УДК 624.15

О. Ю. Шмундяк
Р. І. Припоров
І. В. Маєвська

ВПЛИВ ДОВЖИНИ ПАЛЬ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЇХ РОБОТИ У ПАЛЬОВОМУ ФУНДАМЕНТІ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджено вплив довжини паль на несучу здатність і характер роботи пальового фундаменту за результатами математичного моделювання в програмному комплексі LIRA-SAPR 2024. Розглянуто розрахункові схеми із залізобетонними палями завдовжки 3 м і 10 м за різної кількості паль та кроку їх розташування. Оцінювання виконано з урахуванням осідання фундаменту, ступеня реалізації несучої здатності паль і частки навантаження, яку сприймає ростверк. Установлено, що для досліджених розрахункових схем скорочення довжини паль не спричиняє пропорційного зменшення загальної несучої здатності фундаменту. Виявлено залежність ефективності роботи паль від їхнього кроку та характеру перерозподілу навантаження між палями й ростверком. Отримані результати свідчать про доцільність комплексного оцінювання пальового фундаменту як єдиної системи під час вибору його конструктивних параметрів.

Ключові слова: пальовий фундамент, довжина паль, математичне моделювання, несуча здатність, ростверк, осідання, LIRA-SAPR.

Abstract

The paper investigates the influence of pile length on the bearing capacity and behavior of a pile foundation based on mathematical modeling results using the LIRA-SAPR 2024 software package. Design models featuring 3 m and 10 m long reinforced concrete piles with varying quantities and spacing arrangements are considered. The evaluation takes into account foundation settlement, the degree of utilization of pile bearing capacity, and the proportion of the load carried by the pile cap (grillage). It has been established that for the analyzed design schemes, reducing the pile length does not lead to a proportional decrease in the overall bearing capacity of the foundation. The study reveals the dependence of pile performance efficiency on their spacing and the pattern of load redistribution between the piles and the pile cap. The obtained results demonstrate the feasibility of comprehensively evaluating the pile foundation as a unified system when selecting its structural parameters.

Keywords: *pile foundation, pile length, mathematical modeling, bearing capacity, pile cap, settlement, LIRA-SAPR.*

Актуальність дослідження

Пальові фундаменти широко застосовуються в будівництві для передавання навантажень від споруд на ґрунтову основу. Їхня несуча здатність і деформативність залежать від характеристик ґрунтів, конструктивних параметрів паль, їхнього взаємного розташування та взаємодії з ростверком. У пальово-плитних фундаментах навантаження сприймається не лише палями, а й ростверком, який контактує з ґрунтом. Тому оцінювання ефективності таких фундаментів потребує врахування спільної роботи всіх їхніх елементів [1].

Одним із параметрів, що визначає характер роботи пальового фундаменту, є довжина паль. Збільшення довжини окремої палі може підвищувати її індивідуальну несучу здатність, однак не завжди забезпечує пропорційне збільшення несучої здатності фундаменту загалом. Це пояснюється взаємним впливом паль у групі, перерозподілом навантаження між палями та ростверком, а також особливостями деформування ґрунтової основи. Дослідження фундаментів із короткими палями також засвідчують важливість оцінювання їхньої роботи в складі фундаментної системи, а не лише за характеристиками окремих елементів [2].

З огляду на це, актуальним є визначення того, наскільки скорочення довжини паль впливає на загальну несучу здатність фундаменту та розподіл навантаження між його елементами. Результати такого дослідження можуть бути використані для попереднього обґрунтування конструктивних рішень і визначення раціонального співвідношення між довжиною паль, їхньою кількістю та кроком розташування.

Мета та методика дослідження

Метою роботи є визначення впливу довжини паль на несучу здатність і характер роботи пальового фундаменту за результатами математичного моделювання.

Числове дослідження виконано в програмному комплексі LIRA-SAPR 2024. Під час формування розрахункових схем палі моделювалися багатовузловими стержневими скінченними елементами з відповідними жорсткісними характеристиками, а ростверк — пластинчастими елементами. Взаємодію конструкції з ґрунтовою основою враховували за допомогою пружних елементів. Такий підхід дає змогу оцінювати загальні деформації фундаменту, розподіл зусиль між окремими палями та частку навантаження, яку сприймає ростверк. Вибір способу моделювання паль і ґрунтової основи має істотне значення для достовірності результатів розрахунку [3; 4].

Для перевірки адекватності розрахункової моделі результати числового моделювання одиночної палі зіставляли з даними польового випробування. Розрахункове осідання палі становило 8,27 мм, тоді як за результатами натурного випробування — 8,85 мм. Відносна різниця між отриманими значеннями становить близько 6,6 %, що свідчить про прийнятну відповідність моделі експериментальним даним у межах розглянутого випадку. Водночас така перевірка не виключає необхідності врахування особливостей конкретної ґрунтової основи та прийнятих передумов моделювання.

У розрахунках розглядалися забивні залізобетонні палі перерізом 0,3 × 0,3 м завдовжки 3 м і 10 м. Палі об'єднувалися залізобетонним ростверком завтовшки 0,7 м. Ґрунтову основу моделювали дрібним піском із питомою вагою 18,6 кН/м³, коефіцієнтом пористості 0,67, питомим зчепленням 2 кПа, кутом внутрішнього тертя 32° та модулем деформації 28 МПа. Розрахункові схеми відрізнялися кількістю паль, їхнім кроком і довжиною, що дало змогу дослідити вплив цих чинників на спільну роботу фундаменту.

Для оцінювання результатів використовували граничне осідання групи паль 15 мм. Окремо несучу здатність одиночної палі визначали за осідання, що дорівнює 8 мм. Аналізували загальне навантаження на фундамент, частку ростверку в його сприйнятті, ступінь реалізації несучої здатності паль у групі та ступінь реалізації несучої здатності ростверку.

Для дослідження впливу довжини паль на роботу фундаменту було сформовано розрахункові моделі з різними геометричними параметрами пальових груп. На рис. 1 наведено розрахункові моделі фундаменту з 16 палями перерізом 0,3 × 0,3 м, розташованими з кроком 3d, для двох варіантів довжини паль — 3 м і 10 м. Порівняння цих моделей дає змогу оцінити, як зміна довжини паль впливає на загальну несучу здатність фундаменту та розподіл навантаження між палями й ростверком.



Рисунок 1 — Розрахункові моделі пальового фундаменту з різною довжиною паль.

Результати дослідження та їх аналіз

Результати розрахунків показали, що збільшення довжини окремої палі не забезпечує пропорційного зростання несучої здатності фундаменту загалом. Для розглянутих розрахункових схем скорочення довжини паль із 10 м до 3 м за незмінної кількості паль супроводжувалося зменшенням загальної

несучої здатності приблизно в 1,0–1,1 раза. За незмінного кроку паль, що дорівнював 3d, відповідне зменшення становило приблизно 1,0–1,3 раза залежно від конфігурації фундаменту.

Отримані результати вказують на те, що ефективність фундаменту визначається не лише індивідуальними характеристиками паль. Важливу роль відіграють взаємодія паль між собою, передавання навантаження на ґрунт через ростверк та зміна жорсткості системи залежно від геометричних параметрів. Отже, збільшення довжини паль доцільно оцінювати з позиції приросту несучої здатності всієї фундаментної системи, а не тільки окремого конструктивного елемента.

Для фундаменту з 16 палями та кроком 3d за осідання 15 мм розрахункове граничне навантаження на систему з палями завдовжки 3 м становило близько 7070 кН. Для аналогічної схеми з палями завдовжки 10 м цей показник становив близько 6980 кН. Таким чином, у межах цієї конкретної розрахункової моделі загальна несуча здатність фундаменту з коротшими палями виявилася близькою до показника фундаменту з довшими палями.

Водночас індивідуальна несуча здатність одиночної палі завдовжки 3 м становила 540 кН, а палі завдовжки 10 м — 970 кН. Це підтверджує, що різниця в несучій здатності окремих паль не обов'язково прямо відображається на несучій здатності фундаменту в цілому. У групі відбувається перерозподіл навантаження між палями та ростверком, тому для оцінювання ефективності необхідно аналізувати роботу всієї системи.

Важливою характеристикою є частка навантаження, яку сприймає ростверк. Для фундаменту з 16 палями та кроком 3d вона становила 39,8 % за довжини паль 3 м і 37,9 % за довжини 10 м. Отже, у межах цієї схеми ростверк сприймав значну частину загального навантаження. Це підтверджує необхідність урахування його роботи під час розрахунку пальово-плитних фундаментів, оскільки нехтування внеском ростверку може призводити до неповної оцінки роботи конструкції [1].

Аналіз схем із різним кроком паль показав, що за незмінної кількості паль частка навантаження, яку сприймає ростверк, змінюється залежно від відстані між палями та їхньої довжини. Для фундаменту з дев'ятьма палями завдовжки 3 м і кроком 7d частка ростверку становила 48,9 %, тоді як для аналогічної схеми з палями завдовжки 10 м — 52,2 %. Це свідчить про взаємозалежність геометрії пальової групи та механізму передавання навантаження на ґрунтову основу.

Для детальнішого аналізу впливу геометричних параметрів пальової групи на спільну роботу паль і ростверку на рис. 2 наведено залежності частки ростверку в загальному навантаженні на фундамент від кроку паль за їх незмінної кількості, що дорівнює дев’яти. На графіках зіставлено результати фізичного та математичного моделювання для паль різної довжини. Наведені залежності дають змогу простежити зміну участі ростверку в передаванні навантаження на ґрунтову основу залежно від кроку паль.

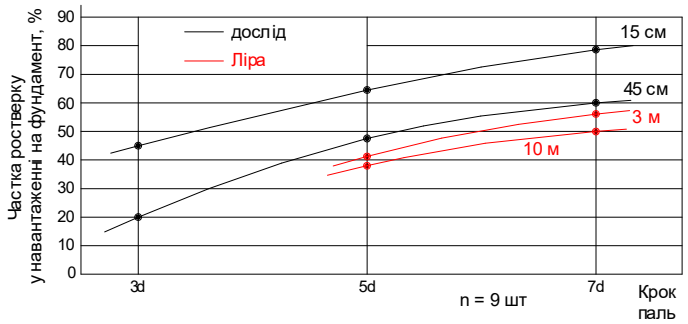

Рисунок 2 — Залежність частки ростверку в несучій здатності фундаменту від кроку паль.

Окремо проаналізовано ступінь реалізації несучої здатності паль у складі фундаменту. Для кроку 3d коротші палі демонстрували вищий ступінь реалізації своєї індивідуальної несучої здатності порівняно з довшими палями. За більшого кроку спостерігалася протилежна тенденція: ефективніше реалізовувалася несуча здатність довших паль. Це означає, що оцінювання раціональної довжини паль не може здійснюватися без урахування їхнього взаємного розташування.

Для оцінювання ефективності використання несучої здатності паль у складі фундаменту на рис. 3 наведено залежності ступеня її реалізації від кроку паль за незмінної кількості дев’ять одиниць. Ре-

зультати математичного моделювання порівняно з даними фізичних досліджень для паль різної довжини. Графіки дають змогу оцінити, як зміна відстані між палями впливає на реалізацію їхньої індивідуальної несучої здатності під час спільної роботи у фундаменті.

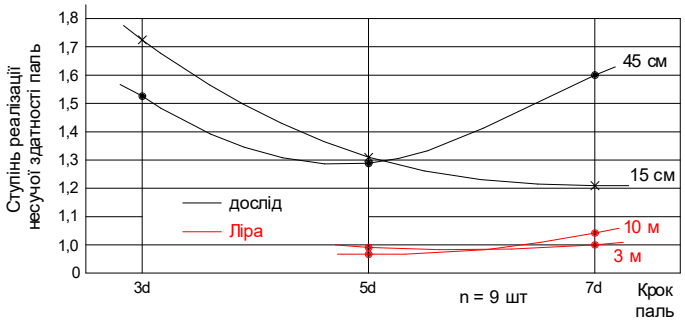

Рисунок 3 — Залежність ступеня реалізації несучої здатності паль від кроку їх розташування.

Результати математичного моделювання доцільно розглядати разом із результатами фізичного маломасштабного моделювання, у якому також досліджувалися закономірності розподілу навантаження між палями та ростверком [6]. Водночас кількісні значення показників реалізації несучої здатності можуть відрізнятися залежно від типу моделі, прийнятих характеристик ґрунту, способу представлення конструктивних елементів та умов проведення випробувань. Тому зіставлення результатів має ґрунтуватися на встановлених закономірностях і враховувати обмеження кожного методу дослідження.

Висновки

За результатами математичного моделювання встановлено, що довжина паль впливає на несучу здатність і характер роботи пальового фундаменту, проте цей вплив залежить від кількості паль, кроку їх розташування та частки навантаження, яку сприймає ростверк.

Для розглянутих розрахункових схем скорочення довжини паль із 10 м до 3 м не спричинило пропорційного зменшення загальної несучої здатності фундаменту. За незмінної кількості паль зменшення становило приблизно 1,0–1,1 раза, а за кроку 3d — близько 1,0–1,3 раза залежно від конфігурації.

Виявлено, що за малого кроку паль коротші палі характеризуються вищим ступенем реалізації власної несучої здатності, тоді як за збільшення кроку перевага за цим показником може переходити до довших паль. Крім того, ростверк сприймає суттєву частину загального навантаження, що підтверджує необхідність урахування його спільної роботи з палями.

Отже, довжину паль необхідно обирати з урахуванням роботи фундаменту як єдиної системи. Використання коротших паль може бути раціональним для окремих конфігурацій, однак остаточне рішення має ґрунтуватися на комплексній перевірці несучої здатності, осідань та інших граничних станів відповідно до чинних нормативних вимог [5].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Malviya D. K., Ansari A., Samanta M. Settlement and load sharing behavior of piled raft foundation: a review. Innovative Infrastructure Solutions. 2023. Vol. 8. Article 305. DOI: https://doi.org/10.1007/s41062-023-01272-w .

2. Garcia J. R., Albuquerque P. J. R. Numerical Analysis of Piled Raft Composed by Short Piles. Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges : proceedings of the XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. IOS Press, 2019. P. 553–560. DOI: https://doi.org/10.3233/STAL190084 .

3. Бондарева Л., Нечипоренко Д. Дослідження впливу способів моделювання паль на розподіл зусиль у пальовому фундаменті. Основи та фундаменти. 2022. Вип. 44. С. 44–54. DOI: https://doi.org/10.32347/0475-1132.44.2022.44-54 .

4. Носенко В. С., Кашоїда О. О. Визначення напружено-деформованого стану групи паль шляхом числового моделювання їх взаємодії з основою за даними польових досліджень. Основи та фундаменти. 2021. Вип. 43. С. 87–100.
5. ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення. Київ, 2018.
6. Шмундяк О. Ю., Припоров Р. І., Маєвська І. В. Вплив довжини паль на ефективність їх роботи у пальовому фундаменті на підставі фізичного маломасштабного моделювання. Інноваційні технології в будівництві : збірник матеріалів міжнародної науково-технічної конференції. Вінниця : ВНТУ, 2026. 8 с. URL: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/egeu2017/paper/view/3386 (дата звернення: 19.10.2026).

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