

Табачников С.В., Найдьонова В.Є.

*Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
(вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002, Україна; e-mail: s.v.tabachnikov@ukr.net;
v.naidenova@ukr.net)*

ДО ПИТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ БУРОВИХ ПАЛЬ З УРАХУВАННЯМ ДОВАНТАЖУВАЛЬНИХ СИЛ ТЕРТЯ, ЩО ДІЮТЬ ПО БІЧНИЙ ПОВЕРХНІ

Запропоновано методику моделювання взаємодії бурових паль з ґрунтовим масивом при наявності структурно-нестійких ґрунтів, враховуючи особливості створення розрахункової схеми при роботі паль на дію висмикуючих навантажень. Виконано в ПК Plaxis моделювання і розрахунок методом кінцевих елементів напружено-деформованого стану системи «паля – ґрунтовий масив». Наведено порівняльний аналіз результатів моделювання з результатами випробувань ґрунтів натурними палями.

Ключові слова: моделювання, паля, висмикуючі навантаження, бічна поверхня, довантажувальні сили тертя, метод кінцевих елементів, напружено-деформований стан.

Вступ. Як відомо в просідаючих ґрунтах при напруженому стані, викликаному власною вагою або зовнішнім навантаженням від фундаменту, при замочуванні можуть виникати додаткові осідання. Пальові фундаменти в структурно-нестійких ґрунтах слід проектувати з повним прорізанням всіх просідаючих шарів, а також інших видів ґрунтів, міцнісні характеристики яких знижуються під час замочування. Будівлі (споруди) слід проектувати в цих випадках з урахуванням нерівномірних осідань пальового фундаменту, що викликані довантажувальними силами тертя по бічній поверхні паль при підйомі рівня підземних вод або при замочуванні ґрунтів з зовнішнього джерела під частиною споруди [1]. В сучасних умовах для вирішення складних геотехнічних проблем широко застосовуються різні програмні комплекси (Plaxis, ANSYS і ін.). Причиною вибору даних програмних комплексів є наявність складних моделей ґрунту, в яких поведінка ґрунту може бути змодельована з різним ступенем точності.

Матеріали і методи досліджень. Теоретичні методи для прогнозу поведінки паль й пальових фундаментів в ґрунтовому масиві розвивалися на підставі використання рішень Мелана для плоскої задачі та рішення Міндліна у випадках просторової задачі. Такий підхід використовували в своїх дослідженнях Абраменко П.Г., Бартоломей А.О., Батерфілд Р., Барвашов В.О.,

Бенерджі П. та ін. На даний час існує цілий ряд наукових робіт Болдирєва Г.Г. [2], Schanz Т. [3], які присвячені методам порівняння реальної поведінки ґрунтів та їх моделей у різних програмних комплексах. При розрахунках і проектуванні пальових фундаментів широке використання отримав метод скінчених елементів (МСЕ).

У роботах [4-8, 14] авторами наводяться результати досліджень взаємодії паль в структурно-нестійких ґрунтах із застосуванням методу скінчених елементів, реалізованих в ПК PLAXIS 3D Foundation (версія 1.6) [9], для моделювання випробувань ґрунтів натурними палями, в тому числі з використанням різних моделей ґрунтової основи і умов контакту «паля – ґрунтовий масив». Раніше нами були розглянуті деякі особливості під час моделювання роботи паль при дії висмикуючих навантажень з використанням стандартних інструментів Plaxis і моделі ґрунту з критеріями міцності Мора-Кулона, які прямо впливають на результати розрахунку [10], та запропонована методика вирішення проблем при моделюванні таких завдань.

Мета і постановка задачі. Метою статті є пошук методики для адекватного математичного моделювання взаємодії ґрунтового масиву, що володіє просідаючими властивостями, з палями, що працюють на висмикуючі навантаження. Завданням досліджень є моделювання і чисельний аналіз

НДС системи «паля – ґрунтовий масив» і порівняння з результатами натурних випробувань ґрунтів палею.

Результати дослідження. Для підтвердження правильності запропонованих підходів при моделюванні необхідно отримати максимальну відповідність чисельних і фізичних результатів, тому у якості вихідних даних були прийняті результати випробувань ґрунтів натурними палями діаметром $\varnothing 600$ мм і довжиною $L \approx 11$ м при дії висмикуючих навантажень відповідно до [11], які проводились в ґрунтах природної вологості (рис.1) при будівництві житлового будинку по вул. Велозаводській в м. Харкові [12].

Особливістю ґрунтових нашарувань на даному будівельному майданчику є наявність у верхній частині насипних ґрунтів, що представлені насипом й незлежаними суглинками та супісками ПЕ-1, які мають просідаючі властивості, потужністю до ≈ 11 м від проектного дна котловану [13].

Випробування проводилися за допомогою стенду анкерного СА-600 [15].

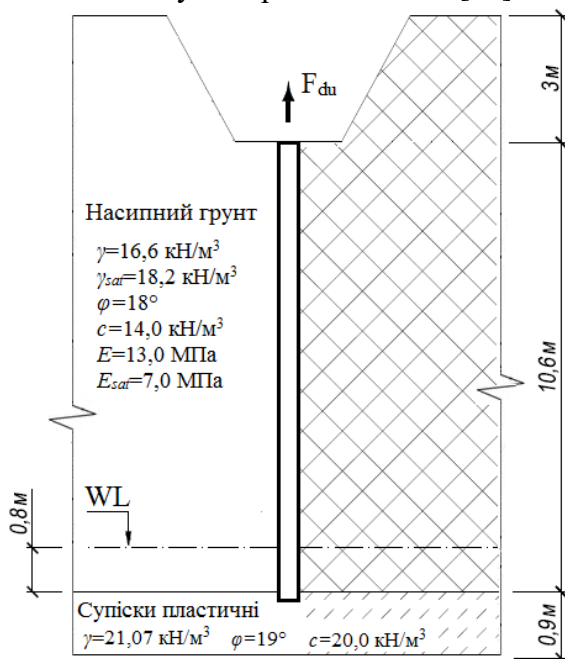


Рис. 1. Розрахункова схема розташування палі в ґрунтовому масиві.

Обговорення результатів. Методика математичного моделювання взаємодії ґрунтового масиву з палями, що працюють на висмикуючі навантаження. Відповідно до розрахункової схеми рис. 1 була створена аналогічна модель за допомогою

програмного комплексу «Plaxis 3D Foundation» (версія 1.6), в якій суцільна область розглядається як сукупність кінцевого числа елементів. Для виключення впливу на результати розрахунку граничних умов моделі була обрана область $20 \times 20 \times 11,6$ м, неоднорідної будови із застосуванням об'ємних 15-вузлових клиновидних елементів, які забезпечують для переміщень інтерполяцію четвертого порядку і використовують чисельні інтегрування по двадцяти точкам напружень. Моделювання напружено-деформованого стану ґрунту проводилося з використанням нелінійної моделі з критерієм міцності Мора-Кулона (М-К). Для конструкції палі використовувалася лінійно-пружна модель матеріалу. Масив ґрунту моделювався відповідно до основних фізико-механічних характеристик ґрунту (див. рис. 1): питома вага ґрунту γ , kN / m^3 ; питома вага водонасиченого ґрунту γ_{sat} , kN / m^3 ; питоме зчеплення ґрунту c , kPa ; кут внутрішнього тертя ґрунту φ , град.; модуль деформації ґрунту E , kPa ; коефіцієнт Пуасона ν , од., приймався для суглинків – 0,35 (див. табл. 2). Палі моделювалася об'ємною (Massive circular pile) діаметром $\varnothing 0,60$ м, яка взаємодіє з ґрунтом за допомогою спеціальної зовнішньої оболонки елементів на поверхні контакту «паля – ґрунт» (Outside interface), з наступними параметрами лінійно-пружної моделі матеріалу (Л-У): питома вага бетону С20 / 25 (В 25) γ , kN / m^3 ; модуль пружності E_{sat} , kPa ; коефіцієнт Пуасона ν , од. Рівень ґрунтових вод моделювався на $\approx 9,8$ м нижче позначки – 0.00 суцільної області моделі основи. Загальна потужність ПЕ-1 ґрунтів становить $\approx 10,6$ м. Нижче моделювався нестисливий шар потужністю $\approx 1,0$ м для подальшого виконання зазору між п'ятою палі і ґрунтом.

Поверхні контакту моделювались шляхом підбору величини коефіцієнту зниження міцності $R_{inter} = 0,7 \div 1,0$. Цей коефіцієнт пов'язує міцність оболонки елементів на поверхні контакту «паля – ґрунтовий масив», тобто тертя на поверхні палі і адгезію з міцністю ґрунту – кутом тертя і зчеплення. В якості еталонної моделі розглядалася модель з коефіцієнтом $R_{inter} = 0,7$, що

узгоджується з коефіцієнтом умови роботи ґрунту по бічній поверхні γ_{cf} буронабивної

палі великого діаметру в відповідних ґрунтах [11].

Таблиця 1 - Властивості матеріалів ґрунту й палі

Параметр	Модель матеріалу	Структурний параметр ґрунту (палі)	Питома вага ґрунту	Питома вага водонасиченого ґрунту	Модуль деформації ґрунту	Коефіцієнт Пуассона	Питома зчеплення ґрунту
Позначення	Model	Type	γ	γ_{sat}	E	ν	c
Одиниця виміру	М-К	-	кН/м ³	кН/м ³	кПа	ед.	кПа
Фізична характеристика шару	М-К	Дренір.	16,6	18,2	13000	0,35	14
Палі	Л-У	Непор.	24,0	–	$29,2 \cdot 10^6$	0,2	–

Навантаження прикладалося як ступеннями, що повністю відповідало методики проведення польових випробувань [15], так й відразу максимальним значенням, яке відповідало граничному навантаженню, що викликало безперервне збільшення переміщення палі без її стабілізації – «зрив» палі, проте як зазначалося раніше [10] спосіб прикладання висмикуючого навантаження не має принципового значення, так само як й точка прикладання навантаження (голова або п'ята).

На рис. 3-4 приведена модель масиву ґрунту виконана відповідно до розрахункової схеми, яка наведена на рис. 1 та її розріз.

Формування напружено-деформованого стану системи «палі – ґрунтовий масив» при дії висмикуючого навантаження складалося з наступних етапів (фаз):

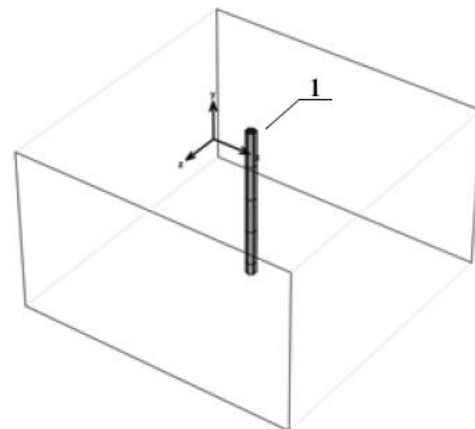
Фаза 1 – навантаження розрахункової області власною вагою ґрунту і формування початкового НДС ґрунтового масиву (*Initial phase*);

Фаза 2 – моделювання палі Ø600 мм і $L = 10,6$ м;

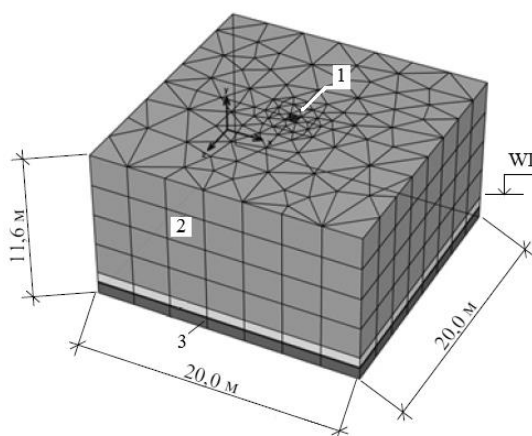
Фаза 3 – прикладання висмикуючого навантаження рівного $F_{du} = 400,0$ кН, що відповідає граничному висмикуючому навантаженню при натурних випробуваннях.

Після першої та другої фази переміщення ґрунту і палі обнулялися шляхом включення функції *Reset displacement to zero*.

В результаті моделювання і розрахунку отримана візуальна картина переміщень у вигляді ізополей на розрізі (рис. 4).



a



б

Рис. 2. Модель масиву ґрунту: а – моделювання області масиву ґрунту й палі; б – кінцево-елементна 3D модель «палі – ґрунтовий масив»; 1 – палі у ґрунтовому масиві; 2 – ґрунтовий масив; 3 – нестискаємий шар ґрунту

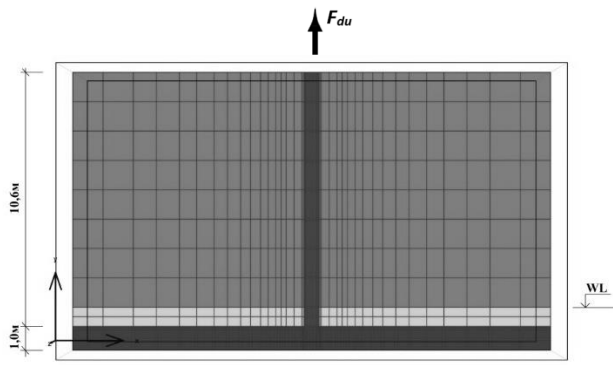


Рис. 3. Розріз масиву ґрунту з палею згідно розрахункової схеми рисунку 1

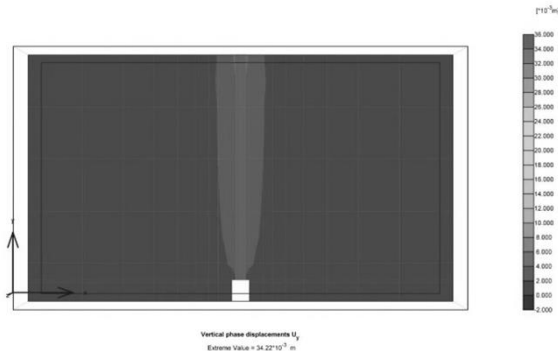


Рис. 4. Переміщення палі й ґрунту при $R_{inter}=0,7$
З картини переміщень розрахункової моделі (рис. 4) видно, що наявність зазору під п'ятою палі дозволяє перешкодити не реалістичне включення масиву ґрунту в роботу в цій зоні, перешкоджаючи розвитку переміщень палі.

На рис. 5 показані графіки залежності переміщення досліджуваної палі від дії висмикуючого навантаження, які порівняні з графіком при натурних випробуваннях [15].

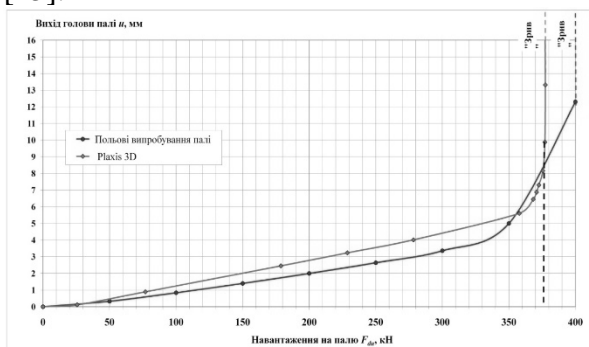


Рис. 5. Графіки залежності вертикального переміщення палі від висмикуючого навантаження F_{du} та чисельного моделювання (Plaxis 3D)

З графіків видно, що отримані на підставі чисельного рішення в ПК Plaxis залежності переміщення палі від висмикуючого навантаження досить добре корелю-

ється з аналогічною залежністю при натурних випробуваннях ґрунтів палею, при цьому похибка між значеннями граничного опору становить не більше 5,5%.

Висновки. Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. Запропоновано методіку моделювання за допомогою програмного комплексу «Plaxis 3D Foundation» спільної роботи палі і ґрунтового масиву при дії висмикуючого навантаження, що дозволяє виключити включення в роботу ґрунтової основи під п'ятою палі, що відповідає реальній роботі таких палі при відповідному завантаженні.

2. Проведено порівняльний аналіз результатів, отриманих на підставі математичного моделювання системи «палі – ґрунтовий масив» з використанням моделі Мора-Кулона, з результатами при натурних випробуваннях ґрунтів палею, який показав достатню відповідність залежностей переміщень від навантаження, де похибка між значеннями граничного опору склала не більше 5,5%, що підтверджує можливість застосування запропонованої методіки моделювання для аналогічних завдань по визначенню довантажувальних сил тертя, що діють по бічній поверхні палі.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Проблемы строительства на слабых грунтах. К вопросу о повышении прочности и несущей способности [Текст]: материалы Всесоюзного совещания по новым методам возведения промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных глинистых грунтах, 1972 г. / Маслов Н.Н. / Н.Н. Маслов, Ле Ба Льюнг. – 1972. – С. 39-48.
2. Болдырев, Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов [Текст] / Г.Г. Болдырев. – Состояние вопроса; ПГУАС. – Пенза, 2008. – 696 с.
3. Schanz T. The Hardening Soil Model: Formulation and Verification [Текст] / T. Schanz, P.A. Vermeer, P.G. Bonnier // Beyond 2000 in Computational Geotechnics. – Balkema, Rotterdam, 1999. – Pp. 281-290.
4. Карпенко Д.А. До моделювання напружено-деформованого стану лесової основи

- бурунабвиної палі з розширенням. // Основи і фундаменти: Міжвід. наук.-тех. зб. – К.: Будівельник, 2006. – Вип. 30. – С. 47-52.
5. Корнієнко М.В. Чисельне моделювання роботи стовпчастих пальових фундаментів з розширенням в лесових ґрунтах [Текст] / М.В. Корнієнко, Д.А. Карпенко // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво) / ДНДІБК Міністерства регіонального розвитку та будівництва України. – Київ, НДІБК, 2008. – Вип.71: В 2-х кн.: Книга 1. – С. 406-415.
 6. Peculiarities of implementation of primary numerical modeling when determination of the forces of negative friction on pile side surface in condition of its test with static load [Текст]: Proceedings of the 23rd European Young Geotechnical Engineers Conference, 2004 Barcelona /
 7. Karpenko D. – Universitat Politècnica de Catalunya, 2014. – Pp. 67-70.
 8. Седин, В.Л. Применение модели упрочняющегося грунта в численном моделировании буроинъекционных свай большого диаметра [Текст] / В.Л. Седин // Журн. Геотехника. – 2014. – Вып. № 4. – С. 32-40.
 9. Маєвська І.В. Чисельне моделювання роботи буроін'єкційної палі у піщаних ґрунтах [Текст] / І.В. Маєвська, А.В. Романенко // Наук.-техн. Збірник «Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві». – 2011. – Вип. №1. – С. 67-70.
 10. PLAXIS. Finite element code for soil and rock analyses. Rykovodstvo polsovatelya. 3D Foundation (версія 1.6).
 11. Табачников, С.В. К вопросу математического моделирования работы буровых свай на выдергивающие нагрузки [Текст] / С.В. Табачников, А.В. Самородов // Вестник ХНАДУ. – Харьков: ХНАДУ, 2017. – Вып. 76. – С. 84-90.
 12. Основи та фундаменти споруд. Зміна №1: ДБН В.2.1-10-2009. – [Чинний від 2011-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 55 с.
 13. Научно-технический отчет: Дослідження несучої здатності двох натурних буро набивних паль вертикальними статичними навантаженнями на ділянці будівництва житлових будинків по вул. Велозаводській (район школи 145) у м. Харкові [Текст] / ООО «НПО «Регионспецпроект». – Харьков, 2013. – 46 с.
 14. Технический отчет об инженерно-геологических изысканиях на участке строительства жилых домов по ул. Велозаводской (р-н школы №145) в г. Харькове [Текст] / «УкрНИИТИЗ», 2013 г.
 15. Клепиков, С.Н. К расчету фундаментов из бурунабивных свай в условиях просадочных грунтов II типа [Текст] / С.Н. Клепиков, В.А. Сайко // Основания и фундаменты. – Киев, 1980. – Вып.13. – С. 13-19.
 16. Палі. Визначення несучої здатності за результатами польових випробувань: ДСТУ Б В.2.1-27:2010. – [Чинний від 2011-07-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 11с.

Табачников С.В., Найдёнова В.Е. К ВОПРОСУ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ БУРОВЫХ СВАЙ С УЧЕТОМ ДОГРУЖАЮЩИХ СИЛ ТРЕНИЯ, ДЕЙСТВУЮЩИХ ПО БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ. Предложена методика моделирования взаимодействия буровых свай с грунтовым массивом с наличием структурно-неустойчивых грунтов, учитывая особенности создания расчетной схемы при работе свай на действии выдергивающих нагрузок. Выполнены в ПК Plaxis моделирование и расчет методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния системы «свая – грунтовой массив». Приведен сравнительный анализ результатов моделирования с результатами испытаний грунтов натурными сваями.

Ключевые слова: моделирование, свая, выдергивающая нагрузка, боковая поверхность, догружающие силы трения, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние.

Tabachnikov S.V., Naydenova V.E. TO THE QUESTION OF MATHEMATICAL MODELING OF BORED PILES WORK CONSIDERING NEGATIVE SKIN FRICTION FORCES ON LATERAL SURFACE. A method for modeling interaction of bored piles with a soil base with presence of structurally unstable soils is proposed, taking into account the features of the design of the calculating scheme for piles with pulling loads action. Modeling and finite element analysis of stress-strain state of the «pile – soil massif» system were performed in the Plaxis. A comparative analysis of the results of modeling with the results of pile load tests is given.

Keywords: modeling, pile, pulling load, lateral surface, negative skin friction, finite element method, stress-strain state.