УДК 624.15

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

ВПЛИВ РОЗРІДЖЕНОГО РОЗМІЩЕННЯ ПАЛЬ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ СТОВПЧАСТОГО ПАЛЬОВОГО ФУНДАМЕНТУ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Наведено результати математичного моделювання роботи стовпчастих пальових фундаментів із розрідженим розміщенням паль у програмному комплексі SOFiSTiK. Проаналізовано вплив кількості та довжини паль, а також площі ростверку на навантаження, яке сприймає пальовий кущ, і частку ростверку в загальному навантаженні. Встановлено, що зменшення кількості паль за незмінної площі ростверку не спричиняє пропорційного зниження навантаження на фундамент. Збільшення площі ростверку за сталої кількості паль підвищує його участь у сприйнятті навантаження та створює передумови для застосування коротших паль.

Ключові слова: стовпчастий пальовий фундамент, розріджене розміщення паль, ростверк, короткі палі, довгі палі, SOFiSTiK, несуча здатність, математичне моделювання.

Вступ. Під час традиційного проєктування пальових фундаментів за чинними нормами [1] кількість паль часто визначають за їхньою індивідуальною несучою здатністю, а палі в межах ростверку розміщують максимально компактно (з мінімально допустимим кроком $3d$), прагнучи мінімізувати габарити та матеріаломісткість ростверку. За такого конструктивного підходу робота низького ростверку як елемента, що безпосередньо контактує з ґрунтом і передає на нього частину зовнішнього навантаження, фактично не враховується, а ростверк розглядається лише як розподільна конструкція між надземною частиною споруди та головами паль.

Водночас за компактного розташування паль у кущі виникає негативний кущовий ефект: зони ущільнення та напружено-деформовані області навколо сусідніх паль перекриваються, що знижує несучу здатність кожної окремої палі у складі групи порівняно з одиночною палею та збільшує загальне осідання фундаменту [2]. Розріджене розміщення паль у поєднанні зі збільшеною площею ростверку дає змогу послабити взаємний негативний вплив паль у ґрунтовому масиві, залучити до спільної роботи ґрунтову основу безпосередньо під підошвою ростверку та перерозподілити зовнішнє навантаження між палями й ростверком.

Метою дослідження є оцінювання впливу кількості й довжини паль та площі ростверку на ефективність роботи стовпчастого пальового фундаменту з розрідженим розміщенням паль за результатами математичного моделювання в просторовій постановці.

Методика математичного моделювання

Математичне моделювання виконано у скінченно-елементному програмному комплексі SOFiSTiK, який застосовано для оцінювання напружено-деформованого стану системи «ростверк — палі — ґрунтова основа» у межах діапазону лінійної залежності «навантаження–осідання». Розглядали пальові кущі, геометрично та конструктивно аналогічні моделям, випробуваним під час фізичного маломасштабного моделювання в масштабі 1:20. У межах чисельного експерименту варіювали кількість паль у кущі (4, 5, 9 та 12 шт.) і розміри ростверку в плані (1,8 × 1,8 м та 3,2 × 3,2 м); додатково моделювали роботу одиночних паль довжиною 3 та 10 м і ростверків відповідних розмірів як окремих фундаментів мілкого закладання для визначення еталонних показників.

Розрахункова скінченно-елементна модель передбачала монолітний залізобетонний ростверк товщиною 0,7 м із підколонником розміром 0,5 × 0,5 м та забивні залізобетонні палі квадратного поперечного перерізу 0,3 × 0,3 м із бетону класу С20/25 (В25) довжиною l = 3 м (короткі палі з відносною довжиною l/d = 10) та l = 10 м (довгі палі з відносною довжиною l/d = 33,3). Ґрунтову основу прийнято однорідною, складеною з піску середньої крупності; для ґрунту задано такі фізико-механічні характеристики: питома вага γ = 18,6 кН/м^3, коефіцієнт пористості e = 0,67, питоме зчеплення c = 2 кПа, кут внутрішнього тертя φ = 32°, модуль деформації E = 28 МПа. Для опису нелінійного деформування ґрунтового середовища використано пружно-пластичну модель Кулона–Мора. Розміри розрахункового ґрунтового масиву в плані становили 20 × 20 м за глибини 20 м, що виключало вплив граничних умов на результати розрахунку.

Зовнішнє вертикальне навантаження прикладали ступенями у вигляді зосередженої сили до верхнього торця підколонника. Розрахунок виконували до досягнення осідання фундаменту понад 40 мм [3]. Для кількісного порівняння конструктивних варіантів визначали загальне навантаження на фундамент N, поздовжні зусилля в головах окремих паль $N_{\text{р}}$, сумарне навантаження, яке сприймає підошва ростверку $N_{\text{г}}$, частку ростверку в загальному навантаженні $\alpha_{\text{г}} = N_{\text{г}} / N$, а також ступені реалізації несучої здатності паль і ростверку $k_{\text{р}}$ та $k_{\text{г}}$ за контрольного осідання куща S = 40 мм.

Результати моделювання та їх аналіз

Отримані розрахункові залежності «навантаження–осідання» мали практично лінійний характер у прийнятому робочому діапазоні навантажень, що добре узгоджується з даними експериментальних лоткових випробувань. Результати математичного моделювання підтвердили основні фізичні закономірності: низький ростверк активно залучається до сприйняття вертикального навантаження вже на початкових ступенях навантаження, а його внесок у загальну несучу здатність суттєво залежить від площі ростверку, кількості та довжини паль. Частка ростверку дещо збільшувалася зі зростанням навантаження внаслідок мобілізації тертя по бічній поверхні паль і перерозподілу контактних тисків під підошвою, проте після початкових етапів розрахунку її зміна стабілізувалася.

За результатами розрахунків у ПК SOFiSTiK зменшення кількості паль до трьох разів (з 12 до 4 шт.) за незмінної площі ростверку 1,8 × 1,8 м призводило до зниження загального навантаження, яке сприймав кущ при осіданні 40 мм, лише у 1,10–1,12 раза для коротких паль довжиною 3 м та у 1,10–1,29 раза для довгих паль довжиною 10 м. Отже, скорочення кількості паль у групі не супроводжується пропорційним зменшенням несучої здатності фундаменту, оскільки вивільнене навантаження перерозподіляється на підошву ростверку та решту паль, які працюють в умовах меншого взаємного екранування. Найбільш виражений позитивний ефект від розрідженого компонування спостерігався саме для коротких паль.

На рис. 1 наведено зіставлення залежностей навантаження на кущ від кількості паль для ростверку розміром 1,8 × 1,8 м (105 × 105 мм при фізичному моделюванні). Графік ілюструє результати фізичного моделювання та розрахунку в SOFiSTiK для різних довжин паль. Зі збільшенням кількості паль загальне навантаження на кущ зростає, однак характер зміни свідчить про те, що приріст несучої здатності від кожної додаткової палі є значно меншим за несучу здатність одиночної палі, а при розрідженому компонуванні (4 палі по кутах) визначальну роль відіграє спільна робота ростверку та ґрунтової основи.

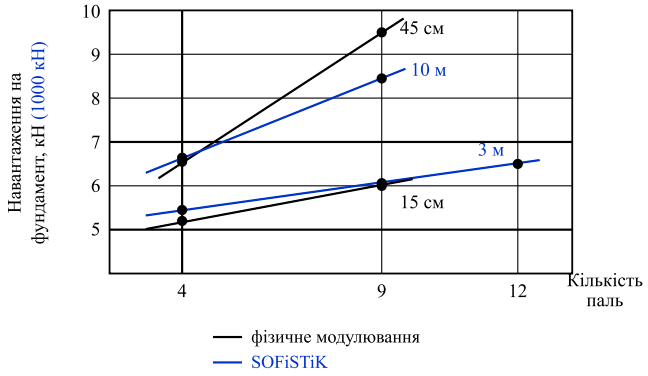


Рисунок 1 – Залежність навантаження на кущ від кількості паль для ростверку 1,8 × 1,8 м за різної довжини паль

Другий напрям чисельних досліджень стосувався оцінювання впливу площі ростверку за незмінної кількості паль (чотири палі, розташовані по кутах ростверку). Збільшення розмірів ростверку в плані з 1,8 × 1,8 м (площа $A_г$ = 3,24 м^2) до 3,2 × 3,2 м (площа $A_г$ = 10,24 м^2, тобто приблизно у 3,16 раза) суттєво підвищувало сумарне навантаження, яке сприймав комбінований фундамент при однаковому осіданні 40 мм (рис. 2). Приріст несучої здатності відбувається передусім за рахунок залучення більшого об'єму ґрунтової основи під підошвою ростверку та збільшення кроку між кутовими палями до 9d, що майже повністю усуває їх взаємний вплив.

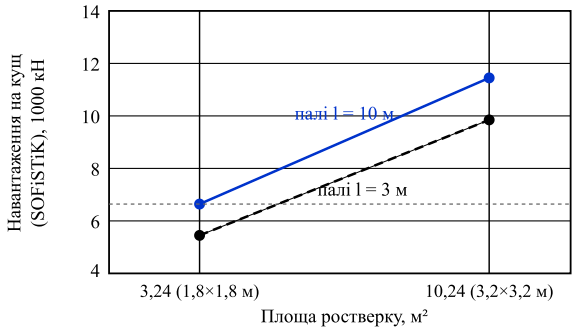


Рисунок 2 – Залежність загального навантаження на кущ із 4 паль від площі ростверку за результатами розрахунку в SOFiSTiK (при осіданні 40 мм)

Як видно з рис. 2, збільшення площі ростверку приблизно у три рази (з 3,24 до 10,24 м^2) за сталої кількості паль (4 шт.) дозволяє отримати для куща з коротких паль довжиною 3 м навантаження, що не лише компенсує зменшення довжини паль, а й перевищує несучу здатність куща з ростверком 1,8 × 1,8 м на палях довжиною 10 м. Це підтверджує технічну доцільність заміни довгих паль на короткі за умови відповідного розвитку опорної площі ростверку, що дає змогу суттєво зменшити витрати арматурної сталі, бетону паль та енерговитрати на їх занурення.

Важливим показником ефективності комбінованого фундаменту є перерозподіл зовнішнього навантаження між його конструктивними елементами. Зі збільшенням площі ростверку за сталої кількості паль неухильно зростала його частка в загальному навантаженні. За результатами математичного моделювання в SOFiSTiK для базових компонувань вона становила 50–60 %, тоді як за фізичними випробуваннями досягала 60–80 %, а для варіантів із максимально розвиненою площею ростверку та короткими палями — 70–90 %. На рис. 3 представлено зміну частки навантаження, яку сприймає ростверк, та ступеня реалізації несучої здатності ростверку залежно від схеми розміщення паль.

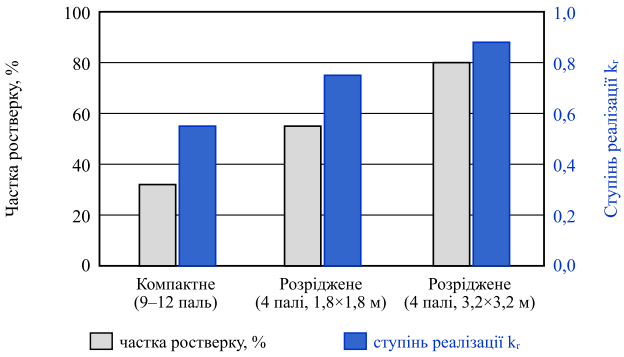


Рисунок 3 – Зміна частки навантаження на ростверк та ступеня реалізації його несучої здатності залежно від схеми розміщення паль

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення. Київ, 2018.
2. Poulos H. G. Approximate Numerical Analysis of Pile-Raft Interaction. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 1994. Vol. 18, No. 2. P. 73–92.
3. ДСТУ Б В.2.1-27:2010. Основи та фундаменти споруд. Палі. Визначення несучої здатності за результатами польових випробувань.

Кордецький Роман Олександрович — здобувач ступеня магістра кафедри промислового та цивільного будівництва, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: romankovygh@gmail.com.

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

Маєвська Ірина Вікторівна — кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com.