

Визначення напружено-деформованого стану групи паль шляхом числового моделювання їх взаємодії з основою за даними польових досліджень

Віктор Носенко¹, Остап Кашоїда²

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037,

¹v.s.nosenko@gmail.com, orcid.org/0000-0002-8261-1846

²o.o.kashoida@gmail.com, orcid.org/0000-0002-9234-4489

DOI: 10.32347/0475-1132.43.2021.87-100

Анотація. Перед інженерами часто постає питання: - який саме програмний комплекс обрати для вирішення певної задачі? Для вирішення задач геотехніки застосовуються наступні програмні комплекси: 1) Plaxis; 2) Midas GTS NX; 3) Abaqus; 4) Ліра – САПР. Кожен із програмних комплексів володіє певними перевагами так і недоліками.

У даному дослідженні використовується ПК «Ліра – САПР» та «Midas GTS NX», за допомогою яких виконувалось числове моделювання взаємодії групи паль з основою, що описано в досліді Бартоломея А.О. [1].

Виконано порівняння напружено-деформованого стану, яке було отримано при використанні наступних варіантів моделей системи «основа – пальовий фундамент»:

1) ПК «Ліра – САПР»:

1.1) палі змодельовані одновузловими скінченними елементами, що розташовуються з заданим по довжині палі кроком та мають жорсткість в різних напрямках і наближено враховують оточуючий ґрунт навколо палі та під її вістрям (СЕ-57);

1.2) ґрунтове середовище змодельовано об'ємними скінченними елементами, що деформуються нелінійно; палі – стержневими скінченними елементами.

2) «Midas GTS NX»:

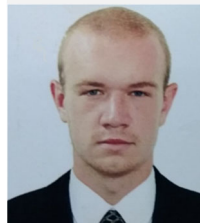
2.1) ґрунтове середовище змодельовано об'ємними скінченними елементами, що деформуються нелінійно; палі – стержневими скінченними елементами, що мають «віртуальний» зв'язок з оточуючим ґрунтом;

2.2) ґрунтове середовище – аналогічно; палі – об'ємними скінченними елементами, що володіють параметрами залізобетону.

Показано, що вибір програмного комплексу



Віктор Носенко
доцент кафедри
геотехніки
к.т.н., доц.



Кашоїда Остап
аспірант, асистент кафедри
геотехніки.

та методу моделювання основи впливає на напружено-деформований стан системи «основа – пальовий фундамент».

Моделювання основи з використанням перемінного коефіцієнта жорсткості призводить до кількісної відмінності отриманих результатів з польовим дослідженням. Даний метод моделювання є найменш трудозатратним і швидким. Недоліком даного методу моделювання є те, що необхідно для кожної стадії навантаження створювати окрему модель.

Моделювання основи об'ємними скінченними елементами з нелінійним законом деформування потребує ідентифікації розрахункових параметрів основи та є доволі трудомістким. Недоліком даного методу моделювання є те, що необхідно контролювати коректність розмірів скінченних елементів та їх сумісну роботу.

Ключові слова. Ліра – САПР, Midas GTS NX, група паль, числове моделювання, об'ємний ґрунтовий масив, коефіцієнти жорсткості.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На сьогоднішній день застосовується багато різних програмних комплексів для геотехнічних розрахунків за допомогою методу скінченних елементів. Серед вітчизняних проектувальників застосовуються наступні програмні комплекси: 1) Plaxis; 2) Midas GTS NX 3) Abaqus; 4) Ліра – САПР.

Кожний програмний комплекс володіє певними перевагами, так і недоліками. Наприклад: в ПК «Ліра – САПР» складно задати нашарування похилих інженерно-геологічних елементів (далі ІГЕ), так-як об'ємні скінченні елементи створюються за допомогою функції «Видавити»; в «Midas GTS NX» палі, що виконані об'ємними скінченними елементами необхідно пересікати поверхнями для формування природнього залягання ІГЕ, потім цим елементам необхідно задати відповідні параметри ІГЕ та налаштувати, щоб на відповідній стадії об'ємні скінченні елементи палей змінили властивості ґрунту на залізобетон, що викликає значні трудозатрати на створення моделі.

Щоб визначити який із них краще підходить для моделювання взаємодії палей з ґрунтовою основою було виконано числове моделювання експерименту Бартоломея А.О. [1], що виступає в якості еталону.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботах Бойко І.П. [2, 6, 8, 9], Сахаров В.О. [5], Скочко Л. О. та Хоронжевського М. В. [8] висвітлюється питання моделювання взаємодії пальових фундаментів з ґрунтовою основою.

ЗАДАЧІ

Змодельовати НДС елементів системи «основа – пальовий фундамент» з використанням наступних програмних комплексів (далі ПК) та таких варіантів моделювання:

а) ПК «Ліра – САПР»:

1.а) палі змодельовані одновузловими скінченними елементами, що розташовуються з заданим по довжині палі кроком та

мають жорсткість в різних напрямках і наближено враховують оточуючий ґрунт навколо палі та під її вістря (СЕ-57);

2.а) ґрунтове середовище змодельовано об'ємними скінченними елементами, що володіють нелінійним законом деформування Кулона-Мора; палі – стержневими скінченними елементами.

Б) «Midas GTS NX»:

1.б) ґрунтове середовище змодельовано об'ємними скінченними елементами, що володіють нелінійним законом деформування Кулона-Мора; палі – стержневими скінченними елементами, що мають «віртуальний» зв'язок з оточуючим ґрунтом;

2.б) ґрунтове середовище змодельовано об'ємними скінченними елементами, що володіють нелінійним законом деформування Кулона-Мора; палі – об'ємними скінченними елементами, що володіють параметрами залізобетону.

Виконати порівняння отриманих результатів числового моделювання в різних програмних комплексах.

МЕТА РОБОТИ

Порівняти напружено-деформований стан групи палей, що отримано в різних програмних комплексах між собою та з результатами експерименту [1].

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У роботі застосовано числове моделювання НДС елементів системи «основа – пальовий фундамент» з використанням ПК «Ліра – САПР 2019» та «Midas GTS NX».

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для даного дослідження було влаштовано дослідний куц із 9ти забивних палей перерізом 300x300 (мм) та довжиною 5м, що об'єднані між собою монолітним залізобетонним ростверком з розмірами в плані 2,4x2,4 (м) та висотою 300 мм (рис.1).

В якості основи виступають м'якопластичні глинисті ґрунти. 4й, 5й і 12й шар пред-

ставлений суглинками, а інші шари є глинами. Фізико-механічні характеристики даних ґрунтів наведено у табл.1.

У дослідному куці було виділено характерні палі (рис.1) для яких будуть будуватись графіки випробувань (рис.2).

Через 45 діб на дослідний куц прикладалось навантаження ступенями. Величина ступеней наступна: 1 – 400кН; 2 – 600кН; 3 – 800кН 4 – 1400кН; 5 – 1800кН. На основі отриманих результатів було побудовано графік випробування (залежності навантаження від осідання) дослідного куца (рис.2).

Посадка групи паль (фундаменту) на геологічні умови дослідної ділянки наведені на рис.3.

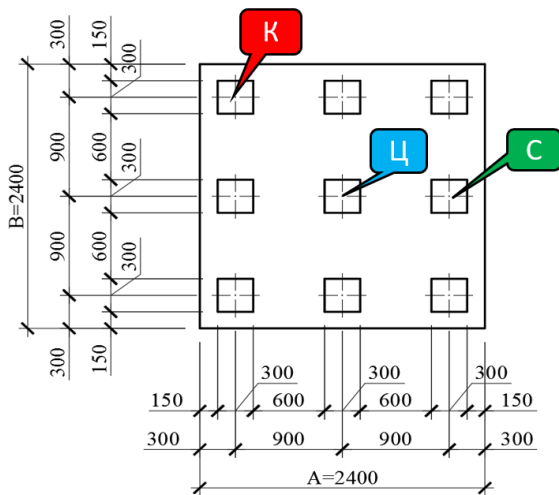


Рис.1. Схема дослідного куца.
Fig.1. Scheme of the experimental bush.

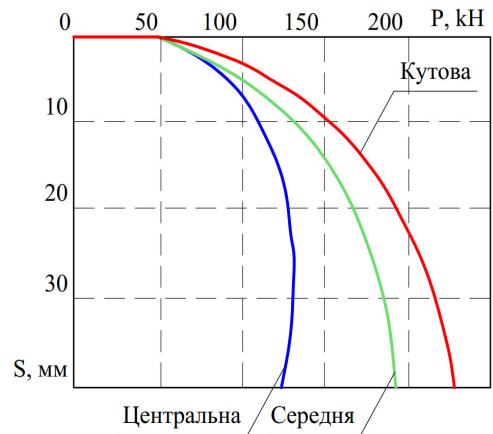


Рис.2. Графік навантаження-осідання для палі дослідного куца.
Fig.2. The schedule of loading and subsidence of piles of an experimental bush.

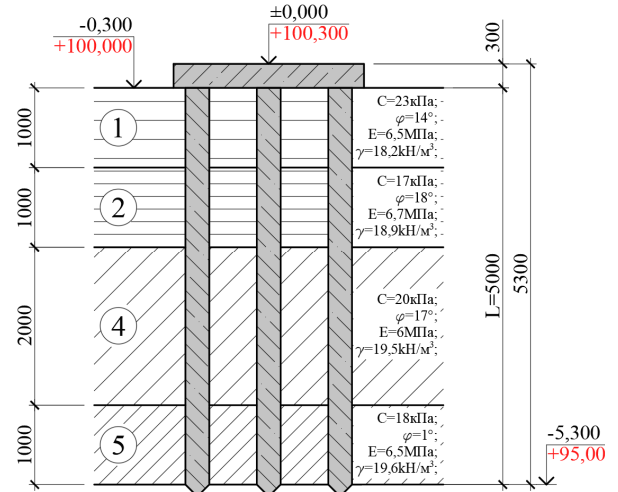


Рис.3. Геологічний розріз з посадкою фундаменту.
Fig.3. Geological section with foundation planting.

Табл.1. Фізико-механічні характеристики ґрунту
Tab.1. Physico-mechanical characteristics of the soil

Назва ґрунту	Об'ємна вага ґрунту, γ	Природна вологість, w	Границя текучості, w_L	Границя пластичності, w_p	Коефіцієнт Пуассона, ν	Питоме зчеплення, C	Кут внутрішнього тертя, ϕ	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	0,36	20	17	6
4- Суглинок м'якопластичний	19,6	0,31	0,37	0,21	0,36	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;

Табл.2. Стадії розрахунку (монтажу)

Tab.2. Stages of calculation (montage)

№, п/п	Стадія	Площа ростверку, м.кв	Тиск на ростверк, кПа	Приріст тиску, кПа
1	Початкова	Мається на увазі поява ґрунтового масиву з прикладанням власної ваги до нього		
2	Фундамент	«Занулення» деформацій від I стадії. Поява залізобетонних елементів фундаменту		
3	200кН	$A * B = 2,4м * 2,4м = 5,76м^2;$	34,72	34,72
4	400кН		69,44	34,72
5	600кН		104,17	34,72
6	800кН		138,89	34,72
7	1400кН		243,06	104,17
8	1800кН		312,50	69,44

1) ГРУПА ПАЛІ В ПК «ЛІРА – САПР» 1.1) МОДЕЛЮВАННЯ ОСНОВИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЕРЕМІННОГО КОЕФІЦІЄНТА ЖОРСТКОСТІ

СЕ-57 – це одновузловий скінченний елемент в ПК «Ліра – САПР 2019», що моделює палю як пружну в'язь по всіх напрямках та довкола глобальних (X, Y, Z) осей. Він має змогу визначати жорсткість палі у автоматичному режимі, для цього програмою використовується модуль «Ґрунт», у якій задається інформація про геологічні умови ділянки (фізико-механічні характеристики ґрунту: $\rho, e, w, E, C, \varphi$).

Числове моделювання СЕ-57 представлено двома способами: 1) єдиним одновузловим скінченним елементом, що знаходиться на місці палі; 2) одновузловими скінченними елементами, що розташовані по довжині стовбура палі з певним кроком. При моделюванні другим способом можна врахувати тип примикання палі до ростверку (жорстке, чи шарнірне).

При розрахунку жорсткості палі вертикальна жорсткість ґрунтової основи розповсюджується по довжині палі пропорційно граничній несучій здатності ґрунту F_d , що визначено згідно формули [1.1].

При розрахунку жорсткості палі вертикальна жорсткість ґрунтової основи розповсю-

джується по довжині палі пропорційно граничній несучій здатності ґрунту F_d , що визначено згідно формули:

$$F_d = R * A * \gamma_{R,R} * \gamma_c + \sum_{i=1}^{i=n} f_i * u * h_i * \gamma_{R,f} * \gamma_c; \quad [1.1]$$

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 поперечного перерізу палі; $\gamma_{R,R}, \gamma_{R,f}, \gamma_c$ – коефіцієнти умов роботи.

Тоді жорсткість ґрунту під підшвою палі $EA_{\text{під}}$ і жорсткість i -го шару ґрунту вздовж довжини палі EA_i визначається як:

$$EA_{\text{під}} = \frac{R * A * \gamma_{R,R} * \gamma_c}{S_{Fd}}; \quad [1.2]$$

$$EA_i = \frac{f_i * u * h_i * \gamma_{R,f} * \gamma_c}{S_{Fd}}; \quad [1.3]$$

Де: S_{Fd} – теоретичне осідання палі при навантаженні $F = F_d$. Значення $R, f_i, \gamma_{R,R}, \gamma_{R,f}, \gamma_c$ – беруться із норм.

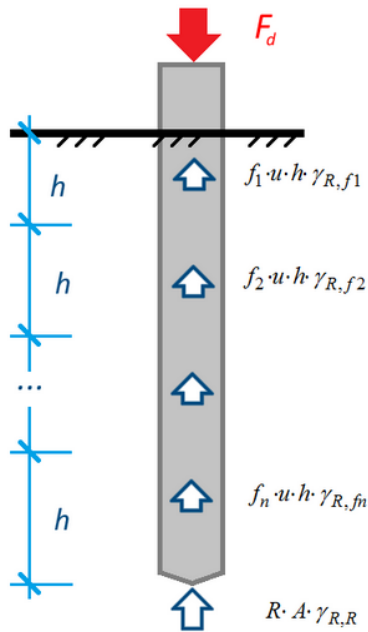


Рис.4. Схема визначення жорсткості палі по теоретичним значенням осідання і несучої здатності палі.

Fig.4. Scheme for determining the stiffness of the pile according to the theoretical values of displacement and bearing capacity of the pile.

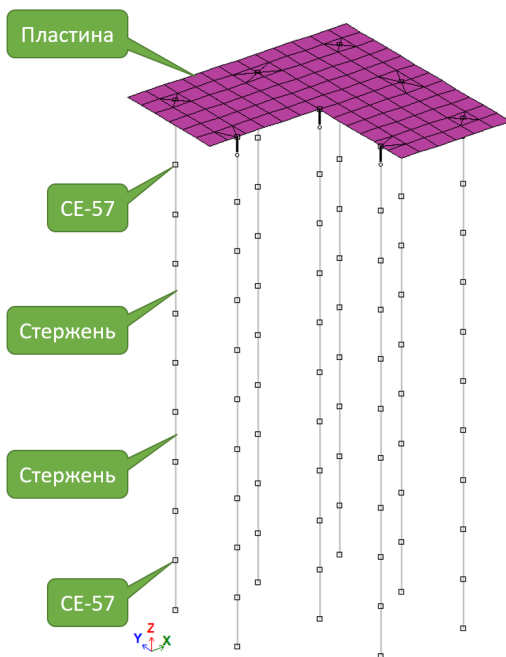


Рис.5. Фрагмент розрахункової моделі із використанням СЕ-57.

Fig.5. Fragment of the calculation model using FE-57.

1.2) МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНОЇ ОСНОВИ ОБ'ЄМНИМИ СКІНЧЕННИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ З КРИТЕРІЄМ МІЦНОСТІ КУЛОНА-МОРА

Даний метод моделювання полягає в тому, що в якості основи виступають об'ємні скінченні елементи, яким призначено критерій міцності Кулона-Мора. Дані скінченні елементи (далі СЕ) володіють наступними параметрами: E – модуль загальної деформації; ν – коефіцієнт Пуассона; C – питома зчеплення; R_t – граничний опір ґрунту на розтяг; φ – кут внутрішнього тертя; σ_p – граничне напруження стиску; R_0 – питома вага матеріалу. В якості критерія переходу у пластичний стан застосовується умова міцності Кулона – Мора:

$$\tau = C + \sigma * tg(\varphi); \quad [1.4]$$

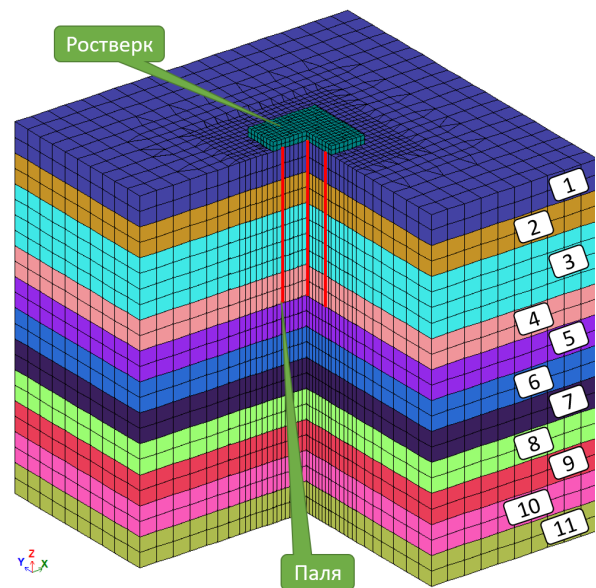


Рис.6. Фрагмент розрахункової моделі із використанням об'ємних СЕ в якості ґрунтового середовища.

Fig.6. Fragment of the calculation model using volumetric FE as a soil environment.

У ПК «Ліра – САПР» (версія 2019) ще не реалізовані інтерфейси, тому вузли залізобетонних елементів фундаментів жорстко прилипають до СЕ ґрунтового середовища.

Проаналізувати зміну вертикальних напружень у об'ємних СЕ можна на рис.7-8.

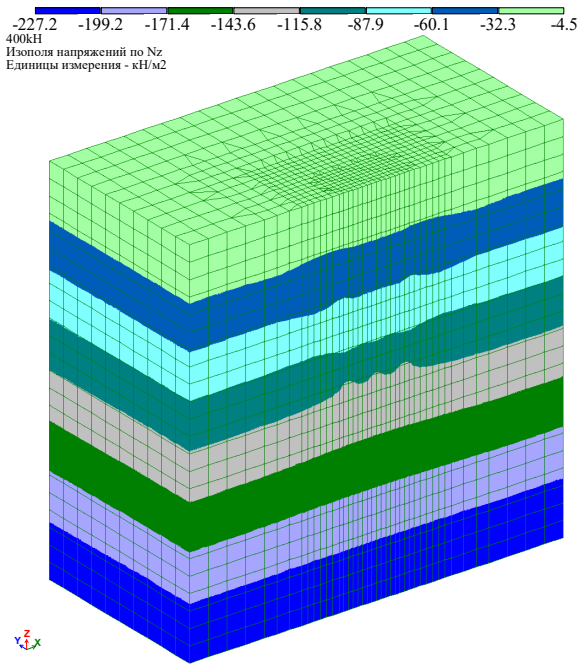


Рис.7. Вертикальні напруження в об'ємних СЕ ґрунтового середовища на IV стадії монтажу.

Fig.7. Vertical stresses in bulk FE of the soil environment at the IV stage of installation.

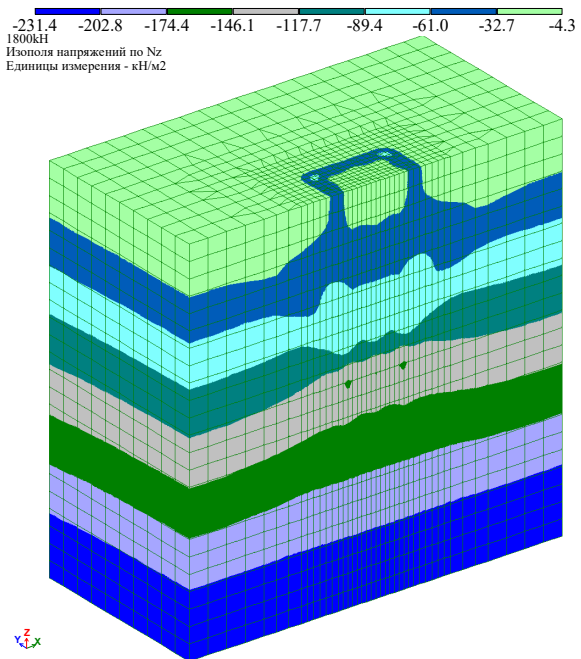


Рис.8. Напруження в об'ємних СЕ ґрунтового середовища на VIII стадії монтажу.

Fig.8. Vertical stresses in bulk FE of the soil environment at the VIII stage of installation.

2) ГРУПА ПАЛЬ В ПК «MIDAS GTS NX» 2.1) МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНОЇ ОС- НОВИ ОБ'ЄМНИМИ СКІНЧЕННИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ З КРИТЕРІЄМ МІЦНОС- ТІ КУЛОНА-МОРА ТА ПАЛЯМИ З «ВІР- ТУАЛЬНИМИ» ЗВ'ЯЗКАМИ

Критерій міцності Кулона-Мора описує пружно-пластичну поведінку матеріалу. Такий критерій дозволяє отримувати результати в загальних випадках нелінійних розрахунків ґрунтової основи.

Критерій міцності Кулона-Мора володіє двома недоліками, а саме: 1) середнє головне напруження не впливає на текучість, що суперечить реальній поведінці ґрунтів при випробуваннях; 2) крива руйнування для критерія Кулона-Мора має лінійну форму, тому параметр міцності (кут внутрішнього тертя) не залежить від гідростатичного тиску.

Нелінійні параметри, що використовуються для описання критерія міцності Кулона-Мора, наступні: C – питоме зчеплення; φ – кут внутрішнього тертя; E – модуль загальної деформації; ν – коефіцієнт Пуассона; γ – питома вага матеріалу.

Палі взаємодіють з ґрунтовим середовищем за допомогою «віртуальних» зв'язків (спеціальних інтерфейсів) (рис.9). Жорсткість по боковій поверхні палі та під нижнім кінцем палі визначається на основі несучої здатності одиночної палі і її осідання, що визначено у відповідності до діючих нормативних документів.

Результатом розрахунку є наступні параметри: граничний опір зсуву (Ultimate Shear Force) (kH/m^2); модуль жорсткості при зсуві (Shear Stiffness Modulus) (kH/m^3); модуль жорсткості при стиску (Normal Stiffness Modulus) (kH/m^3); несуча здатність палі під подошвою палі (Tip Bearing Capacity) (kH); жорсткість «пружини» під подошвою палі (Tip Spring Stiffness) (kH/m).

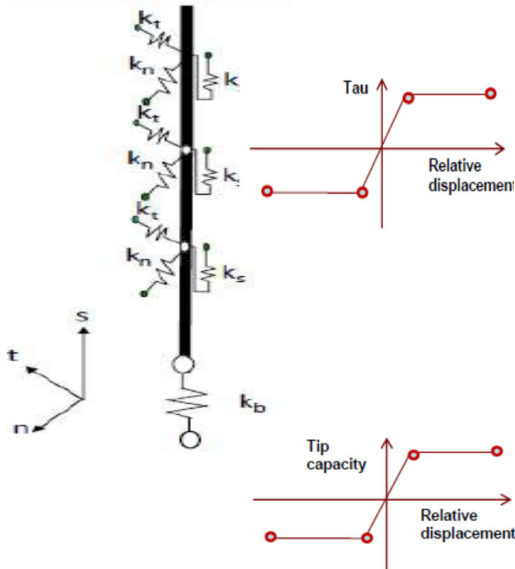


Рис.9. Схема «віртуального» зв'язку (інтерфейсу) по боковій поверхні і під вістря палі.

Fig.9. Scheme of "virtual" contact (interface) on the side surface and under the tip of the pile.

Розрахунок жорсткості можна виконати в окремому модулі «Свайный интерфейс» де необхідно вказати інформацію про палю (рис.10), інформацію про геологічні умови (рис.11).

Рис.10. Параметри палі.
Fig.10. Pile parameters.

ИГЭ	Грунт	Толщина Н (м)	Отметка (м)
1	Глина	1.0	1.0
2	Глина	1.0	2.0
3	Суглинок	2.0	4.0
4	Суглинок	1.0	5.0
5	Глина	1.0	6.0
6	Глина	1.0	7.0
7	Глина	1.0	8.0

Рис.11. Параметри ґрунтового середовища.

Fig.11. Soil environment parameters.

Результати розрахунку представлені на рис.12. Так-як паля прорізає 4 шари ґрунтової основи, то в результаті ми отримуємо 4 жорсткості.

Ultimate Shear Force		Shear Stiffness (Kt)	
№	Значение (кН/м2)	№	Значение (кН/м3)
1	9.6	1	1874.59
2	9.55	2	1864.82
3	8.0	3	1562.15
4	11.6	4	2265.12

Normal Stiffness (Kn)	
№	Значение (кН/м3)
1	1620.0
2	4410.0
3	7200.0
4	11610.0

Рис.12. Отримані результати.
Fig.12. The results obtained

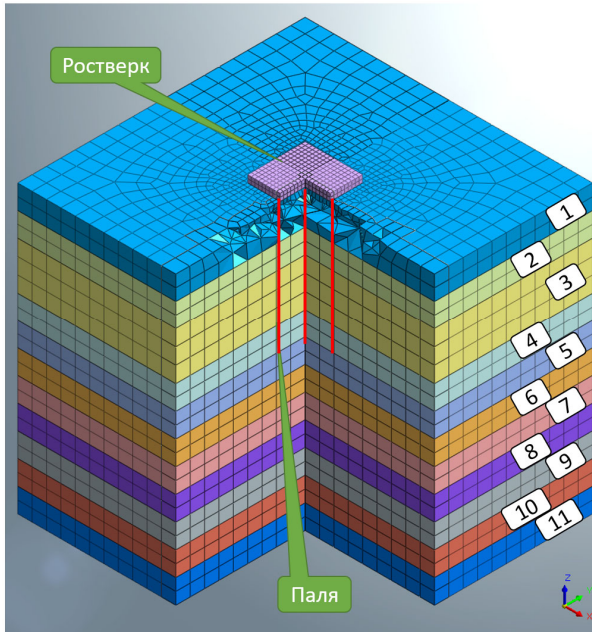


Рис.13. Фрагмент розрахункової моделі із використанням об'ємних СЕ в якості ґрунтового середовища та інтерфейсів палі.

Fig.13. Fragment of a computational model using three-dimensional elements as soil environment and pile interfaces

Між плитою ростверку та ПГЕ-1 встановлено інтерфейси, що знижують тертя на 33% ($R = 0,67$).

Рисунки з отриманими вертикальними напруженнями в «Midas GTS NX» є більш контрастними в порівнянні із результатами, що наведені на рис.7-8.

Як можемо бачити із рис.15, що на межі контакту ростверку з ПГЕ-1 є концентратори напружень, що відсутні на результатах на рис.7-8 (ПК «Ліра – САПР»). Це, теоретично, пов'язано із використанням інтерфейсу. Якби ПК «Ліра – САПР» мав такий інструмент, можливо там теж спостерігалися б такі концентратори напружень.

Порівняння поздовжніх зусиль в палях і їх осідання виконано на останніх сторінках даної роботи (рис.19-22).

Також по рис.13 можемо бачити дуже гарну триангуляцію СЕ: довкола плити ростверку СЕ створено дрібніше, а віддаляючись від неї – крупніше. Нажаль такої триангуляції в ПК «Ліра – САПР» (версії 2019), неможливо досягти, адже там об'ємні скінченні елементи треба «видавлювати».

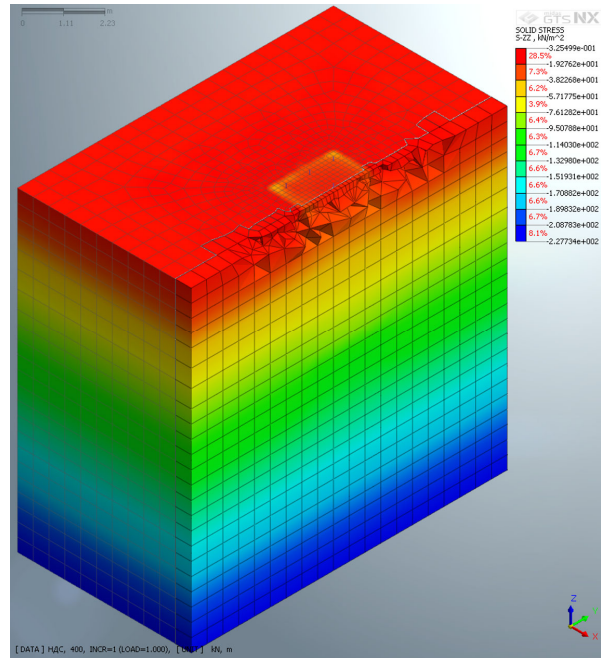


Рис.14. Напруження в об'ємних СЕ ґрунтового середовища на IV стадії монтажу.

Fig.14. Vertical stresses in bulk FE of the soil environment at the IV stage of installation.

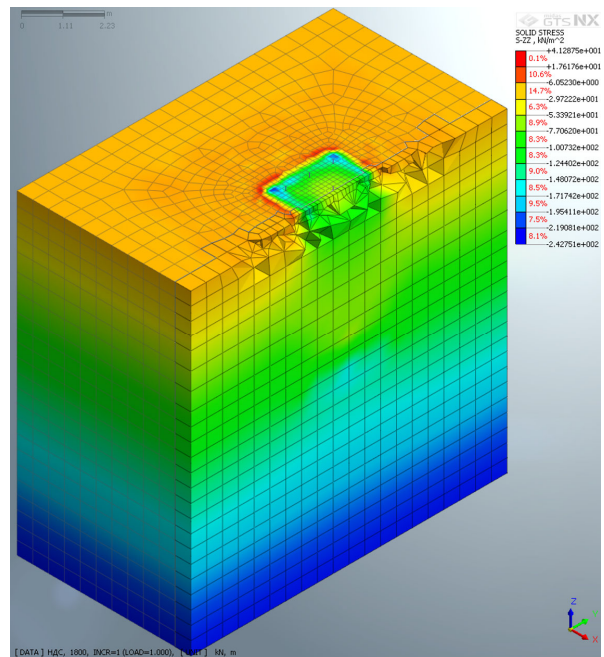


Рис.15. Напруження в об'ємних СЕ ґрунтового середовища на VIII стадії монтажу.

Fig.15. Vertical stresses in bulk FE of the soil environment at the VIII stage of installation.

Особливістю даного методу є: 1) СЕ палі і ґрунтового середовища не пересікаються між собою; 2) нелінійні властивості тертяковання для елементів інтерфейсів; 3) не-

має необхідності робити дрібну тріангуляцію – відповідно треба менший час на розрахунок моделі; 4) Інтерфейси по боковій поверхні і під п'ятою палі задаються окремо; 5) підходить для моделей з великою кількістю палей.

2.2) МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНОЇ ОСНОВИ ОБ'ЄМНИМИ СКІНЧЕННИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ З КРИТЕРІЄМ МІЦНОСТІ КУЛОНА-МОРА ТА ПАЛЯМИ ІЗ ОБ'ЄМНИХ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Параметри ґрунтового середовища такі ж як в попередньому варіанті моделювання.

Відмінністю даного методу моделювання від попереднього є те, що палі моделюються об'ємними скінченними елементами (рис.16). По боковій поверхні палі та під підошовою ростверку влаштовано інтерфейси ($R = 0,67$).

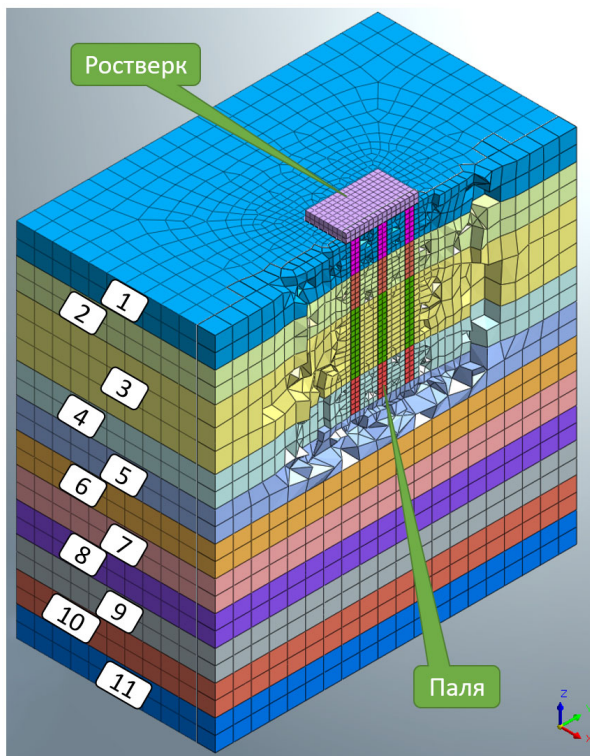


Рис.16. Фрагмент розрахункової моделі із використанням об'ємних СЕ в якості ґрунтового середовища та палей.

Fig.16. Fragment of the calculation model using volumetric CE as soil medium and piles

Оскільки палі моделюються об'ємними скінченними елементами, то в результаті розрахунку ми отримаємо напруження, а не зусилля.

Щоб перевести напруження в зусилля необхідно згадати опір матеріалів, або ввести віртуальну балку, що проходить через центр ваги палі.

Параметри ґрунтового середовища аналогічні попередньому варіанту моделювання.

Особливості даного методу: 1) трудомісткий процес створення сіток СЕ палей та оточуючого ґрунтового середовища; 2) велика кількість СЕ – треба багато часу на розрахунок моделі; 3) результатом розрахунку є напруження; 4) є еталонним варіантом моделювання, так як враховується площинний ефект при створенні інтерфейсів, а також розповсюдження напружень по перерізу палі.

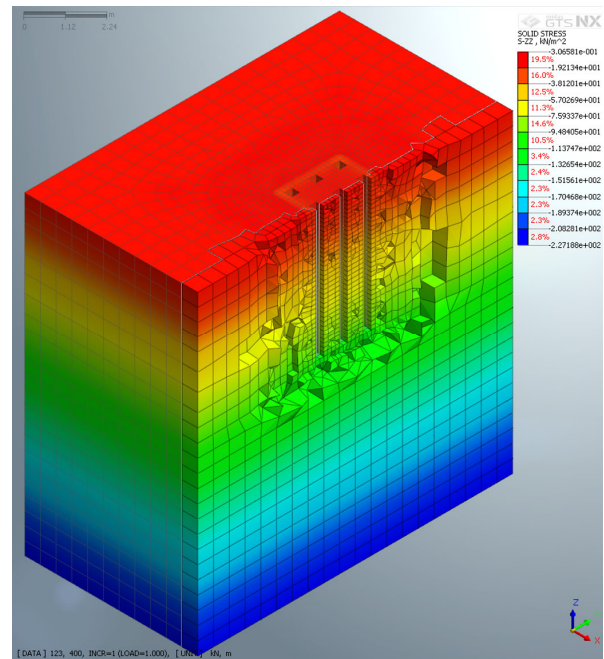


Рис.17. Напруження в об'ємних СЕ ґрунтового середовища на IV стадії монтажу.

Fig.17. Vertical stresses in bulk FE of the soil environment at the IV stage of installation.

Порівнюючи рис.14 та рис.17 (на II стадії навантаження ростверку) можемо спостерігати майже ідентичні ізополя напружень в об'ємних СЕ. Відмінність лише кількісна та складає близько 5...7%, що показує на гарну кореляцію результатів незалежно від методу моделювання пального фундаменту.

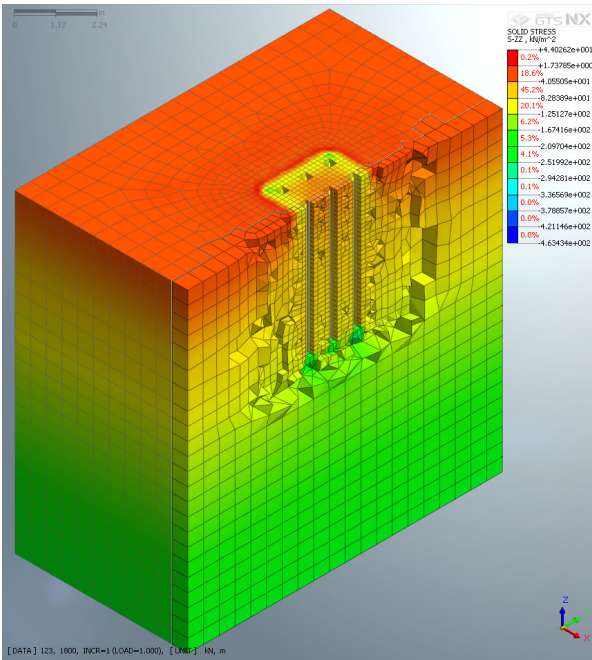


Рис.18. Напруження в об'ємних SE ґрунтового середовища на VIII стадії навантаження.

Fig.18. Vertical stresses in bulk FE of the soil environment at the VIII stage of loading.

ПОРІВНЯННЯ ПОЗДОВЖНІХ ЗУСИЛЬ ТА ОСІДАННЯ ПАЛЬ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД МЕТОДУ МОДЕЛЮВАННЯ ОСНОВИ ТА ЗАСТОСОВАНОГО ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ

Нижче наведено порівняння поздовжніх зусиль в палях та осідання (рис.19-22) характерних паль, що наведено на рис.1.

Для відображення кількісних відмінностей, порівняння результатів виконано у вигляді гістограми. Для зручності порівняння було визначено різницю у відсотках (за 100% взято результати дослідження Бартоломея А. О. [1]).

Червоний колір відсотків – отримане значення перевищує результати випробування.

Блакитний колір відсотків – отримане значення менше того, що отримано при випробуванні.

Щоб не захаращувати роботу однотипними гістограмами, було прийнято рішення, що буде показано порівняння на IV та VIII стадії монтажу (див.табл.2).

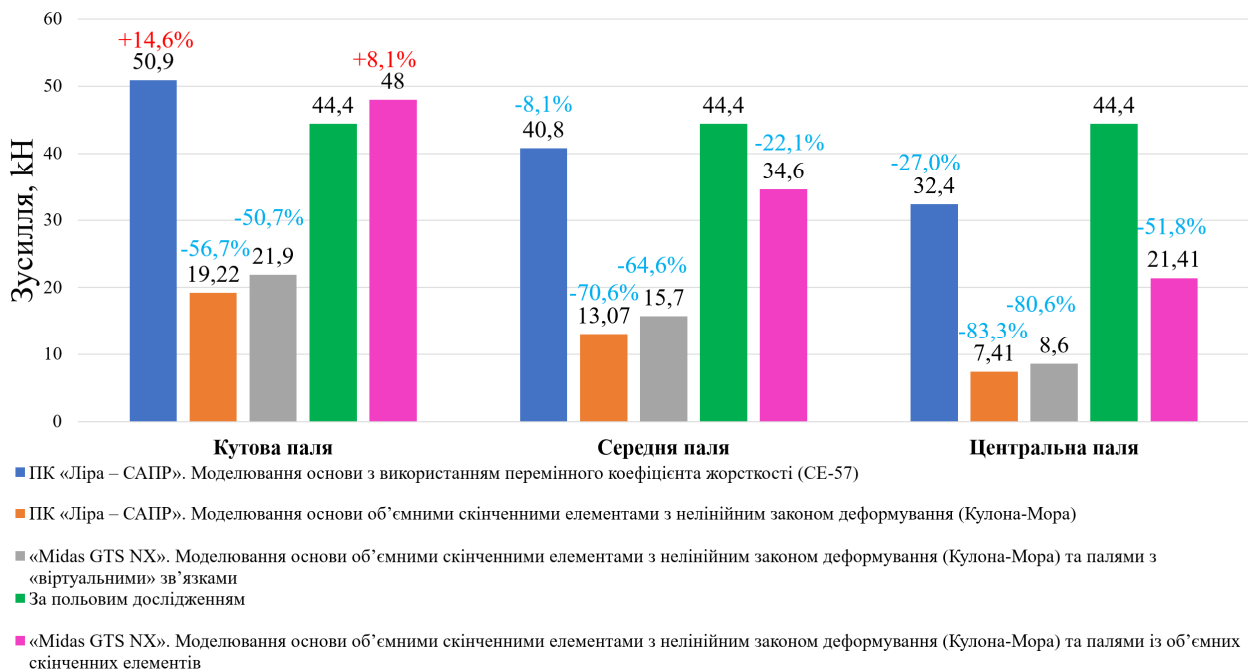


Рис.19. Поздовжні зусилля в дослідних палях в залежності від методу моделювання основи та використаного програмного комплексу. Стадія монтажу IV.

Fig.19. Longitudinal forces in experimental piles depending on the method of modeling the base and the software used. Stage of montage IV.

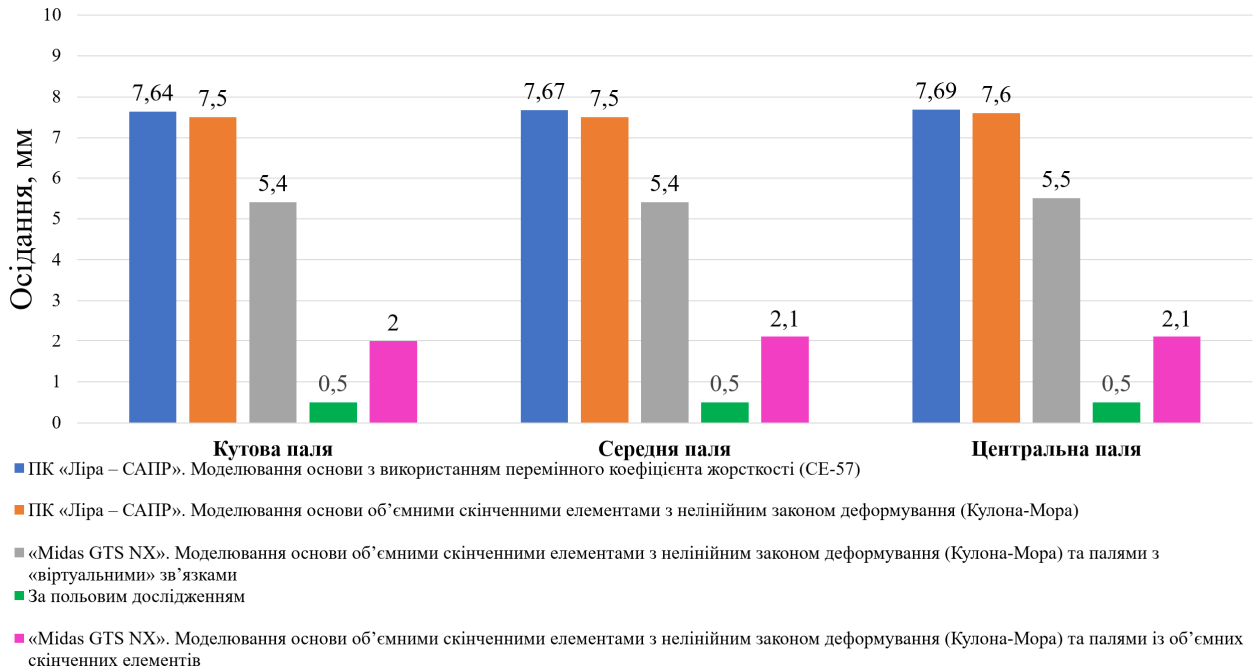


Рис.20. Осідання дослідних палей в залежності від методу моделювання основи та використаного програмного комплексу. Стадія монтажу IV.

Fig.20. Displacement of experimental piles depending on the method of modeling the base and the software used. Stage of montage IV.

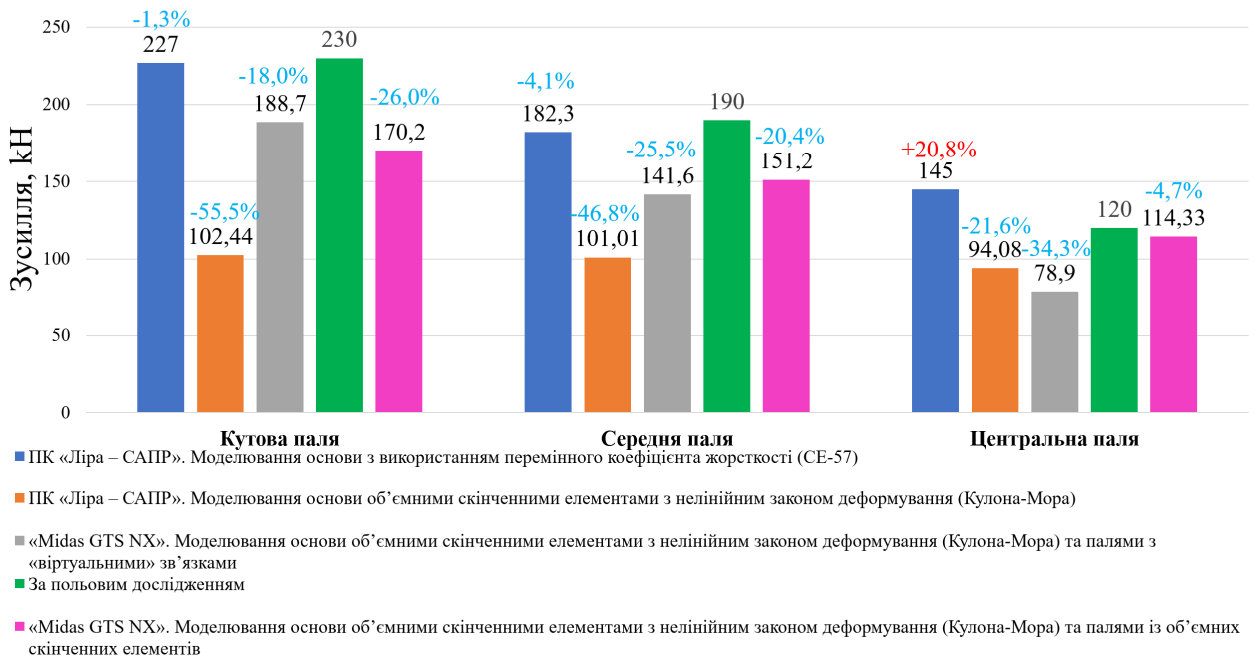


Рис.21. Поздовжні зусилля в дослідних палях в залежності від методу моделювання основи та використаного програмного комплексу. Стадія монтажу VIII.

Fig.21. Longitudinal forces in experimental piles depending on the method of modeling the base and the software used. Stage of montage VIII.

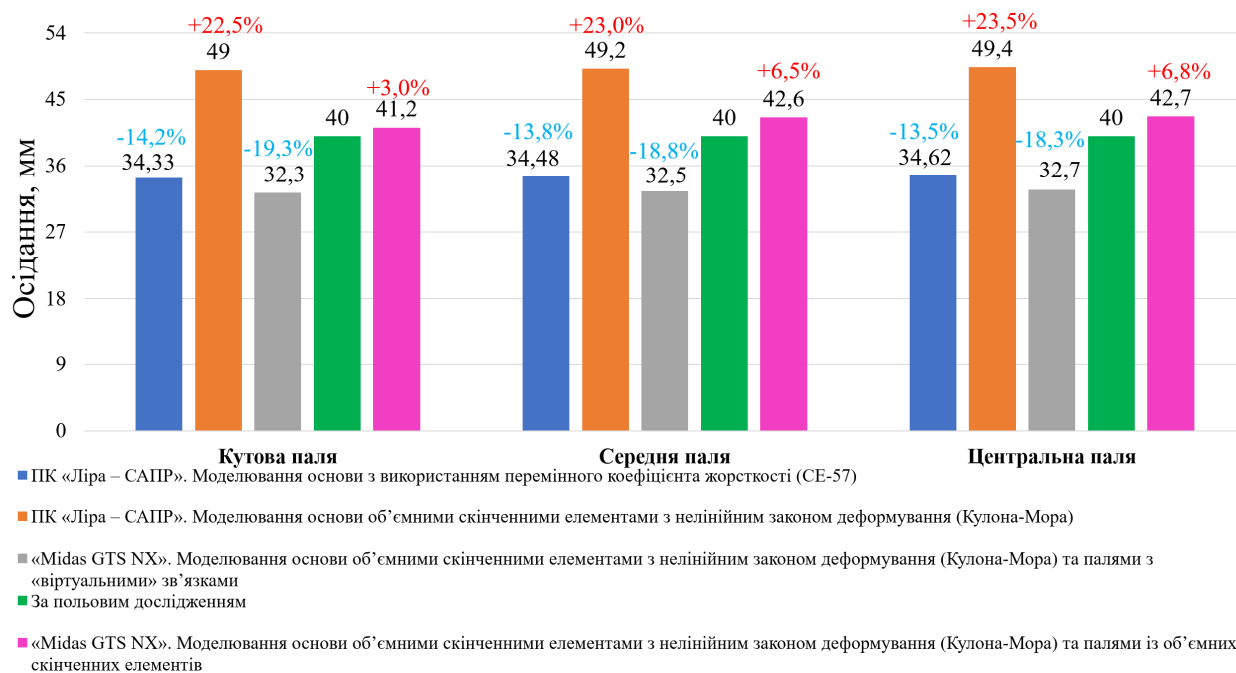


Рис.22. Осідання дослідних паль в залежності від методу моделювання основи та використаного програмного комплексу. Стадія монтажу VIII.

Fig.22. Displacement of experimental piles depending on the method of modeling the base and the software used. Stage of montage VIII.

ВИСНОВКИ

Показано, що вибір програмного комплексу та методу моделювання основи (грунтового середовища) впливає на НДС групи паль.

Моделювання основи з використанням перемінного коефіцієнта жорсткості (SE-57) в ПК «Ліра – САПР» призводить до кількісної відмінності отриманих результатів з польовим дослідженням: 1) поздовжні зусилля – 1,3...27% (в середньому 12,65%); 2) осідання – 13,5...14,2% (в середньому 13,83%). Даний метод моделювання є найменш трудозатратним і швидким в розрахунку. Недоліком даного методу моделювання є те, що необхідно для кожної стадії навантаження створювати окрему модель, так як неможливо виконати коректне уточнення (перерахунок) жорсткостей SE-57 при зміні навантаження.

Моделювання основи об'ємними скінченними елементами з нелінійним законом деформування (Кулона-Мора) в ПК «Ліра – САПР» призводить до кількісної відмінності отриманих результатів з польовим дослідженням: 1) поздовжні зусилля –

21,6...83,3% (в середньому 55,75%); 2) осідання – 22,5...23,5% (в середньому 23%). Даний метод моделювання вважається еталонним серед вітчизняних проектувальників, в той же час він є доволі трудомістким і необхідно значно більше часу (в порівнянні із попереднім методом) на розрахунок моделі. Недоліком даного методу моделювання є те, що необхідно контролювати коректність розмірів SE грунтового середовища та сумісну роботу елементів (щоб вузли палі були зшиті із грунтовим середовищем). Час розрахунку моделі складав 20хв (1200с).

Моделювання основи об'ємними скінченними елементами з нелінійним законом деформування (Кулона-Мора) та палями з «виртуальними» зв'язками в «Midas GTS NX» призводить до кількісної відмінності отриманих результатів з польовим дослідженням: 1) поздовжні зусилля – 18...80,6% (в середньому 45,62%); 2) осідання – 18,3...19,3% (в середньому 18,8%). Даний метод моделювання є дещо «чорним ящиком», тому що повністю невідомо як працюють «виртуальні» зв'язки та як розраховуються характеристики, що наведено на

рис.12 (формули для розрахунку можна знайти в інтернеті, але їх ще треба «розкручувати»). Моделювання є дещо складнішим ніж в ПК «Ліра – САПР». Перевагою даного програмного комплексу є: можливість створення інтерфейсів на межі контакту елементів із різних матеріалів (ростверк – ґрунт), гарна тріангуляція елементів моделі та контрастні картинки результатів. Для розрахунку такої моделі було витрачено 110с, що у 10,9 рази швидше ніж в ПК «Ліра – САПР».

Моделювання основи об'ємними скінченними елементами з нелінійним законом деформування (Кулона-Мора) та палями із об'ємних скінченних елементів в «Midas GTS NX» призводить до кількісної відмінності отриманих результатів з польовим дослідженням: 1) поздовжні зусилля – 4,7...51,8% (в середньому 22,18%); 2) осідання – 3...6,8% (в середньому 5,43%). Даний метод вважається еталонним для моделювання експериментів. Це видно по різниці осідання дослідних паль (близько 5,43%) в порівнянні із експериментом. Даний метод є найбільш трудомістким. До переваг даного методу можна віднести те, що є можливість задати інтерфейси по боковій поверхні палі та під ростверком. Для розрахунку такої моделі було витрачено 11хв (660с), що у 1,8 рази швидше ніж в ПК «Ліра – САПР».

ЛІТЕРАТУРА

1. Бартоломей А.А. Прогноз осадок свайных фундаментов / А.А.Бартоломей, И.М.Омельчак, Б.С.Юшков. – Москва: Стройиздат, 1994. – 378с.
2. Бойко І.П. Особливості взаємодії пальових фундаментів під висотними будинками з їх основою. / І.П.Бойко // *Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник*. – К.: КНУБА. – 2006. – Вип. 30. – С. 3-8.
3. Носенко В.С. Напружено-деформований стан пальово-плитних фундаментів секційних висотних будинків: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Носенко Віктор Сергійович. – К.: КНУБА, 2012. – 175с.
4. Підлуцький В.Л. Взаємодія фундаментної плити з палями різної довжини з ґрунтовою багатопшаровою основою: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Підлуцький Василь Леонідович. – К.: КНУБА, 2013. – 230с.

5. Сахаров В.О. Моделювання взаємодії пальового фундаменту з нелінійною основою в умовах прибудови: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Сахаров Володимир Олександрович. – К.: КНУБА, 2005. – 215 с.
6. Boyko I.P. Finite element simulation of the loss of stable resistance in a foundation-soil system / I.P. Boyko, V.S. Boyandin, A.E. Delnik, A.L. Kozak, A.S. Sakharov // *Archive of Applied Mechanics № 62*. – 1992. – p. 316-328.
7. Городецкий А.С. Компьютерные модели конструкций / А.С. Городецкий, И. Д. Евзоров. – Київ: ФАКТ, 2007. – 392с.
8. Бойко І.П. Ідентифікація параметрів ґрунтів на основі результатів натурних випробувань паль / І.П. Бойко, Л.О. Скочко, М.В. Хоронжевський // *Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник*. – К.: КНУБА. – 2021. – Вип. 42. – С. 9-18.
9. Boyko I. Interaction of piles in field tests / I.Boyko, V.Pidlutskyi, V.Buriak // *2nd Polish-Ukrainian Geotechnical Scientific Seminar. Planning of experiment project «Pile tests – 2019»*. – Zielona Góra, Poland. - 9.10.2018.

REFERENCES

1. Bartolomey A.A., Omelchak I.M., Yushkov B.S. (1994). Prohnoz osadok svaynykh fundamentov [Pile foundation settlement forecast]. Moscow. Stroyizdat, 378. (in Russian).
2. Boyko I.P. (2006). Osoblyvosti vzaiemodii palovykh fundamentiv pid vysotnymy budynkamy z yikh osnovoiu [Features of the interaction of pile foundations under high-rise buildings with their foundation]. *Osnovu i fundamenti: Mizhvidomchyy naukovotekhnichnyy zbirnyk*. Kyiv: KNUBA, 30, 3-8 (in Ukrainian).
3. Nosenko V.S. (2012). Napruzhenodeformovanyj stan paljovo-plytnykh fundamentiv sekcijnykh vysotnykh budynkiv [Stress-strain state of plate-pile foundations of sectional high-rise buildings]. *Dys. kand. tekhn. nauk: 05.23.02*. Kyiv: KNUBA, 175 (in Ukrainian).
4. Pidlutskyi V.L. (2013). Vzayemodiya fundamentnoyi plyty z palyamy riznoyi dovzhyny z gruntovoyu bagatosharovoyu osnovoyu [Interaction of a base plate with piles of different lengths with a soil multilayer basis]. *Dys. kand. tekhn. nauk: 05.23.02*. Kyiv: KNUBA, 230 (in Ukrainian).
5. Sakharov V.O. (2005). Modelyuvannya vzayemodiyi paljovogo fundamentu z

- nelinijnoyu osnovoyu v umovakh prybudovy [Modeling of the interaction of a pile foundation with a nonlinear basis in the conditions of an extension]. Dys. kand. tekhn. nauk: 05.23.02. Kyiv: KNUBA, 215 (in Ukrainian).
6. Boyko I.P., Boyandin V.S., Delnik A.E., Kozak A.L., Sakharov A.S. (1992). Finite element simulation of the loss of stable resistance in a foundation-soil system. *Archive of Applied Mechanics*, 62, 316-328.
 7. Gorodetskiy A.S. (2007). Komp'yuternyye modeli konstruksiy [Computer models of constructions]. Kyiv, FAKT, 392 (in Ukrainian)/
 8. Boyko I.P., Skochko L.O., Khoronzhevskiy M.V. (2021). Vyznachennya parametriv gruntu za rezul'tatamy pol'ovyykh vyprobuvan' pal' [Identification of soil parameters based on the results of field tests of piles]. *Osnovu i fundamente: Mizhvidomchyy naukovotekhnichnyy zbirnyk*. Kyiv: KNUBA, 42, 9-18 (in Ukrainian).
 9. Boyko I., Pidlutskiy V., Buriak V. (2019). Interaction of piles in field tests. *2nd Polish-Ukrainian Geotechnical Scientific Seminar. Planning of experiment project «Pile tests – 2019»*. Zielona Góra, Poland. 9.10.2018.

Determination of the stress-strain state of a group of piles by numerical simulation of their interaction with the base according to field research data

Viktor Nosenko
Ostap Kashoida

Summary. Engineers often face the question: - Which software package should be chosen to solve a particular problem? The following software systems are used to solve geotechnical problems: 1) Plaxis; 2) Midas GTS NX; 3) Abaqus; 4) Lira - SAPR. Each of the software packages has certain advantages and disadvantages.

In this study, the software package "Lira - SAPR" and "Midas GTS NX" are used. With the help of which numerical modeling of the interaction of a group of piles with the base was performed, which is described in the experience of Bartolomey A. A. [1].

The stress-strain state was compared, which was obtained using the following variants of the models of the "base - pile foundation" system:

1) software package "Lira-SAPR":

1.1) piles are modeled by single-node finite elements, which are located with a step specified along

the length of the pile and have rigidity in different directions and approximately take into account the surrounding soil around the pile and under its tip (FE-57);

1.2) the soil environment is modeled by non-linearly deformable volumetric finite elements; piles - rod finite elements.

2) "Midas GTS NX":

2.1) the soil environment is modeled by non-linearly deformable volumetric finite elements; piles - rod finite elements that have a "virtual" connection with the surrounding soil;

2.2) soil environment - similarly; piles - volumetric finite elements with the parameters of reinforced concrete.

It is shown that the choice of the software package and the method of modeling the base affects the stress-strain state of the "base - pile foundation" system.

Modeling the base using the belt stiffness coefficient leads to a quantitative difference between the obtained results and the field study. This modeling method is the least labor-intensive and fast. The disadvantage of this modeling method is that it is necessary to create a separate model for each stage of the load.

Modeling the base with volumetric finite elements with a nonlinear deformation law will disturb the identification of the design parameters of the base, which is quite laborious. The disadvantage of this modeling method is that it is necessary to control the correctness of the dimensions of the finite elements and their joint work.

Keywords. Lira - SAPR, Midas GTS NX, group of piles, numerical modeling, volumetric soil mass, stiffness coefficients.