

Взаємодія фундаментів із бурових паль з основою

Ігор БОЙКО¹, Олександр ГАВРИЛЮК², Остап КАШОЇДА³, Вероніка ЖУК⁴

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

¹boyko.ip@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-6841-0271>

²gavryliuk.ov@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-7252-0679>

³kashoida_oo@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-9234-4489>

⁴zhuk.vv@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1114-3192>

DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.13-20

Анотація. Методика випробування ґрунту палями дає можливість визначити несучу здатність палі по ґрунту максимально точно. Це пояснюється тим, що статичні випробування натурних паль вдавлюючим навантаженням дають можливість найточніше відтворити умови роботи палі в ґрунті під навантаженням від надфундаментних конструкцій будівлі або споруди. Статичні випробування натурних паль мають проводитися завчасно, до влаштування конструкцій пальових фундаментів, бо за їх результатами приймається рішення про необхідність внесення коригуючих змін до проекту пальових фундаментів. Однак статичні випробування зазвичай потребують значних витрат часу, що обумовлено їх технологією виконання. А основним недоліком статичних випробувань натурної палі є вартість порівняно з іншими доступними наближеними методиками. Розрахункове значення несучої здатності бурової палі, що визначено на основі інженерних розрахунків, дозволяє здійснити лише попередню та наближену оцінку роботи палі у взаємодії з ґрунтами будівельного майданчика. Цей метод розрахунку відзначається простотою у застосуванні, проте водночас має обмежену точність, що може впливати на остаточні результати аналізу. Комп'ютерна імітація взаємодії бурової палі з ґрунтом по бічній поверхні та під її підшвою дозволяє наблизити результати моделювання до результатів натурального статичного випробування дослідної палі за умови ідентифікації параметрів для обраної математичної моделі ґрунтового середовища.

Для комп'ютерної імітації натурального експерименту, а саме, випробування бурової палі статичним вдавлюючим навантаженням, було



Ігор БОЙКО
професор кафедри
геотехніки
д.т.н., проф.



Олександр ГАВРИЛЮК
асистент кафедри
геотехніки



Остап КАШОЇДА
доцент кафедри
геотехніки
PhD



Вероніка ЖУК
доцент кафедри
геотехніки
к.т.н., доц.

застосовано програмний комплекс «Midas GTS NX». При цьому для ґрунтового масиву та стовбура палі було використано об'ємні скінчені елементи. Поведінка ґрунту під навантаженням описувалася нелінійним законом деформування ґрунтового середовища з модифікованим критерієм міцності Кулона-Мора. В дослідженні було приділено увагу перерозподілу поздовжніх зусиль в стовбурі палі, характеру передачі навантаження на ґрунт через бічну поверхню та під

підшвою палі на всіх етапах навантаження.

Ключові слова. Числове моделювання, бурова паля, напруження, осідання, Midas GTS NX.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Польові випробування натурних паль є одним із найнадійніших способів отримання достовірної інформації про взаємодію палі з ґрунтами будівельного майданчика та закономірності її роботи під навантаженням. Вони дозволяють оцінити фактичну несучу здатність палі та визначити основні характеристики ґрунту (Бойко, 2018). Однак, незважаючи на високу точність таких методів, їх істотним недоліком є значна трудомісткість, тривалість виконання та висока вартість реалізації.

З огляду на ці обмеження, було здійснено ідентифікацію параметрів ґрунтового середовища для подальшого прогнозування несучої здатності паль на основі числових розрахунків. Для цього було реалізовано комп'ютерну імітацію процесу випробування натурної палі статичним вдавлюючим навантаженням. Моделювання виконувалося у спеціалізованому програмному комплексі «Midas GTS NX», який дозволяє відтворити умови взаємодії палі та ґрунту з використанням об'ємних скінченних елементів (Носенко, 2022) та нелінійних закономірностей поведінки ґрунту під навантаженням.

МЕТА РОБОТИ

Дослідити роботу палі в ґрунті на всіх етапах навантаження за даними комп'ютерної імітації статичного випробування натурної палі вдавлюючим навантаженням в піщаних ґрунтах з ідентифікованими параметрами нелінійної моделі ґрунтового середовища.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Засобами ПК «Midas GTS NX» було виконано комп'ютерну імітацію натурних випробувань палі статичним вдавлюючим

навантаженням (Гаврилюк, 2024), при цьому для моделювання ґрунтового масиву та стовбура палі було використано об'ємні скінченні елементи. Для опису особливостей поведінки ґрунту під навантаженням було обрано нелінійний закон деформування ґрунтового середовища з модифікованим критерієм міцності Кулона-Мора. Внаслідок здійсненої ідентифікації параметрів моделі ґрунтового середовища (Кашоїда, 2024), було досягнуто достатньої збіжності результатів комп'ютерної імітації з даними польових випробувань натурної палі: відхилення значень осідання палі внаслідок кожної прикладеної ступені навантаження не перевищувала 1 мм. Отримана збіжність результатів комп'ютерної імітації з натурними випробуваннями палі дозволила зробити висновок про можливість оцінки несучої здатності бурової палі в піщаних ґрунтах для різних її геометричних параметрів за результатами числового моделювання (Du, 2023).

Було здійснено комп'ютерну імітацію роботи бурових паль в піщаних ґрунтах для найбільш популярних їх геометричних параметрів, що застосовують для житлового і цивільного будівництва (рис. 1): для діаметрів паль 420 мм, 620 мм і 820 мм, та довжин паль 12 м, 15 м, 18 м і 21 м.

За результатами розрахунків було отримано графіки залежності «осідання-навантаження» $S = f(p)$ для розглянутих розмірів паль. Аналіз показав, що зі збільшенням діаметру палі та її довжини, лінійна ділянка графіку збільшується по довжині та зменшує кут нахилу до горизонталі. Наступна фаза роботи палі в ґрунті також характеризується зменшенням кута нахилу графіку при зростанні перерізу і довжини палі.

Для розглянутих геометричних параметрів паль було здійснено також розрахунок несучої здатності за аналітичною методикою, при цьому опір ґрунту під підшвою палі R та по бічній поверхні f приймається за табличними даними. Було виявлено, що різниця між аналітичною методикою визначення F_d та даними числового моделювання має зростаючу тенденцію зі збільшенням діаметру бурових паль (рис. 2-а), а саме:

– для паль діаметром 420 мм для довжин

$L=12, 15, 18$ м очікувана несуча здатність палі, визначена аналітичним способом, має різницю із даними числового моделювання, в межах 5%;

- для палі діаметром 620 мм похибка з даними моделювання складає 15...25%;
- для палі діаметром 820 мм різниця з числовим моделюванням складає 35...40%.

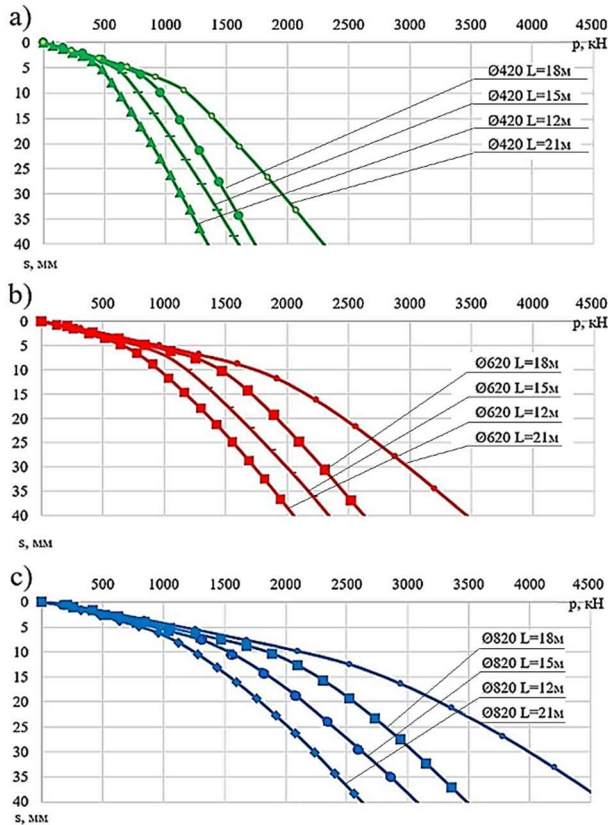


Рис.1. Графіки «осідання-навантаження» $S = f(p)$ за даними моделювання для діаметрів палі: а – 420 мм; б – 620 мм; в – 820 мм.

Fig.1. «Settlement-load» graphs $S = f(p)$ based on computer simulation data for pile diameters: а – 420 mm; б – 620 mm; в – 820 mm

Додатково, для розглянутих геометричних параметрів палі ($\varnothing 420, 620, 820$ мм, $L = 12, 15, 18, 21$ м) було визначено їх питому несучу здатність F''_d (1). Можна зробити висновок, що для заданих ґрунтових умов раціональним варіантом буде використання палі довжиною 18 м показано на Рис. 2-б для розглянутих діаметрів бурових палі.

$$F''_d = \frac{F_d}{V} \quad (1)$$

де F_d – несуча здатність палі, V – об'єм

стовбура палі. Отже, такий підхід дозволяє оцінити ефективність рішення по палі в ґрунті з ідентифікованими параметрами ґрунтового середовища дає можливість дослідити еволюцію напружено-деформованого стану елементів системи «ґрунтова основа - паля».

Комп'ютерна імітація роботи палі в ґрунті з ідентифікованими параметрами ґрунтового середовища дає можливість дослідити еволюцію напружено-деформованого стану елементів системи «ґрунтова основа - паля».

За даними комп'ютерної імітації випробування палі статичним вдавлюючим навантаженням було проаналізовано роботу палі в процесі прикладання навантаження. Було помічено, що характер передачі навантаження на ґрунт через бічну поверхню палі змінюється зі збільшенням величини навантаження та вичерпанням несучої здатності ґрунту навколо стовбура палі.

На Рис. 3 приведено розподіл поздовжніх зусиль в стовбурі палі для різних ступенів навантаження на палю. Аналіз результатів комп'ютерної імітації роботи палі в ґрунті показав, що співвідношення складових несучої здатності палі, а саме, по побічній поверхні та під підшвою палі, залежать від величини прикладеного навантаження. Наприклад, для ступені навантаження $N_3=1600$ кН поздовжнє зусилля на рівні підшви палі склало 265 кН (рис. 3-б), що складає близько 15% від величини прикладеного на палю навантаження. Це свідчить про передачу 85% навантаження на ґрунт через бічну поверхню палі. В той же час, для ступені навантаження $N_7=2800$ кН поздовжнє зусилля на рівні підшви палі склало 868 кН (рис. 3-д), що складає близько 30% від прикладеного на палю навантаження. Тоді, для цієї ступені навантаження через бічну поверхню палі передається 70%.

Зафіксовано, що на початкових етапах навантаження паля переважно працює по бічній поверхні, зі збільшенням навантаження поступово включається в роботу підшва палі, що пов'язано із вичерпанням ґрунтом вздовж стовбура палі його несучої здатності. Цю тенденцію підтверджує характер перерозподілу дотичних напружень τ_z показано на Рис. 4 для різних етапів навантаження.

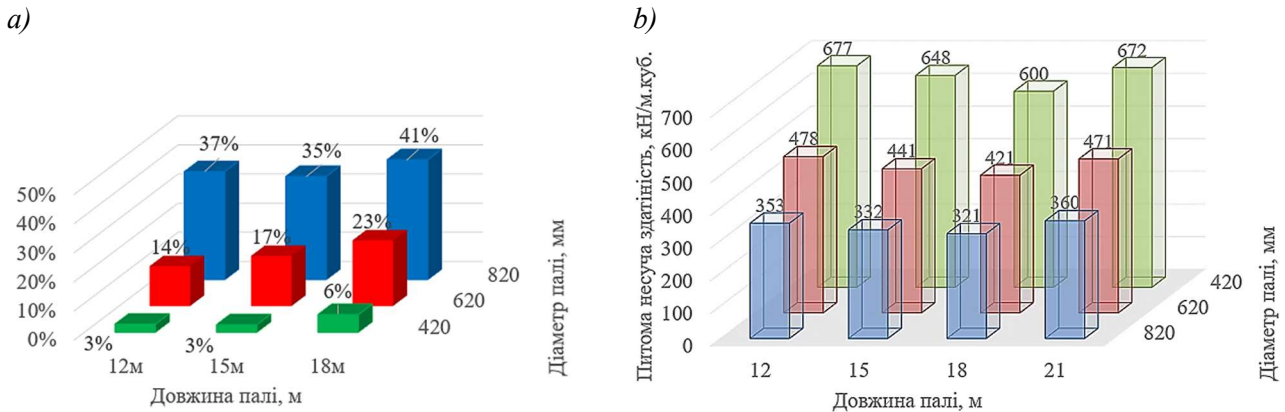


Рис.2. Несуча здатність палей, визначена за даними комп'ютерної імітації: *a* – похибка аналітичної методики розрахунку; *b* – питома несуча здатність палей F''_d , кН/м³.

Fig.2. Bearing capacity of piles determined from computer simulation data: *a* – error of analytical calculation method; *b* – specific bearing capacity of piles F''_d , кН/м³.

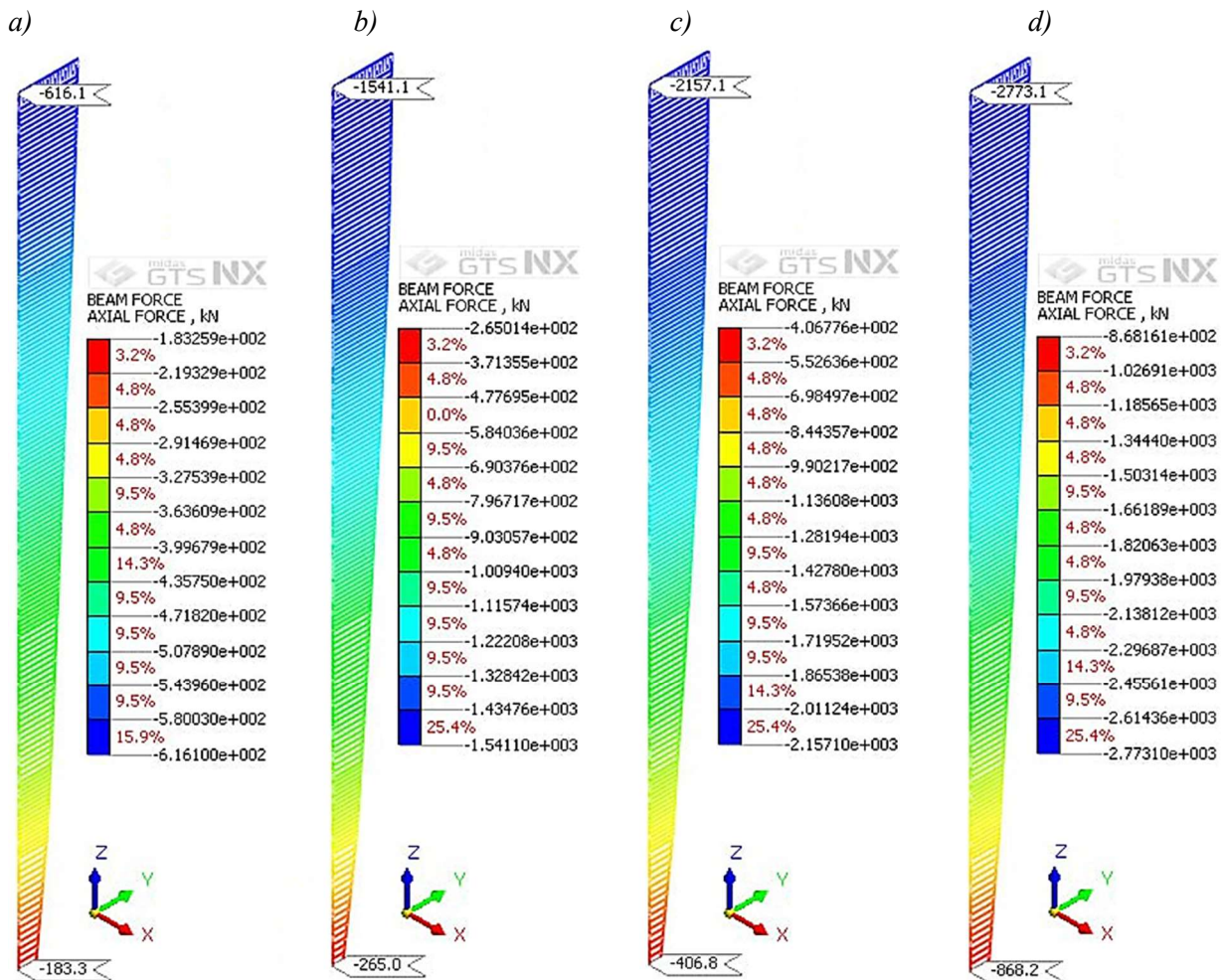


Рис.3. Розподіл поздовжніх зусиль N , кН в стовбурі палі для різних ступеней навантаження на палю за даними комп'ютерної імітації: *a* – $N_1=650$ кН; *b* – $N_3=1600$ кН; *c* – $N_5=2200$ кН; *d* – $N_7=2800$ кН.

Fig.3. Longitudinal force distribution N , кН in the pile shaft for different degrees of pile loading according to computer simulation data: *a* – $N_1=650$ кН; *b* – $N_3=1600$ кН; *c* – $N_5=2200$ кН; *d* – $N_7=2800$ кН.

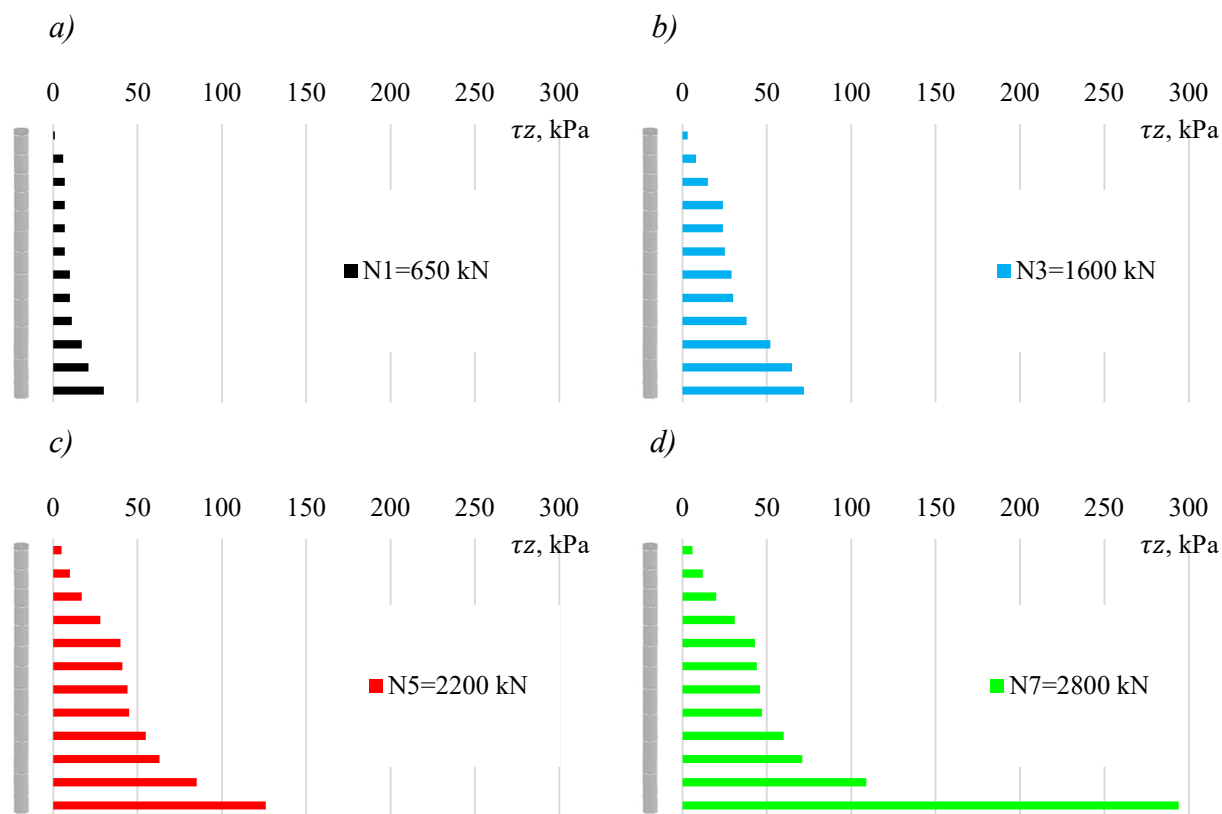


Рис.4. Дотичні напруження в оточуючому ґрунті по довжині стовбура палі τ_z , кПа для ступені навантаження: а – $N_1=650$ кН; б – $N_3=1600$ кН; в – $N_5=2200$ кН; г – $N_7=2800$ кН.

Fig.4. Tangential stresses in the surrounding soil along the length of the pile shaft τ_z , kPa for different stages of pile loading: а – $N_1=650$ кН; б – $N_3=1600$ кН; в – $N_5=2200$ кН; г – $N_7=2800$ кН.

Епюри підтверджують факт роботи палі по бічній поверхні на початкових етапах навантаження і включення підосви палі тільки після вичерпання несучої здатності ґрунтів, що знаходяться в контакт з бічною поверхнею палі

На початковому етапі навантаження палі дотичні напруження мають рівномірний розподіл вздовж стовбура палі з поступовим збільшенням по глибині, і для ступені навантаження N_1 , наприклад, складають 5...20 кПа, для ступені N_3 відповідно 10...60 кПа. Далі було зафіксовано більш активне включення в роботу підосви палі показано на Рис. 3, що також можна побачити і за приростом значення дотичних напружень на рівні підосви палі показано на Рис. 4-с. Для ступені навантаження N_7 (яка відповідає прийнятому значенню F_d за результатами натурних випробувань палі статичним вдавлюючим навантаженням), можна побачити стрімкий приріст дотичних

напружень наведено на Рис. 4-д на рівні підосви палі.

Аналіз проведених розрахунків показав, що доля навантаження, що передається на ґрунтову основу через бічну поверхню палі і її підосву, не є сталим значенням. Характер перерозподілу буде залежати від величини діючого на палю навантаження і показників ґрунтів навколо палі.

Для заданих ґрунтових умов і розглянутих геометричних параметрів палі (довжина 23 м, діаметр бурової палі 620 мм) було отримано наступні закономірності показано на Рис. 5: на початкових етапах навантаження паля переважно працює по бічній поверхні, передаючи на ґрунт до 85...90% навантаження через свою бічну поверхню.

Із збільшенням навантаження включається в роботу підосва палі. Для ступені навантаження, яка відповідає прийнятому значенню F_d за результатами натурних випробувань палі статичним вдавлюючим

навантаженням, було зафіксовано передачу через бічну поверхню палі 70% навантаження. При цьому за даними аналітичних розрахунків несучої здатності палі з використанням табличних значень опору по бічній поверхні та під підшоною палі, співвідношення складових F_{df}/F_{dr} склало 60/40 % (розрахунок був виконаний для бурової палі діаметром 620 мм довжиною 23 м для заданих ґрунтових умов).

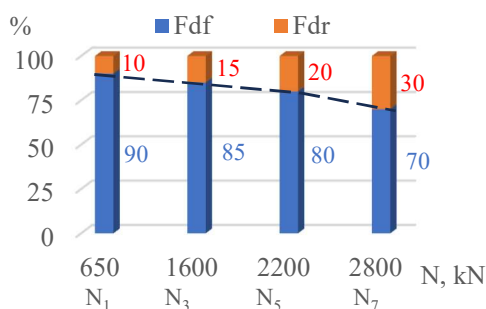


Рис.5. Розподіл складових несучої здатності палі F_{df}, F_{dr} , % для різних етапів навантаження на палю.

Fig.5. Distribution of components of pile bearing capacity F_{df}, F_{dr} , % for different stages of pile loading.

Тенденція подальшого збільшення доли навантаження, що передається через підшву палі, зберігається і на наступних етапах навантаження.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Показано, що комп'ютерна імітація – це наближений метод розрахунку, але на базі експериментальних даних та ідентифікації параметрів моделі середовища ми можемо наблизити результати числового моделювання до еталону.

Виконано комп'ютерну імітацію спільної роботи палі з ґрунтом з використанням ідентифікованих параметрів нелінійної моделі ґрунтового середовища.

Встановлено, що доля навантаження, яка передається на ґрунтову основу через бічну поверхню палі і її підшву, не є сталим значенням. Характер перерозподілу залежить від величини діючого на палю навантаження і характеристик ґрунтів.

Зафіксовано, що для заданих ґрунтових умов і розглянутих геометричних

параметрів палі (довжина 23 м, діаметр бурової палі 620 мм) на початкових етапах навантаження паля переважно працює по бічній поверхні (передача на ґрунт до 85...90% навантаження через бічну поверхню палі).

Підтверджено, що зі збільшення навантаження включається в роботу підшва палі. Для ступені навантаження, яка відповідає значенню F_d за результатами натурних випробувань палі статичним вдавлюючим навантаженням, паля передає через свою бічну поверхню 70% навантаження (для аналогічних вихідних даних за аналітичною методикою доля F_{df} склала 60%).

Визначено, що характер розподілу дотичних напружень в ґрунті навколо стовбура палі на початкових етапах навантаження є рівномірно-зростаючим по довжині палі з глибиною. На ступені навантаження, яка відповідає прийнятому значенню F_d за результатами натурних випробувань палі, зафіксовано стрімке і значне збільшення величини дотичних напружень на рівні підшви палі (до 3..5 разів більше порівняно із значеннями вздовж стовбура палі).

Продемонстровано, що застосування ідентифікованих параметрів ґрунтового середовища при моделюванні спільної роботи палі з ґрунтом, дало можливість отримати графіки залежності «осідання-навантаження» для різних геометричних параметрів бурових паль в піщаних ґрунтах. Таким чином, з'явилася можливість визначити несучу здатність паль з різними розмірами за даними числового моделювання взаємодії палі з оточуючим ґрунтом.

Визначено закономірність приросту похибки аналітичної методики визначення несучої здатності бурових паль у піщаних ґрунтах: різниця між аналітичною методикою визначення F_d та даними числового моделювання має зростаючу тенденцію зі збільшенням діаметру бурових паль (від 5% до 40%).

Розраховано питому несучу здатність паль для оптимізації проектних рішень палевих фундаментів. Така методика дозволить оцінити ефективність рішення по палевим фундаментам через контроль величини питомої несучої здатності паль.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ігор Бойко & Василь Підлущкий (2018). Дослідження взаємодії паль в умовах польових випробувань. *Десята всеукраїнська науково-технічна конференція з іноземною участю «Механіка ґрунтів, геотехніка та фундаментобудування»*. Полтава, 16-17 жовтня 2018. С. 4.
2. Віктор Носенко & Остап Кашоїда (2022). Числове моделювання експерименту випробування групи паль з використанням різних моделей ґрунтової основи. *Опір матеріалів і теорія споруд*, 109, 441-454. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.441-454>
3. Олександр Гаврилюк, Остап Кашоїда & Вероніка Жук (2024). Моделювання взаємодії палі з ґрунтовим середовищем з використанням нелінійної математичної моделі з модифікованим критерієм міцності Кулона-Мора. *Основи та Фундаменти / Bases and Foundations*, 49, 43-54. <https://doi.org/10.32347/0475-1132.49.2024.43-54> (in Ukrainian)
4. Остап Кашоїда, Олександр Гаврилюк & Вероніка Жук (2024). Ідентифікація параметрів одиночної палі з використанням модифікованого закону Кулона – Мора у програмному комплексі «Midas GTS NX» *International Scientific-Practical Conference of Young Scientists «BUILD MASTER CLASS-2024» Conference Proceedings*. – Kyiv: KNUCA. 2024. 223–224.
5. Du, Zhaodong & Xu, Si. (2023). Bearing capacity design of ram-compacted bearing base piling foundations by simple numerical cavity expansion approach. *International Journal of Geomechanics*, 22(2), 13. <http://dx.doi.org/10.1061/%28ASCE%29GM.1943-5622.0002285>
2. Viktor Nosenko & Ostap Kashoida (2022). Chyslove modeliuвання eksperymentu vyprovuvannya hrupy pal z vykorystanniam riznykh modelei gruntovoi osnovy [Numerical simulation of the experiment on testing a group of piles using different models of soil base]. *Opir materialiv i teoriia sporud*, 109, 441-454. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.441-454> (in Ukrainian)
3. Oleksandr Havryliuk, Ostap Kashoida & Veronika Zhuk (2024). Modeliuвання vzaïemodii pali z gruntovym seredovyschem z vykorystanniam neliiniïnoi matematychnoi modeli z modyfikovanyim kryteriïem mitsnosti Kulona-Mora [Simulation the interaction of a pile with the soil using a nonlinear mathematical model with a modified Mohr–Coulomb strength criterion]. *Osnovy ta Fundamenti / Bases and Foundations*, 49, 43–54. <https://doi.org/10.32347/0475-1132.49.2024.43-54> (in Ukrainian)
4. Ostap Kashoida, Oleksandr Havryliuk & Veronika Zhuk (2024). Identyfikatsiia parametriv odynochnoi pali z vykorystanniam modyfikovanoho zakonu Kulona-Mora u prohramnomu kompleksi «Midas GTS NX» [Identification of single pile parameters using the modified Mohr-Coulomb law in the Midas GTS NX software package] *International Scientific-Practical Conference of Young Scientists «BUILD MASTER CLASS-2024» Conference Proceedings*. – Kyiv: KNUCA. (2024). 223–224. (in Ukrainian)
5. Du, Zhaodong & Xu, Si. (2023). Bearing capacity design of ram-compacted bearing base piling foundations by simple numerical cavity expansion approach. *International Journal of Geomechanics*, 22(2), 13. <http://dx.doi.org/10.1061/%28ASCE%29GM.1943-5622.0002285> (in English)

REFERENCES

1. Ihor Boiko & Vasyl Pidlutskyi (2018). Doslidzhennia vzaïemodii pal v umovakh polovyykh vyprovuvan [Research on pile interaction in field test conditions]. *Desiata vseukrainska naukovo-tekhnichna konferentsiia z inozemnoiu uchastiu «Mekhanika gruntiv, heotekhnika ta fundamentobuduвання»*. - m. Poltava, 16-17 zhovtnia 2018. – S. 4. (in Ukrainian)

Interaction of bored pile foundations with the soil base

Ihor BOYKO
 Oleksandr HAVRYLIUK
 Ostap KASHOIDA
 Veronika ZHUK

Summary The method of testing soil with piles makes it possible to determine the bearing capacity of a pile in the soil as accurately as possible. This is

explained by the fact that static tests of full-scale piles with indentation loads make it possible to most accurately reproduce the conditions of operation of a pile in the soil under load from superfoundation structures of a building or structure. Static tests of natural piles should be carried out in advance, before the construction of pile foundation structures, because their results are used to decide on the need to make corrective changes to the pile foundation design. However, static tests usually require significant time, which is due to their execution technology. And the main disadvantage of static tests of natural piles is the cost compared to other available approximate methods. The calculated value of the bearing capacity of a bored pile, determined on the basis of engineering calculations, allows only a preliminary and approximate assessment of the pile's performance in interaction with the soils of the construction site. This calculation method is characterized by simplicity of application, but at the same time has limited accuracy, which may affect the final results of the analysis. Computer simulation of the interaction of a bored pile with the soil on the lateral surface and under its sole allows us to approximate the simulation results to the results of a full-scale static test of an experimental pile, provided that the parameters for the selected mathematical model of the soil environment are identified.

The Midas GTS NX software package was used for computer simulation of a full-scale experiment, namely, testing a bored pile with static compression loads. At the same time, volumetric finite elements were used for the soil mass and the pile shaft. The behavior of the soil under load was described by a nonlinear law of deformation of the soil medium with a modified Mohr-Coulomb strength criterion. The study paid attention to the redistribution of longitudinal forces in the pile shaft, the nature of the load transfer to the soil through the lateral surface and under the pile base at all stages of loading.

Keywords. Numerical simulation, bored pile, stress, settlement, Midas GTS NX.