

УДК 624.154

## ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ВИПРОБУВАННЯ ГРУПИ ПАЛЬ З ВИКОРИСТАННЯМ РІЗНИХ МОДЕЛЕЙ ГРУНТОВОЇ ОСНОВИ

**В.С. Носенко,**

канд. техн. наук, доцент кафедри геотехніки

**О.О. Кашоїда,**

аспірант, асистент кафедри геотехніки

*Київський національний університет будівництва і архітектури*

DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.441-454

Метою даної роботи є дослідження впливу обраної моделі ґрунтового середовища на напружено-деформований стан (НДС) пальового фундаменту. Розглянуті наступні питання: 1) аналіз основних моделей ґрунтового середовища, що широко використовуються при моделюванні взаємодії фундаментів з ґрунтовими основами; 2) виконано числове моделювання НДС системи «основа – пальовий фундамент» з використанням моделей основи у вигляді: перемінних коефіцієнтів жорсткості, об'ємних пружних та пружно-пластичних елементів ґрунтового масиву; 3) приведено порівняння НДС пальового фундаменту отриманого числовим моделюванням з використанням різних моделей основи та для верифікації отриманих результатів виконано співставлення із даними польового експерименту випробування групи паль.

**Ключові слова:** пальовий фундамент, числове моделювання, коефіцієнти жорсткості, об'ємний ґрунтовий масив.

### Вступ

Широке застосування пальових фундаментів в сучасному будівництві спонукає до пошуку ефективних методів числового моделювання НДС систем «основа – пальовий фундамент – надземні конструкції». Сучасні програмні комплекси мають можливість моделювати ґрунтове середовище з використанням різних моделей: коефіцієнти жорсткості, об'ємні скінченні елементи. Перед інженерами постає питання, вибору адекватної моделі, що відображає особливості роботи реальних конструкцій при їх взаємодії з ґрунтами [2, 3, 4, 5, 6]. В даному дослідженні виконано порівняння результатів числового моделювання взаємодії пальового фундаменту з ґрунтовою основою з використанням різних моделей ґрунту та співставлення з експериментальними даними випробування групи паль об'єднаних в один фундамент. В основу даного дослідження покладено польові експерименти з випродування натурних паль, що були проведені проф. Бартоломеем А.О. та колегами [1]. В експерименті в ґрунт було забито групу з 9 паль довжиною 5 м і перерізом 30x30 см. Палі були об'єднані залізобетонним армованим ростверком. Фізико-механічні характеристики ґрунтів основи паль наведено в табл.1. Прив'язка паль та габарити ростверку зображені на рис. 1, на рис. 2 показана посадка фундаменту на геологічний переріз.

Таблиця 1

## Фізико-механічні характеристики ґрунтів

Назва ґрунту	Об'ємна вага ґрунту, $\gamma$	Природна вологість, $w$	Границя текучості, $w_L$	Границя пластичності, $w_p$	Коефіцієнт Пуассона, $\nu$	Пітоме зчеплення, $C$	Кут внутрішнього тертя, $\phi$	Модуль деформації, $E$
1- Глина м'якопластична	18,2	0,33	0,42	0,21	0,41	23	14	6,5
2- Глина м'якопластична	18,9	0,32	0,39	0,21	0,41	17	18	6,7
3- Суглинок м'якопластичний	19,5	0,3	0,35	0,19	0,38	20	17	6
4- Суглинок м'якопластичний	19,6	0,31	0,37	0,21	0,38	18	16*	6,5
5- Глина м'якопластична	19,8	0,31	0,42	0,23	0,42	26*	17	6,5
6- Глина м'якопластична	19,3	0,34	0,42	0,23	0,42	19	15*	6,5
7- Глина м'якопластична	18,8	0,33	0,42	0,24	0,41	32*	13*	7
8- Глина м'якопластична	19	0,32	0,4	0,22	0,41	21	14*	7
9- Глина м'якопластична	18,9	0,37	0,44	0,23	0,41	23	23	7,5
10- Глина м'якопластична	19	0,3	0,38	0,2	0,41	23*	14*	8
11- Суглинок м'якопластичний	19,2	0,37	0,34	0,18	0,41	17	14*	8,5

\* значення, що було прийнято для розрахунку

Таблиця 2

## Навантаження на дослідний куц

Номер ступені навантаження	Навантаження, що діє на ступені, кН	Рівномірно-розподілене навантаження (тиск) по плиті ростверку, кН/м <sup>2</sup>
1	400	69.44
2	600	104.17
3	800	138.89
4	1400	243.06
5	1800	312.50

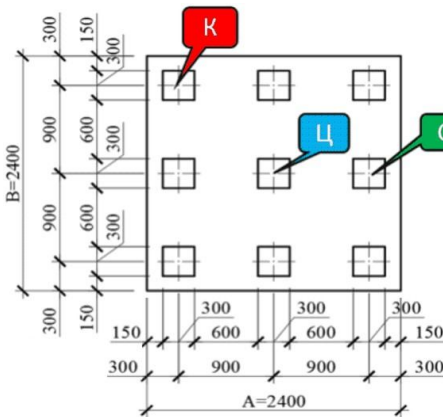


Рис. 1. Загальний вигляд фундаменту в плані з позначеними характерними палями

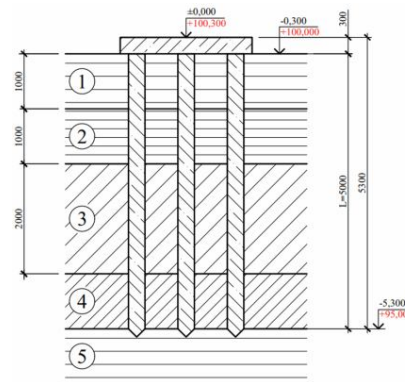


Рис. 2. Геологічний розріз з посадкою фундаменту

Через 45 діб після влаштування паль на дослідний куц ступенями прикладалось навантаження та вимірювалися фактичні осідання паль та зусилля, що виникають в оголовках контрольних паль. Послідовність навантаження наступна: I – 400 кН; II – 600 кН; III – 800 кН; IV – 1400 кН;

$V = 1800$  кН [1, 2]. На основі отриманих результатів було побудовано графік випробування дослідного куца, що наведено на рис. 3

### 1. Основне дослідження

Числове моделювання НДС системи «основа – пальовий фундамент» при різних варіантах врахування ґрунтового середовища виконувались за допомогою ПК «Ліра-САПР 2019».

Було виконано моделювання з використанням наступних моделей ґрунтового середовища:

1) ґрунтова основа моделювалася перемінними коефіцієнтами жорсткості основи, що у бібліотеці скінченних елементів (БСЕ) Ліра – САПР позначається як СЕ-57. Окремо слід зауважити, що механізм визначення коефіцієнтів жорсткості цих елементів дозволяє врахувати взаємний вплив паль при різних відстанях між палями. Необхідно виконувати декілька ітерацій для визначення значень даних коефіцієнтів.

2) ґрунтова основа задана об'ємними пружними елементами (СЕ-34 та СЕ-36 у БСЕ Ліра – САПР);

3) ґрунтова основа задана об'ємними нелінійно-деформованими елементами де в якості критерія міцності використана умова міцності Кулона-Мора (СЕ-271 та СЕ-273 у БСЕ Ліра – САПР). Скінчено-елементні моделі в ПК «Ліра – САПР» наведені на рис. 4.

При моделюванні основи з використанням об'ємних скінченних елементів навантаження прикладалось ступеням за допомогою системи «Монтаж».

При моделюванні основи за допомогою «СЕ-57» було створено для кожної ступені навантаження окрему скінчено-елементну модель, у якій уточнювались перемінні коефіцієнти жорсткості за кілька разів.

Жорсткість палі (мається на увазі сума всіх жорсткостей окремих одноузлових скінченних елементів якими розбитий стержень палі (див. рис. 4 (в)), що моделюється за допомогою «СЕ-57» визначається шістьма величинами:  $R_x, R_y, R_z, R_{ix}, R_{iy}, R_{iz}$ .

Погонні жорсткості  $R_x, R_y, R_{ix}, R_{iy}, R_{iz}$  визначаються за допомогою стержневого суперелементу, що моделює тіло палі сумісно з оточуючим ґрунтом. Довжина суперелементу рівна довжині палі  $L$ .

Суперелемент складає  $N$  стержнів, що опираються боковими поверхнями на пружну основу, яка розташована вздовж глобальних осей  $X$  та  $Y$  або локальних осей координат  $X$  та  $Y$ .  $N$  – задана кількість дроблення палі по довжині.

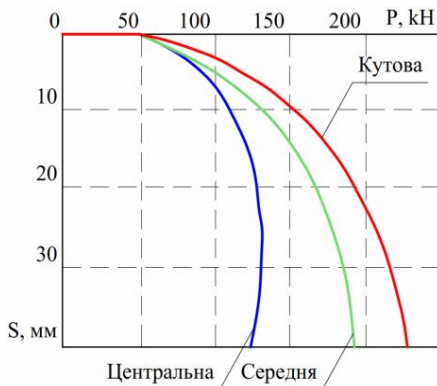


Рис. 3. Графік навантаження-осідання для паль дослідного куца

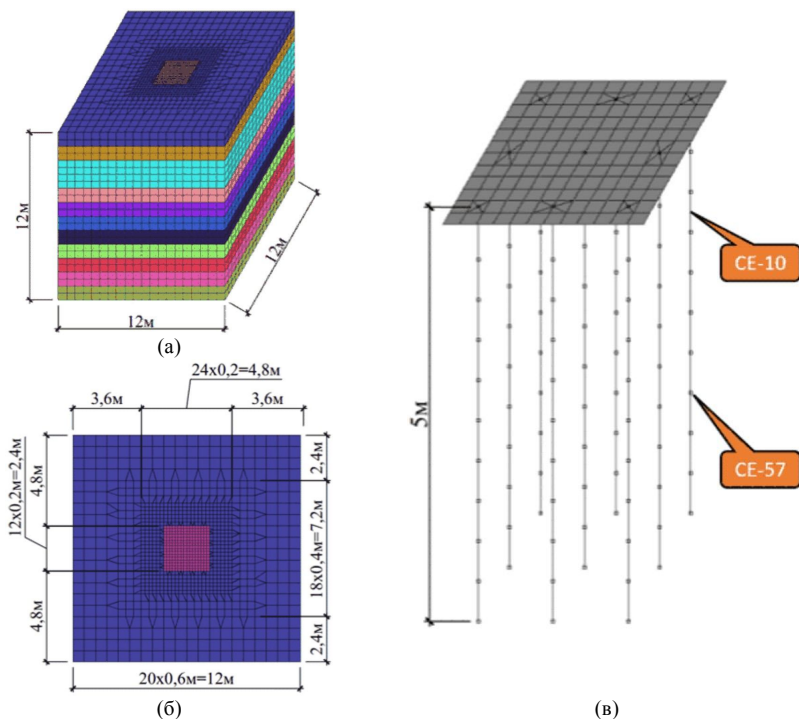


Рис. 4. Загальний вигляд скінчено-елементних моделей: (а) – ґрунтова основа моделюється за допомогою об'ємних скінчених елементів; (б) те саме, вигляд зверху; (в) – модель з використанням перемінних коефіцієнтів жорсткості

Жорсткості визначаються по формулам:

$$R_x = \frac{1}{D_x}, R_y = \frac{1}{D_y}, R_{ux} = \frac{1}{D_{ux}}, R_{uy} = \frac{1}{D_{uy}}, R_{uz} = \frac{1}{D_{uz}}, \quad (1)$$

де  $D_i$  – приріст координат (переміщення) по відповідній осі.

Погонна жорсткість палі (мається на увазі сума всіх жорсткостей окремих одноузлових скінчених елементів якими розбита одиниця довжини стержня палі (зазвичай 1 м)) без розширення п'яти:

$$R_z = \frac{G_1 \cdot L}{\beta}. \quad (2)$$

Усреднений модуль зсуву  $G_1$  і коефіцієнт Пуассона  $\nu_1$  вздовж лінії  $L$  (довжини палі):

$$G_1 = \frac{\sum_1^{NL} G_i \cdot h_i}{L}, \quad \nu_1 = \frac{\sum_1^{NL} \nu_i \cdot h_i}{L}. \quad (3)$$

Усреднений модуль зсуву  $G_2$  і коефіцієнт Пуассона  $\nu_2$  вздовж довжини ( $k \cdot L$ ) нижче п'яти палі:

$$G_2 = \frac{\sum_1^{N \in L} G_j \cdot h_j}{k \cdot L}, \quad \nu_2 = \frac{\sum_1^{N \in L} \nu_j \cdot h_j}{k \cdot L}, \quad (4)$$

де  $G_i = (E_i/2)/(1 + \nu_i)$  – модуль зсуву  $i$ -го шару ґрунту;  $L$  – довжина палі;  $E_i$  – модуль деформації  $i$ -го шару ґрунту,  $i=1, n$ ;  $k$  – коефіцієнт глибини під п'ятою палі, що враховує властивості ґрунту нижче п'яти.

Коефіцієнт «жорсткості основи»  $C_1$  на боковій поверхні палі визначається посередині кожного стержневого СЕ яким моделюється тіло палі (координата  $Z$ ), у відповідності із значенням коефіцієнту пропорційності  $K$  (т/м<sup>4</sup>) шарів ґрунту і коефіцієнту умов роботи  $\gamma_c$

$$C_1 = \frac{K \cdot Z}{\gamma_c}. \quad (5)$$

## 2. Розрахунок вертикальної жорсткості палі по теоретичним значенням осідання і несучої здатності

Розрахункова схема представлена на рис. 5. При розрахунку жорсткості палі вертикальна жорсткість ґрунтової основи розповсюджується по довжині палі пропорційно граничній несучій здатності ґрунту  $F_d$ , що визначено згідно формули:

$$F_d = R \cdot A \cdot \gamma_{R,R} \cdot \gamma_c + \sum_{i=1}^n f_i \cdot u \cdot h_i \cdot \gamma_{R,f} \cdot \gamma_c, \quad (6)$$

де  $R$  – розрахунковий опір ґрунту під п'ятою палі;  $f_i$  – розрахунковий опір  $i$ -го шару ґрунту по боковій поверхні палі;  $h_i$  – товщина шару;  $A$  – площа п'яти палі;  $u$  – периметр перерізу палі;  $\gamma_{R,R}, \gamma_{R,f}, \gamma_c$  – коефіцієнти умов роботи. Тоді жорсткість ґрунту під п'ятою палі  $EA_{\text{п'яти}}$  і жорсткість  $i$ -го шару ґрунту вздовж довжини палі  $EA_i$  визначається як:

$$EA_{\text{п'яти}} = \frac{R \cdot A \cdot \gamma_{R,R} \cdot \gamma_c}{S_{Fd}},$$

$$EA_i = \frac{f_i \cdot u \cdot h_i \cdot \gamma_{R,f} \cdot \gamma_c}{S_{Fd}}, \quad (7)$$

де  $S_{Fd}$  – теоретичне осідання палі при навантаженні  $F = F_d$ . Значення  $R, f_i, \gamma_{R,R}, \gamma_{R,f}, \gamma_c$  – вибираються із будівельних норм по характеристикам ґрунту і способу влаштування палі.

Теоретичне осідання  $S_{Fd}$  від

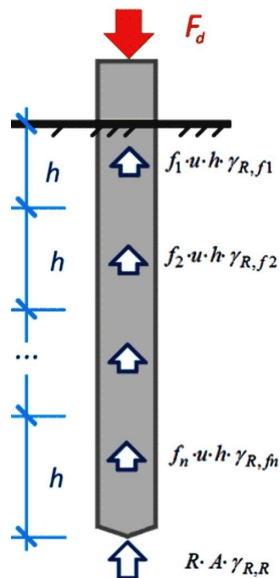


Рис. 5. Схема визначення жорсткості палі по теоретичним значенням осідання і несучої здатності

навантаження  $F_d$  вираховується за методикою, що наведена за будівельними нормами.

Розрахунок осідання одиночних паль, що прорізають шар ґрунту з модулем зсуву  $G_1$ , МПа, коефіцієнтом Пуассона  $\nu_1$  та опираються на ґрунт, що розглядається як лінійно-деформований напівпростір, характеризується модулем зсуву  $G_2$  та коефіцієнтом Пуассона  $\nu_2$ , допускається застосування при виконанні вимог умов:  $l/d > 5$ ;  $G_1 l / G_2 d > 1$  (де  $l$  – довжина палі, м;  $d$  – зовнішній діаметр поперечного перерізу стовбура палі, м) по формулам:

а) для одиночної висячої палі без розширення п'яти:

$$s = \beta \frac{N}{G_1 l}, \quad (8)$$

де  $N$  – вертикальне навантаження, що припадає на палю, МН;  $\beta$  – коефіцієнт, що визначається по формулі:

$$\beta = \frac{\beta'}{\lambda_1} + 0.5 \frac{1 - (\beta'/\alpha')}{\chi}, \quad (9)$$

де  $\beta' = 0,17 \ln(k_v G_1 l / G_2 d)$  – коефіцієнт, що відповідає абсолютно жорсткій палі ( $EA = \infty$ );  $\alpha' = 0,17 \ln(k_{v1} l / d)$  – той же коефіцієнт для випадку однорідної основи з характеристиками  $G_1$  і  $\nu_1$ ;  $\chi = EA / G_1 l^2$  – відносна жорсткість палі;  $EA$  – жорсткість стовбура палі на стиск, МН;  $\lambda_1$  – параметр, що характеризує збільшення осідання за рахунок стиснення стовбура і визначається за формулою:

$$\lambda_1 = \frac{2,12\chi^{3/4}}{1 + 2,12\chi^{3/4}}. \quad (10)$$

Коефіцієнти  $k_v$ ,  $k_{v1}$  визначаються по формулі:

$$k_v = 2,82 - 3,78\nu + 2,18\nu^2 \quad (11)$$

відповідно при  $\nu = (\nu_1 + \nu_2)/2$  та при  $\nu = \nu_1$ ;

б) для одиночної палі з розширенням п'яти або палі-стійки:

$$S = \frac{1 - \nu_2}{G_2 d_b} + \frac{Nl}{EA}, \quad (12)$$

де  $d_b$  – діаметр розширення палі.

Характеристики  $G_1$  і  $\nu_1$  приймаються усередненими для всіх шарів ґрунту в межах глибини занурення палі, а  $G_2$  і  $\nu_2$  – в межах  $0.5l$ , тобто на глибинах від  $l$  до  $1.5l$  від верху палі, при умові, що під нижніми кінцями паль відсутні глинисті ґрунти текучої консистенції, органічно-мінеральні і органічні ґрунти.

Модуль зсуву ґрунту  $G = E_0/2(1 + \nu)$  допускається приймати рівним  $0.4E_0$ , а коефіцієнт  $k_v$  рівним 2,0 (де  $E_0$  – модуль загальної деформації).

Розрахунковий діаметр  $d$  для палей некруглого перерізу, наприклад стандартних забивних палей заводського виготовлення, визначається за формулою:

$$d = \sqrt{(4A)/\pi}, \quad (13)$$

де  $A$  – площа поперечного перерізу палі.

### 3. Визначення жорсткості ґрунту в горизонтальному напрямку

Жорсткість ґрунтової основи палі в горизонтальному напрямку визначається коефіцієнтом  $C_Z$  на боковій поверхні палі:

$$C_Z = K \cdot \frac{z}{\gamma_c}, \quad (14)$$

Коефіцієнт  $C_Z$  визначається для кожного шару ґрунту товщиною не більше 2 м у відповідності з заданими значеннями коефіцієнта пропорційності  $K$  цього шару, глибини залягання середини шару  $z$  і коефіцієнта умов роботи  $\gamma_c$ , який приймається у відповідності до діючих нормативних документів.

### 4. Врахування взаємного впливу палей

Врахування взаємного впливу виконується по методиці, що наведена нижче.

З урахуванням взаємного впливу осідання  $i$ -ої палі

$$S_i = s(N_i) + \sum_{j \neq i} \delta_{ij} \frac{N_j}{G_1 l}, \quad (15)$$

де  $s(N_i)$  – осідання  $i$ -ої палі від власного навантаження  $N_i$ ;  $\sum_{j \neq i} \delta_{ij} \frac{N_j}{G_1 l}$  –

додаткового осідання  $i$ -ої палі від впливу всіх інших палей, де

$$\delta = \begin{cases} 0,17 \ln \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a}, & \text{якщо } \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a} > 1; \\ 0, & \text{якщо } \frac{k_v G_1 l}{2G_2 a} \leq 1. \end{cases} \quad (16)$$

Врахування впливу всіх палей на горизонтальну жорсткість  $i$ -ої палі виконується множенням коефіцієнту пропорційності ґрунту  $K$  на понижуючий коефіцієнт  $\alpha_i$ , що визначається по формулі:

$$\alpha_i = \gamma_c \prod_{j \neq i} \left\{ 1 - \frac{d}{r_{ij}} \left[ 0,789 + 0,229 \frac{|x_j - x_i|}{r_{ij}} - 0,143 \left( \frac{x_j - x_i}{r_{ij}} \right)^2 \right] \right\}, \quad (17)$$

де  $\gamma_c$  – коефіцієнт, що враховує ущільнення ґрунту при зануренні палей та приймається рівним: 1,2 для забивних палей суцільного перерізу і 1,0 для інших видів палей;  $d$  – діаметр або сторона поперечного перерізу палі;

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad (18)$$

де  $x_i, y_i$  – координати осі  $i$ -ої палі в плані;  $x_j, y_j$  – координати осі  $j$ -ої палі в плані.

### **5. Використання моделі ґрунту з об'ємними скінченними елементами, що деформуються пружно**

Дана модель зображена на рис. 4 (а). Об'ємні скінченні елементи, що моделюють ґрунти можуть мати форму: паралелепіпеда, тетраедра, прямої трьохгранної призми, шестивузлових та восьмивузлових об'ємних елементів. Ці елементи володіють наступними параметрами:  $E$  – модуль загальних деформації;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $R_0$  – питома вага матеріалу.

### **6. Використання моделі ґрунту з об'ємними скінченними елементами, що деформуються пружно-пластично**

Візуально дана модель є ідентичною попередній. Відмінність полягає у параметрах якими володіють скінченні елементи, що моделюють пружно-пластичне ґрунтове середовище. Поведінка цих елементи описується наступними параметрами:  $E$  – модуль загальної деформації;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $C$  – питома зчеплення;  $R_t$  – граничний опір ґрунту на розтяг;  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя;  $\sigma_p$  – граничне напруження стиску;  $R_0$  – питома вага матеріалу. В якості критерія переходу у пластичний стан застосовується умова міцності Кулона – Мора:

$$\tau = C + \sigma \cdot \tan(\varphi). \quad (18)$$

### **7. Результати числового моделювання польового експерименту з випробування групи з 9 паль**

Виконавши моделювання взаємодії пальового фундаменту з різними варіантами представлення основи в ПК «Ліра-САПР» було отримано значну кількість результатів для аналізу. Для подальшого аналізу і порівняння було вибрано поздовжні зусилля і осідання характерних паль (кутової, середньої і центральної). Для спрощення сприйняття показано результати на першій та останній стадії навантаження.

Аналізуючи значення поздовжніх зусиль у характерних палях (рис. 6), можна бачити кращу кореляцію результатів між польовим дослідженням та моделюванням паль з використанням перемінних коефіцієнтів жорсткості (SE-57). Також варто звернути увагу, що результати з використанням перемінних коефіцієнтів жорсткості по кутовій палі завищують результати до 15%, у той час як результати по середній і центральній палі знижуються в межах 8...28%. Використання моделей з використанням об'ємних скінченних елементів ґрунту (пружне і пружно-пластичне деформування) для всіх характерних паль знижує отримані результати в межах 17...54%.

Порівняння осідання характерних паль на першій стадії завантаження рис. 7 показує, що результати числового моделювання значно завищують величини осідання при малих навантаженнях.





Рис. 6. Порівняння поздовжніх зусиль у характерних палях на першій стадії навантаження (400 кН)

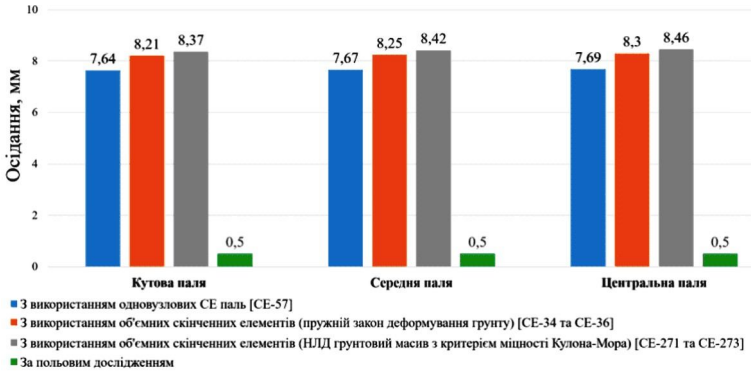


Рис.7. Порівняння осідань характерних палей на першій стадії навантаження (400кН)

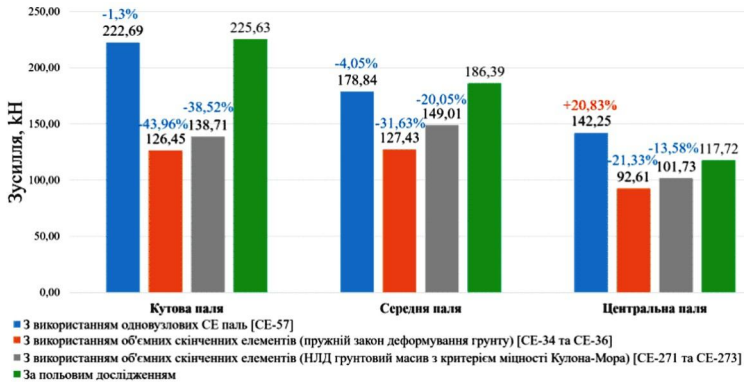


Рис. 8. Порівняння поздовжніх зусиль у характерних палях на останній стадії навантаження (1800кН)

Порівнявши поздовжні зусилля у характерних палях на останній ступені навантаження яка була прийнята у польовому досліді рис.8 можна побачити ще кращу кореляцію результатів між польовим дослідженням та моделлю з використанням перемінних коефіцієнтів жорсткості (CE-57). Також варто звернути увагу, що результати з використанням перемінних коефіцієнтів жорсткості по кутовій та центральній палі завищують результати у межах 1...21%, у той час як результати по середній палі занижуються в межах 5%. Використання числових моделей з об'ємними скінченними елементами ґрунту (пружне і пружно-пластичне деформування), для всіх характерних паль знижує отримані результати в межах 13...44%.

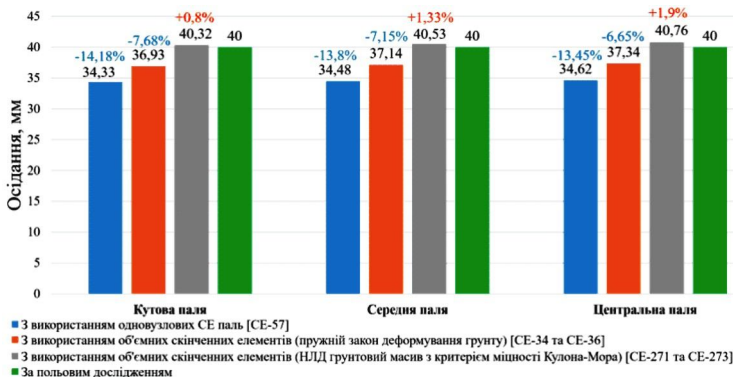


Рис.9. Порівняння осідань характерних паль на останній стадії навантаження (1800kN)

Виконавши порівняння осідання характерних паль на останній стадії завантаження рис.9 спостерігаємо відмінну кореляцію результатів моделювання із польовим дослідженням у варіанті числової моделі з використанням об'ємних скінченних елементів ґрунту з критерієм міцності Кулона-Мора. Похибка в межах 0,8...2%. Використання моделі об'ємних пружних елементів ґрунтового масиву призводить до зниження осідання у всіх характерних палях в межах 6...8%. Модель з використанням перемінних коефіцієнтів жорсткості (CE-57) також знижує осідання у всіх дослідних палях в межах 13...15%.

## 8. Висновки

1. Виявлено, що розрахункові значення поздовжніх зусиль у палях, що моделюються стержневими елементами, а взаємодія з основою імітуються перемінними коефіцієнти жорсткості основи дають гарну збіжність з даними експериментальних досліджень. Похибка по всім дослідним палям в широкому діапазоні навантаження становить до 20%. При визначенні величини перемінних коефіцієнтів жорсткості необхідно виконувати їх ітераційне уточнення не менше 3 разів. Недоліком моделювання основи перемінними коефіцієнти жорсткості є складність отримання коректних значень згинаючих моментів у палі.

2. При використанні моделі ґрунтової основи у вигляді об'ємних пружних скінченних елементів похибка у визначенні поздовжніх зусиль у палях складає до 45%, а використання пружно-пластичних об'ємних елементів ґрунту підвищує точність розрахунку. Виконавши порівняння розрахункових та фактичних значень осідання паль спостерігаємо відмінну кореляцію результатів у варіанті числової моделі з використанням об'ємних пружно-пластичних скінченних елементів ґрунту з критерієм міцності Кулона-Мора. Похибка в межах 0,8...2%. Використання моделі об'ємних пружних елементів ґрунтового масиву призводить до зниження осідання у палях в межах до 8%. Модель з використанням перемінних коефіцієнтів жорсткості основи також знижує осідання у палях в межах до 15%.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Бартоломей А.А., Омельчак І.М., Юшков Б.С.* Прогноз осадок свайных фундаментов. - К.: Москва, Стройиздат, 1994. - 378 с.
2. *Бойко І.П., Підлущий В.Л.* Дослідження взаємодії паль в умовах польових випробувань. - Десята всеукраїнська науково-технічна конференція з іноземною участю «Механіка ґрунтів, геотехніка та фундаментобудування». - м. Полтава, 16-17 жовтня 2018. - С. 4.
3. *Безволев С.Г.* Методика определения коэффициентов жесткости грунта при расчете свай на горизонтальную нагрузку. - Основания, фундаменты и механика грунтов. - 2012. - No. 2 (2012). - С. 8 - 12.
4. *Antone F. Sayegh, Frank K. Tso.* Analysis of linear structures on nonlinear pile foundations. - Computers and Structures. - 1988. - No. 29 (4). - P. 633 - 643.
5. *Гоцуляк Є.О., Корнієнко М.В., Шельменко А.М.* Розрахунок осадки і несучої здатності паль при їх взаємодії в плитному фундаменті. - Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех.збірн. - К.: КНУБА - 2010. - Вип. 86. - С. 124 - 130.
6. *Sandy H.L. Cheen, Xinliu Wu.* The value range of contact stiffness factor between pile and soil based on penalty function. - IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science (ICEESE). - 2018. - No. 128 (2018).

#### REFERENCES

1. *Bartolomey A.A., Omelchak I.M., Yushkov B.S.* Prognoz osadok svaynykh fundamentov (Pile foundation settlement forecast). Moscow:Stroyizdat, 1994, 378 pp.
2. *Boyko I.P., Pidlutsky V.L.* Doslidzhennya vzyemodiyy pal v umovakh polovyykh vyprobuvan (Investigation of pile interaction under field test conditions). - The tenth-Ukrainian scientific and technical conference with foreign participation "Soilmechanics, geotechnics and foundation engineering». - Poltava, October 16-17, 2018. - P. 4.
3. *Bezvolev S.G.* Metodika opredeleniya koeffitsiyentov zhestkosti grunta pri raschete svay na gorizontaln'nyu nagruzku (Method for determining the coefficients of soil stiffness when calculating piles for a horizontal load). - Base, foundations and soil mechanics. - 2012. - No. 2 (2012). - P. 8 - 12.
4. *Antone F. Sayegh, Frank K. Tso.* Analysis of linear structures on nonlinear pile foundations. - Computers and Structures. - 1988. - No. 29 (4). - P. 633 - 643.
5. *Gotsulyak E.O., Kornienko M.V., Shelmenko A.M.* Rozrakhunok osadky i nesuchoyi zdatsnosti pal pry yikh vzyemodiyy v plytnomu fundamenti (Calculation of settlement and bearing capacity of piles with their supportin a slab foundation). - Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-& Technical collected articles. - Kyiv.: KNUBA, 2010. - Issue 86. - P. 124 - 130.
6. *Sandy H. L. Cheen, Xinliu Wu.* The Value Range of Contact Stiffness Factor between Pile and Soil Based on Penalty Function. - IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science (ICEESE). - 2018. - No. 128 (2018).

*Nosenko V.S., Kashoida O.O.*

### **ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ ВИПРОБУВАННЯ ГРУПИ ПАЛЬ З ВИКОРИСТАННЯМ РІЗНИХ МОДЕЛЕЙ ГРУНТОВОЇ ОСНОВИ**

У даній роботі досліджено вплив обраної моделі ґрунтового середовища на напружено-деформований стан (НДС) пального фундаменту. Розглянуті наступні питання: 1) аналіз основних моделей ґрунтового середовища, що широко використовуються при моделюванні взаємодії фундаментів з ґрунтовими основами; 2) виконано числове моделювання НДС системи «основа – паливий фундамент» з використанням моделей основи у вигляді: перемінних коефіцієнтів жорсткості, об'ємних пружних та пружно-пластичних елементів ґрунтового масиву; 3) приведено порівняння НДС пального фундаменту отриманого числовим моделюванням з використанням різних моделей основи та верифікація результатів шляхом співставлення із даними польового експерименту випробування групи палів. В основу даного дослідження покладено польові експерименти з випробування натурних палів, що були проведені проф. Бартоломесом А.О. та колегами. В експерименті в ґрунт було забито групу з 9 палів довжиною 5 м і перерізом 30х30 см. Палі були об'єднані залізобетонним армованим ростверком. Числове моделювання НДС системи «основа – паливий фундамент» виконувались за допомогою ПК «Ліра – САПР 2019».

Виявлено, що розрахункові значення поздовжніх зусиль у палях, що моделюються стержневими елементами, а взаємодія з основою імітуються перемінними коефіцієнти жорсткості основи дають гарну збіжність з даними експериментальних досліджень. Похибка по всім дослідним палям в широкому діапазоні навантаження становить до 20%. При визначенні величини перемінних коефіцієнтів жорсткості необхідно виконувати їх ітераційне уточнення не менше 3 разів. Недоліком моделювання основи перемінними коефіцієнти жорсткості є складність отримання коректних значень згинаючих моментів у палів. При використанні моделі ґрунтової основи у вигляді об'ємних пружних скінченних елементів похибка у визначенні поздовжніх зусиль у палях складає до 45%, а використання пружно-пластичних об'ємних елементів ґрунту підвищує точність розрахунку. Виконавши порівняння розрахункових та фактичних значень осідання палів спостерігаємо відмінну кореляцію результатів у варіанті числової моделі з використанням об'ємних пружно-пластичних скінченних елементів ґрунту з критерієм міцності Кулона-Мора. Похибка в межах 0,8...2%. Використання моделі об'ємних пружних елементів ґрунтового масиву призводить до зниження осідання у палях в межах до 8%. Модель з використанням перемінних коефіцієнтів жорсткості основи також знижує осідання у палях в межах до 15%.

**Ключові слова:** паливий фундамент, числове моделювання, коефіцієнти жорсткості, об'ємний ґрунтовий масив.

*Nosenko V.S., Kashoida O.O.*

### **NUMERICAL SIMULATION OF THE EXPERIMENT ON TESTING A GROUP OF PILES USING DIFFERENT MODELS OF SOIL**

In the paper, the influence of the selected model of the soil environment on the stress-strain state (SSS) of the pile foundation is studied. The following issue are considered: 1) analysis of the main models of the soil environment, widely used in modeling the interaction of foundations with soil foundations; 2) Numerical modeling of the stress-strain state of the "base – pile foundation" system was performed using foundation models in the form of: variable stiffness coefficients, volume trilinear and elastic-plastic elements of the soil mass; 3) a comparison of the SSS of a pile foundation obtained by numerical modeling using various foundation models and verification of the results by comparing with the data of a field experiment of testing a group of piles is given. This study is based on field experiments on testing full-scale piles, conducted by prof. Bartolomey A.A. and colleagues. In the experiment, a group of 9 piles with a length of 5 m and a section of 30x30 cm was driven into the ground. The piles were combined with a reinforced concrete grillage. Numerical modeling of the stress-strain state of the system "base - pile foundation" was carried out using the SP "Lira – SAPR 2019".

It was revealed that the calculated values of longitudinal forces in piles modeled by rod elements, and the interaction with the base of the base stiffness factors simulated by variables give good convergence with the data of experimental studies. The error for all experimental fields in a

wide range of loads is up to 20%. When determining the value of the variable stiffness coefficients, it is necessary to refine the miteratively more than 3 times. The disadvantage of modeling the foundation with variable stiffness factors is the difficulty in obtaining the correct values of bending moments in piles. When using a soil foundation model in the form of volumetric elastic finite elements, the error in determining the longitudinal forces in piles is up to 45%, and the use of elastic-plastic volumetric soil elements increases the accuracy of the calculation. After comparing the calculated and actual values of piles ettlement, we observe an excellent correlation of the results in the variant of the numerical model using volumetric elastic-plastic finite soil elements with the Mohr-Coulomb strength criterion. The error is within 0.8 ... 2%. The use of the model of volumetric elastic elements of the soil massif leads to an under estimation of settlement in piles within the range of up to 8%. The model using variable foundation stiffness factors also under estimates settlement in piles by up to 15%.

**Keywords:** pile foundation, numerical simulation, stiffness coefficients, volumetric soil massif.

*Носенко В.С., Кашиоидо О.А.*

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ИСПЫТАНИЯ ГРУППЫ СВАЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗНЫХ МОДЕЛЕЙ ГРУНТОВОЙ ОСНОВЫ**

В данной работе исследовано влияние выбранной модели грунтовой среды на напряженно-деформированное состояние (НДС) свайного фундамента. Рассмотрены следующие вопросы: 1) анализ основных моделей грунта, широко используемых при моделировании взаимодействия фундамента с грунтовыми основаниями; 2) выполнено числовое моделирование НДС системы «основа – свайный фундамент» с использованием моделей основания в виде: переменных коэффициентов жесткости, объемных упругих и упруго-пластических элементов грунтового массива; 3) приведено сравнение НДС свайного фундамента, полученного числовым моделированием с использованием различных моделей основания, и верификация результатов путем сопоставления с данными полевого эксперимента по испытанию группы свай. В основу данного исследования положены полевые эксперименты по испытанию натуральных свай, проведенные проф. Бартоломео А.А. и коллегами. В эксперименте в грунт была забита группа из 9 свай длиной 5 м и сечением 30х30см. Сваи были объединены железобетонным армированным ростверком. Численное моделирование НДС системы «основа – свайный фундамент» выполнялось с помощью ПК «Лира – САПР 2019».

Выявлено, что расчетные значения продольных усилий в сваях, моделируемых стержневыми элементами, а взаимодействие с основанием имитируемых переменными коэффициентами жесткости основания дают хорошую сходимость с данными экспериментальных исследований. Погрешность по всем опытным сваям в широком диапазоне нагрузки составляет до 20%. При определении величины переменных коэффициентов жесткости нужно делать их итерационное уточнение не менее 3 раз. Недостатком моделирования основы переменными коэффициентами жесткости является сложность получения корректных значений изгибающих моментов в сваях. При использовании модели грунтового основания в виде объемных упругих конечных элементов погрешность в определении продольных усилий в сваях составляет до 45%, а использование упруго-пластических объемных элементов грунта повышает точность расчета. Выполнив сравнение расчетных и фактических значений просадки свай, наблюдаем отличную корреляцию результатов в варианте числовой модели с использованием объемных упруго-пластических конечных элементов грунта с критерием прочности Кулона-Мора. Погрешность в пределах 0,8...2%. Использование модели объемных упругих элементов грунтового массива приводит к занижению оседания в сваях в пределах до 8%. Модель с использованием переменных коэффициентов жесткости основания также занижает оседание в сваях в пределах до 15%.

**Ключевые слова:** свайный фундамент, численное моделирование, коэффициенты жесткости, объемный грунтовой массив.

УДК 624.154

*Носенко В.С., Кашоїда О.О. Числове моделювання експерименту випробування групи паль з використанням різних моделей ґрунтової основи // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА – 2022. – Вип. 109. – С. 441-454.*

*Виконано числове моделювання експерименту випробування групи паль. Числове моделювання виконувалось в ПК «Ліра – САПР 2019» з використанням різних моделей ґрунтового середовища: 1) перемінні коефіцієнти жорсткості; 2) об'ємні скінченні елементи з пружним законом деформування; 3) об'ємні скінченні елементи з нелінійним законом деформування, що володіють критерієм міцності Кулона-Мора.*

Табл. 2. Іл. 9. Бібліогр. 6 назв.

UDC 624.154

*Nosenko V.S., Kashoida O.O. Numerical simulation of the experiment on testing a group of piles using different models of soil base // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-&-Technical collected articles. – Kyiv.: KNUBA, 2022. – Issue 109. – P. 441-454.*

*Numerical modeling of the experiment on testing a group of piles has been carried out. Numerical modeling was carried out in the PC "Lira - SAPR 2019" using various models of the soil environment: 1) variable stiffness coefficients; 2) volumetric finite elements with an elastic law of deformation; 3) volumetric finite elements with a nonlinear law of deformation, having the Mohr-Coulomb strength criterion.*

Tabl. 2. Fig. 9. Ref. 6.

УДК 624.154

*Носенко В.С., Кашоїда О.А. Численное моделирование эксперимента испытания группы свай с использованием разных моделей ґрунтового основания // Соппротивление материалов и теория сооружений: науч.-тех. сборн. – К.: КНУСА, 2022. – Вып. 109. – С. 441-454.*

*Выполнено численное моделирование эксперимента по испытанию группы свай. Численное моделирование выполнялось в ПК «Лира – САПР 2019» с использованием различных моделей почвенной среды: 1) переменные коэффициенты жесткости; 2) объемные конечные элементы с упругим законом деформирования; 3) объемные конечные элементы с нелінійним законом деформирования, обладающие критерием прочности Кулона-Мора.*

Табл. 2. Ил. 9. Библиогр. 6 назв.

**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):** доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри геотехніки КНУБА Носенко Віктор Сергійович

**Адреса робоча:** 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури.

**E-mail:** nosenko.vs@knuba.edu.ua

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0002-8261-1846>

**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):** аспірант, асистент кафедри геотехніки КНУБА Кашоїда Остап Олександрович

**Адреса робоча:** 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури.

**E-mail:** kashoida\_oo@knuba.edu.ua

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0002-9234-4489>