

ВПЛИВ СПОСОБУ ВЛАШТУВАННЯ ПАЛЬ НА ГРАНИЧНИЙ ОПІР ПАЛЬОВОГО КУЩА

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Виконане математичне моделювання роботи стовпчастого пальового фундаменту з забивних та бурових палей за допомогою програмного комплексу Plaxis 3D. Досліджена реалізація роботи ростверку і палей у складі пальового фундаменту у порівнянні з роботою одиночної палі і ростверку як фундаменту мілкового закладання в залежності від геометричних параметрів фундаменту і виду ґрунтів. Порівняний напружено-деформований стан пальових фундаментів з бурових палей з напружено-деформованим станом пальових фундаментів з забивних палей. Встановлено, що ступінь реалізації несучої здатності палі і ростверку у складі пальового фундаменту залежить не тільки від відносної довжини і кроку палей, а і від способу їх влаштування.

Врахування взаємного впливу елементів групи палей наближає ефективність роботи куща з бурових палей до роботи куща з забивних палей, що робить бурові палі конкурентоспроможними при проектуванні фундаментів під колони широкого кола споруд.

Ключові слова: стовпчастий пальовий фундамент, ростверк, забивна палія, бурова палія, перерозподіл, несуча здатність.

Annotation

Mathematical modeling of the columnar pile foundation from driving and drilling piles was performed using the Plaxis 3D software package. The realization of the work of the grid and piles as a part of the pile foundation in comparison with the work of the single pile and the grid as the foundation of shallow laying depending on geometrical parameters of the foundation and a kind of soils is investigated. The stress-strain state of pile foundations from drilling piles is compared with the stress-strain state of pile foundations from driven piles. It is established that the degree of realization of bearing capacity of a pile and a grid as a part of the pile base depends not only on relative length and a step of piles, but also on a way of their arrangement.

Taking into account the mutual influence of the elements of the group of piles brings the efficiency of the bush from drilling piles to the work of the bush from driving piles, which makes drilling piles competitive in the design of foundations for columns of a wide range of structures.

Keywords: columnar pile foundation, grid, driven piles, drilling pile, redistribution, bearing capacity.

Вступ

На теперішній час відсутні методи визначення граничного опору палейових груп, які враховують взаємодію палей між собою та з низьким ростверком через ґрунт. Проектування фундаментів у вигляді груп палей здійснюється на підставі визначення граничного опору одиночної палі [1].

Великою кількістю дослідів встановлено, що у складі стовпчастого пальового фундаменту частина навантаження передається на палі, а частина – на ростверк, навантаження між палями розподіляється нерівномірно [2 – 6]. Виявлені суттєві відмінності роботи палей у групі у порівнянні з роботою одиночної палі як з точки зору деформацій фундаменту, так і сукупного граничного опору фундаменту. Специфічна поведінка палей у складі групи, підтверджена багатьма авторами (Бахолдін Б. В., Бартоломей А. О., Голубков В. М., Дорошкевич Н. М., Знаменський В. В., Григорян А. О., Девальтовський Є. Е., Сернов В. О., Чунюк Д. Ю., Кравченко П. О., Алехин В. С.) свідчить про те, що призначення параметрів фундаменту з групи палей виходячи з параметрів одиночних палей без врахування взаємодії всіх елементів є некоректним.

Практично немає досліджень, які б висвітлювали різницю в поведінці під навантаженням палейових груп з забивних та бурових палей, тобто таких, які утворюються без виймання ґрунту і створюють навколо палей ущільнену зону, і таких, що утворюються з вийманням ґрунту.

Створення адекватних методів визначення граничного опору пальового куща з врахуванням взаємної роботи всіх елементів і способу влаштування паль може підвищити ефективність і надійність проектних рішень, тому тема дослідження є актуальною і має практичне значення.

Найбільш достовірним методом досліджень палових фундаментів є натурні випробування, але внаслідок суттєвих складнощів при їх проведенні, зазвичай користуються чисельним моделюванням, заснованим на методі скінчених елементів (МСЕ). Одним з програмних комплексів, в якому можна реально змоделювати ґрунтове середовище навколо палі є Plaxis 3D, який був застосований для досліджень.

Результати дослідження

При кафедрі БМГА ВНТУ з 2005 року ведуться дослідження сумісної роботи паль і ростверку у складі палового фундаменту як в умовах реконструкції, так і при новому будівництві. Питанням роботи кущових фундаментів з різними видами паль присвячені роботи [7 - 10].

Для аналізу впливу способу влаштування паль на напружено-деформований стан та граничний опір палового куща використаємо результати досліджень двох магістерських робіт (магістри Кримняк Я. М. [9] та Колибаба В. В. [10]), в яких було виконане чисельне моделювання роботи груп паль під колону за однаковою програмою, але для паль, що влаштовуються без виймання ґрунту та з вийманням ґрунту відповідно.

Дослідження виконувались за допомогою програмного комплексу Plaxis 3D.

В роботах [9, 10] кількість паль у кущі була прийнята 9 шт. Розглядалися забивні палі з перерізом 30х30 см та бурові палі діаметром 30 см. Варіювались довжина і крок паль.

Були проведені 2 серії моделювань для кожного з видів паль відповідно у піщаному та глинистому ґрунті.

Для першої серії моделювань розглядався пісок дрібний з характеристиками: $\gamma = 18,6 \text{ кН/м}^3$, $e = 0,67$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 32^\circ$, $E = 28 \text{ МПа}$; для другої серії суглинок тугопластичний з характеристиками: $\gamma = 18,7 \text{ кН/м}^3$, $c = 23 \text{ кПа}$, $\varphi = 21^\circ$, $\nu = 0,35$, $E = 14 \text{ МПа}$.

Програма чисельних досліджень наведена у таблиці 1.

Таблиця 1 – Програма моделювання сумісної роботи ростверку і паль у складі стовпчастого палового фундаменту (додатково варіюються вид ґрунту і спосіб влаштування палі)

Група дослідів	Довжина та поперечний розмір паль	Крок і кількість паль
1	L = 3 м, d = 0,3 м	3d, 9 шт.
2		5d, 9 шт.
3		7d, 9 шт.
4	L = 6 м, d = 0,3 м	3d, 9 шт.
5		5d, 9 шт.
6		7d, 9 шт.
7	L = 9 м, d = 0,3 м	3d, 9 шт.
8		5d, 9 шт.
9		7d, 9 шт.
10	L = 12 м, d = 0,3 м	3d, 9 шт.
11		5d, 9 шт.
12		7d, 9 шт.

Програма вивчення частки навантаження, що сприймається ростверком і палями у складі стовпчастого палового фундаменту, передбачала наступні етапи:

- створення розрахункової моделі стовпчастого палового фундаменту;
- дослідження залежності навантаження, що сприймається ростверком і палями у складі стовпчастого палового фундаменту, від довжини паль, їх кроку та характеристик ґрунту;
- побудова графіків залежності «осідання-навантаження».

При моделюванні були прийняті наступні передумови і параметри:

- модель ґрунту основи – пружно-пластична модель Кулона-Мора;

- за навантаження, що сприймається фундаментом, приймається значення зовнішнього навантаження без урахування ваги ростверку при деформаціях, що не перевищують допустимого значення 10 см;

- частка навантаження, що сприймається ростверком, визначається як добуток реактивного опору основи на площу ростверку без урахування площі паль;

- частка навантаження, що сприймається палями, визначається як різниця між загальним навантаженням на фундамент і навантаженням, що сприймається ростверком.

Додатково було проведено моделювання роботи одиночних паль різної довжини в різних ґрунтових умовах та моделювання роботи ростверку як фундаменту мілкого закладання в різних ґрунтових умовах.

При кількості паль 9 шт., кроці паль 3d ростверк мав габаритні розміри в плані 2,4 м x 2,4 м; при кроці паль 5d – 3,6 м x 3,6 м; при кроці паль 7d – 4,8 м x 4,8 м.

Несуча здатність груп паль, одиночних паль та ростверків як фундаментів мілкого закладання визначалась при деформації 100 мм.

На рис. 1 наведено графіки залежності несучої здатності стовпчастого пального фундаменту в цілому від кроку паль при довжині паль 3 м, 6 м, 9 м, 12 м для піщаних та глинистих ґрунтів. Бачимо закономірне зростання несучої здатності фундаменту при збільшенні довжини паль та їх кроку. Якісний характер зростання близький для різних видів ґрунту.

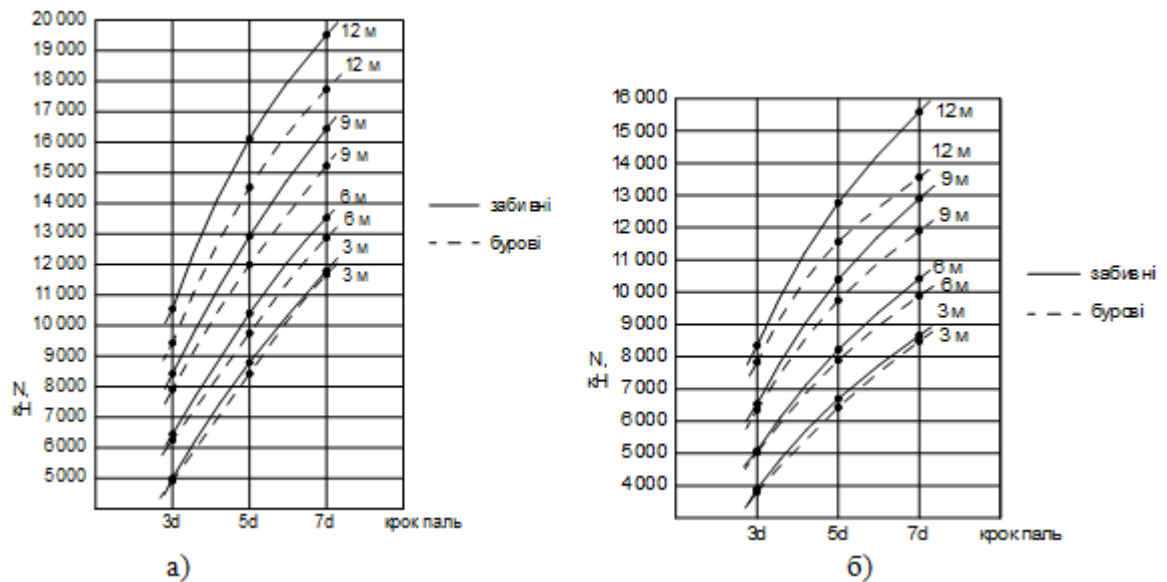


Рис. 1 – Графіки залежності несучої здатності стовпчастого пального фундаменту з забивних та бурових паль від кроку і довжини паль: а) – для піщаного ґрунту; б) – для глинистого ґрунту

З рис. 1 також можна бачити, що несуча здатність фундаментів з забивних паль більше за несучу здатність фундаментів з бурових паль, але не на стільки, як цього можна було б очікувати. Для коротких паль зменшення несучої здатності при переході до бурових паль не перевищує 5%, а для довгих паль 10-12% у піщаних ґрунтах і 10-15% в глинистих ґрунтах. Найменша різниця спостерігається при кроці паль 3d і найбільша при кроці паль 7d. Водночас несуча здатність одиночних бурових паль набагато менша за несучу здатність одиночних забивних паль в аналогічних умовах, що можна бачити з таблиці 2.

Покращення умов роботи паль у складі фундаментів можна пояснити включенням у роботу нижнього ростверку, а також причинами, дослідженими у роботах [11, 12]. Оцінка несучої здатності паль у складі фундаментів у цих роботах виконується з припущення, що за рахунок додаткових напружень по бічній поверхні і в рівні нижнього кінця паль, спричинених навантаженням від ростверку і взаємним впливом паль, створюється ефект «обтиснення» ствола палі, що збільшує тертя по бічній поверхні і опір під нижнім кінцем палі. Таким чином не тільки ґрунт під ростверком додає опору вертикальним навантаженням, а і палі у складі фундаменту краще себе реалізують.

Таблиця 2 – Співвідношення несучих здатностей одиночних забивних і бурових паль в аналогічних умовах

Вид ґрунту	Вид палі	L = 3 м	L = 6 м	L = 9 м	L = 12 м
Піщаний ґрунт	Несуча здатність одиночної забивної палі, кН	415	778	1220	1740
	Несуча здатність одиночної бурової палі, кН	240	357	467	585
	Співвідношення несучих здатностей	1,72	2,18	2,61	2,97
Глинистий ґрунт	Несуча здатність одиночної забивної палі, кН	315	480	680	910
	Несуча здатність одиночної бурової палі, кН	215	300	405	522
	Співвідношення несучих здатностей	1,46	1,60	1,68	1,74

Слід відзначити, що таке покращення умов роботи паль у складі навантаженого фундаменту спостерігається тим більше, чим більше осідання фундаменту. За дослідями Бартоломея А. О. [2], осідання паливових фундаментів зростає не різко і при осіданнях стрічкових фундаментів 2-3 см графіки «осідання-навантаження» для фундаменту перетинають графіки одиночних паль (після перетинання паля фундаменту сприймає більше навантаження ніж одична.

Для більш детального аналізу ступеню реалізації несучої здатності окремих елементів паливового фундаменту і різниці у характері цієї реалізації при застосуванні паль різних видів при аналізі результатів моделювання визначались:

- частка ростверку у навантаженні на фундамент;
- усереднене навантаження на палю у складі фундаменту для порівняння з несучою здатністю одиночної палі (ступінь реалізації несучої здатності палі);
- реактивний опір під подошвою ростверку і ступінь його реалізації у порівнянні з реактивним опором під подошвою відповідного фундаменту мілкого закладання.

На рис. 2 наведені графіки залежності частки ростверку у навантаженні на стовпчастий паливовий фундамент від довжини і кроку паль для різних видів ґрунтів і різних видів паль.

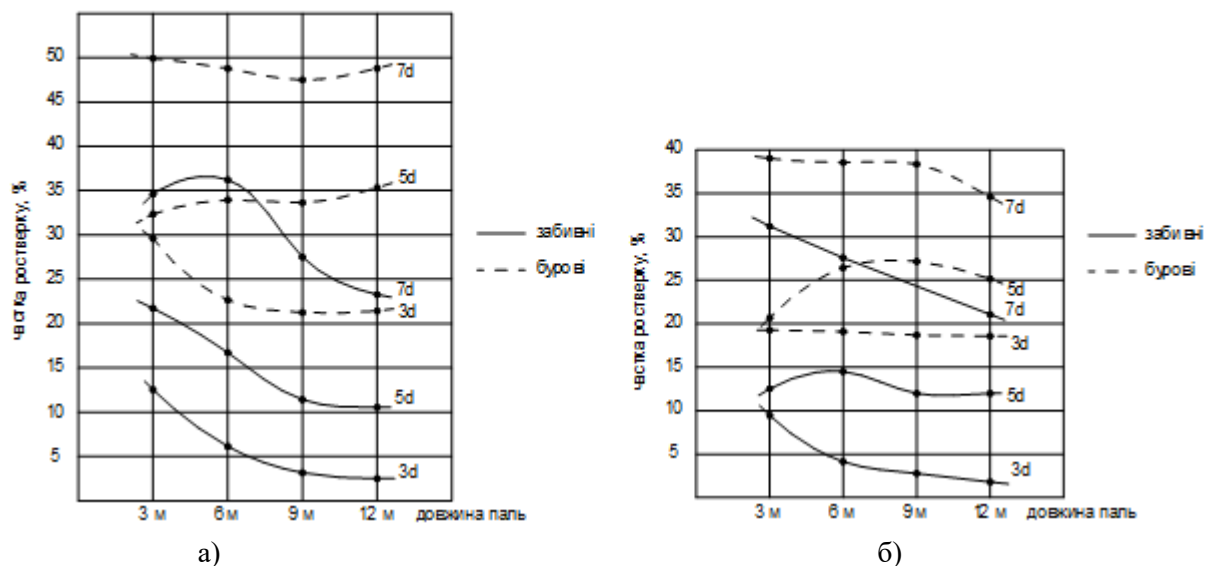


Рис. 2 – Графіки залежності частки ростверку у навантаженні на стовпчастий паливовий фундамент з забивних та бурових паль від довжини і кроку паль: а) – для піщаного ґрунту; б) – для глинистого ґрунту

За результатами чисельного моделювання видно, що частка ростверку у фундаментах з бурових паль суттєво більша (20-50% для піщаних ґрунтів та 20-40% для глинистих). Для забивних паль ця частка складає 3 -35 % для піщаних ґрунтів та 2-30% для глинистих.

Характер залежності частки ростверку від геометричних параметрів куща для забивних і бурових палей аналогічний. Частка ростверку залежить переважно від осової відстані між палями. Збільшення відстані між палями призводить до суттєвого збільшення частки ростверку, але для палейових кущів збільшення відстані між палями призводить до збільшення загальної площі ростверку, що закономірно збільшує і реактивний опір ґрунту.

При збільшенні довжини палей частка ростверку у навантаженні на фундамент знижується, але несуттєво. Характер зміни частки ростверку аналогічний при роботі фундаментів у піщаному та глинистому ґрунті.

На рис. 3 наведені графіки залежності ступеню реалізації несучої здатності палей у складі палейового фундаменту від довжини і кроку палей.

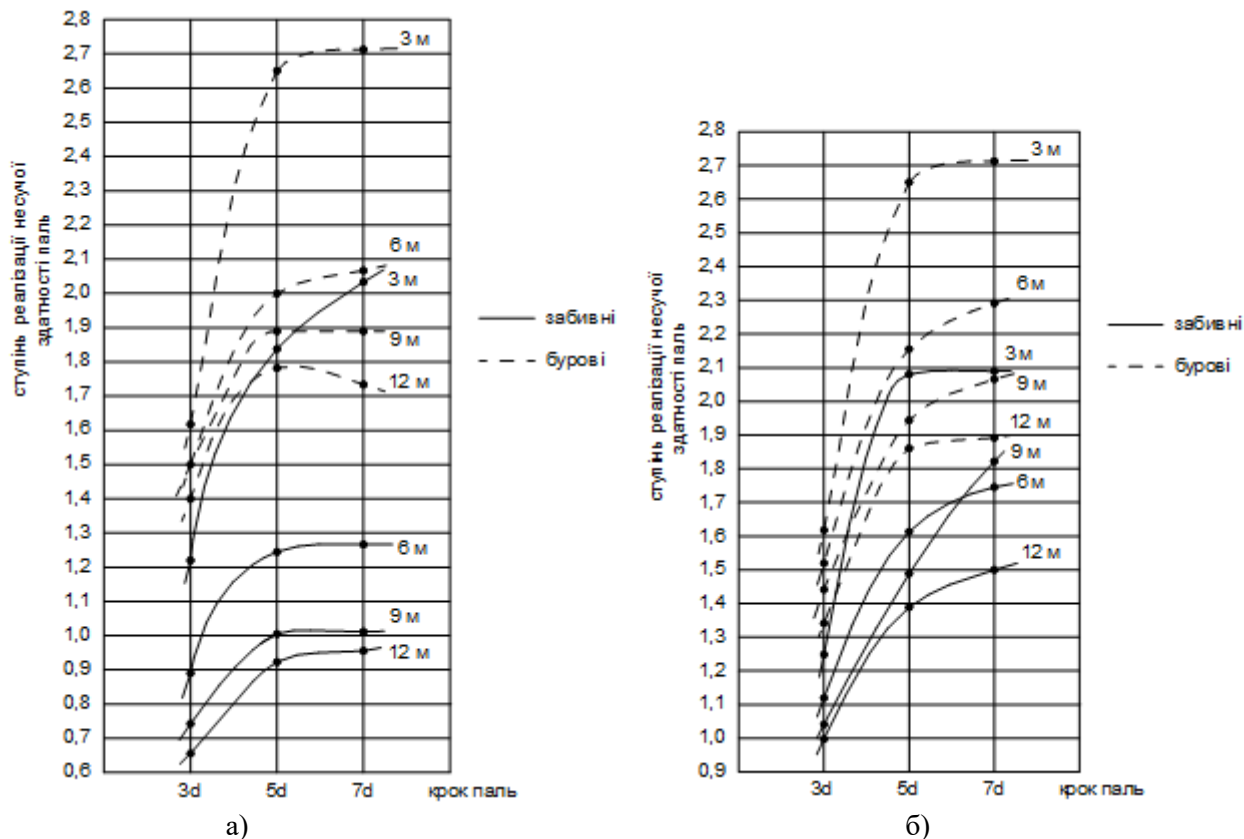


Рис. 3 – Залежність ступеню реалізації несучої здатності палей у складі фундаменту з забивних та бурових палей від кроку і довжини палей: а) – для піщаного ґрунту; б) – для глинистого ґрунту

Також, як і частка ростверку, ступінь реалізації несучої здатності палей у складі палейового фундаменту суттєво більший для фундаментів з бурових палей. Незалежно від виду ґрунту ступінь реалізації несучої здатності палей для фундаментів з бурових палей коливається в межах 1,4 – 2,7, а для забивних палей в межах 0,7 – 2,0. Для фундаментів з забивних палей при кроці 3d палей у складі куща у піщаних ґрунтах реалізують свою несучу здатність не повністю, у глинистих ґрунтах при кроці 3d підвищення несучої здатності забивних палей при роботі в групі не відбувається. Кущі з бурових палей підвищують свою несучу здатність працюючи у групі навіть при мінімальному кроці.

З рис. 3 видно, що ступінь реалізації несучої здатності палей у складі палейового фундаменту залежить від довжини і кроку палей. Реалізація несучої здатності палей у складі фундаменту зменшується із збільшенням їх довжини. При збільшенні кроку палей реалізація несучої здатності палей збільшується. Характер включення палей у роботу аналогічний при роботі у різних ґрунтах.

Навантаження, що припадає на ростверк палейового фундаменту менше у порівнянні з навантаженням на ростверк, як фундамент мілкового закладання. На рис. 4 наведено графік залежності ступеня реалізації тиску під підшвою ростверку стовпчастого палейового фундаменту від кроку палей різної довжини.

Ступінь реалізації тиску під підшвою ростверку, як і ступінь реалізації несучої здатності палей для фундаментів з бурових палей вища (в інтервалі 0,4-0,9 для фундаментів з бурових палей і 0,08-0,6 для фундаментів з забивних палей).

Як бачимо, довжина палі мало впливає на роботу ґрунту під ростверком забивних палей. Цей ґрунт краще включається у роботу при збільшенні кроку палей. Характер зміни ступеню реалізації тиску під підшоною ростверку аналогічний для фундаментів у глинистому та піщаному ґрунті.

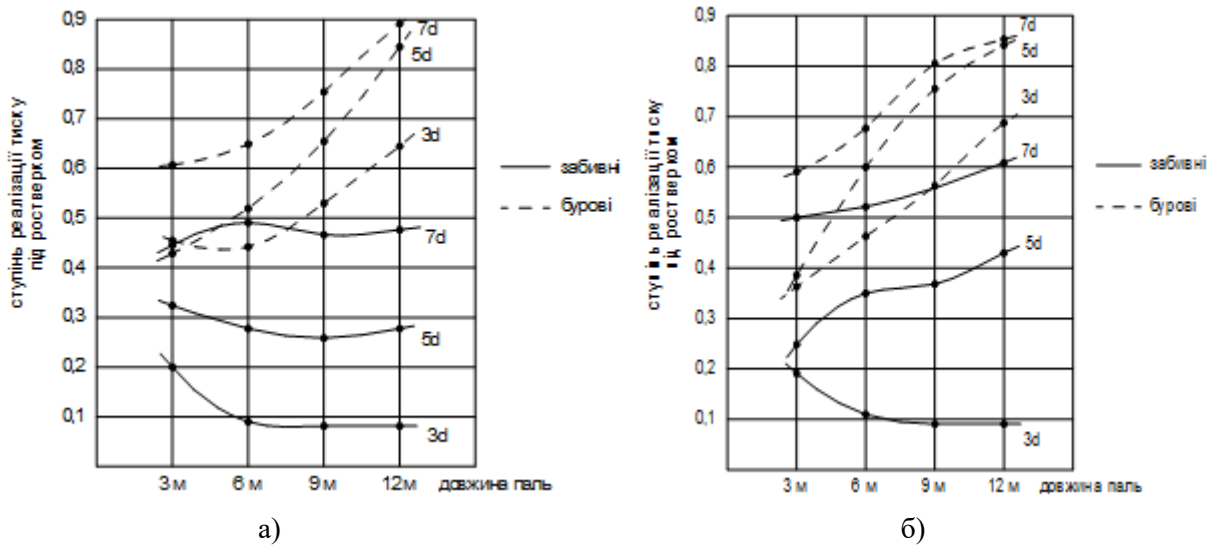


Рис. 4 – Залежність ступеню реалізації тиску під підшоною ростверку стовпчастого пального фундаменту з забивних та бурових палей від кроку палей різної довжини: а) – для піщаного ґрунту; б) – для глинистого ґрунту

Для фундаментів з бурових палей довжина палей вже суттєво впливає на роботу ґрунту під ростверком. При збільшенні довжини палей ростверк сприймає більше навантаження. Також як і для забивних палей ґрунт краще включається у роботу під ростверком при збільшенні кроку палей. Характер зміни ступеню реалізації тиску під підшоною ростверку аналогічний для фундаментів у глинистому та піщаному ґрунті.

Висновки

1. Несуча здатність пального фундаменту з низьким ростверком як правило перевищує суму несучих здатностей одиночних палей. Виключення складають куці з забивних палей при кроці 3d. При частому розміщенні палей навіть включення у роботу ростверку не забезпечує позитивний куцовий ефект, оскільки палі в таких куцах частково виключаються з роботи. Фундаменти з бурових палей завжди показують більшу несучу здатність, ніж сума несучих здатностей одиночних палей.

2. Несуча здатність низького ростверку в системі пального фундаменту:

- у палих фундаментах з бурових палей майже вдвічі більша ніж у палих фундаментах з забивних палей;
- збільшується, при збільшенні кроку між палими;
- збільшується, при збільшенні довжини палей в системі пального фундаменту;
- характер залежності частки навантаження низького ростверку при роботі фундаменту в піщаному та глинистому середовищах, в залежності від довжини та кроку палей, змінюється не суттєво.

3. Робота палей в групі з низьким ростверком суттєво відрізняється від роботи одиночної палі. По мірі зростання навантаження осереднене навантаження на палю у складі фундаменту зростає.

Ступінь реалізації несучої здатності палей у складі пального фундаменту суттєво більший для фундаментів з бурових палей у порівнянні з фундаментами з забивних палей.

Для фундаментів з забивних палей при кроці 3d палі у складі куці у піщаних ґрунтах реалізують свою несучу здатність не повністю, у глинистих ґрунтах при кроці 3d підвищення несучої здатності забивних палей при роботі в групі у порівнянні з одиночною палею не відбувається. Куці з бурових палей підвищують свою несучу здатність, працюючи у групі, навіть при мінімальному кроці.

4. Ступінь реалізації несучої здатності палей у складі пального фундаменту залежить від довжини і кроку палей. Реалізація несучої здатності палей у складі фундаменту зменшується із збільшенням їх довжини. При збільшенні кроку палей реалізація несучої здатності палей збільшується. Характер включення палей у роботу аналогічний при роботі у різних ґрунтах

5. Врахування реальної роботи палей і ростверку у складі пального фундаменту дозволяє підвищувати несучу здатність пального фундаменту в цілому і відповідно економити матеріальні та

трудові ресурси під час проведення будівельних робіт.

6. Оскільки пальові фундаменти з бурових паль значно більш інтенсивно підвищують свою несучу здатність за рахунок спільної роботи їх елементів під навантаженням у порівнянні з пальовими фундаментами з забивних паль, то при врахуванні цієї спільної роботи пальові фундаменти з бурових паль стають конкурентоспроможними з аналогічними фундаментами з забивних паль.

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. Бартоломей А. А., Омельчак И. М., Юшков Б. С. Прогноз осадок свайних фундаментов /Под ред. Бартоломея А. А.. Москва : Стройиздат, 1994. 384 с.
3. Дорошкевич Н. М., Знаменский В. В. Экспериментальные исследования деформаций групп свай при действии постоянных и кратковременных циклических нагрузок. Свайные фундаменты. ВНИИОСП, ДальНИИС, Москва : Стройиздат, 1991. С. 45-50.
4. Знаменский В. В., Рузаев А. М., Полинков И. Н. Взаимодействие низкого ростверка со сваями. Вестник МГСУ. Москва, 2008. №2. С. 48-51.
5. Козачок Л. Д. Распределения напряжений в основании моделей кустов свай. Республ. межвед. науч.-техн. сб. Основания и фундаменты. 1974. Вып.7. Київ : Будівельник. С. 47-51.
6. Девальтовский Е. Э. Исследование работы свайных фундаментов с учетом их взаимодействия с межсвайным грунтом. Дисс. ...канд. техн. наук, – Ленинград, 1982.
7. Малишев О.М., Цимбал С.О., Маєвська І.В., Блащук Н.В. Сумісна робота паль і ростверку у стовпчастому пальовому фундаменті. Тези регіональної науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців ВНТУ, м. Вінниця, ВНТУ, 2017 р. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2018/paper/viewFile/3694/31033103>.
8. 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.
9. Кримняк Я.М., Маєвська І.В. Робота забивних паль і ростверку у складі стовпчастого пальового фундаменту. Тези Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «МОЛОДЬ В НАУЦІ: ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРОБЛЕМИ, ПЕРСПЕКТИВИ (МН-2021), Вінниця, ВНТУ, 2021 URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2021/paper/view/11077>.
10. Колібаба В.В., Маєвська І.В. Робота бурових паль і ростверку у складі стовпчастого пальового фундаменту // Тези Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «МОЛОДЬ В НАУЦІ: ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРОБЛЕМИ, ПЕРСПЕКТИВИ (МН-2021), Вінниця, ВНТУ, 2021 URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2021/paper/view/11114>.
11. Алехин В. С. Взаимодействие свай в составе групп и определение предельного сопротивления основания : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02. Москва, 2020. 147 с.
12. Кравченко П. А. Оценка работы свай в составе фундаментов реконструируемых зданий : автореф. дис. ...канд. техн. наук : 05.23.02. Санкт-Петербург, 2013. 19 с.

Ірина Вікторівна Маєвська — канд. техн. наук, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця. irina.mayevskaja@gmail.com.

Irina V. Majewska - candidate. Sc., assistant professor of department of construction, architecture and municipal economy, Vinnytsia National Technical University. Vinnitsa.

Наталія Вікторівна Блащук — канд. техн. наук, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця. vernata@ukr.net.

Natalia V. Blashchuk - candidate. Sc., assistant professor of department of construction, architecture and municipal economy, Vinnytsia National Technical University. Vinnitsa.