

МЕХАНІКА ҐРУНТІВ ТА ФУНДАМЕНТИ

УДК 624.131:624.15

**ЕФЕКТ СУМІСНОЇ РОБОТИ ПАЛЬ І РОСТВЕРКУ
У СКЛАДІ СТРІЧКОВОГО ПАЛЬОВОГО ФУНДАМЕНТУ**

І. В. Маєвська, Н. В. Блащук

В статті виконано чисельне моделювання методом скінченних елементів сумісної роботи ростверка і паль у складі стрічкового пальового фундаменту, а також комплексний аналіз факторів, які впливають на частку навантаження, що сприймає ростверк. За результатами кореляційного аналізу з елементами математичного моделювання отримано функціональну залежність частки навантаження, що сприймає ростверк, яка покладена в основу методики розрахунку стрічкових пальових фундаментів з урахуванням роботи ростверка. Застосування даної методики дозволить зменшити кількість паль, що суттєво знизить вартість влаштування стрічкових пальових фундаментів.

В статье выполнено численное моделирование методом конечных элементов совместной работы ростверка и свай в составе ленточного свайного фундамента, а также комплексный анализ факторов, которые влияют на долю нагрузки, воспринимаемой ростверком. По результатам корреляционного анализа с элементами математического моделирования получена функциональная зависимость доли нагрузки, воспринимаемой ростверком, которая заложена в основу методики расчета ленточных свайных фундаментов. Использование данной методики дает возможность уменьшить количество свай, что существенно снизит стоимость устройства ленточных свайных фундаментов.

The paper made numerical simulation method of finite elements collaboration grillage and piles in the tape pile foundation and complex analysis of the factors affecting the share load perceives grillage. According to the results of the correlation analysis with elements of mathematical modeling obtained functional dependence of particle load perceives grillage belt that underlies the methodology of calculation of band pile foundations considering work grillage. Application of this method will reduce the amount of driving that significantly reduce the cost of installation tape pile foundations.

Вступ

При розрахунку допустимого навантаження на стрічковий пальовий фундамент, як правило, враховується лише робота паль, хоча чинні норми [1] регламентують враховувати роботу ростверка як реакцію ґрунтової основи під ним. Експериментальними дослідженнями ряду авторів (Бартоломея А. О., Голубкова В. М., Дорошкевич Н. М., Знаменського В. В., Кондрашова В. О., Омельчака І. М., Югая О. К., Яблочкова В. Д. та багатьох інших) встановлено, що ростверк пальового фундаменту здатний сприймати 10-30 % загального навантаження і включається в роботу при досить незначних осіданнях 2-5 мм.

Попередніми розрахунками встановлено, що враховувати роботу ростверка стрічкового пальового фундаменту як реакцію ґрунтової основи під ним не завжди коректно, робота ростверка залежить від таких факторів: від кроку і довжини паль, від інженерно-геологічних умов ґрунтової основи, від величини прикладеного навантаження.

Врахування сумісної роботи ростверка і паль стрічкового пальового фундаменту дозволить приймати більш раціональні рішення при проектуванні, що в свою чергу приведе до значної економії матеріальних та трудових ресурсів.

Для вирішення поставленої задачі необхідно виконати чисельне моделювання роботи стрічкового пальового фундаменту під навантаженням, встановити основні закономірності зміни ефекту сумісної роботи паль і ростверка від впливових факторів. На основі виявлених закономірностей розробити методику розрахунку стрічкового пальового фундаменту з урахуванням ефекту сумісної роботи ростверка і паль.

Результати чисельного моделювання стрічкового пальового фундаменту

Результатами експериментальних досліджень впливу низького ростверка на роботу пальового фундаменту різних авторів, а також власними модельними дослідженнями встановлено, що факторами, які впливають на частку навантаження, що сприймає низький ростверк пальового фундаменту є: вид паль, довжина паль, розмір поперечного перерізу палі, крок паль в поздовжньому напрямку, відстань між рядами паль підсилення, інженерно-геологічні умови будівельного майданчику. Для вивчення і оцінювання напружено-деформованого стану основи стрічкового пальового фундаменту було виконано чисельне моделювання в програмному комплексі Plaxis 3D.

Програма чисельного моделювання стрічкового пальового фундаменту передбачала такі етапи:

- створення розрахункової схеми стрічкового пальового фундаменту;
- для порівняльної оцінки виконано моделювання роботи поодиначних паль під навантаженням;
- дослідження залежності частки навантаження, що сприймає ростверк стрічкового пальового фундаменту, від довжини паль, їх виду, кроку в поздовжньому напрямку, відстані між рядами паль та характеристик ґрунту;
- побудова графіків залежності «осідання – навантаження» та порівняння отриманих результатів з теоретичними розрахунками.

При чисельному моделюванні були прийняті наступні передумови і параметри:

- модель ґрунту основи – пружно-пластична модель Кулона-Мора;
- модель стрічкового пальового фундаменту з співвідношенням сторін $L/B \geq 10$;
- палі – з поперечним розміром $d=30$ см, довжиною 3, 6, 9, 12 та 15 м;
- способи влаштування паль: без виймання та з вийманням ґрунту;
- розташування паль у два ряди;
- відстань між рядами паль $5d$, $7d$ та $9d$;
- крок паль у поздовжньому напрямку $3d$, $6d$, $9d$ та $12d$;
- розміри розрахункової області в плані 40×60 м, по глибині розмір змінний в залежності від довжини паль;
- за навантаження, що сприймає стрічковий паловий фундамент, приймається значення зовнішнього навантаження з урахуванням ваги ростверка при деформаціях, що не перевищують допустимого значення;
- частка навантаження, що сприймається ростверком, визначається як добуток реактивного опору основи на площу ростверка без врахування площі паль.

При моделюванні роботи стрічкового пальового фундаменту були враховані такі фази роботи:

- робота ґрунтової товщі без фундаментів (початкова фаза);
- влаштування стрічкового пальового фундаменту;
- робота стрічкового пальового фундаменту під дією вертикального навантаження.

В результаті проведеного чисельного моделювання було отримано залежності частки навантаження, що сприймає ростверк стрічкового пальового фундаменту, від різних факторів.

На рис. 1 наведено залежність частки навантаження, що сприймається ростверком, від кроку для бурових та забивних паль різної довжини.

Як видно з рис. 1, при збільшенні довжини палі частка навантаження, що сприймає ростверк, зменшується, при збільшенні відстані між палями – збільшується, що не одноразово підтверджувалось дослідями Голубкова В. М., Дорошкевич Н. М., Знаменського В. В., Бартоломея А. О., Сернова В. О. та інших.

З рис. 1 видно, що частка навантаження, яке сприймає ростверк, при влаштуванні бурових паль більша. Залежність частки навантаження, що сприймається ростверком, від способу влаштування паль має закономірний характер.

На рис. 2 зображено залежність частки навантаження, що сприймає ростверк стрічкового пальового фундаменту, від відстані між рядами паль довжиною 9 м.

На рис. 3 наведено мозаїки деформацій система «палі – ростверк – основа» при різному кроці паль довжиною 9 м.

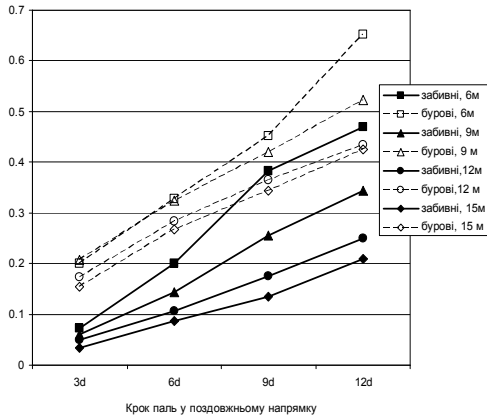


Рис. 1. Залежність частки навантаження, що сприймає ростверк, від кроку в поздовжньому напрямку для забивних і бурових паль різної довжини

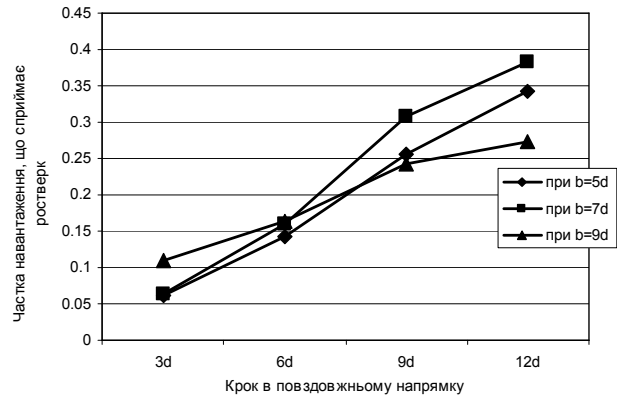


Рис. 2. Залежність частки навантаження, що сприймає ростверк стрічкового пального фундаменту, від відстані між рядами паль

З рис. 3 видно, чим більша відстань між палями, тим краще включається в роботу ґрунт в міжпальовому просторі під подошвою ростверка і тим краще реалізує свою несучу здатність по ґрунту паля. Характер розвитку деформацій ґрунту в основі фундаменту суттєво змінюється при зміні відстані між палями, реактивний опір основи під подошвою ростверка зі збільшенням відстані між палями також збільшується.

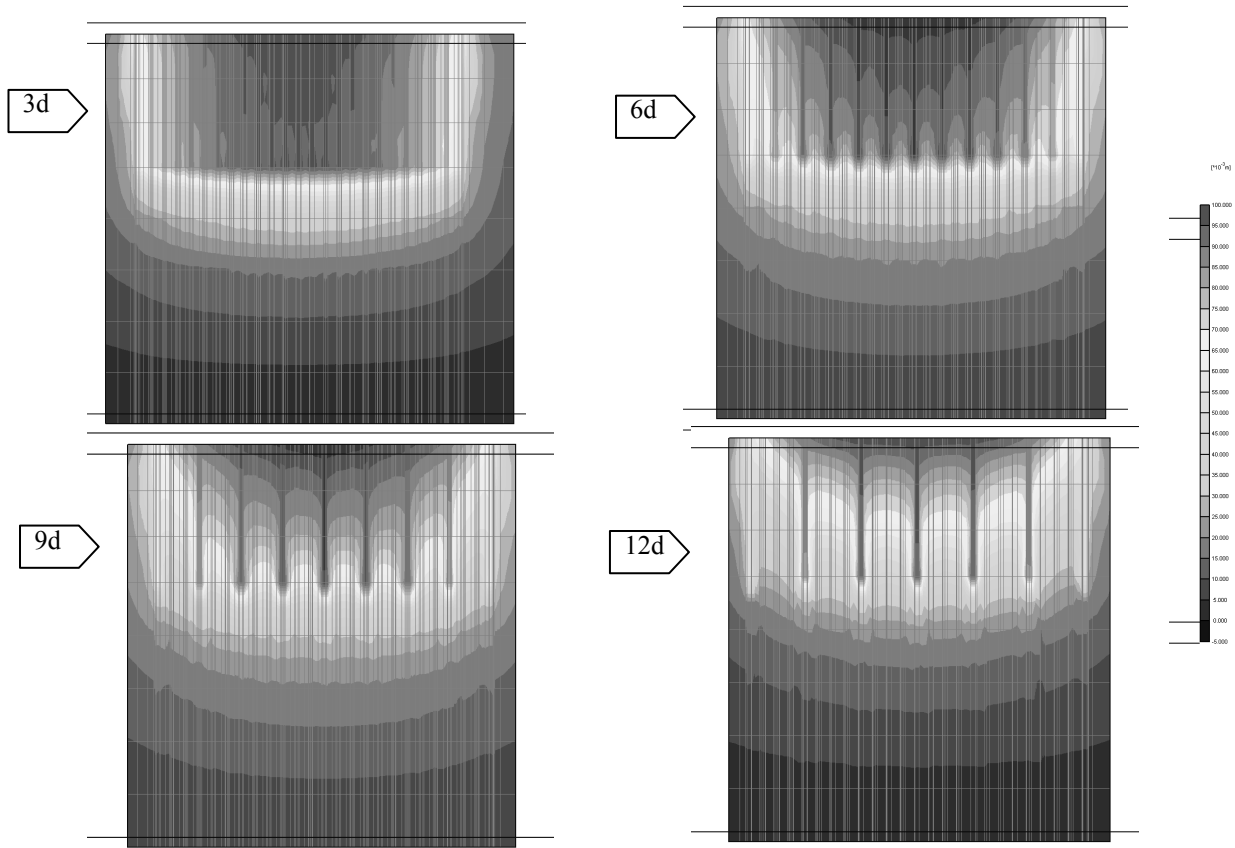


Рис. 3. Мозаїки деформацій системи «паля – ростверк – основа» при різному кроці паль у поздовжньому напрямку, довжина паль 9 м

На рис. 4 наведено мозаїки деформацій системи «паля – ростверк – основа» при різній відстані між рядами паль для паль довжиною 9 м.

З рис. 4 видно, чим більша відстань між рядами паль, тим краще включається в роботу ґрунт в міжпальовому просторі і тим краще реалізує свою несучу здатність по ґрунту паля.

Для оцінювання отриманої величини зовнішнього навантаження, що сприймається стрічковим палевим фундаментом в однорідному піщаному ґрунті (пісок середньої крупності), за результатами моделювання виконано порівняння з результатами теоретичних розрахунків.

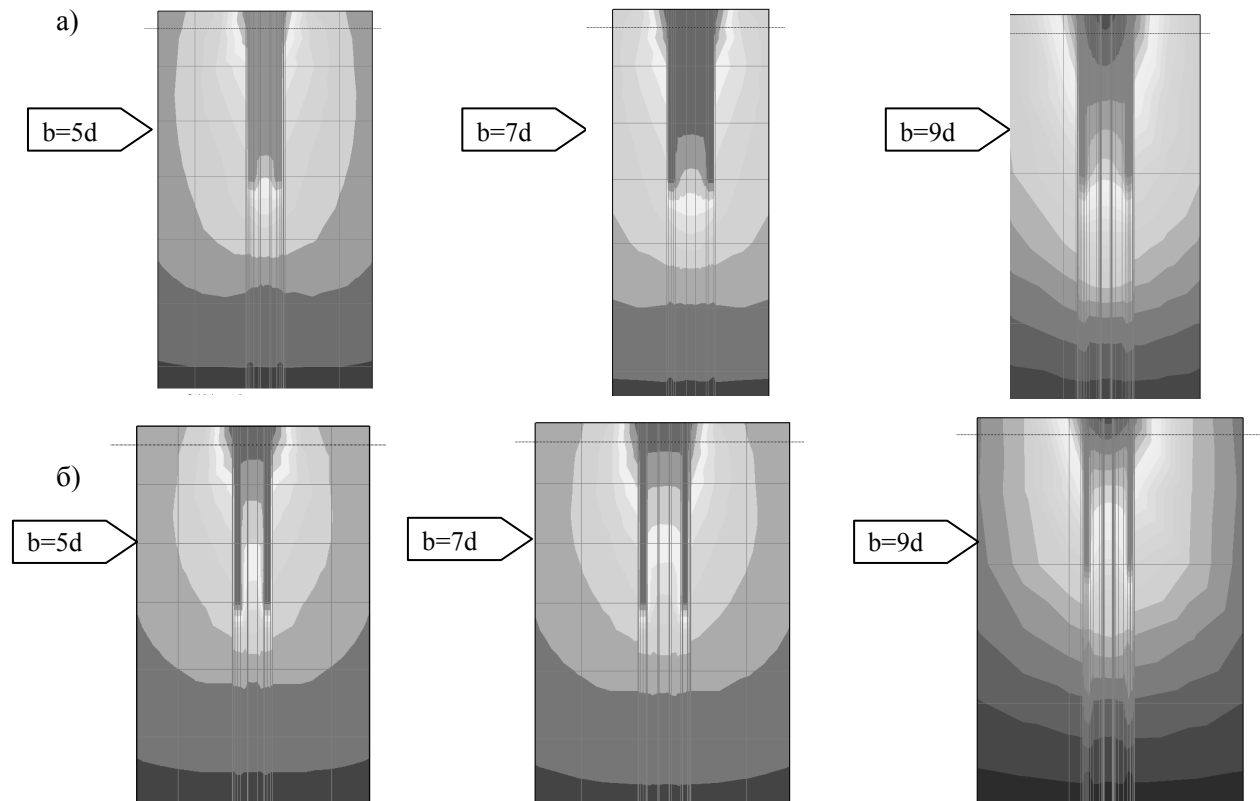


Рис. 4. Мозаїки деформацій системи «палі – ростверк – основа» при різній відстані між рядами палі для палі довжиною 9 м:
 а) при кроці в поздовжньому напрямку 3d, б) при кроці в поздовжньому напрямку 12d

В таблиці 1 наведено такі дані:

- навантаження, що сприймається стрічковим палевим фундаментом, (F_1) за результатами моделювання в ПК Plaxis 3D Foundation;
- навантаження, що сприймається стрічковим палевим фундаментом, (F_2) як алгебраїчна сума допустимих навантажень на палі, яка визначена без урахування роботи ростверка;
- навантаження, що сприймається стрічковим палевим фундаментом, (F_3), яке визначене згідно з рекомендаціями [2] за формулою (1):

$$F_3 = F_d \cdot n + A \cdot R, \quad (1)$$

де F_d – допустиме навантаження на палю, що визначається згідно з [1], кН;

n – кількість палі на 1 м п. фундаменту;

A – площа 1 м п. ростверка підсиленого фундаменту, м²;

R – розрахунковий опір ґрунту під подошвою підсиленого фундаменту за формулою Е.1 [2], кПа;

- навантаження, що сприймається стрічковим палевим фундаментом, (F_4), яке визначене згідно з рекомендаціями [3, 4 та 5] за формулою (2):

$$F_4 = F_k \cdot n + A \cdot R, \quad (2)$$

де F_k – допустиме навантаження на палю, що визначається за формулою Н.2.1 [1], але опір по боковій поверхні на глибині 1...1,5 b не враховується (до розрахунку приймається 1,25b=2,75 м) згідно з [3, 4 та 5];

- навантаження, яке сприймається стрічковим пальовим фундаментом, (F_5), що визначене як алгебраїчна сума допустимого навантаження на поодинокі палі та стрічковий фундамент мілкового закладання, що визначене моделюванням в Plaxis 3D. При визначенні F_5 несуча здатність поодиноких паль визначалась при величині $0,2 \cdot S$.

Таблиця 1

Порівняння навантаження на стрічковий пальовий фундамент, що визначене різними методами

№ п/п	Довжина, кількість і крок паль	Навантаження на стрічковий пальовий фундамент, кН/п.м								
		F_1	F_2	F_1/F_2	F_3	F_1/F_3	F_4	F_1/F_4	F_5	F_1/F_5
1	$l=3$ м, 50шт, 3d	1394	726	1,92	1407	0,99	1165	1,20	2128	0,66
2	$l=3$ м, 26шт, 6d	1324	378	3,50	1090	1,21	962	1,38	1665	0,80
3	$l=3$ м, 16шт, 9d	1264	232	5,45	952	1,33	873	1,45	1471	0,86
4	$l=3$ м, 12шт, 12d	1239	174	7,12	899	1,38	839	1,48	1394	0,89
5	$l=6$ м, 50шт, 3d	1694	1131	1,50	1814	0,93	1566	1,08	2624	0,65
6	$l=6$ м, 26шт, 6d	1602	588	2,72	1301	1,23	1171	1,37	1922	0,83
7	$l=6$ м, 16шт, 9d	1514	362	4,18	1082	1,40	1001	1,51	1630	0,93
8	$l=6$ м, 12шт, 12d	1424	271	5,25	997	1,43	935	1,52	1513	0,94
9	$l=9$ м, 50шт, 3d	2092	1670	1,25	2344	0,89	2097	1,00	3215	0,65
10	$l=9$ м, 26шт, 6d	1969	869	2,27	1576	1,25	1447	1,36	2229	0,88
11	$l=9$ м, 16шт, 9d	1824	535	3,41	1250	1,46	1171	1,56	1819	1,00
12	$l=9$ м, 12шт, 12d	1694	401	4,22	1122	1,51	1062	1,60	1655	1,02
13	$l=12$ м, 50шт, 3d	2544	1964	1,30	2650	0,96	2403	1,06	3751	0,68
14	$l=12$ м, 26шт, 6d	2389	1021	2,34	1736	1,38	1606	1,49	2508	0,95
15	$l=12$ м, 16шт, 9d	2224	628	3,54	1350	1,65	1269	1,75	1991	1,12
16	$l=12$ м, 12шт, 12d	2079	471	4,41	1198	1,74	1136	1,83	1784	1,17
17	$l=15$ м, 50шт, 3d	3024	2416	1,25	3105	0,97	2851	1,06	4194	0,72
18	$l=15$ м, 26шт, 6d	2889	1256	2,30	1973	1,46	1839	1,57	2739	1,05
19	$l=15$ м, 16шт, 9d	2799	773	3,62	1495	1,87	1412	1,98	2132	1,31
20	$l=15$ м, 12шт, 12d	2439	580	4,21	1307	1,87	1243	1,96	1890	1,29

Як видно з табл. 1 навантаження, що сприймається стрічковим пальовим фундаментом в однорідних піщаних ґрунтах, визначене чисельним моделюванням (F_1) найбільше наближається до значень, що визначені за рекомендаціями (F_4) [3, 4 та 5], при кроці паль 3d, при більшому кроці різниця зростає.

Навантаження, що сприймається стрічковим пальовим фундаментом, (F_2), визначене без урахування роботи ростверка, занижене, що було зауважено рядом авторів.

Просте підсумування допустимого навантаження на палі і стрічку мілкового закладання (F_3 та F_5) не доцільно використовувати взагалі, оскільки при кроці 3d отримуємо несучу здатність, яка перевищує фактичну.

Аналіз результатів експериментальних та теоретичних досліджень, що проведені до теперішнього часу в країнах СНД та за кордоном, а також моделювання методом скінченних елементів дозволив виявити основні закономірності взаємодії системи «палі – ростверк – основа» для стрічкового пальового фундаменту.

В подальшому було опрацьовано результати чисельного моделювання методами математичної статистики та за допомогою програмного комплексу MatLab та встановлено функціональна залежність частки навантаження, що сприймає ростверк у складі стрічкового пальового фундаменту.

Методика розрахунку стрічкових пальових фундаментів з урахуванням роботи ростверка

На основі виявлених закономірностей у роботі стрічкового пальового фундаменту та отриманої функціональної залежності для визначення частки навантаження, що сприймає

ростверк, було розроблено методику розрахунку стрічкових пальових фундаментів з урахуванням роботи ростверка.

Область застосування методики:

- під подошвою ростверка розташований ґрунт з модулем деформації $E > 5$ МПа;
- палі за характером роботи в ґрунті висячі;
- палі, що влаштовані з вийманням та без виймання ґрунту;
- дворядове розташування паль.

Послідовність розрахунку.

1. Оцінювання інженерно-геологічних умов будівельного майданчика та визначення навантаження на фундамент.

2. Вибір типу та довжини паль, способу їх улаштування, визначення геометричних параметрів стрічкового пальового фундаменту. В першому наближенні приймається кількість і крок паль без врахування роботи ростверка.

3. Визначення ефекту сумісної роботи ростверка і паль у складі стрічкового пальового фундаменту (α) за формулою:

$$\alpha = \left(\frac{1}{1 + \frac{\pi \cdot l^2 \cdot (f_0/E)}{(a \cdot b)}} \right) \cdot e^{-(l/d)^{0.75} / (a/d)}, \quad (3)$$

де l – довжина палі, м;

f_0 – початковий опір по боковій поверхні (опір по боковій поверхні в верхній зоні довжини палі);

a – крок паль уздовж ряду, м;

b – відстань між рядами паль, м;

d – поперечний розмір палі, м;

E – наведений модуль деформації ґрунту, що визначається згідно з П.1.3 [1]:

$$E = (1 - b)k_f E_f + k_p b E_p, \quad (4)$$

де b – коефіцієнт, який визначає частину навантаження, що передається нижнім кінцем палі, визначають за табл. П.1.2 [1];

E_f – осереднений у межах довжини палі модуль деформації ґрунтової основи, кПа, що контактує з бічною поверхнею, визначається за формулою П.1.4 [1];

E_p – модуль деформації під нижнім кінцем палі, кПа, визначається в межах одного діаметра вище і чотирих нижче позначки нижнього кінця палі;

k_f – коефіцієнт умов роботи ґрунту вздовж бічної поверхні палі, визначають згідно з П.1.5 [1];

k_p – коефіцієнт умов роботи ґрунту під нижнім кінцем палі, визначають згідно з П.1.5 [1].

4. Визначення допустимого навантаження на групу паль:

$$F_{паль} = n \cdot \zeta_p \cdot N, \quad (5)$$

де n – кількість паль, шт.;

ζ_p – коефіцієнт, що враховує ступінь реалізації несучої здатності палі по ґрунту у складі пальового фундаменту, залежить від ґрунтових умов, довжини та відстані між палями. При визначенні допустимого навантаження на групу паль при поздовжньому кроці палі $a = 3d$ коефіцієнт $\zeta_p = 0,65$ для піщаних та $\zeta_p = 0,85$ для глинистих ґрунтів, а при $a > 3d$ приймається $\zeta_p = 1$;

N – допустиме навантаження на одиночну палю, що визначається згідно з [1].

5. Визначення допустимого навантаження на стрічковий пальовий фундамент:

$$F_{\Sigma} = \frac{F_{паль}}{1 - \alpha} \quad (6)$$

6. Збільшення повздовжнього кроку паль і визначення ефекту сумісної роботи ростверка і паль у складі стрічкового пальового фундаменту (п.2). За потребою можна варіювати також довжиною палі.

7. Вибір оптимального варіанту, тобто такого, де робота ростверка максимально використовується (оптимальний крок і оптимальна довжина паль).

Застосування методики розрахунку стрічкових пальових фундаментів з урахуванням роботи ростверка дозволить зменшити кількість паль та досягти більш економічних рішень.

Висновки

- Виконано комплексний аналіз факторів, які впливають на частку навантаження, що сприймає ростверк у складі стрічкового пальового фундаменту. Виявлено, що найбільш впливовими факторами є: крок паль у поздовжньому напрямку, відстань між рядами паль, довжина та спосіб улаштування паль, ґрунтові умови.
- Розроблена методика розрахунку стрічкових пальових фундаментів з врахуванням роботи ростверка, яку можна застосовувати для практичних розрахунків.
- Розрахунок за даною методикою дозволяє зменшити кількість паль у складі стрічкового пальового фундаменту за рахунок врахування роботи ростверка, при тому, що рекомендовані величини збільшення частки ростверка надані з певною обережністю.

Використана література

1. Основи та фундаменти будівель та споруд. Основні положення проектування : ДБН В.2.1-10-2009. Зміна 1 – [Чинні від 2011-07-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011 – 55 с. – (Державні будівельні норми України).
2. Підсилення фундаментів будівель та споруд, побудованих на лесових ґрунтах, бурин'єкційними палями : ВБН В.2.1-1-97. [Чинні від 1998-05-01]. – К. : Українська державна корпорація по виконанню монтажних і спеціальних будівельних робіт, 1997 – 44 с. – (Відомчі будівельні норми України).
3. Матеріали семінару: «Основи, фундаменти та підземні споруди. Проектування, будівництво та надійна та безпечна експлуатація». м. Київ, 25-26 лютого 2009 р.
4. Рекомендации по расчету свайных фундаментов с несущими ростверками : Р 5.01.015.05 – [Срок действия: с 1.01.2006 г. по 1.01.2011г.]. – Минск: Научно-проектно-производственное республиканское унитарное предприятие «СТРОЙТЕХНОРМ», 2005. – 24 с.
5. Сернов В. А. Совместная работа свай с ростверками в песчаных и глинистых грунтах: дис. на соискание научной степени канд. техн. наук: 05.23.02 / Сернов Вячеслав Александрович. – Минск, 2010. – 181 с.

Маєвська Ірина Вікторівна – к.т.н., доцент кафедри промислового та цивільного будівництва Вінницького національного технічного університету.

Блащук Наталя Вікторівна – к.т.н., старший викладач кафедри промислового та цивільного будівництва Вінницького національного технічного університету.