

УДК 625.154.5

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТАТИЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ ГРУНТІВ БУРОІН'ЄКЦІЙНОЮ ПАЛЕЮ МСЕ В ПК PLAXIS 3D

м. н. с., аспірант Бікус К. М.

ДВНЗ "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", м. Дніпропетровськ

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими практичними завданнями. В сучасних умовах геотехнічного будівництва існує потреба у зниженні нерівномірних осідань основ пальових фундаментів, а також у достовірності визначення несучої здатності палей, і деформативності ґрунтів їх основи. Що, безпосередньо залежить від достовірності математичного моделювання роботи палей і пальових фундаментів в розрахункових програмних комплексах (ПК).

Винайти строгі аналітичні рішення кожної з великої кількості задач прогнозу напружено-деформованого стану (НДС) масивів з ущільненням ґрунтів через: притаманні їм нелінійну залежність між напруженнями та деформаціями, неоднорідність середовища, одночасність існування в них областей, що перебувають у дограничному й граничному за міцністю стані, подекуди складність геометричної форми фундаментів, границь шарів і зон ґрунтів, – практично неможливо [1].

Тому в інженерній практиці користуються методами, заснованими на введенні спрощуючих передумов, головним чином, скінчених елементів (МСЕ). МСЕ найбільш підходить для задач із розвиненою неоднорідністю характеристик міцності. На сьогоднішній день МСЕ є найбільш досконалим серед відомих чисельних методів для вирішення геотехнічних задач. Перевагами, що забезпечують популярність МСЕ в геомеханіці є простота отримання конкретних рішень за програмою; можливість згущення сітки СЕ в місцях, де очікують високі градієнти параметра, що досліджують; принципова можливість реалізації в програмах довільних механічних властивостей матеріалу, будь-якої послідовності навантаження; можливість оцінки сумісної роботи основ і фундаментів без поділу на незалежні розрахунки за несучою здатністю та деформаціями тощо [1].

МСЕ покладено в основу розрахунків багатьох програм та ПК, які використовують для оцінювання НДС ґрунтових масивів. Серед відомих спеціальних ПК: Plaxis 3D, ANSYS, FLAC, FEMmodels,

GeoSoft, midas GTS та ін. Найбільш розповсюдженим в світовій практиці і нашій країні є ПК Plaxis 3D.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття. Чисельне моделювання роботи паль є складною геотехнічною задачею, оскільки існує багато параметрів, що ускладнюють розрахунок. Навіть при ідеальному моделюванні виникають відхилення від поведінки в реальних ґрунтових умовах. Зокрема, поряд з багатьма перевагами буроін'єкційних паль (CFA-палі, від англ. Continuous flight auger piles) [5, 8] існує ряд недоліків пов'язаних з недоврахування їх несучої здатності в розрахунках [4], а також недоврахування тиксотропного розуцільнення водонасичених глинистих ґрунтів масиву ґрунту навколо паль, що призводить до перевищення бетонної суміші (інколи більше ніж в два рази) [5]. Автори [7] наголошують навіть на небезпечності технології, яка полягає в неконтрольованому надлишковому вийманні ґрунту при заглибленні шнеку і формуванні воронки осідання, зокрема в складних інженерно-геологічних умовах. Дослідження з вивчення процесу розпушення піщаного водонасиченого ґрунту, в основі буроін'єкційних паль, які підтверджують наявність поршневого ефекту, що значно ослаблює ґрунт основи під нижнім кінцем палі [6, 7], формують коло невіршених питань і підтверджують важливість і гостроту вирішення даної проблеми, шляхом чисельного моделювання роботи паль в ПК. Найбільш надійним способом для перевірки адекватності SE-розрахунку є порівняння з натурними дослідженнями, що підтверджено роботами [2, 3].

Тому, **метою роботи** є моделювання статичного випробування ґрунтів буроін'єкційною палею МСЕ, з використанням геотехнічного ПК Plaxis 3D і порівняння розрахунків з результатами натурних випробувань.

Основний матеріал і результати. В м. Дніпропетровськ здійснюється будівництво багатоповерхового житлового будинку. Будинок зводиться на багатошаровій ґрунтовій основі, верхні шари якої є слабкими, з точки зору сприймання повного навантаження від будинку. Це викликало необхідність влаштування пального фундаменту, який складається з буроін'єкційних паль, зв'язаних ростверком у вигляді залізобетонної плити товщиною 1,4 м. Палі прийняті довжиною 14,0 м, діаметром 520 мм. Розрахункове навантаження на палю прийнято $N=1\ 630$ кН на основі проведених натурних статичних випробувань ґрунтів буроін'єкційними палями.

За літологічними ознаками і показниками фізико-механічних властивостей товща ґрунтів, що досліджується розділена на 13

інженерно-геологічних елементів. Після їх аналізу, через близькість фізико-механічних параметрів, для розрахунку в ПК Plaxis 3D вони були об'єднані в 7 інженерно-геологічних елементів. Показники фізико-механічних властивостей ґрунтів приведено в табл. 1.

Як вже зазначалось, для моделювання статичного випробування ґрунтів буроін'єкційною палею було обрано розрахунковий ПК Plaxis 3D, який представляє собою пакет прикладних геотехнічних програм для СЕ-аналізу НДС ґрунтової основи. При використанні МСЕ суцільна область розглядається як сукупність скінченного числа елементів. В даній роботі ґрунтова основа моделювалась у вигляді масиву $15 \times 15 \times 23,73$ (h) м, неоднорідної будови з застосуванням об'ємних, 15-ти вузлових клиновидних елементів.

Для моделювання визначення НДС системи "основа – одиночна паля" використовувалась пружнопластична модель зі зміцненням ґрунту (Hardening soil model). Hardening soil model, на відміну від моделі Мора-Кулона (Mohr-Coulomb), враховує різницю в жорсткості при первинному навантаженні ґрунту і при його розвантаженні з подальшим навантаженням. Побудування моделі вимагає основних ввідних параметрів, таких як: модуль загальної деформації E , коефіцієнт Пуассона ν , питоме зчеплення C , кут внутрішнього тертя φ і кут дилатансії ψ (див. табл. 1).

Таблиця 1

Вихідні дані. Показники фізико-механічних властивостей ґрунтів

Параметр	Позначення	Інженерно-геологічний елемент (ІГЕ)							Од. вим.
		ІГЕ-3	ІГЕ-4	ІГЕ-5	ІГЕ-6	ІГЕ-7	ІГЕ-8	ІГЕ-10	
Модель матеріалу	Model	Hardening soil							
Тип поведінки матеріалу	Type	Дренований (Drained)							
Питома вага ґрунту вище РГВ	$\gamma_{un\ sat}$	15,8	17	15,9	15,5	16,1	16,8	15,8	кН/м ³
Питома вага ґрунту нижче РГВ	γ_{sat}	18,4	18,8	19,3	19,2	19,7	20,03	15,8	кН/м ³
Модуль деформації при стандартному дренажному трьохосному випробуванні ґрунту	E_{50}^{ref}	3500	4000	8000	6000	7000	24000	29000	кН/м ²

Продовження табл. 1

Дотичний одометричний модуль при первинному навантаженні	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	3500	8000	8000	12000	14000	24000	58000	кН/м
Модуль пружності при розвантаженні / повторному навантаженні	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	10500	40000	24000	30000	35000	72000	145000	кН/м
Показник степеня для залежності жорсткості від рівня напружен	m	0,6000	0,8000	0,6	0,8000	0,6000	0,55	0,5	-
Зчеплення	c_{ref}	8	12	9	12	10	5	42	кН/м
Кут внутр. тертя	φ	26,00	25,00	24,00	23,00	24,00	31,00	21,00	град
Кут дилатансії	ψ	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1	0,000	град
Коеф. Пуассона при повторному навантаженні	ν_{ur}	0,3000	0,3000	0,3000	0,3000	0,3000	0,2000	0,2000	-

ПК Plaxis 3D враховує етапність зведення конструкції, що дає можливість точного і реалістичного моделювання різних режимів навантаження. Вихідні параметри для моделювання в Plaxis 3D задавались згідно з даними натурних статичних випробувань ґрунтів дослідною буроін'єкційною палею в замоченому стані, відповідно ДСТУ Б В.2.1-27:2010. Детально конструкція дослідної палі, устаткування и методика проведення випробування представлені в [6].

В даній роботі, на початковому етапі (Initial phase) при моделюванні ґрунтового масиву використовувалась K_0 -procedure, що дозволило генерувати вертикальні напруження в стані рівноваги з власною вагою ґрунту.

На подальшому етапі моделювалась буроін'єкційна паля Ø 520 мм, довжиною – 14 м, характеристики якої указані в табл. 2.

Оскільки робота одиночної палі значно відрізняється від роботи палі в пальному полі і в складі пального фундаменту, ПК Plaxis 3D значно реагує на ці відмінності і на вибір інструменту при моделюванні палі.

Тому, для вирішення даної задачі, одиночна паля моделювалась за допомогою інструмента стрижнева палі (Embedded pile) в центрі SE-сітки. Embedded pile представляє собою палю, зіставлену з балочних елементів, яка може бути розташована в довільному напрямку в ґрунтовому масиві і взаємодіє з ґрунтом за допомогою спеціальної оболонки елементів (Outside interface). Взаємодія може включати опір по бічній поверхні, а також опір під нижнім кінцем палі. Embedded pile не займає об'єм, довкола палі передбачається зона, в якій виключена пластична поведінка ґрунту. Розмір цієї зони базується на діаметрі палі, відповідно набору даних по матеріалу палі. Це робить її максимально схожою за поведінкою на реальну палю.

Таблиця 2

Властивості матеріалу палі

Параметр	Позначення	Паля	Од. вим.
Товщина / Діаметр	d	0,52	м
Об'ємна вага	γ	24,525	кН/м ³
Тип поведінки	Type	Лінійне, ізотропне	-
Модуль Юнга	E_1	30018600	кН/м ²
Модуль Зрушення	G_{12}		кН/м ²
Коефіцієнт Пуассона	ν	0,2	

Також, було враховано, що на момент випробування вже було зведено чотири поверхи будівлі. Тому далі на масив ґрунту прикладалось розподілене навантаження 160 кН/м². Після чого, на наступному етапі розрахунку переміщення ґрунту набувало початкового положення, шляхом ввімкнення функції Reset displacements to zero.

Поетапне навантаження палі моделювалось збільшенням прикладеного зосередженого навантаження до голови палі на 200 кН (як при натурних випробуваннях). Розрахунок вівся до зриву палі (при $P=3\ 410$ кН). Головними параметрами результатів є навантаження P і осідання S . За результатами розрахунків були отримані ізолінії переміщення ґрунту (рис. 1) і побудовані графіки залежності осідання від навантаження (рис. 2).

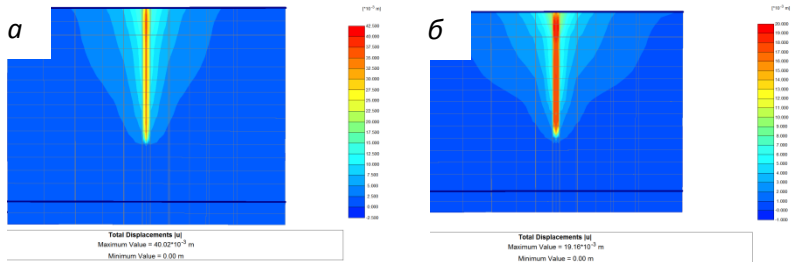


Рис. 1. Ізолінії вертикальних переміщень ґрунту: а – при навантаженні палі 3 410 кН ($S=40,02$ мм), б – при розвантаженні палі

Була проведена серія тестових розрахунків с двома видами палей Embedded pile й Massive circular pile (об'ємна паля). В процесі проведеного дослідження було виявлено, що для чисельного моделювання статичних випробувань ґрунтів палями, зокрема бурюін'єкційними, найбільше підходить інструмент Embedded pile. Його використання дозволяє отримати максимально наближені дані, в відповідності з реальною поведінкою одиначної палі в ґрунті при статичних випробуваннях.

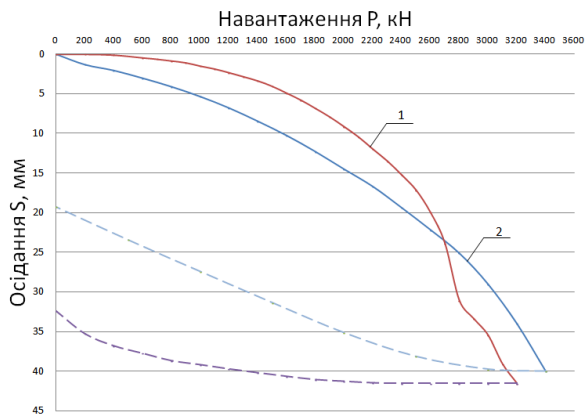


Рис. 2. Графік залежності осідання S від навантаження P : 1 – при натурних статичних випробуваннях; 2 – при розрахунку в ПК Plaxis 3D

Як видно з графіка (рис. 2) результати розрахунку одиначної палі за МСЕ і дані натурних статичних випробувань отримали задовільну

збіжність. За розрахунками видно, що максимальне допустиме навантаження на палю, складає 3 410 кН. Таке значення навантаження перевищує значення, отримане за даними натурних статичних випробувань 3 200 кН на 6,2 %. Таке розходження можна пояснити за рахунок доущільнення розпушеної піщаної основи під вістрям палі при натурних випробуваннях [6].

Необхідно відмітити, що чисельне моделювання проведеного статичного випробування дозволило отримати повну інформацію щодо НДС основи ґрунтового масиву на всьому діапазоні навантаження палі.

Висновки. Чисельне моделювання роботи палі є складною геотехнічною задачею, оскільки існує багато параметрів, що ускладнюють розрахунок. Навіть при ідеальному моделюванні виникають відхилення від поведінки в реальних ґрунтових умовах, пов'язані з такими факторами як анізотропія ґрунтового середовища навіть в межах одного ПЕ, недосконалість технології виготовлення палі, зокрема бурюін'єкційних, що сприяє ослабленню ґрунтової основи під нижнім кінцем. Найбільш надійним способом для перевірки адекватності СЕ-розрахунку є порівняння з натурними дослідженнями. Можна шляхом підбору знайти найбільш підходящу методику для розрахунку в ПК. Серія тестових розрахунків виявила, що для моделювання статичних випробувань ґрунтів бурюін'єкційними палями, найбільше підходить інструмент *Embedded pile*. Його використання дозволяє отримати максимально наближені дані, в відповідності з реальною поведінкою палі в ґрунті при статичних випробуваннях, і отримати задовільну збіжність результатів. Таким чином, МСЕ, реалізований в ПК *Plaxis 3D* дозволяє достатньо точно моделювати статичні випробування ґрунтів палями.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Винников, Ю.Л. Математичне моделювання взаємодії фундаментів з ущільненими основами при їх зведенні та наступній роботі: Монографія. – Полтава: ПолтНТУ ім.Юрія Кондратюка, 2004.–237 с.
2. Зарецкий, Ю.К. Расчетная оценка взаимодействия экспериментальных свай с основанием и сравнение с результатами испытаний / Ю.К. Зарецкий, М.И. Карабаев // Вестник МГСУ: научно-техн. журнал. – М., 2006. – № 1. – С. 93 – 99.

3. Знаменский, В.В. Сравнение результатов натуральных экспериментов с расчетами, выполненными при помощи конечно-элементной программы Plaxis 3D Foundation для забивных свай в глинистых грунтах / В.В. Знаменский, А.М. Рузаев, И.Н. Польшков // Вестник МГСУ: научно-техн. журнал. – №2. – М.: МГСУ, 2008. – С. 18 – 23.
4. Корнієнко, М.В. Визначення несучої здатності паль за результатами випробувань статичним навантаженням / М.В. Корнієнко, І.Ю. Заварзіна // Будівельні конструкції: міжвід. наук.-техн. зб. наук. праць. – Вип. 75, книга 2. – Київ, ДП НДІБК, 2011. – С. 150 – 158.
5. Мангушев, Р.А. Современные свайные технологии: Уч. пособ. / Р.А. Мангушев, А.В. Ершов, А.И. Осокин. – М.: Изд. АСВ, 2010. – 240 с.
6. Сєдін, В.Л. Вплив вдавлювального навантаження на деформативність основ буроін'єкційних паль / В.Л. Сєдін, К.М. Бікус, А.М. Мельник // Основи і фундаменти: міжвідомчий наук.-техн. зб. – К.: КНУБА, 2014. – Вип. 35. – С. 78 – 88.
7. Улицкий, В.М. Гид по геотехнике (путеводитель по основ., фундам. и подземным сооружениям) / В.М. Улицкий, А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин. – СПб.: ПИ "Геореконструкция", 2012. – 288 с.
8. Fleming K. Piling Engineering / K. Fleming, A. Weltman, M. Randolph, K. Elson. – London and New York: Taylor and Francis, 2008. – 398 p.