a shorter total length during design, which will lead to a reduction in the cost of the foundation.

Keywords: new pile foundation, short piles, long piles, grillage, small-scale models, bearing capacity, grillage fraction, specific bearing capacity.

Вступ

Актуальним є питання збільшення ефективності роботи окремих елементів у складі пальового фундаменту. Чинними нормами [1] не передбачене врахування різного ступеню реалізації несучої здатності паль і ростверку у таких фундаментах. При врахуванні внеску кожного з елементів у несучу здатність фундаменту виникає можливість оптимізувати геометричні параметри пальових кушів з мінімізацією витрат.

Проведені раніше дослідження показали [3-6], що короткі палі краще реалізують свою несучу здатність при спільній роботі з ростверком, що дозволяє варіюючи кількістю паль і розмірами ростверку замінювати довгі палі на короткі без втрати несучої здатності стовпчастого пальового фундаменту.

Попередньо авторами було проаналізоване питання, чи може бути економічно доцільним використання коротких паль у порівнянні з довгими і за яких умов використання коротких паль може дати економічний ефект [6]. При проєктуванні за нормами [1] короткі палі частіше за все замінюються меншою кількістю довгих паль. В роботі [6] на підставі результатів математичного моделювання доведено, що за рахунок кращої реалізації роботи елементів пальового фундаменту для паль малої довжини з

великим кроком можна досягти однакової несучої здатності з фундаментом з паль великої довжини при традиційному мінімальному кроці 3d.

Для підтвердження раніше виконаного попереднього дослідження ефективності використання коротких паль у складі стовпчастого пальового фундаменту виконаний фізичний експеримент на маломасштабних моделях. Проведені дослідження розглядають стовпчасті пальові фундаменти при новому будівництві.

Устаткування та прилади для проведення фізичного моделювання

Випробування маломасштабних моделей пальового фундаменту проводилось у лабораторному лотку розміром 1800×1200×1000 мм, обладнаного упорною системою для домкрату, який передає навантаження на пальовий куш.

В якості ґрунту використовувався пісок середньої крупності із щільністю $\rho = 1,67 \text{ г/см}^3$ та вологістю $w = 0,07$. Основа створювалась шляхом пошарового засипання у лоток піску заданої вологості з ущільненням кожного шару до заданої щільності. Щільність контролювалась методом ріжучого кільця у трьох точках кожного шару товщиною 15 см.

Навантаження на модель фундаменту передавалось за допомогою гвинтового домкрату вантажопідйомністю 1,5 т, а для виміру зусилля, що передається на фундамент, використовувався динамометр з максимальним зусиллям 3 т.

Для замірювання переміщень моделі фундаменту використовувалась система прогиномірів, встановлена на незалежній реперній системі, закріпленій на стінки лотка.

Проведені раніше моделювання стовпчастих пальових фундаментів на маломасштабних моделях при кафедрі БМГА ВНТУ [3, 5] дозволили обрати масштаб моделювання 1:20, який дозволить довести до втрати несучої здатності фундаменти з моделями паль довжиною до 10 м при перерізі 30х30 см (виходячи з обмежених можливостей упорної системи).

Для випробувань виготовлені моделі дерев'яних паль перерізом 15х15 мм з довжинами 150, 230, 300 та 450 мм (відповідають натурним палям перерізом 300х300 мм з довжинами 3, 4,5, 6 та 9 м).

У роботі [2] наведений детальний опис використаного устаткування, моделей паль та ростверку з ілюстрацією шляхом фотофіксації.

При проведенні досліджень визначались зусилля у палях куша за допомогою тензOMETричних датчиків, встановлених на голови паль. Використовувались датчики промислового виготовлення, передбачені для виміру поздовжніх зусиль до 2 кН.

Для фіксації показів датчиків і перетворення їх у зусилля в палях був виготовлений спеціальний пристрій для замірів навантаження, що припадає на палі групи.

На рис. 1 наведене розміщення датчиків у тілі ростверка.



Рис. 1 – Розміщення датчиків у тілі ростверка

На рис. 2 показана в зборі система для передавання навантаження на модель ростверку (штамп) без паль, на рис. 3 – система в зборі для передавання навантаження на модель пальового фундаменту.



Рис. 2 – Система для передавання навантаження на модель ростверку (штамп) без паль



Рис. 3 – Система для передавання навантаження на модель пальового фундаменту

План експериментів фізичного моделювання

Випробувались пальові фундаменти з різною кількістю паль, розміщених у кожному отворі виготовлених ростверків (рис. 2). Випробування передбачали використання моделей паль з довжиною 150 мм (модель палі довжиною 3 м) і довжиною 450 мм (модель палі довжиною 9 м).

При плануванні модельного експерименту в якості незалежних змінних обрані основні геометричні параметри пальового куща:

- приведена довжина палі, l/d ;
- крок паль в кущі;
- кількість паль у групі.

Передбачені групи паль зі сталою кількістю паль (9 шт.) з варіюванням кроку (3d, 5d, 7d) і розмірів ростверку та довжини паль, а також групи паль зі сталим кроком 3d та варіюванням кількістю та довжиною паль і розмірами ростверків.

Передача статичного навантаження на фундамент здійснювалась ступенями з витримкою кожного ступеня до умовної стабілізації деформацій (не більше 0,25 мм за 15 хв. спостережень) до досягнення навантаженням граничного значення.

Для аналізу відмінності поведінки паль і ростверку у складі кушового фундаменту і поведінки одиночної палі та плити ростверку проведенні випробування одиночних паль різної довжини та плит ростверків без паль.

Межі варіювання параметрів прийняті з врахуванням практики використання пальових фундаментів. У таблиці 1 наведена програма модельного експериментального дослідження.

Таблиця 1 - Програма модельного експериментального дослідження стовпчастих пальових фундаментів

Розміри ростверку, мм	Крок паль	Кількість паль	Довжина паль, мм	Приведена довжина паль
105x105	3d	5	150	10
			450	30
140x140	3d	9	150	10
			450	30
200x200	5d	9	150	10
			450	30
260x260	7d	9	150	10
			450	30
185x185	3d	16	150	10
			450	30

Результати фізичного моделювання роботи стовпчастого пальового фундаменту з палями різної довжини

В результаті проведення експериментів за розробленою програмою дослідження були одержані:

- графіки залежності осідання – навантаження куша в цілому
- графіки осідання – навантаження за результатами випробування одиночних паль різної довжини;
- графік осідання – навантаження при випробуванні плити ростверку як штампа без паль.

У таблиці 2 наведено результати експериментальних досліджень маломасштабних моделей пальових фундаментів із сталою кількістю паль $n = 9$ шт. при осіданні 30 мм.

Таблиця 2 – Результати експериментальних випробувань моделей стовпчастих пальових фундаментів із сталою кількістю паль $n = 9$ шт. при осіданні 30 мм

Розміри ростверку, мм	Крок паль	Приведена довжина паль, (l/d)	Навантаження на модель фундаменту, кН	Навантаження, яке сприймають палі, кН	Несуча здатність одиночної палі при 0,2S, кН	Ступінь реалізації несучої здатності паль	Навантаження, яке сприймає ростверк, кН	Несуча здатність ростверку, кПа	Частка ростверку, %	Ступінь реалізації ростверку, %	Питома несуча здатність паль, кН/см
140×140	3d	10	5,20	2,81/0,31	0,3	1,03	2,39	3,5	46,0	68,3	0,0206
		30	7,00	5,77/0,64	0,75	0,85	1,23	3,5	17,6	35,1	0,0142
200×200	5d	10	5,70	1,44/0,16	0,3	0,53	4,26	5,0	74,7	85,2	0,0107
		30	8,80	3,89/0,43	0,75	0,58	4,91	5,0	55,8	98,2	0,0096
260×260	7d	10	8,50	2,00/0,22	0,3	0,74	6,50	6,8	76,5	95,5	0,0147
		30	15,00	6,00/0,67	0,75	0,89	9,00	6,8	60,0	1,32	0,0148

У таблиці 3 наведено результати експериментальних досліджень маломасштабних моделей пальових фундаментів із сталим кроком паль 3d при осіданні 30 мм.

На рис. 4 та 5 наведені графіки залежності несучої здатності фундаментів від кроку та кількості паль. На рис. 6 та 7 наведені графіки залежності частки ростверку у несучої здатності фундаментів від кроку та кількості паль.

Таблиця 3 – Результати експериментальних випробувань моделей стовпчастих пальових фундаментів із сталим кроком паль 3d при осіданні 30 мм

Розміри ростверку, мм	Кількість паль	Приведена довжина паль, (l/d)	Навантаження на модель фундаменту, кН	Навантаження, яке сприймають палі, кН	Несуча здатність одиначної палі при 0,2S, кН	Ступінь реалізації несучої здатності паль	Навантаження, яке сприймає ростверк, кН	Несуча здатність ростверку, кПа	Частка ростверку, %	Ступінь реалізації ростверку, %	Питома несуча здатність паль, кН/см
105×105	5	10	2,40	1,49/0,3	0,3	1,0	0,91	1,9	38,0	47,9	0,02
		30	4,80	3,7/0,74	0,75	0,98	1,1	1,9	22,9	57,9	0,0164
140×140	9	10	5,20	2,81/0,31	0,3	1,03	2,39	3,5	46,0	68,3	0,0206
		30	7,00	5,77/0,64	0,75	0,85	1,23	3,5	17,6	35,1	0,0142
185×185	16	10	7,80	4,42/0,28	0,3	0,92	3,38	4,2	43,3	80,5	0,0187
		30	9,60	7,20/0,45	0,75	0,60	2,40	4,2	25,0	57,2	0,01

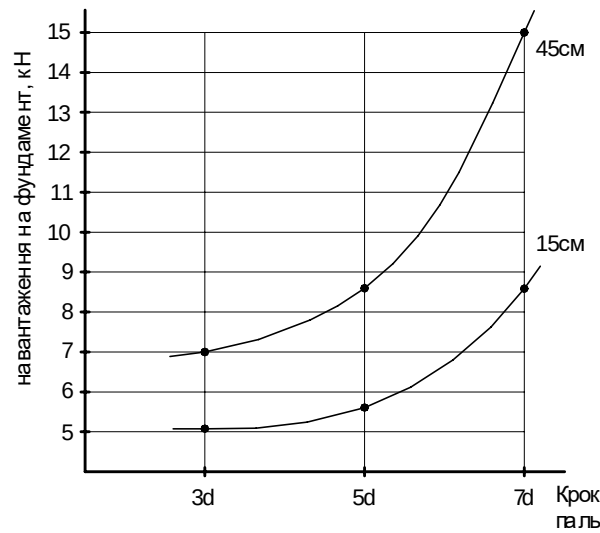


Рис. 4 – Графіки залежності несучої здатності фундаментів від кроку паль при кількості паль у куці 9 шт.

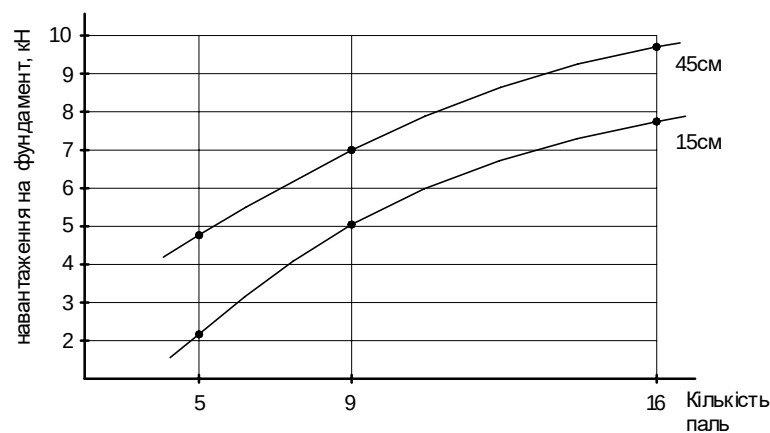


Рис. 5 – Графіки залежності несучої здатності фундаментів від кількості паль при кроці паль у куці 3d

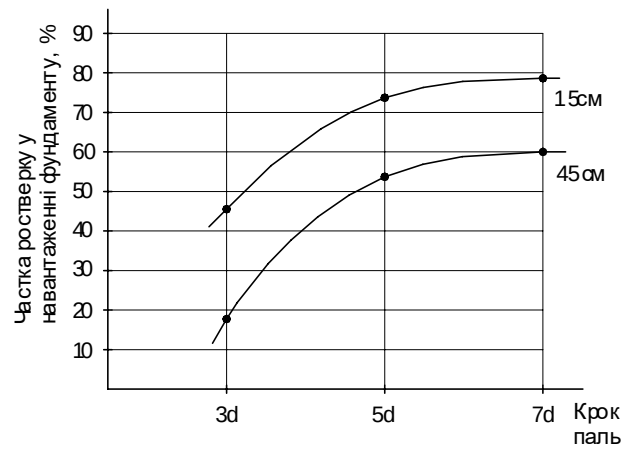


Рис. 6 – Графіки залежності частки ростверку у несучій здатності фундаментів від кроку паль при кількості паль у кущі 9 шт.

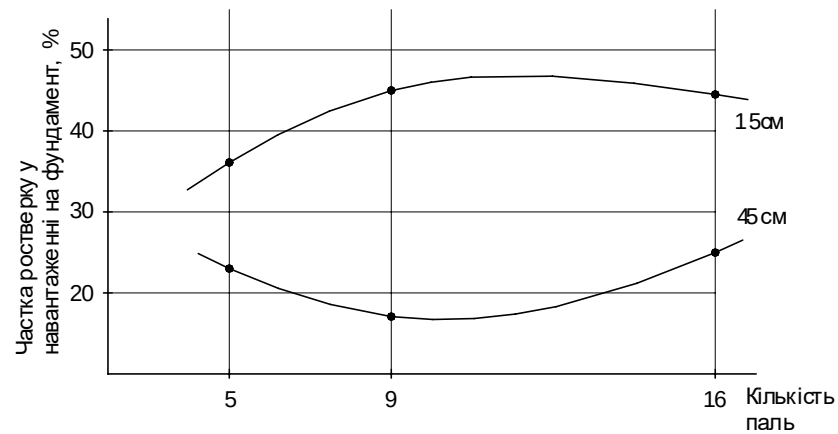


Рис. 7 – Графіки залежності частки ростверку у несучій здатності фундаментів від кількості паль при кроці паль у кущі 3d

На рис. 8 та 9 наведені графіки залежності навантажень на палі і ростверк у складі фундаменту від кроку та кількості паль.

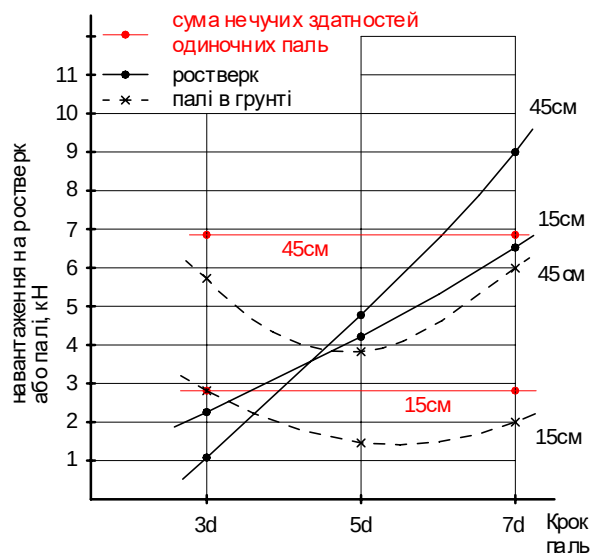


Рис. 8 – Графіки залежності навантажень на палі і ростверк у складі фундаменту від кроку паль при кількості паль у кущі 9 шт.

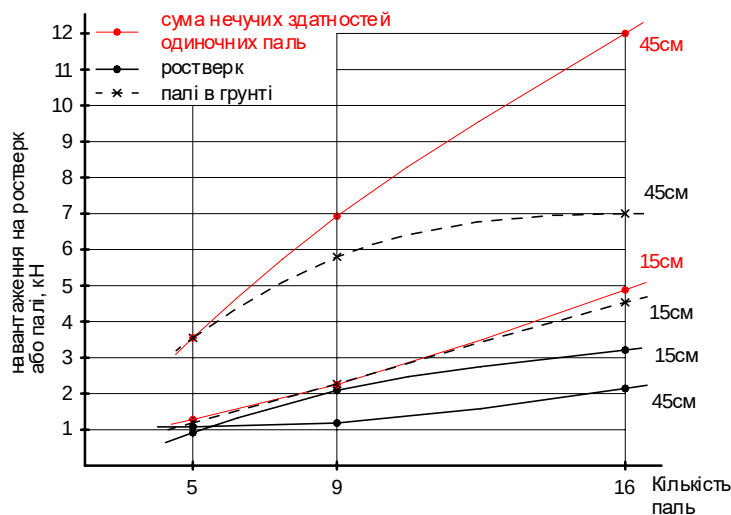


Рис. 9 – Графіки залежності навантажень на палі і ростверк у складі фундаменту від кількості паль при кроці паль у куші 3d

З графіків рис. 4 та 5 можна бачити, що при сталій кількості паль зменшення довжини паль у 3 рази призводить до зменшення несучої здатності пальового фундаменту у 1,35 - 1,7 рази, при сталому кроці паль 3d – у 1,25 - 2,2 рази. Найкращий ефект спостерігається для кушів з великим кроком паль.

Збільшення кроку паль з 5d до 7d дозволяє замінити довгі палі на короткі без втрати несучої здатності. При кроці паль 3d 9 коротких паль замінюють 5 довгих або 16 коротких – 8 довгих. В першому випадку загальна довжина паль, від якої залежить їх вартість, зменшується з 45 до 27 м, а в другому з 72 до 48 м.

Частка ростверку у несучій здатності фундаменту зростає із збільшенням кроку паль, а при сталому кроці мало залежить від кількості паль у куші (рис. 6 та 7). Для коротких паль частка ростверку більша, ніж для довгих.

З рисунків 8 та 9 видно, що короткі палі використовують свою несучу здатність у групі більш ефективно у порівнянні з одиночними палями, ніж довгі. Ступінь реалізації коротких паль знаходиться у межах 0,6 – 1,0, а довгих 0,6 – 0,9 (табл. 2, 3) і в кожному конкретному випадку ступінь реалізації коротких паль більший за ступінь реалізації довгих. Виключення складають фундаменти з широкими ростверками і рідким розміщенням паль (крок 7d), де і короткі і довгі палі реалізують свою несучу здатність добре.

Висновки

1. Частка ростверку у навантаженні на пальовий фундамент зменшується із збільшенням їх довжини і збільшується при збільшенні кроку паль.
2. Зменшення довжини паль у 3 рази призводить до зменшення несучої здатності пальового фундаменту лише у 1,25 - 2,2 рази, що свідчить про більшу ефективність коротких паль.
3. Ступінь реалізації коротких паль у пальових фундаментах більший за ступінь реалізації довгих, що забезпечує більш ефективне їх використання. За рахунок заміни довгих паль на короткі навіть при збільшенні їх кількості досягається економія матеріалу паль на 50-60%.
4. Проведені дослідження доводять доцільність використання коротких паль при улаштуванні пальових фундаментів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування зі зміною №1 та №2. [Чинний від 2012-07-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 161 с. (Об'єкти будівництва та промислова продукція будівельного призначення).
2. Шмундяк О. Ю., М. С. Барбалюк М. С., Маєвська І. В. Результати першого етапу дослідження роботи коротких і довгих паль у стовпчастих пальових фундаментах шляхом фізичного маломасштаб-

ного моделювання. Міжнародна науково-технічна конференція Енергоефективність в галузях економіки України (2025), Вінниця, 19.11.2025 – 21.11.2025. ВНТУ, 2025. 7 с. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2025/paper/viewFile/26304/21692>.

3. Маєвська І. В., Блащук Н. В. Робота паль і ростверку у складі стовпчастих пальових фундаментів : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2023. 182 с.

4. Маєвська І. В., Блащук Н. В., Кременська Ю. О. Особливості роботи пальових кушів з коротких паль за даними числового моделювання. Основи та фундаменти: науково-технічний збірник. Вип.43. Київ : КНУБА, 2021. С.30-39.

5. Маєвська І. В. Попович М.М., Кременська Ю. О. Різниця в роботі коротких і довгих паль у складі стовпчастого пальового фундаменту за результатами фізичного моделювання. „Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві”, н/т збірник ВНТУ, Вінниця. 2022. №2(33). С. 108-118.

6. Маєвська І.В., Блащук Н.В., Шмундяк О.Ю. Аналіз ефективності використання коротких паль у складі стовпчастого пальового фундаменту. Основи та фундаменти: науково-технічний збірник. Вип.48. Київ : КНУБА, 2024. С.48-60.

Шмундяк Олександр Юрійович - аспірант, факультет будівництва цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: shmund@ukr.net.

Припоров Ростислав Ігорович - студент гр. Б-25м, факультет будівництва цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: rostikpriporov@gmail.com

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

Shmundyak Oleksandr YU — Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email : shmund@ukr.net

Rostyslav Igorovich Pryporov – student of group B-25m, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: rostikpriporov@gmail.com

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