

Порівняння несучої здатності бурової палі малого діаметру, отриманої за результатами натурних випробувань і числового моделювання

Сорока Павло¹

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

¹pavlo40@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0003-8766-5442>

DOI: 10.32347/0475-1132.47.2023.38-48

Анотація. Представлено порівняння результатів моделювання статичних випробувань ґрунтів буровою палею малого діаметру з даними, отриманими з натурних випробувань. Розрахунки виконувались методом числового моделювання за допомогою програмного забезпечення ПК «Plaxis», в основу якого покладено метод скінченних елементів. Дана задача була реалізована в плоскій (2D) постановці для осесиметричної моделі, яка дає змогу аналізувати напружено-деформований стан (НДС) та взаємодію елементів системи «паля-ґрунтового середовища».

Створено окремі розрахункові моделі для двох типів паль, виконаних за різними технологіями: буроін'єкційна СФА паля та бурова паля з частковим витісненням ґрунту. Для врахування історії попереднього навантаження з метою максимального наближення моделей до реальних умов, розрахунки виконані в 4 етапи у відповідності до послідовності будівництва: 1 етап – початковий етап (визначення початкових напружень в ґрунтовому масиві в природному стані), 2 етап – розробка ґрунту до проектної відмітки дна котловану, 3 етап – випробування ґрунтів палею статичним вдавлювальним навантаженням. 4 етап – розвантаження палі. За результатами розрахунків було проведено аналіз НДС та взаємодії елементів системи «паля-ґрунтового середовища» та виконано співставлення графіків осідань, отриманих за результатами розрахунків та даними натурних випробувань.

Показано, що використання плоскої осесиметричної СЕМ є достатньо ефективним підходом для оцінки напружено-деформованого стану та розуміння взаємодії елементів системи «паля-ґрунтового середовища», а також прогнозування несучої здатності паль для подальшого



Павло Сорока
аспірант кафедри
геотехніки.

проекування пальової основи до отримання результатів натурних випробувань. Крім того, трудомісткість та затрати часу при даному підході порівняно невисокі відносно інших альтернативних методів.

За відповідного досвіду використання даного підходу в різних ґрунтових умовах з відповідним співставленням з даними натурних випробувань, він може бути застосований при техніко-економічному обґрунтуванні та прийнятті остаточних рішень про вибір того чи іншого типу фундаментів

За результатами розрахунків було визначено, що різниця в отриманих значеннях несучої здатності отриманих в результаті числового моделювання та натурних випробувань складає 3-4%. При цьому значення несучої здатності РДР палі вище на 69% ніж несуча здатність буроін'єкційних СФА паль.

Ключові слова. бурові палі, несуча здатність паль, числове моделювання, випробування ґрунтів палями.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Зведення фундаментів будівель та споруд у сучасних умовах при поступовому загостренні дефіциту матеріальних ресурсів та збільшенні вартості будівельних матеріалів вимагає більш високої точності при

розрахунках та проектуванні фундаментів для максимально ефективного використання несучої здатності ґрунтової основи та матеріалу фундаментів. Враховуючи те, що палі малого діаметру останнім часом все частіше використовуються в якості фундаментів будівель та споруд, виникає потреба у вдосконаленні методик моделювання їх взаємодії з ґрунтовим середовищем.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Питання числового моделювання взаємодії бурових паль з ґрунтовим середовищем та визначення несучої здатності паль висвітлювали у своїх роботах Бойко І.П. [1], Маєвська І. В. [2], Винников Ю. Л. [3] Зоценко М. Л. [4], Тол Ф. та Брьюре В. [5], Кабелла Е. та Пасалакв Р [6]., Кос Ж. [7], Венгерт М. та Вермеер П. [8]

МЕТА РОБОТИ

Аналіз ефективності числового моделювання методом скінченних елементів для оцінки напружено-деформованого стану та опису взаємодії елементів системи «паля-ґрунтове середовище», а також для підвищення точності визначення несучої здатності бурових паль малого діаметру при проектуванні фундаментів.

ЗАДАЧІ

- 1) Оцінка НДС системи «паля-ґрунтове середовище» з використанням числового моделювання у плоскій осесиметричній постановці задачі 2D.
- 2) Аналіз результатів проведення статичних випробувань ґрунтів натурними палями на будівельному майданчику.
- 3) Порівняння результатів та визначення відхилень результатів числового моделювання від даних, отриманих під час натурних випробувань.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Числове моделювання виконувалось в програмному комплексі Plaxis за методом

скінченних елементів з використанням осесиметричної схеми з 15-вузловими трикутних елементами. Для опису поведінки ґрунтів обрана HS-модель (Hardening Soil Model), що описує пружно-пластичне деформування ґрунтів та враховує підвищення деформаційних характеристик ґрунтів при повторному завантаженні. Стовбур палі задається у вигляді масиву з відповідними пружними характеристиками та лінійною роботою матеріалу. Вдавлювальне навантаження імітоване прикладанням вимушеного переміщення відповідної величини.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Моделювання виконано на основі реальних ґрунтових умов та особливостей ділянки лівобережної частини м. Києва в безпосередній близькості до р. Дніпро.

Майданчик потенційного будівництва відноситься до басейну р. Дніпро. Західна межа майданчика розміщується на відстані 55...70 м від берегової лінії р. Дніпро. Рельєф ділянки нерівний, техногенно змінений, із загальним незначним пониженням у західному напрямку (до русла р. Дніпро). Абсолютні позначки по майданчику на час вишукувань складають 97.80...99.40 м.

Геологічна будова ділянки розвідана на глибину до 20 м від денної поверхні і представлена комплексом сучасних і неоплейстоценових відкладів, що є типовими для даного району вишукувань. Голоценові відклади: представлені шаром техногенних насипних та намивних (в частині ділянки) ґрунтів (tH), що залягають на природному рельєфі заплави (виторфовування на ділянці не проводилось). Намивні ґрунти представлені дрібнозернистим різної щільності піском, потужністю до 2.5 м. Насипні ґрунти неоднорідні за своїм складом (суглинки, супіски, піски), часто із будівельним сміттям (уламки залізобетонних конструкцій, арматура, щебінь, ін.), домішками гумусованих ґрунтів, побутового сміття. Всі техногенні відклади відносяться до категорії злежаних. Вони покривають гумусовані та замулені малопотужні відклади старичної

фації (ІbН). Верхньоплейстоценова ланка: алювіальні відклади (аРІІІ) – представлені потужною товщею дрібнозернистих, переважно щільних пісків, з рідкими малопотужними прошарками супісків та суглинків. За літературними та архівними відомостями алювіальні відклади мають потужність більше 30 м. Вони залягають на сильно розмитій поверхні палеогенових та крейдових відкладів.

Гідрогеологічні умови ділянки характеризуються наявністю потужного водоносного горизонту, що приурочений до верхньоплейстоценових алювіальних відкладів (аРІІІ), за архівними даними він має потужність більше 40 м. Водовміщуючими грунтами виступають алювіальні піски. Підземні води на ділянці вишукувань зустрінуті

всіма свердловинами. Усталений рівень ґрунтових вод зафіксований на глибинах 4.2...5.8 м від денної поверхні, в абсолютних позначках 93.00...93.60 м. Водонесний горизонт – безнапірний, його живлення відбувається за рахунок гідравлічного зв'язку з водами долини р. Дніпро, та значно меншою мірою – за рахунок інфільтрації атмосферних опадів та можливих техногенних втрат з водонесучих мереж. Область живлення ґрунтових вод співпадає з областю розповсюдження водоносного горизонту в неоплейстоценових відкладах. Сезонні коливання ґрунтових вод складають 1.2...1.6 м. Територія вишукувань відноситься до підтопленої. Тип підтоплення – природний.

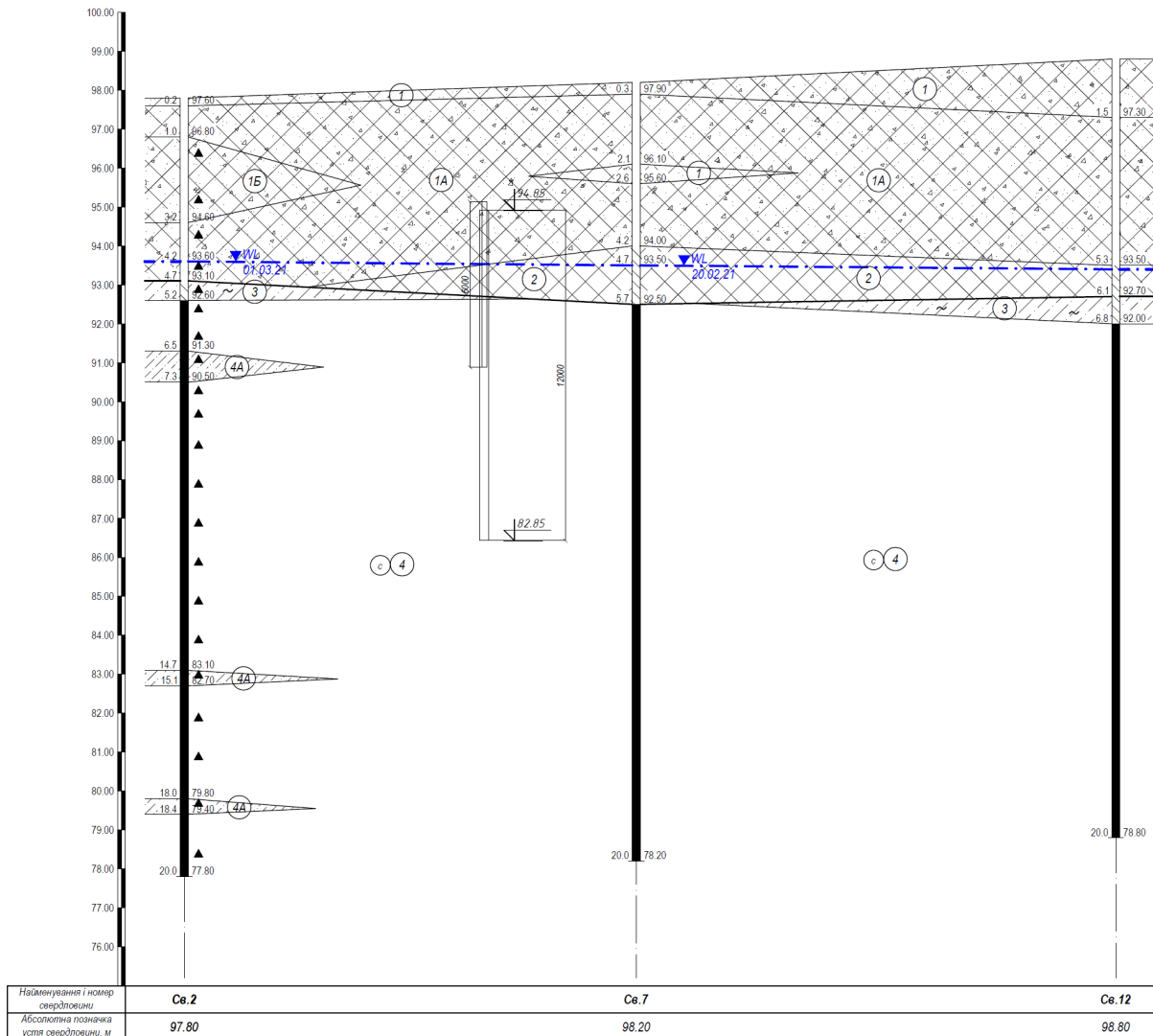
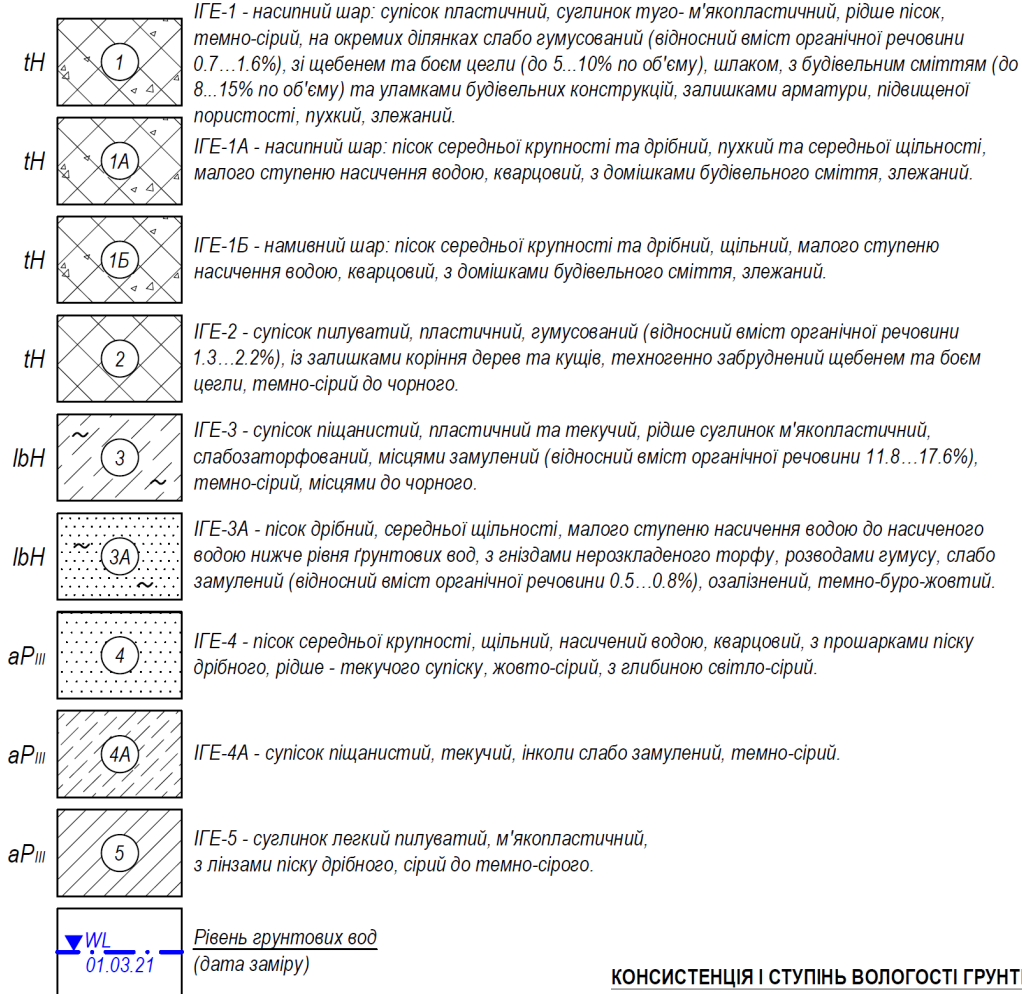


Рис.1. Посадка палі на інженерно-геологічний розріз по майданчику
Fig.1. Pile positioning on soil profile of the site

Умовні позначення:



ТОЧКИ ВІДБОРУ ЗРАЗКІВ:

- ▲ - ґрунту з порушеною структурою
- - ґрунту з непорушеною структурою
- - проби води

КОНСИСТЕНЦІЯ І СТУПІНЬ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТІВ

консистенція	ступінь вологості
Тверда	Маловологий
Пластична М'якопластична	Вологий
Текуча	Насичений водою

Рис.2. Опис ґрунтів
Fig.2. Soil description

Побудова розрахункових моделей відбувалась на основі даних інженерно-геологічних вишукувань. В якості розрахункового перерізу було використано інженерно-геологічну колонку для свердловини №7 (див. рис. 1). В якості об'єкта дослідження виступали дві бурові палі діаметром 320мм довжиною 12м (відмітка верху 94.85, відмітка низу 82.85), виконані за двома різними технологіями:

- паля №1 – бурова СFA паля (бурін'єкційна);

- паля №2 – бурова PDP паля, виконана за методом часткового витіснення ґрунту. Моделювання технології часткового витіснення виконується за допомогою приєднання відповідного значення об'ємної деформації для скінченних елементів в межах стовбура палі.

Натурні випробування проводились у відповідності до нормативу [9]. В якості анкерних паль були використані шість паль аналогічної конструкції, розташовані з дотриманням нормативних вимог.

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Числове моделювання напружено-деформованого стану системи «паля-грунтове середовище» виконувалось методом скінченних елементів в програмному комплексі Plaxis. При цьому використовується плоска осесиметрична модель з 15-вузловими кінцевими елементами трикутної форми. Для опису поведінки ґрунтів обрана HS-модель. Це вдосконалена модель другого порядку, яка є пружно-пластичним типом гіперболічної моделі, сформульованої в рамках пластичності зміцнення при зсуві. Крім того, модель включає зміцнення при стисненні для імітації незворотного ущільнення ґрунту при первинному стисненні. Іншими словами, модель передбачає зміну деформаційних параметрів в залежності від рівня напружень у ґрунті. Перехід ґрунту у граничний стан описується за допомогою критерію міцності Кулона-Мора.

Вхідні параметри ґрунтів:

γ_{unsat} – питома вага ґрунту у вище рівня ґрунтових вод (РГВ), кН/м^3 ;

γ_{sat} – питома вага ґрунту нижче рівня ґрунтових вод (РГВ), кН/м^3 ;

E_{50} – січний модуль деформації отриманий за результатами дренажних тривісних випробувань при половині граничного значення девіатора, МПа;

E_{oed} – модуль деформації отриманий за результатами первинних одометричних випробувань, МПа;

E_{ur} – модуль пружності при розвантаженні/повторному завантаженні, МПа;

c – питома зчеплення, кПа ;

ϕ – кут внутрішнього тертя, град;

ψ – кут дилатансії, град;

m – показник ступеня залежності жорсткості від рівня напружень;

ν_{ur} – коефіцієнт Пуассона для розвантаження/повторного завантаження;

p_{ref} – референтне значення тиску, при якому визначені відповідні значення модулів деформації, кПа ;

K_0 – параметр бічного тиску ґрунтів;

R_f – граничний коефіцієнт $R_f = q_f / q_a$.

Вхідні параметри ґрунтів та наведені у таблиці 1.

Стовбур палі задається масивом з пружними характеристиками і лінійною роботою за допомогою моделі Linear Elastic Model. Зона контакту бічної поверхні та п'яти палі з ґрунтовим середовищем моделюється інтерфейсними елементами.

Вхідні параметри матеріалу стовбуру палі:

γ – питома вага, кН/м^3 ;

E_{ref} – модуль пружності, кН/м^2 ;

ν – коефіцієнт Пуассона;

G_{ref} – модуль зсуву;

Вхідні розрахункові параметри матеріалу стовбуру палі та наведені у таблиці 2.

Для імітації вдавлювального навантаження використовуються вимушені рівномірні лінійні переміщення відповідної величини.

Модель створена на основі даних звіту з інженерно-геологічних вишукувань, нашарування ґрунтів та рівень ґрунтових вод прийняті відповідно до інженерно-геологічної колонки для свердловини №7.

Для врахування історії попереднього навантаження з метою максимального наближення моделі до реальних умов, розрахунки виконані в 4 етапи у відповідності до послідовності будівництва:

- 1 етап – початковий етап (визначення початкових напружень в ґрунтовому масиві в природному стані);

- 2 етап – розробка ґрунту до проектної відмітки дна котловану;

- 3 етап – випробування ґрунтів палею статичним вдавлювальним навантаженням;

- 4 етап – розвантаження палі.

За результатами моделювання виконано оцінку напружено-деформованого стану ґрунтового середовища та визначено розподіл поздовжніх зусиль в палях для кожного ступеня навантаження. На основі отриманих даних формується графік залежності осідання від прикладеного навантаження для вузла в рівні відмітки оголовка палі на її центральній осі (рис. 4), а також визначається величина несучої здатності палі згідно [11].

Кінцева величина вимушеного переміщення була задана на рівні 40мм, що відповідає вимогам [9]. Відповідне максимальне

навантаження на 1 радіан круглого перерізу палі при даному осіданні склало:

- для CFA палі – 114.3 кН/рад, або 718 кН для всього перерізу;
- для PDP палі – 198.3 кН/рад, або 1246 кН для всього перерізу.

При цьому розподіл навантаження між бічною поверхнею та п'ятою палі виглядає наступним чином (рис. 3):

- для CFA палі: бічна поверхня – 423 кН (що відповідає середній величині тertia по бічній поверхні 35 кПа), п'ята – 295 кН (що відповідає середній величині напруження 3668 кПа);

- для PDP палі: бічна поверхня – 944 кН (що відповідає середній величині тertia по бічній поверхні 78 кПа), п'ята – 302 кН (що відповідає середній величині напруження 3755 кПа).

При величині осідання 30мм за допомогою графіка була визначена величина несучої здатності (рис.4) 30мм, яка склала:

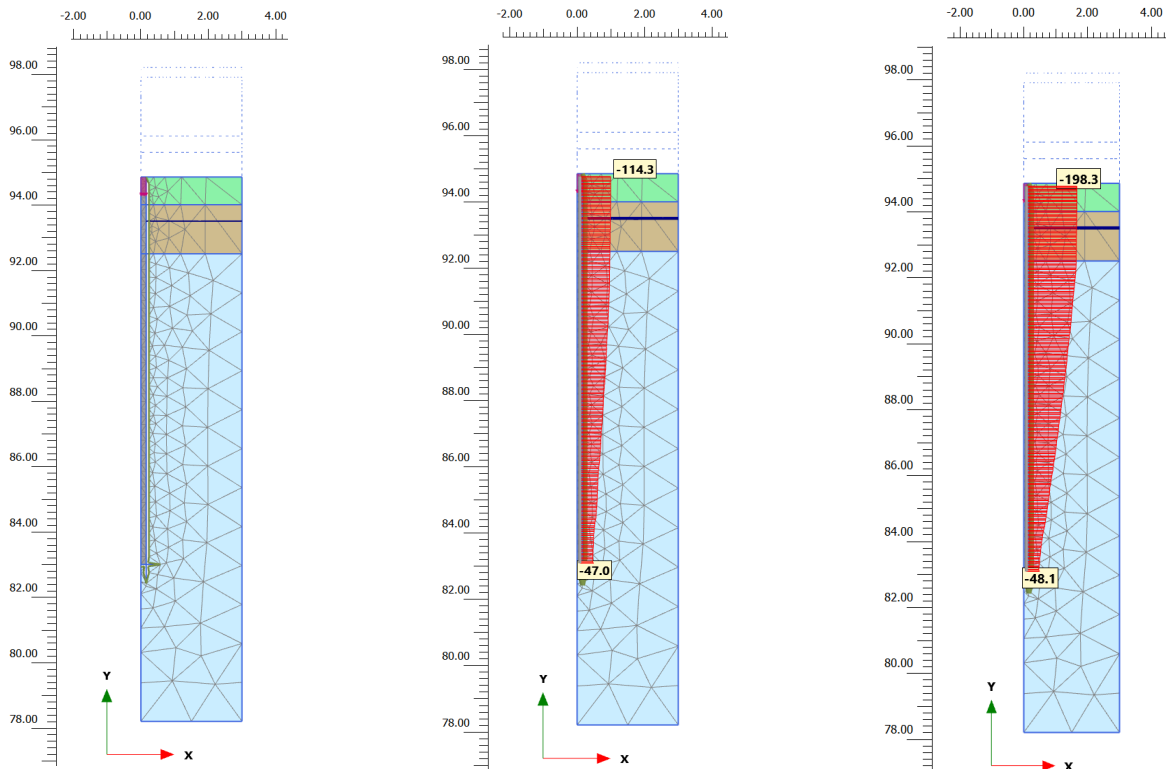
- для CFA палі – 675 кН;
- для PDP палі – 1149 кН.

Табл. 1. Вхідні розрахункові параметри ґрунтів.
Table 1. Input calculation parameters of soils.

№ ПЕ	Найменування ґрунтів	Характеристики ґрунтів								
		Питома вага вище РГВ, кН/м ³	Питома вага нижче РГВ, кН/м ³	Модуль деформації за результатами тривалих випробувань, МПа	Модуль деформації за результатами одометричних випробувань, МПа	Модуль пружності при розвантаженні/повторному завантаженні, МПа	Питома зчеплення, кПа	Кут внутрішнього тертя, градусів	Показник ступеня залежності жорсткості від рівня напружень	Референтний тиск
		γ_{unsat}	γ_{sat}	E_{50}	E_{oed}	E_{ur}	c	ϕ	m	P_{ref}
		кН/м ³	кН/м ³	МПа	МПа	МПа	кПа	град	дол. од.	кПа
1	Насипний шар	15,80	18,70	7	7	21	0.1	18	0,5	100
1А	Насипний шар	16,40	19,40	16	16	48	0.1	18	0,5	100
2	Супісок пластичний	15,60	17,80	6	6	30	6	9	0,85	100
4	Пісок щільний	18,10	20,10	45	45	135	4	37	0,5	100

Табл. 2. Вхідні розрахункові параметри матеріалу стовбуру палі
Table 2. Input calculation parameters of pile shaft material

№ з/п	Найменування матеріалу	Характеристики матеріалів			
		Питома вага, кН/м ³	Модуль пружності, МПа	Коефіцієнт Пуасона	Модуль зсуву, МПа
		γ	E_{ref}	ν	G
		кН/м ³	ГПа		ГПа
1	Бетон С32/40	25,00	32	0,15	13,9



а) Скінченно-елементна модель в програмному комплексі Plaxis
 a) Finite element model in Plaxis

б) Епіюра поздовжніх зусиль в CFA палі
 б) Longitudinal forces diagram for CFA pile

в) Епіюра поздовжніх зусиль в PDP палі
 в) Longitudinal forces diagram for PDP pile

Рис.3. Скінченно-елементна модель та епюри поздовжніх зусиль в паялах
 Fig.3. Finite element model and longitudinal force diagrams in piles

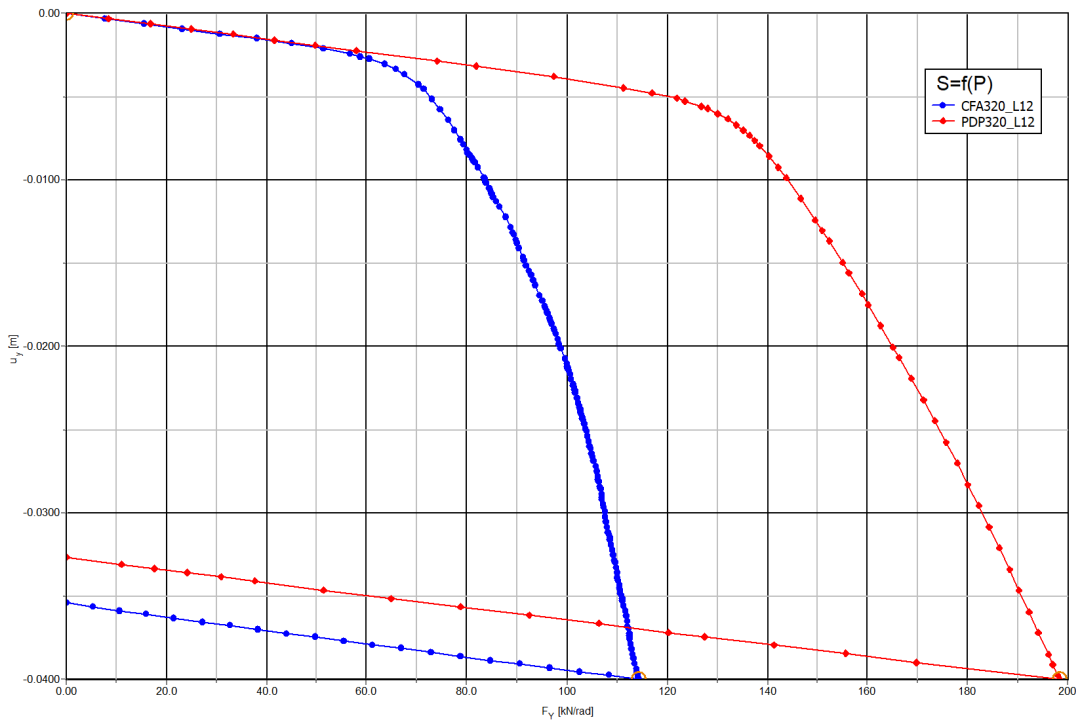


Рис.4. Графік залежності величини осідання від прикладеного зусилля за результатами моделювання
 Fig.4. Load-settlement curve according to the modeling results

НАТУРНІ ВИПРОБУВАННЯ ҐРУНТІВ ПАЛЯМИ

Для визначення реальної величини несучої здатності паль на майданчику були влаштовані два випробувальні кущі із застосуванням різних технологій: буроін'єкційні CFA палі та бурові PDP палі з частковим витісненням ґрунту. Після закінчення технологічної перерви для набору бетоном паль проектної міцності були виконані статичні випробування ґрунтів натурними палями згідно [9] (рис.5).

Навантаження на палі було доведено до значень:

- CFA паля №1 – 74 тони при осіданні 45,34мм;
- PDP паля №2 – 135 тон при осіданні 42,3мм.

Визначена відповідно до [11] несуча здатність палі при величині осідання 30мм складала:

- для CFA палі №1 – 70 тон;
- для PDP палі №2 – 118 тон.

Графік залежності осідань від прикладеного навантаження при натурних випробуваннях відображений на рис.7.

ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

За результатами моделювання статичних випробувань ґрунтів палями у програмному комплексі Plaxis за методом скінченних елементів та проведення випробувань ґрунтів натурними палями статичним вдавлювальним навантаженням виконано порівняння графіків залежності осідань паль від прикладеного навантаження (рис. 8) та отриманих значень несучої здатності паль для двох типів: буроін'єкційні CFA палі та бурові PDP палі з частковим витісненням ґрунту.

Різниця в отриманих значеннях несучої здатності отриманих в результаті числового моделювання та натурних випробувань складає 3-4% . При цьому значення несучої здатності PDP палі вище на 69% ніж несуча здатність буроін'єкційних CFA паль.



Рис. 5. Загальний вигляд випробувального стенду

Fig. 5. General view of test facility

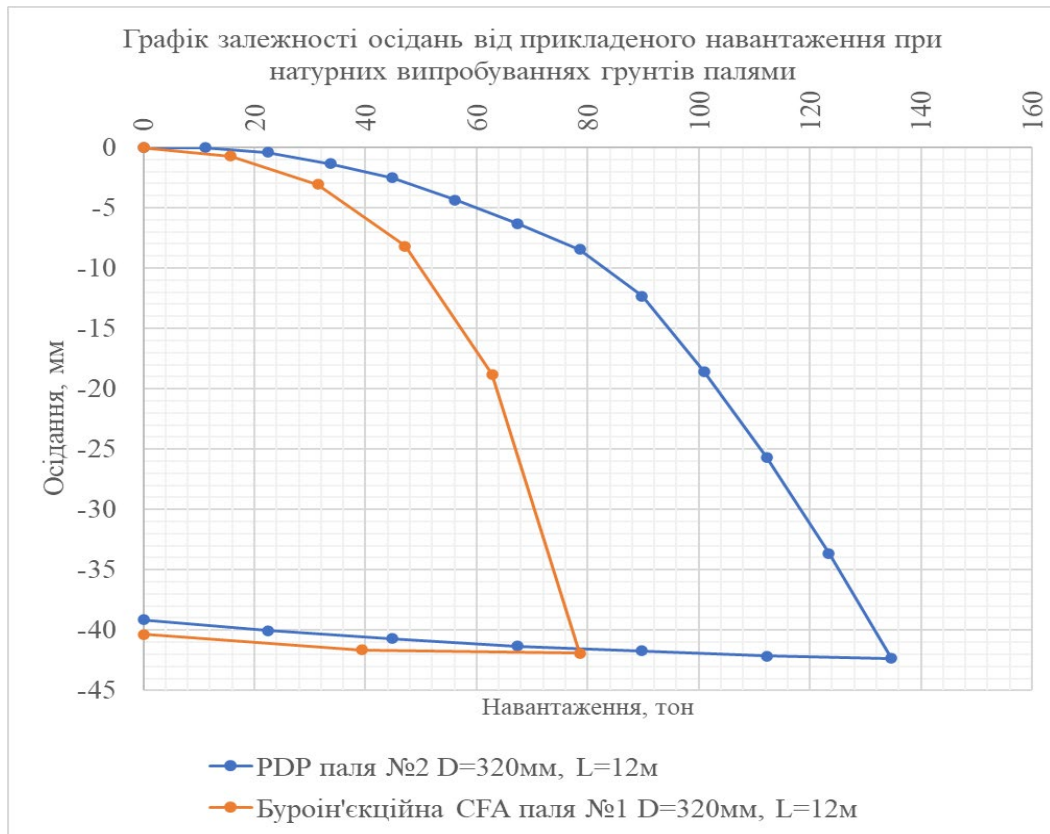


Рис. 6. Графік залежності осідань від навантаження за результатами натурних випробувань
Fig. 6. Load-settlement curve based on the results of field tests

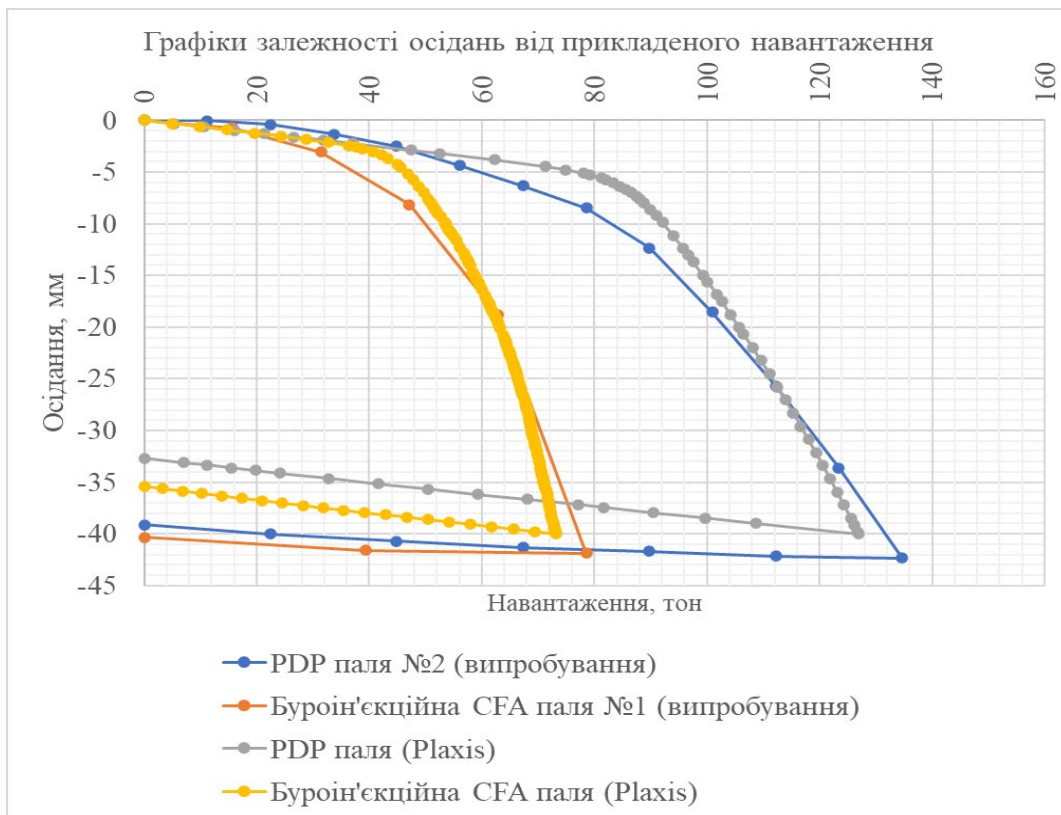


Рис. 7. Порівняння графіків залежності осідань від прикладеного навантаження
Fig. 7. Comparison of load-settlement curves

ВИСНОВКИ

Отримані результати свідчать про досить високу ефективність методу скінченних елементів, реалізованого в програмному комплексі Plaxis, при моделюванні НДС системи «паля-грунтове середовище» та прогнозуванні несучої здатності бурових паль малого діаметру. Це підтверджується досить незначними розбіжностями при порівнянні отриманих результатів числового моделювання із натурними випробуваннями випробуваннями.

Даний підхід може бути використані під час техніко-економічного порівняння та прийняття кінцевих рішень при проектуванні фундаментів будівель та споруд.

Для подальшого вдосконалення методів моделювання слід розглядати поведінку палі при навантаженні в різних типах ґрунтів.

В цілому, отримані результати дозволяють зробити висновок, що числове моделювання методом скінченних елементів в Plaxis є зручним та ефективним інструментом для прогнозування несучої здатності бурових паль малого діаметру з достатньо високою точністю і може широко застосовуватись при геотехнічному проектуванні, за умови наявності відповідного досвіду та кореляції з даними натурних випробувань.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бойко І.П. Визначення несучої здатності бурроін'єкційної палі великого діаметру за допомогою різних методів. / І.П. Бойко, Ю.В. Карпенко, С.М. Новофастовський, В.С. Подпратов // *Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник*. – К.: КНУБА – 2004. – Вип. 28. – С. 79-94.
2. Маєвська І. В. Вдосконалення методики визначення несучої здатності бурових паль. / І. В. Маєвська, Н. В. Блашук, С. В. Романов // *Будівельні конструкції. Міжвідомчий науково-технічний збірник*. – К.: НДІБК. – 2016. – вип. 83. – С.616-625.
3. Винников Ю. Л. Математичне моделювання влаштування та роботи бурроін'єкційних паль / Ю. Л. Винников, В. П. Левченко, А. М. Пащенко // *Будівельні конструкції. Міжвідомчий науково-технічний збірник*. – К.:

НДІБК. – 2011. – вип. 75: В 2-х кн.: Книга 2 – С.140-149.

4. Зоценко М. Л. Особливості влаштування бурроін'єкційних паль у водонасичених піщаних ґрунтах / М. Л. Зоценко та ін. // *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. – Полтава: ПНТУ, 2010. – Вип. 3 (28). — с. 82-88.
5. Tol F. Modelling the bearing capacity of displacement piles in sand. / Tol F, Broere W. // *Proceedings of The Institution of Civil Engineers-geotechnical Engineering* – E.: ICE Publishing, 2006 – pp.195-206.
6. Cabella E. Axially loaded pile; numerical models vs. experimental data. / Cabella E., Passalacqua R // *Application of Numerical Methods to Geotechnical Problems* – Vienna: Springer, 1998 – pp. 97–106.
7. Kos J. Non-linear analyses of axially and laterally loaded bored piles. / Kos J // *Application of Numerical Methods to Geotechnical Problems* – Vienna: Springer, 1998 – pp. 121–130.
8. Wenhert M. Numerical analyses of load tests on bored piles. / Wenhert M., Vermeer P. A. // *Proceedings of the 9th International Symposium on Numerical Methods in Geomechanics* – Ottawa: Balkema, Leiden, 2004 – pp. 505–511.
9. ДСТУ Б В.2.1-1-95 (ГОСТ 5686-94) Ґрунти. Методи польових випробувань палями. – К.: Укрархбудінформ, 1997. – 58 с.
10. ДСТУ Б EN 1536:2015 Виконання спеціальних геотехнічних робіт. Палі бурові (EN 1536:2010, IDT) – К.: ДП «ДНДІБК», 2016. – 116 с.
11. ДСТУ Б В.2.1-27:2010 Основи та фундаменти споруд. Палі. Визначення несучої здатності за результатами польових випробувань. – К.: ДП «ДНДІБК», 2010. – 10 с.

REFERENCES

1. Boyko I.P., Karpenko Y.V., Novofastovskyi S.M., Podpriatov V.S. (2004) Vyznachennia nesuchoi zdatnosti buroiniektiinoi pali velykoho diametru za dopomohoiu riznykh metodiv [Determination of the bearing capacity of a large-diameter borehole injection pile with the help of various methods]. *Osnovy i fundamenti: Mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*. Kyiv: KNUBA, 28, 79-94 (in Ukrainian).
2. Mayevska, I.V., Blaschuk N.V., Romanov S.V. (2016) Vdoskonalennia metodyky vyznachennia nesuchoi zdatnosti burovykh pal [Improvement of the method of determining the

- bearing capacity of bored piles]. *Budivelni konstruksii. Mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*. - Kyiv: NDIBK, 83, 616-625 (in Ukrainian).
3. Vynnykov Y.L., Levchenko V.P., Pashchenko A.M. (2011) Matematychni modeliuvannia vlashtuvannia ta roboty buroinieksiinykh pal [Mathematical modeling of the installation and performance of CFA piles]. *Budivelni konstruksii. Mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*. Kyiv: NDIBK, 75, Book 2, 140-149 (in Ukrainian).
 4. Zotsenko M.L. (2010) Osoblyvosti vlashtuvannia buroinieksiinykh pal u vodonasychenykh pishchanykh gruntakh [Specialties of CFA pile installation in water-saturated sandy soils]. *Zbirnyk naukovykh prats (haluzeve mashynobudu-vannia, budivnytstvo)*, Poltava: PNTU, 3 (28), 82-88 (in Ukrainian).
 5. Tol F., Broere W. (2006). Modelling the bearing capacity of displacement piles in sand. *Proceedings of The Institution of Civil Engineers-geotechnical Engineering*, E.: ICE Publishing, 159. 195-206 (in English).
 6. Cabella E., Passalacqua R. (1998) Axially loaded pile numerical models vs. experimental data. *Application of Numerical Methods to Geotechnical Problems*. Vienna: Springer, 97–106 (in English).
 7. Kos J. (1998) Non-linear analyses of axially and laterally loaded bored piles. *Application of Numerical Methods to Geotechnical Problems*. Vienna: Springer, 121–130 (in English).
 8. Wenhert M., Vermeer P. A. (2004). Numerical analyses of load tests on bored piles. *Proceedings of the 9th International Symposium on Numerical Methods in Geomechanics*. Ottawa: Balkema, Leiden, 505–511 (in English).
 9. DSTU B V.2.1-1-95 (GOST 5686-94) (1997) Grunty. Metody polovykh vyprobuvan paliamy [Soils. Field test methods with piles]. Kyiv: Ukrakhbudinform, 58 (in Ukrainian).
 10. DSTU B EN 1536:2015 (2016) Vykonannia spetsialnykh heotekhnichnykh robit. Pali burovi [Execution of special geotechnical works. Bored piles]. (EN 1536:2010, IDT), Kyiv: NDIBK, 116 (in Ukrainian).
 11. DSTU B B.2.1-27:2010 (2010) Osnovy ta fundamenti sporud. Pali. Vyznachennia nesuchoi zdatnosti za rezultatamy polovykh vyprobuvan [Bases and foundations of structures. Piles. Determination of bearing capacity based on the results of field tests]. Kyiv: NDIBK, 10 (in Ukrainian).

Comparison of the bearing capacities of a small-diameter bored pile obtained from the results of field tests and numerical modeling

Pavlo Soroka

Summary. Abstract. The paper compares the results of modeling static soil tests with a small-diameter drill pile with the data obtained from field tests. The calculations were performed by numerical modeling using the PC software "Plaxis", which is based on the finite element method. This problem was solved in a flat (2D) formulation for an axisymmetric model, which makes it possible to analyze the stress-strain state (SSS) and the interaction of elements of the pile-soil environment system.

Separate computational models were created for two types of piles made using different technologies: a bored- CFA pile and a drilled pile with partial soil displacement. In order to take into account the preload history in order to maximize the models' approximation to real conditions, the calculations were performed in 4 stages in accordance with the construction sequence: Stage 1 - initial stage (determination of the initial stresses in the soil massif in the natural state), Stage 2 - excavation to the design mark of the pit bottom, Stage 3 - testing of the soils with a pile by static load. Stage 4 - pile unloading. Based on the results of the calculations, the SSS and the interaction of the elements of the "pile-soil environment" system have been analyzed and compared the settlement graphs obtained from the results of the calculations with the data of field tests.

It is shown that the use of a plane axisymmetric FEM is a sufficiently effective approach for assessing the stress-strain state and understanding the interaction of elements of the pile-soil system, as well as predicting the bearing capacity of piles for further design of the pile foundation before obtaining the results of field tests. In addition, the labor intensity and time consumption of this approach are relatively low compared to other alternative methods.

With appropriate experience in using this approach in different soil conditions with appropriate comparison with field test data, it can be applied in the feasibility study and final decisions on the choice of a particular type of foundation.

Keywords. bored piles, pile bearing capacity, numerical modelling, pile load testing.