

БУДІВНИЦТВО

УДК 624.016.7

Т. М. Нестеренко¹
В. І. Марченко¹

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ З ОЦІНКИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СИСТЕМИ «ВІБРОВАННИЙ ГРУНТОЦЕМЕНТНИЙ ЕЛЕМЕНТ—ОСНОВА»

¹Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

Наведено результати оцінювання напружено-деформованого стану ґрунтоцементних основ і фундаментів методом скінченних елементів та визначення на їх базі несучої здатності та деформативності ґрунтоцементних паль та армованих основ.

Ключові слова: програмний комплекс PLAXIS, ґрунтоцементні палі.

Постійно зростаючі навантаження на основи сучасних будівель і споруд потребує вдосконалення технологій, які дозволяють сприймати такі навантаження, знижувати вартість будівельно-монтажних робіт, збільшувати темпи будівництва. Використання ґрунтоцементу як матеріалу для виготовлення фундаментів та підсилення основ є ефективним напрямком зниження вартості будівництва адже використовуються ґрунти, що залягають безпосередньо в основі будівельних об'єктів. Згідно з класифікацією професора М. Л. Зоценка ґрунтоцемент використовують як для підсилення основ (ґрунтоцементні основи) так і для влаштування ґрунтоцементних паль (ґрунтоцементні фундаменти) [1]. Улаштування ґрунтоцементних елементів підсилення основ та паль можливе в різноманітних ґрунтах: від мулів і торфів до «слабких» скельних порід, незалежно від їх хімічного складу, вологості, рослинних залишків, проникності та інших характеристик. Вони влаштовуються безпосередньо на ділянці будівництва, перевагою є швидкість технології влаштування. Широкого поширення з поміж інших набула бурозмішувальна технологія влаштування ґрунтоцементних основ і фундаментів, за якої до ґрунту подають водоцементний розчин з одночасним перемішуванням його з ґрунтом [1—3]. У ґрунтоцементних основ та фундаментів, незважаючи на велику кількість переваг, є і недоліки, такі як велика пористість та порівняно невелика міцність за матеріалом [1—3]. Питання теоретичного оцінювання несучої здатності ґрунтоцементних основ і фундаментів є досить актуальним, оскільки існує необхідність визначення меж їх використання через невелику (порівняно з бетоном) міцність ґрунтоцементу. Крім того існують технології підвищення міцності ґрунтоцементу, серед яких метод вібрування ґрунтоцементу [4].

Для теоретичного вирішення багатьох геотехнічних задач використовують чисельне моделювання. Метод скінченних елементів (МСЕ) є найбільш досконалим серед відомих чисельних методів механіки суцільного середовища [5]. Цей метод був сформульований в 50-х роках минулого століття у працях Дж. Аргіріса, М. Тернера, Р. Клафа. В основу оцінювання НДС ґрунтових масивів, зокрема їх стійкості, покладений метод скінчених елементів. Серед сучасних програм оберемо скінченно-елементну програму PLAXIS, розроблену для розв'язання геотехнічних задач. Програма об'єднує прості процедури графічного вводу, що дозволяє створювати складні скінченно-елементні моделі.

Побудова скінченно-елементної моделі в програмі базується на створенні геометричної моделі. Вона є ідеалізованою моделлю об'єкта, яка розділяється на скінченні елементи.

Вихідні дані, які необхідні для проведення тестової задачі з моделювання напружено-деформованого стану (НДС) системи «ґрунтоцементний вібрований елемент—ґрунтова основа», такі: координати вузлів; в'язі (вузли із нульовими переміщеннями та вузли з рівними переміщен-

нями); опис навантажень: величина, напрямок та точки (вузли) прикладання; опис скінченних елементів (номери вузлів, модуль деформації, коефіцієнт Пуассона, кут внутрішнього тертя, питоме зчеплення, показник дилатансії); коефіцієнт прискорення збігу; допуск збігу за нев'язкою; максимальна кількість циклів ітерацій.

Фізико-механічні характеристики кожного шару ґрунту у межах розрахункової схеми приймалися на основі результатів інженерно-геологічних вишукувань. Перевага віддавалася даним, отриманим за результатами польових дослідних робіт. Коефіцієнт Пуассона ν за відсутності даних трьохосового стиснення зразків приймали згідно з рекомендаціями норм [6]. При цьому менші значення ν брались для більшої щільності ґрунту.

У табл. 1 наведені характеристики ґрунтів, ґрунтоцементу і бетону, встановлені під час проведення польових дослідів визначення несучої здатності набивних паль на дослідному майданчику будівництва 10-ти поверхового житлового будинку, розташованого у центральній частині м. Полтави. Зважаючи на відсутність даних про характеристики міцності ґрунтоцементу під час моделювання їх значення підбирали з метою отримання найближчих до експериментальних даних результатів.

Таблиця 1

Характеристики ґрунтів і матеріалів

Матеріал	Модель	Питома вага γ , кН/м ³	Коефіцієнт Пуассона, ν	Модуль деформації (пружності) E , МПа	Питоме зчеплення c , кПа	Кут внутрішнього тертя φ , °
ГЕ-2	МС*	18,68	0,35	7,0	23	27
ГЕ-3	МС*	17,91	0,35	10,0	18	31
ГЕ-4	МС*	18,53	0,35	18,0	18	27
ГЕ-5	МС*	19,06	0,35	18,0	17	33
ГЕ-6	МС*	18,88	0,35	21,0	54	19
Ґрунтоцемент	МС*	18	0,25	150	400	25
Ґрунтоцемент вібрований	МС*	18	0,25	300	500	35
Бетон	LE**	25	0,2	23·10 ⁶	—	—

Примітки. *МС — пружно-пластична модель з критерієм міцності Мора-Кулона; **LE — пружна лінійно-деформована модель.

З позиції, що за результатами статичних випробовувань бетонної набивної палі маємо несучу здатність набивної палі прийнятих розмірів саме за ґрунтом, а ґрунтоцементної — за матеріалом, проведено розрахунки залежності між навантаженням і осіданням палі за просторовою і осесиметричною версіями програмного комплексу PLAXIS, виходячи з таких передумов:

— вважається, що матеріал бетонної палі має нескінчену жорсткість, за цими даними встановлюється несуча здатність при вертикальному навантаженні за ґрунтом набивної палі прийнятих розмірів в ґрунтових умовах дослідного майданчика.

— для набивної палі, яка виготовлена з ґрунтоцементу за бурозмішувальною технологією без вібрування, жорсткість приймаємо за даними експериментальних досліджень і вважаємо, що величина осідання її під вертикальним навантаженням у пластичній стадії переважно залежить від деформування ґрунтоцементу;

— таку ж тезу приймаємо для віброваної ґрунтоцементної палі, яка виготовлена за бурозмішувальною технологією з вібруванням і мала відповідну жорсткість.

За результатами розрахунків отримано графіки залежності осідання одиночної палі від навантаження для вказаних трьох випадків: буронабивної бетонної палі (рис. 1); набивної палі, виготовленої з ґрунтоцементу без вібрування (рис. 2); набивної палі виготовленої, з віброваного ґрунтоцементу (рис. 3).

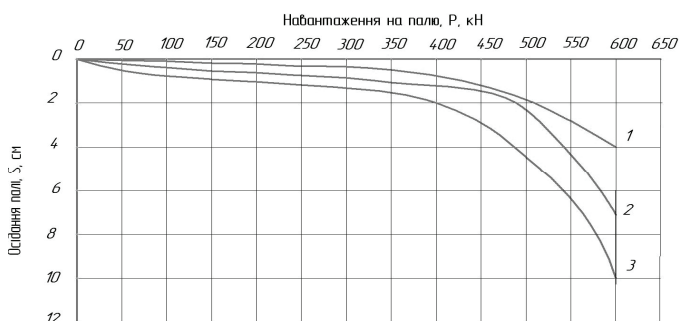


Рис. 1. Залежність осідання від навантаження буронабивної палі за даними обчислювального експерименту за ПК «PLAXIS»: 1 — експериментальний; 2 — за результатами моделювання у осесиметричній постановці; 3 — за результатами моделювання у просторовій постановці

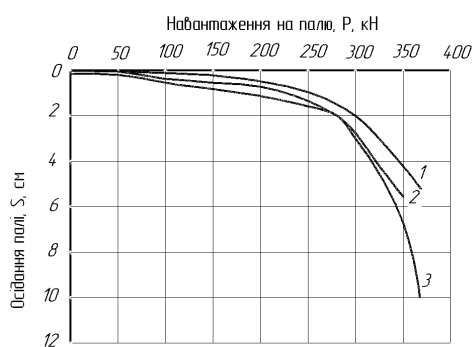


Рис. 2. Залежність осідання від навантаження ґрунтоцементної палі виготовленої без використання вібрування: 1 — експериментальний; 2 — за результатами моделювання у осесиметричній постановці; 3 — за результатами моделювання у просторовій постановці

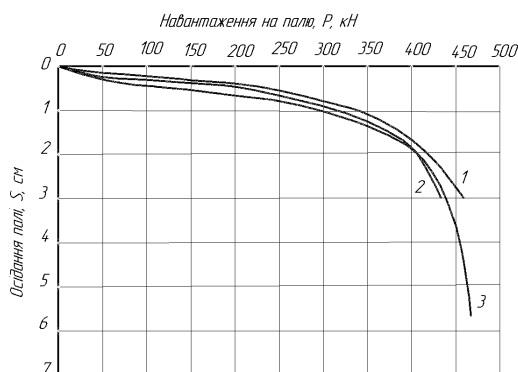


Рис. 3. Залежність осідання від навантаження ґрунтоцементної палі виготовленої з використанням вібрування: 1 — експериментальний; 2 — за результатами моделювання у осесиметричній постановці; 3 — за результатами моделювання у просторовій постановці

Результати визначення несучої здатності палі (при осіданні $S = 2,0$ см) зведено у табл. 2.

Наведені дані свідчать про те, що результатом розрахунків за осесиметричною версією достатньо близькі з даними експерименту. В обох розрахункових випадках скінчені елементи у межах бетонної палі працюють у пружній стадії. Тобто графік відображає пластичну стадію роботи ґрунту. Це свідчить, що вказані величини несучої здатності палі визначені з умови деформування ґрунту.

Таблиця 2

Несуча здатність палі, кН

Технологія влаштування палі	За розрахунком		За результатами польових статичних випробувань
	Осесиметрична версія МСЕ	Просторова версія МСЕ	
Буроабивна бетонна паля	490	400	508
Ґрунтоцементна паля влаштована без вібрування	280	280	300
Ґрунтоцементна паля влаштована з використанням вібрування	404	404	418

Розрахунки осідань під навантаженням ґрунтоцементної палі, яка виготовлена за бурозмішувальною технологією, показують, що частина скінчених елементів у межах контурів палі працює у пластичній стадії, у той час як переважна більшість їх у ґрунтовій основі ще лінійно деформується. Це спостереження дозволяє зробити висновки, що визначено несучу здатність ґрунтоцементної палі саме за матеріалом, у той час як її несуча здатність за ґрунтом суттєво більша.

Розрахунки осідань під навантаженням ґрунтоцементної палі, яка виготовлена за бурозмішувальною технологією з вібруванням, свідчать, що у разі осідання у 2 см більшість елементів палі працює у пластичній стадії, а у ґрунтовому масиві більша їх частина ще лінійно деформується. Розрахунки показують, що вібрована паля має більшу міцність матеріалу, ніж невібрована, але її несуча здатність за ґрунтом ще більша, ніж несуча здатність за матеріалом.

Вплив вібрування під час влаштування армованої основи

Для того ж майданчика проведено обчислювальний експеримент випробовування штампом розміром 120×120 см у плані на основі, армованій ґрунтоцементними елементами, виконаними без використання вібрування і з використанням вібрування. Характеристики ґрунтоцементу прийняті, такими ж як і у попередньому досліді. Елементи розташовані з кроком між осями у 100 см, кількість елементів під одним штампом — 16 шт. (4×4), по центру встановлено залізобетонний штамп.

Для визначених умов створено геометричну модель армованої основи (рис. 4). Інженерно-геологічні умови прийнято такі ж, як і у разі чисельного моделювання статичних випробувань палі. Характеристики ІґЕ показані в табл. 2.

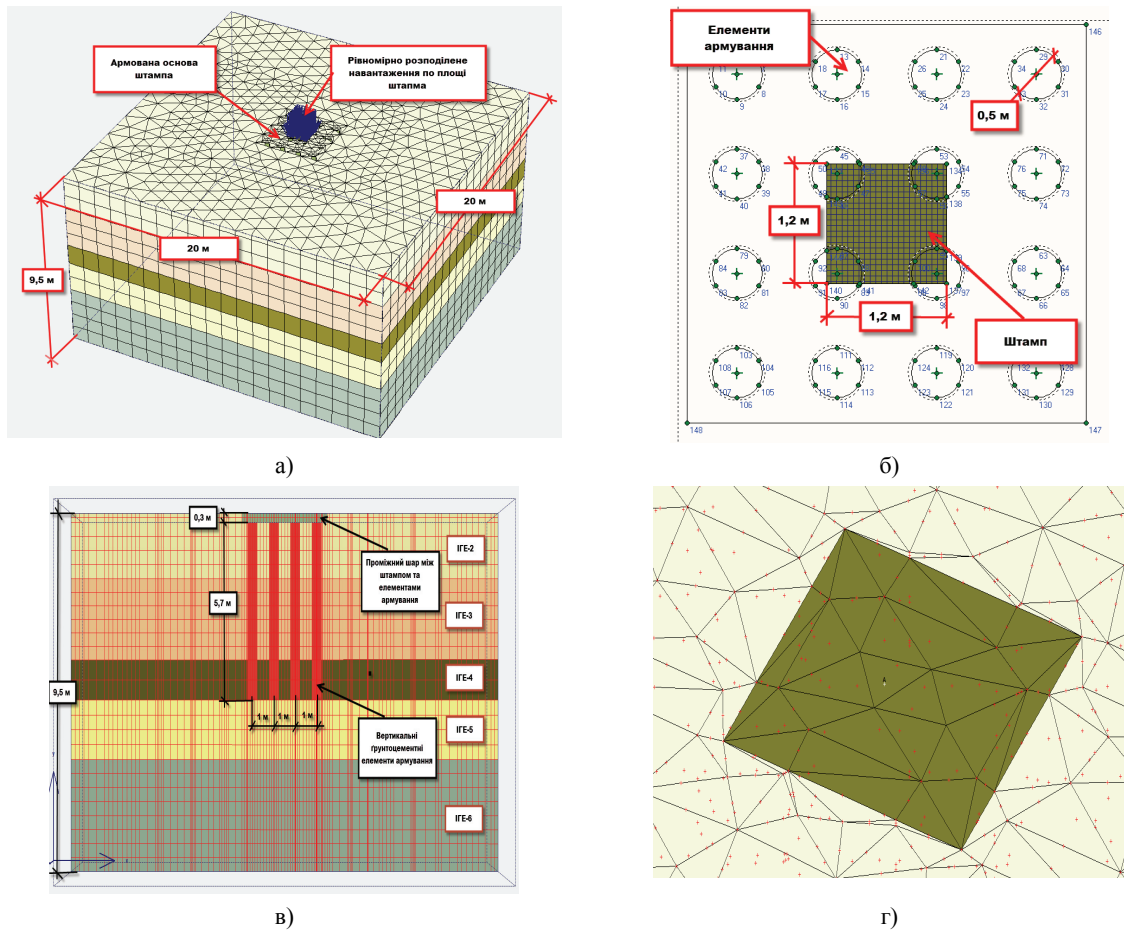


Рис. 4. Геометрична модель для моделювання штампових випробувань армованої основи:
 а — загальний вигляд армованої основи; б — армована основа в розрізі; в — армована основа в плані;
 г — точка на поверхні штампів для побудови графіка залежності «осідання штампів—навантаження»

Армувальними елементами є ґрунтоцементні циліндри діаметром 0,5 м, довжиною 5,7 м. Поверх армованого масиву влаштовано проміжний шар зі щебеню товщиною 0,3 м для виключення безпосереднього контакту між елементами армування та штампом (рис. 4в). Поверх цього шару задано квадратний штамп у вигляді плитного елемента з фізико-механічними характеристиками бетону. На штамп приклали рівномірно розподілене по його площі навантаження, направлене вертикально вниз. Розрахунки проведено за кроково-ітераційною процедурою. Для побудови графіків в координатах «осідання штампів — навантаження» вибрано точку на поверхні штампів (рис. 4г).

Під час моделювання напружено-деформованого стану основи, випробовуючи її штампом, розглянуто три випадки: 1 — випробування природної основи штампом (без армування); 2 — випробування основи армованої ґрунтоцементними елементами, виготовленими без вібрування; 3 — випробування основи армованої ґрунтоцементними елементами, виготовленими з вібруванням. Властивості ґрунтоцементу для кожного з випадків взято згідно з табл. 2.

За результатами проведених розрахунків отримано графіки залежності осідань основ штампів від величини прикладеного навантаження (рис. 5).

Отримані залежності показують, що армування значно збільшує несучу здатність

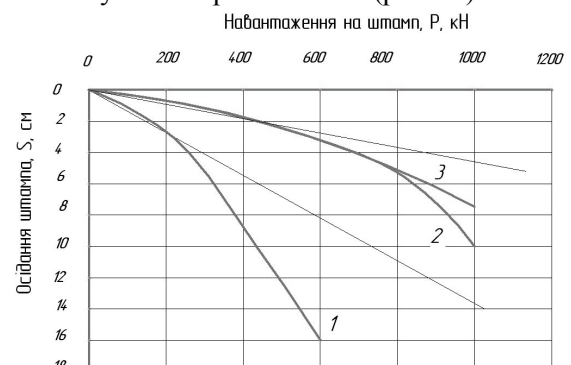


Рис. 5. Графіки залежності осідань основи штампів від навантаження на штамп за результатами моделювання:
 1 — для штампів на природній основі; 2 — для штампів на армованій ґрунтоцементній основі, виготовленій без використання вібрування;
 3 — для штампів на армованій ґрунтоцементній основі, виготовленій з використанням вібрування

основи: пластична (нелінійна) стадія деформування неармованої основи штампа настає при тискові близько 200 кПа, тоді як армованої не віброваними і віброваними ГЦЕ — більше 400 кПа.

Визначення модуля загальної деформації ґрунту виконувалося за формулою Шлейхера-Буссінеска.

$$S = \frac{\omega b P (1 - \mu^2)}{E_0}, \quad (1)$$

де S — осідання штампа; ω — коефіцієнт, що залежить від жорсткості штампа; b — ширина штампа; P — тиск навантаження; μ — коефіцієнт бічного розширення ґрунту (коефіцієнт Пуассона); E_0 — модуль загальної деформації.

За формулою (1) отримані значення модуля деформації для кожного з трьох випадків розрахунку: природна основа $E = 8,0$ МПа; основа, армована ґрунтоцементними елементами $E = 18$ МПа; основа, армована віброваними ґрунтоцементними елементами $E = 18$ МПа. Отримані залежності показують, що армування значно збільшує несучу здатність основи.

Щодо деформаційних характеристик армованих основ, то, як показали результати моделювання, цей параметр в лінійній стадії не залежить від характеристик ґрунтоцементу, тобто вібрування не впливає на характер їх деформування.

Висновки

1. Розрахунок та оцінювання несучої здатності буронабивних паль та ґрунтоцементних елементів можна проводити за методом скінчених елементів.

2. Доцільним для моделювання процесів зрушення є застосування традиційної моделі ґрунту Мора—Кулона у вигляді пружно-пластичного середовища, яка потребує таких основних вихідних даних для ґрунту і для ґрунтоцементу: кута внутрішнього тертя, модуля деформації, питомого зчеплення, коефіцієнта Пуассона. Ці дані необхідно визначити лабораторними і польовими дослідженнями, що забезпечить найдостовірніші вихідні параметри моделі залежно від конкретних інженерно-геологічних умов.

3. Вибрана модель та передумови розрахунків дозволяють встановити межу несучої здатності ґрунтоцементних паль, яка проявляється в спільній роботі палі за матеріалом та за ґрунтом.

4. Проведеними розрахунками підтверджено, що армування основи ґрунтоцементними елементами знижує деформативність основи, при цьому збільшення міцності ґрунтоцементу за рахунок вібрування не впливає на штамповий модуль деформації основи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Зоценко М. Л. Ґрунтоцементні основи та фундаменти / М. Л. Зоценко // Будівельні конструкції: міжвідомчий наук.-техн. зб. наук. праць (будівництво). — К. : ДП НДІБК, 2011 — Вип. 75. — Кн. 1. — С. 447—456.
2. Characteristics of manmade stiff grounds improved by drill-mixing method / [M. Zotsenko, Yu. Vynnykov, I. Lartseva et al.] // Proc. of the 15th European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Athens, 2011). — Amsterdam : IOS Press, 2011. — P. 1097—1102.
3. Зоценко Н. Л. Закрепление оснований цементацией буромесительным методом / Н. Л. Зоценко, И. И. Ларцева, В. И. Марченко // Геотехнические проблемы мегаполисов : тр. Международ. конф. по геотехнике. — М. : ПИ «Геореконструкция», 2010. — Т. 5. — С. 1781—1788.
4. Зоценко М. Л. Ґрунтоцементні палі, що виготовляються бурозмішувальним методом / М. Л. Зоценко // Зб. наукових праць. Серія : Галузеве машинобудування, будівництво, вип. 3(38). Т. 2. — Полтава, 2013. — С. 110—123.
5. Шашкин К. Г. Метод конечных элементов в геомеханике: современный взгляд / К. Г. Шашкин // Численные методы расчетов в практической геотехнике : сб. статей научн.-техн. конф. — СПб. : СПбГАСУ, 2012. — С. 76—86.
6. Ґрунти. Методи лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости / Межгосударственный стандарт. ГОСТ 12248-2010. — 162 с.

Рекомендована кафедрою промислового та цивільного будівництва ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 26.12.2013

Нестеренко Тетяна Миколаївна — асистент кафедри видобування нафти газу і геотехніки, e-mail: tanya-n-poltava@ Rambler.ru;

Марченко Валентин Іванович — канд. техн. наук, асистент кафедри видобування нафти газу і геотехніки.

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

T. M. Nesterenko¹
V. I. Marchenko¹

Theoretical basis of assessment problem solving stress-strain state of the system «vibrated soil-cement element—basis»

¹Poltava National Technical Yuriy Kondratyuk University

Calculation and evaluation of the stability of bored piles and soil-cement piles are presented in the paper. PLAXIS is the program, which is designed to calculate the deformation and stability of geotechnical structures by finite element method solving the elastic-plastic problem of nonlinear soil mechanics.

Key words: program PLAXIS, soil-cement piles.

Nesterenko Tetiana M. — Assistant of the Chair of Extraction of Oil and Gas and Geotechnic, e-mail: tanya-n-poltava@rambler.ru;

Marchenko Valentyn I. — Cand. Sc. (Eng), Assistant of the Chair of Extraction of Oil and Gas and Geotechnic

Т. Н. Нестеренко¹
В. И. Марченко¹

Теоретические основы решения задачи из оценки напряженно-деформированного состояния системы «вибрированный грунтоцементный элемент—основа»

¹Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

Приведены результаты оценки напряженно-деформированного состояния грунтоцементных основ и фундаментов методом конечных элементов и определение на них базе несущей способности и деформируемости грунтоцементных свай и армированных основ.

Ключевые слова: программный комплекс PLAXIS, грунтоцементные сваи.

Нестеренко Татьяна Николаевна — ассистент кафедры добычи нефти газа и геотехники, e-mail: tanya-n-poltava@rambler.ru;

Марченко Валентин Иванович — канд. техн. наук, ассистент кафедры добычи нефти газа и геотехники