

І. В. Маєвська, канд. техн. наук, доц.;  
В. О. Попов, канд. техн. наук, доц.;  
Н. В. Блащук; К. О. Чорноскутова

## КОРЕЛЯЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЧАСТКУ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ СТАРОГО СТРІЧКОВОГО ФУНДАМЕНТУ У СКЛАДІ НОВОГО ПІСЛЯ ПІДСИЛЕННЯ ПАЛЯМИ

*Виконано комплексний аналіз факторів, які впливають на несучу здатність системи паля–ростверк–основа для стрічкових фундаментів мілкового закладання підсилених палями. За результатами кореляційного аналізу з елементами математичного моделювання отримано функціональну залежність частки несучої здатності наявного стрічкового фундаменту мілкового закладання у складі підсиленого.*

### Вступ

В переважній більшості випадків, коли виконується підсилення стрічкових фундаментів мілкового закладання, застосовуються палі. Чинними нормами [1–2] вимагається передача на палі підсилення додаткового зовнішнього навантаження. Як показали результати експериментальних досліджень А. А. Бартоломея [3], В. Н. Голубкова [4], В. А. Сернова [5] та інших в залежності від ґрунтових умов і геометричних параметрів підсиленого фундаменту частка несучої здатності існуючого фундаменту в складі підсиленого може сягати 50 %, що перевищує рекомендоване нормами значення. Врахування спільної роботи існуючого стрічкового фундаменту і паль підсилення дозволить приймати раціональніші рішення в процесі проектування, що, в свою чергу, забезпечить значну економію матеріальних та трудових ресурсів.

Для розв'язання поставленої задачі потрібно виконати моделювання методом скінчених елементів спільної роботи існуючого фундаменту та паль підсилення та виконати кореляційний аналіз даних з метою отримання функціональної залежності несучої здатності існуючого фундаменту від низки факторів.

Попередніми модельними дослідженнями спільної роботи існуючого фундаменту і паль підсилення, [6] встановлено, що факторами, які впливають на частку несучої здатності існуючого фундаменту, що підсилюється палями, є:

- |   |  |
|---|--|
| — довжина паль ( $l_j$ ), м;                      | — розмір поперечного перерізу палі ( $d$ ), м; |
| — крок паль в поздовжньому напрямку ( $a_i$ ), м; | — модуль деформації ґрунту ( $E$ ), МПа        |
| — відстань між рядами паль підсилення ( $b$ ), м; |  |

### Моделювання спільної роботи існуючого фундаменту мілкового закладання і паль підсилення методом скінчених елементів

Моделювання напружено-деформованого стану системи паля—ростверк—основа виконано з різними параметрами основи та змінному кроці і довжині паль підсилення методом скінчених елементів за умов розв'язання просторової задачі засобами програмного комплексу Plaxis 3D Foundation, який дає можливість аналізувати роботу навколопальнової основи за різними лінійними і нелінійними моделями ґрунтового середовища.

Розрахунки виконувались з такими передумовами і параметрами:

- модель ґрунту основи — пружно-пластична модель Кулона–Мора;
- модель стрічкового фундаменту мілкового закладання зі співвідношенням сторін  $L/B \geq 10$  (рис. 1);

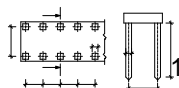


Рис. 1. Модель ростверку

ндаменту бралось значення зовнішнього навантаження з урахуванням ваги ростверку, коли величина осідання 0,1 м;

— несуча здатність ростверку визначалась як добуток реактивного опору основи на площу ростверку без урахування площі паль.

В таблицях подані результати моделювання роботи підсиленого палями стрічкового фундаменту мілкого закладання.

- палі підсилення — призматичні діаметром  $d = 30$  см, довжиною 3, 6, 9, 12 та 15 м;
- розташування паль підсилення у два ряди з різних сторін наявного фундаменту;
- відстань між рядами паль підсилення  $5d, 7d$  та  $9d$ ;
- крок паль у поздовжньому напрямку  $3d, 6d, 9d$  та  $12d$ ;
- розміри розрахункової області в плані  $40 \times 60$  м, по глибині розмір змінний в залежності від довжини паль;
- за несучу здатність підсиленого фу-

Таблиця 1

**Результати моделювання роботи підсиленого палями стрічкового фундаменту**

Різний поздовжній крок і різна довжина паль					
№	$a_i$ , м	$l_i$ , м	$F_i$ , кН/м	$F_{pi}$ , кН/м	$F_i/F_{pi}$
1	0,9	3	1394	266	0,191
2	1,8	3	1324	489	0,369
3	2,7	3	1264	705	0,558
4	3,6	3	1239	723	0,583
5	0,9	6	1694	124	0,073
6	1,8	6	1602	320	0,200
7	2,7	6	1514	578	0,382
8	3,6	6	1424	668	0,469
9	0,9	9	2092	128	0,061
10	1,8	9	1969	283	0,143
11	2,7	9	1824	464	0,255
12	3,6	9	1694	581	0,343
13	0,9	12	2544	128	0,050
14	1,8	12	2389	256	0,107
15	2,7	12	2224	391	0,176
16	3,6	12	2079	521	0,250
17	0,9	15	3024	99	0,033
18	1,8	15	2889	250	0,087
19	2,7	15	2799	374	0,134
20	3,6	15	2439	513	0,210

Палі С9-30 з різним $E$ , МПа							
№	$a_i$ , м	$a_i/d_i$	$l_i/d_i$	$E$ , МПа	$F_i$ , кН/м	$F_{pi}$ , кН/м	$F_i/F_{pi}$
1	3,6	12	30	5	447	82	0,183
2	2,7	9	30	5	524	62	0,118
3	1,8	6	30	5	569	44	0,077
4	0,9	3	30	5	600	27	0,045
5	3,6	12	30	10	834	200	0,240
6	2,7	9	30	10	939	150	0,160
7	1,8	6	30	10	1038	104	0,100
8	0,9	3	30	10	1100	47	0,043
9	3,6	12	30	15	1090	264	0,242
10	2,7	9	30	15	1206	202	0,168
11	1,8	6	30	15	1293	140	0,108
12	0,9	3	30	15	1357	66	0,049
13	3,6	12	30	20	1293	387	0,299
14	2,7	9	30	20	1379	293	0,212
15	1,8	6	30	20	1511	193	0,128
16	0,9	3	30	20	1601	95	0,059
17	3,6	12	30	32	1694	581	0,343
18	2,7	9	30	32	1824	464	0,254
19	1,8	6	30	32	1969	282	0,143
20	0,9	3	30	3230	2092	128	0,061

Примітки.  $F_i$  — несуча здатність 1 п. м підсиленого фундаменту, кН/м;  $F_{pi}$  — несуча здатність 1 п. м ростверку підсиленого фундаменту, кН/м;  $F_i/F_{pi}$  — частка несучої здатності ростверку у складі підсиленого фундаменту.

**Частка несучої здатності ростверку з різним значенням модуля деформації під підшовою і нижнім кінцем палі**

Палі $L = 9$ м, $d = 0,3$ м, крок в поперечному напрямку $5d$ ; під нижнім кінцем палі ґрунт з $E = 32$ МПа	$a_i$ , м	Модуль деформації під підшовою ростверку $E$ , МПа			
		5	10	20	32
	0,9	0,021	0,031	0,045	0,061
	1,8	0,055	0,078	0,112	0,143
	2,7	0,084	0,131	0,185	0,254
	3,6	0,133	0,213	0,291	0,343

**Кореляційний аналіз з елементами математичного моделювання**

До отриманих за результатами числового моделювання даних слід додати граничні умови, які впливають з фізичної сутності роботи фундаментів мілкого закладання, підсиленних палями.

1. У граничному випадку, коли довжина палі  $l_i \rightarrow 0$  (палі відсутні),  $F_{di} \rightarrow 0$ ;  $F_{pi} \rightarrow F_i$ ;  $F_{pi}/F_i \rightarrow 1$ , де  $F_{di}$  — сумарна несуча здатність палі підсилення.
2. У граничному випадку, коли крок між палями  $a_i \rightarrow 0$  (палі перетворюються у фундаментні стінки глибокого закладання),  $F_{di} \rightarrow 1$ ;  $F_{pi} \rightarrow 0$ ;  $F_{pi}/F_i \rightarrow 0$ .
3. У граничному випадку, коли палі значно віддалені одна від одної,  $a_i \rightarrow \infty$ ;  $F_{di} \rightarrow 0$ ;  $F_{pi} \rightarrow F_i$ ;  $F_{pi}/F_i \rightarrow 1$ .
4. У граничному випадку, коли паля дуже довга  $l_i \rightarrow \infty$ ,  $F_{di} \rightarrow F_i$ ;  $F_{pi} \rightarrow 0$ ;  $F_{pi}/F_i \rightarrow 0$ .

З аналізу результатів моделювання систем паля—ростверк—основа, виконаних з використанням скінченних елементів, впливає, що за умови дотримання інженерних рекомендацій під час проектування підсилення стрічкового фундаменту мілкого закладання палями, найістотніше впливають на частку несучої здатності ростверків ( $F_{pi}/F_i$ ) у системі паля—ростверк—основа такі параметри:  $a_i/d_i$ ;  $b_i/d_i$ ;  $l_i/d_i$ ;  $E_i$ ;  $f_{0i}$ , де  $f_{0i}$  — початковий питомий опір по боковій поверхні палі, МПа.

Таким чином, для стрічкових фундаментів мілкого закладання, підсиленних палями, частка несучої здатності ростверку у загальній несучій здатності системи буде являти собою функціонал вигляду

$$F_{pi}/F_i = \Phi(a_i/d_i, l_i/d_i, E_i, f_{0i}). \tag{1}$$

Для отримання характеру самого функціоналу (1) методами, викладеними у [7—9], і засобами програмного комплексу MATLAB, на основі багатofакторного системного аналізу напружено-деформованого стану моделей побудована сім'я поверхонь  $\Phi_1(a_i/d_i, l_i/d_i, E_1, f_{01})$ ,  $\Phi_2(a_i/d_i, l_i/d_i, E_2, f_{02})$  із фіксованими фізико-механічними параметрами основи та змінними геометричними параметрами пально-ростверкової системи. Поверхні побудовані з урахуванням граничних умов. Ізолінії однієї з таких поверхонь в проекції на площини « $F_{pi}/F_i - l_i/d_i$ » та « $F_{pi}/F_i - a_i/d_i$ » зображені, відповідно, на рис. 2 і 3.

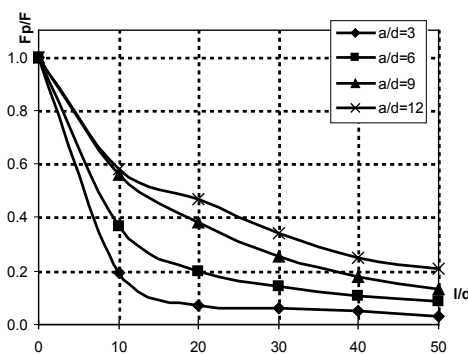


Рис. 2. Ізолінії поверхні в проекції на площину « $F_{pi}/F_i - l_i/d_i$ »

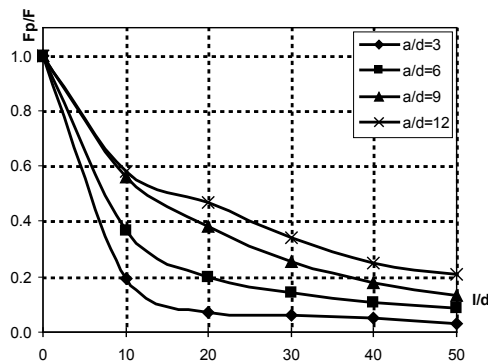


Рис. 3. Ізолінії поверхні в проекції на площину « $F_{pi}/F_i - a_i/d_i$ »

У подальшому числовому аналізі виявлено, що функціонал (1) є добутком двох функціоналів, перший з яких залежить виключно від геометричних параметрів системи паля—ростверк, а інший — від ґрунтових умов та геометричних параметрів:

$$\Phi(a_i/d_i, l_i/d_i, E_i, f_{0i}) = k_1 \Pi(a_i/d_i, l_i/d_i) P(E_i, f_{0i}, l_i/d_i, a_i/d_i, b_i/d_i); \quad (2)$$

$$\Pi(a_i/d_i, l_i/d_i) = \exp(-((l_i/d_i) \wedge 0,75)/(a_i/d_i)); \quad (3)$$

$$P(E_i, f_{0i}, l_i/d_i, a_i/d_i, b_i/d_i) = \frac{1}{1 + k_2 \pi (f_{0i}/E_i) \frac{(l_i/d_i)^2}{a_i/d_i \cdot b_i/d_i}}, \quad (4)$$

де  $k_1$  і  $k_2$  — коефіцієнти пропорційності.

Отриманий математичний вираз (3) для  $\Pi(a_i/d_i, l_i/d_i)$  на всьому проміжку області визначення  $a_i/d_i$  та  $l_i/d_i$  окрім діапазону з відносно малим кроком між палями  $a_i/d_i < 4$  дає високу точність (похибка не перевищує 5 %) у порівнянні з експериментальними даними.

Отриманий математичний вираз (4) для  $P(E_i, f_{0i}, l_i/d_i, a_i/d_i, b_i/d_i)$  на всьому проміжку області визначення  $a_i/d_i, b_i/d_i, l_i/d_i$ , та для всіх  $E_i$  і  $f_{0i}$ , окрім випадків, коли крок між палями відносно малий  $a_i/d_i < 4$ , дає достатню збіжність із експериментальними даними (похибка не перевищує 10 %). В загальному випадку функція (4) є коефіцієнтом пропорційності, який тим ближче до 1, чим жорсткішим є ґрунт.

Таким чином, для визначення частки несучої здатності ростверку у системі паля—ростверк—основа за умови однорідної ґрунтової основи, можна скористатись формулою, отриманою математичними перетвореннями виразів (2—4):

$$\frac{F_p}{F} = k_1 \left( 1 / \left( 1 + \frac{k_2 \pi l^2 (f/E)}{ab} \right) \right) e^{-(l/d)^{0,75}/(a/d)}. \quad (5)$$

За математичною залежністю (5) для конкретних ґрунтових умов побудовано математичну поверхню для  $b = 5d$ . Отримані результати у порівнянні з числовим моделюванням методом скінчених елементів у програмі Plaxis проілюстровані в проекції на площину « $F_{pi}/F_i - l_i/d_i$ » на рис. 4. Похибка для всього діапазону, окрім  $a_i/d_i < 4$  не перевищувала 10 %.

Подібна перевірка була виконана для інших ґрунтових умов, в результаті чого спостерігалися аналогічні результати, що свідчить про адекватність запропонованої формули.

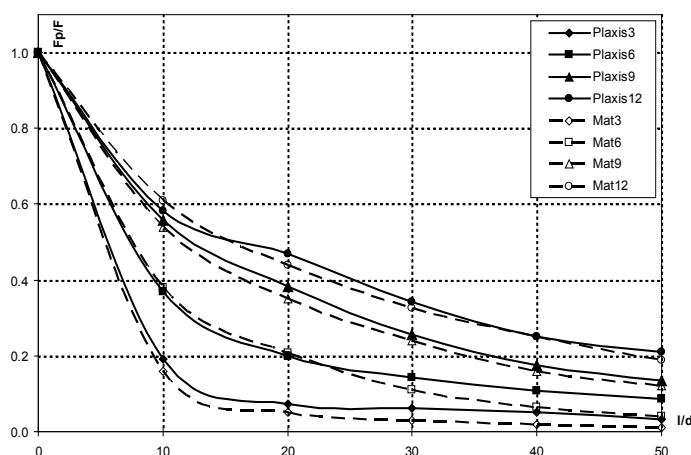


Рис. 4. Ізолінії поверхонь, отримані у Plaxis та за запропонованою математичною формулою (5) в проекції на площину « $F_{pi}/F_i - l_i/d_i$ »

## Висновки

Виконано комплексний аналіз факторів, що впливають на несучу здатність системи паля—ростверк—основа. Виявлено, що такими факторами в основному є  $a_i/d_i$ ;  $b_i/d_i$ ;  $l_i/d_i$ ;  $E_i$ ;  $f_{0i}$ .

Розроблено оригінальний метод багатофакторного аналізу на основі аналізу та порівняння властивостей сімей побудованих числовими методами поверхонь в координатах  $a_i/d_i - l_i/d_i - F_{pi}/F_i$ .

В результаті аналізу статистичних даних, отриманих на скінчено елементних моделях паля—ростверк—основа, розроблена математична модель, яка враховує основні геометричні та фізико-механічні параметри для оцінки частки несучої здатності ростверку у системі. Ця модель описується закономірністю (5).

Адекватність запропонованої моделі підтверджується збіжністю з результатами числового моделювання та експериментальних досліджень [3—5]. Дані експериментальних досліджень показали, що частка ростверку у складі пальового фундаменту в залежності від інженерно-геологічних умов та геометричних параметрів фундаменту може сягати від 5 до 50 %. За запропованою моделлю частка складає від 2 до 35 %.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Підсилення фундаментів будівель та споруд, побудованих на лесових ґрунтах, буроін'єкційними палями : ВБН В.2.1-1-97 / Українська державна корпорація по виконанню монтажних і спеціальних будівельних робіт. — [Чинний від 01-05-1998]. — К. : 1997. — 42 с. — (Відомчі будівельні норми України).
2. Ремонт і підсилення несучих і огороджувальних будівельних конструкцій і основ промислових будинків та споруд : ДБН В.3.1-1-2002 / Державний комітет України з будівництва і архітектури. — [Чинний від 01-07-2003]. — К. : 2003. — 82 с. — (Національні стандарти України).
3. Бартоломей А. А. Расчет осадок ленточных фундаментов / А. А. Бартоломей, И. М. Омельчак, Б. С. Юшков. — М. : Стройиздат, 1994. — 377 с. — ISBN 5-274-01174-8.
4. Голубков В. Н. Материалы полевых исследований совместной деформации свайных фундаментов и их оснований / В. Н. Голубков. — Одесса : ОИСИ, 1966. — 138 с.
5. Никитенко М. И. Исследование работы свайных фундаментов с низкими ростверками / М. И. Никитенко, В. А. Сернов, Д. Л. Щербицкий, Н. С. Балаш // Будівельні конструкції. — 2004. — Т. 1, № 61. — С. 420—425.
6. Маєвська І. В. Результати модельних досліджень стрічкових фундаментів мілкового закладання, що підсилюються палями / І. В. Маєвська, Н. В. Блащук // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : наук.-техн. зб. — 2009. — № 2. — С. 64—69.
7. Гутер Р. С. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта / Р. С. Гутер, Б. В. Овчинский. — М. : Физматгиз, 1962. — 356 с.
8. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. Справочное руководство / Л. З. Румшинский. — М. : Наука, 1971. — 192 с.
9. Чкалова О. Н. Основы научных исследований / О. Н. Чкалова. — Киев : Вища школа, 1978. — 120 с.

Рекомендована кафедрою промислового та цивільного будівництва

Стаття надійшла до редакції 6.07.11  
Рекомендована до друку 19.09.11

**Маєвська Ірина Вікторівна** — доцент, **Попов Володимир Олексійович** — доцент, **Блащук Наталя Вікторівна** — асистент.

Кафедра промислового та цивільного будівництва, Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

**Чорноскутова Катерина Олександрівна** — інженер-проектувальник ТОВ «С-ТЕЛ», Київ.