

УДК 624.131.37

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛОТКОВИХ ВИПРОБУВАНЬ СИСТЕМИ «СТРІЧКОВИЙ РОСТВЕРК – НАБИВНІ ПАЛІ У ПРОБИТИХ СВЕРДЛОВИНАХ – ОСНОВА»

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОТКОВЫХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМЫ «ЛЕНТОЧНЫЙ РОСТВЕРК – НАБИВНЫЕ СВАИ В ПРОБИТЫХ СКВАЖИНАХ – ОСНОВАНИЕ»

NUMERICAL SIMULATION OF TRAY TESTS OF SYSTEM «STRIP GRILLAGE – CAST-IN-SITU IN THE PUNCHED HOLES – BASE»

Винников Ю.Л., д.т.н., проф., Марченко В.І., асистент, Мірошніченко І.В., аспірант (Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, м. Полтава)

Винников Ю.Л., д.т.н., проф., Марченко В.И., ассистент, Мирошниченко И.В., аспирант (Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, г. Полтава)

Vynnykov Y.L., doctor of technical sciences, prof., Marchenko V.I., assistant, Mirosnichenko I.V., post-graduate student (Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava)

Викладені результати моделювання лоткових випробувань системи «стрічковий ростверк – набивні палі у пробитих свердловинах – основа» за плоскою та просторовою версіями методу скінченних елементів.

Изложены результаты моделирования лотковых исследований системы «ленточный ростверк – набивные сваи в пробитых скважинах – основание» по плоской и пространственной версиями метода конечных элементов.

The simulation results of tray tests of system «strip grillage – cast-in-situ pile in the punched holes – base» by 2D and 3D versions of finite element method are presented.

Ключові слова:

Набивна паля у пробитій свердловині, стрічковий ростверк, лотковий експеримент, метод скінченних елементів.

Набивная свая в пробитой скважине, ленточный ростверк, лотковый эксперимент, метод конечных элементов.

Cast-in-situ pile in the punched hole, strip grillage, tray experiment, finite element method.

Вступ. Набивні палі у пробитих свердловинах (НППС) вирізняє високий ступінь використання несучої здатності основи внаслідок формування в ній ущільненої зони. Вони дають змогу майже вилучити земляні і опалубочні роботи, знизити витрати бетону, металу, вартість і трудомісткість робіт, прискорити зведення нульового циклу порівняно з фундаментами, що виготовляють з вийманням ґрунту й заглибленням у нього збірних елементів. Однак досліджень потребують особливості роботи НППС за умов замкнених лесових ґрунтів та їх відповідного проектування.

Метод ПолтНТУ розрахунку НППС [1] ураховує параметри розширених і ущільнених зон палей залежно від параметрів трамбівок, матеріалу розширення, властивостей ґрунту, відстані між осями палей. Та розширення нормативної бази проектування НППС потребує удосконалення визначення осідань НППС у складі стрічкових ростверків у замкнених лесових ґрунтах, яка б ураховувала взаємодію зон впливу сусідніх палей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання цієї проблеми. Експериментальні дослідження [2 – 4] спільної роботи системи «стрічковий ростверк – забивні палі постійного поперечного перерізу – ґрунти» підтвердили, що: при відстані між осями палей $3 - 4 d$ затиснутий між ними ґрунт можливо з достатньою для практики точністю розглядати як єдиний масив; з глибиною дотичні напруження по бічній поверхні палей зростають за кривою другого порядку, які припустимо прийняти за трикутною епюрою; в площині підшви палей нормальні напруження розвиваються за параболою, та їх можливо прийняти як рівномірно розподілені; навантаження передаються за ділянками рядів палей; ростверк включається в роботу при осіданні основи $1,5 - 4$ мм і сприймає максимальні навантаження при її осіданні $15 - 20$ мм, які надалі залишаються постійними; головну частину осідання дає шар під ущільненою зоною, потужність стислої товщі зростає зі збільшенням навантаження та кількості рядів палей, у м'якопластичних глинистих ґрунтах активна зона більша, ніж у тугопластичних чи напівтвердих; межу активної зони доцільно приймати на глибині, де напруження не перевищують структурну міцність ґрунту.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття. Сучасні рішення геотехнічних задач, переважно в межах вісесиметричної версії, методом скінченних елементів (МСЕ) кроково-ітераційними методами у фізично й геометрично нелінійній постановці достатньо адекватно відбивають напружено-деформованого стану (НДС) масиву при влаштуванні окремих фундаментів (палей) з ущільненням ґрунту та їх наступній роботі [5 – 7]. Однак, ці рішення не коректно використовувати для оцінювання взаємодії палей у складі стрічкових ростверків з ґрунтами. Тому слід обґрунтувати коректність механічних моделей стану замкненого лесового ґрунту й геомеханічних моделей плоскої та просторової версії МСЕ [8 – 11] апробованих програмних продуктів щодо розрахунків спільної роботи НППС у складі стрічкових ростверків (СР) з основою (О).

Тому за **метою роботи** було прийнято порівняти дані лоткових досліджень взаємодії НППС у складі стрічкових ростверків [12] із замкними лесовими ґрунтами з результатами моделювань цих же досліджень за плоскою та просторовою версіями МСЕ в програмному комплексі Plaxis.

Викладення основного матеріалу. Для порівняння вирішено обрати дані лоткових випробувань набивних паль у пробитих свердловинах у складі стрічкових ростверків з відстанню між осями паль $\ell_w = 3 \cdot d = 90$ мм [12]. Розміри розрахункової схеми при моделюванні приймали відповідно до розмірів лотка – в плані 580×580 мм і висотою – 560 мм. Розміри моделей паль назначали відповідно до їх фактичних розмірів: глибина свердловини $h = 120$ мм; її діаметр $d = 30$ мм. Крім того в основі цих паль влаштовувалися розширення зі щебеню та зона достатнього ущільнення ґрунту [1]. Розміри ростверку: висота – 50 мм; ширина 40 мм; довжина 320 мм (рис. 1).

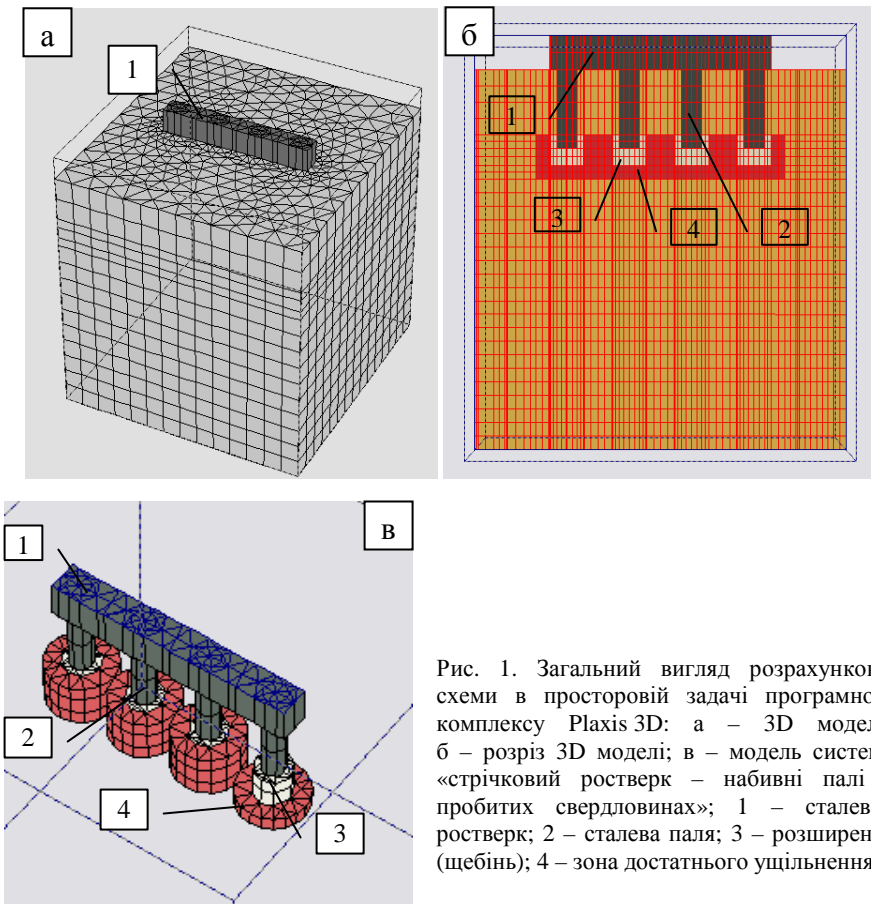


Рис. 1. Загальний вигляд розрахункової схеми в просторовій задачі програмного комплексу Plaxis 3D: а – 3D модель; б – розріз 3D моделі; в – модель системи «стрічковий ростверк – набивні палі в пробитих свердловинах»; 1 – сталевий ростверк; 2 – сталеві палі; 3 – розширення (щебінь); 4 – зона достатнього ущільнення

Ґрунт у лотку, пробиті свердловини, стовбури паль, розширення зі щебеню та ущільнена зона навколо розширення задавалися просторовими кластерами в 3D моделюванні (рис. 1). У 2D (плоскій) постановці – систему «СР – НППС – О» моделювали у вигляді поперечного перерізу стрічки ростверку (рис. 2), розрахунок умовно виконували на одиницю довжини.

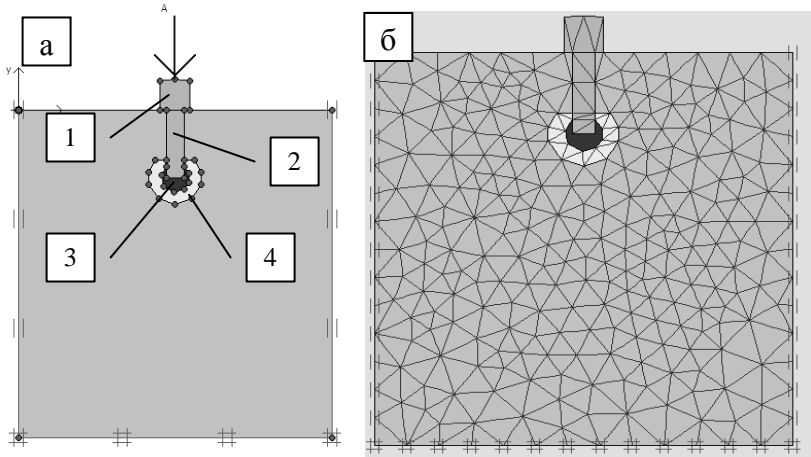


Рис. 2. Розрахункова схема моделювання плоскої задачі в програмному комплексі Plaxis: а – загальний вигляд 2D моделі; б – сітка скінченних елементів; 1 – сталевий ростверк; 2 – стовбур палі; 3 – розширення (щебінь); 4 – зона достатнього ущільнення ґрунту

Механічні моделі та їх параметри для структурних елементів системи, що моделюється наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Механічні моделі та фізико-механічні властивості елементів системи «СР – НППС – О»

№ ІГЕ, найменування матеріалу	Модель матеріалу	Питома вага ґрунту γ , кН/м ³	Питоме зчеплення с, кПа	Кут внутрішнього тертя ϕ , °	Модуль деформації (пружності) Е, МПа	Коефіцієнт Пуассона ν
Суглинок	MC Drained	19,5	16	0	2	0,35
Ущільнена зона	MC Drained	19,5	36	0	6	0,35
Розширення (щебінь)	Linear Elastic Drained	24,0	-	-	50	0,25
Металева паля та ростверк	Linear Elastic	78,5	-	Non-porous	$2,1 \cdot 10^7$	0,15

Для моделювання лоткових випробувань використаємо плоску та просторову версії програмного комплексу PLAXIS.

Для моделювання НДС ґрунту використано ідеальну пружно-пластичну модель з критерієм міцності Мора – Кулона.

Для коректного застосування моделі Мора – Кулона потрібні значення її основних параметрів: 1) дренована (Drained), недренована (Undrained) чи непориста (Non-porous) поведінка ґрунту; 2) питома вага у природному γ_{unsat} й у водонасиченому стані γ_{sat} (оскільки ґрунт у лотку водонасичений, то значення цього параметру приймаємо однакові); 3) коефіцієнти фільтрації ґрунту k_x , k_y , k_z (Permeability), що мають фізичний зміст лише для його недренованої поведінки; 4) модуль деформації ґрунту E ; 5) коефіцієнт Пуассона ν ; 6) кут внутрішнього тертя ґрунту φ ; 7) питома зчеплення ґрунту c ; 8) кут дилатансії ґрунту ψ .

Параметри міцності (c , φ) моделі для ґрунтів (Strength) і деформативності (Stiffness) ґрунтів (E та ν) визначали експериментальним шляхом за даними лабораторних нормативних випробувань.

Коефіцієнт Пуассона ν приймали відповідно до ДСТУ Б В.2.1-4-96 для суглинків 0,35 – 0,37.

Рівень ґрунтових вод приймався по верху лотка, виходячи з умов водонасиченості ґрунту.

Для моделювання сталевих паль і ростверку використана лінійна пружна модель (Linear Elastic). Ця модель відповідає закону Гука – ізотропної лінійної пружності. Ця модель, зокрема, включає в себе два пружних параметри жорсткості, а саме модуль Юнга E і ν коефіцієнт Пуассона. Їх значення призначалися відповідно до ДСТУ Б В.2.6-156: 2010.

Для просторових кластерів цього типу використано опцію Non-porous (непористий). При цьому не будуть ураховуватися початковий і додатковий поровий тиск у кластерах відповідного типу.

Задача розв'язувалася за 3 етапи: 1) гравітаційне завантаження розрахункової області власною вагою ґрунту та визначення початкового НДС ґрунтового масиву; 2) улаштування НППС і ростверку; 3) прикладання вертикального погонного навантаження на систему «СР – НППС – О».

В результаті моделювання отримано графіки залежності осідань досліджуваної системи від навантаження на ростверк (рис. 3).

Порівняння експериментальних і змодельованих графіків показує відповідність деформування системи «СР – НППС – О» як за просторовою, так і за плоскою версіями МСЕ. На графіках простежується відхилення результатів моделювання від експериментальних даних, що можна пояснити неврахуванням при моделюванні часу дії ступенів навантаження.

На рис. 4 показана деформована схема після третього етапу моделювання та точки розвитку пластичних деформацій у ґрунтовому масиві навколо ростверку, паль та їх розширень після прикладення навантаження.

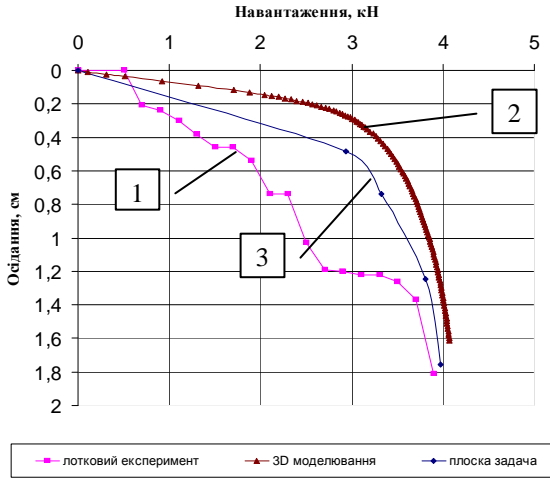


Рис. 3. Графіки залежності «Навантаження – осідання» за результатами лоткового експерименту та його 2D і 3D чисельного моделювання: 1 – лотковий експеримент; 2 – 3D моделювання; 3 – 2D моделювання

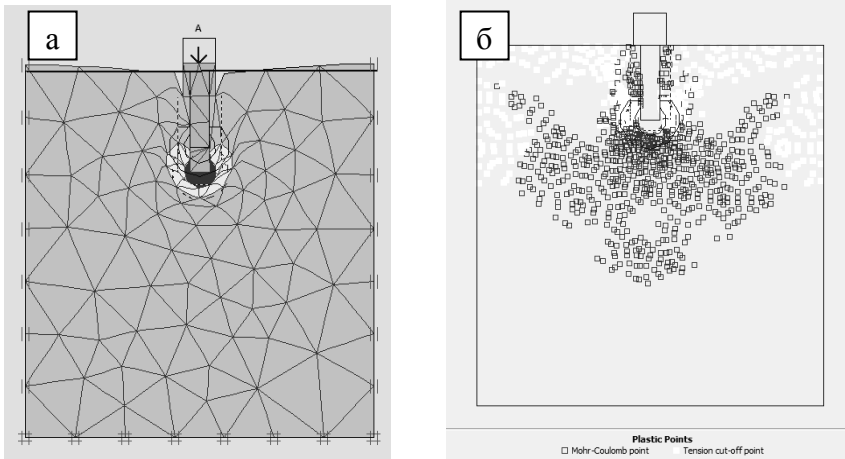


Рис. 4. Деформована схема системи «СР – НППС – О» (а) та зони (точки) розвитку пластичних деформацій у ґрунтовому масиві навколо ростверку, паль та їх розширень (б) за результатами 2D моделювання

На рис. 5 показані загальні напруження в масиві ґрунту при кінцевій величині погонного навантаження на стрічковий ростверк і деформації системи «СР – НППС – О» за результатами 2D моделювання.

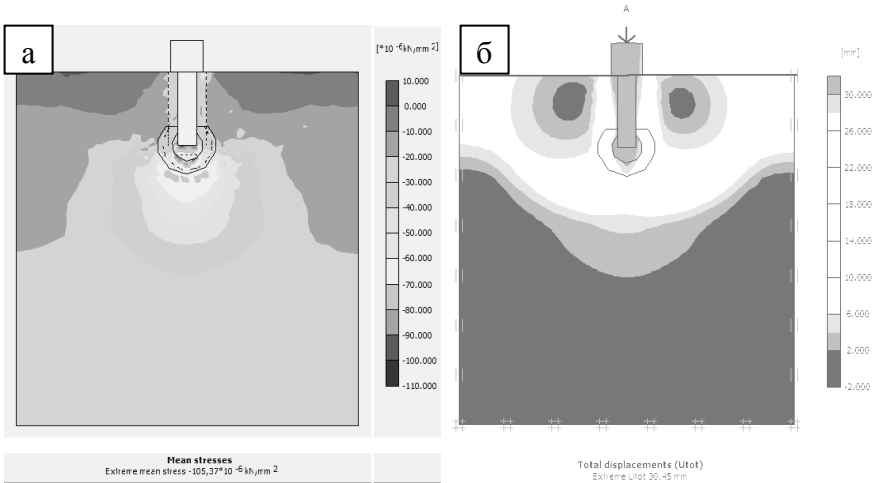


Рис. 5. Загальні напруження (а) та деформації (б) в масиві ґрунту навколо ростверку, паль та їх розширень за результатами 2D моделювання

Результати 3D моделювання, загальні напруження та деформації в системі «СР – НППС – О» зображені на рис. 6.

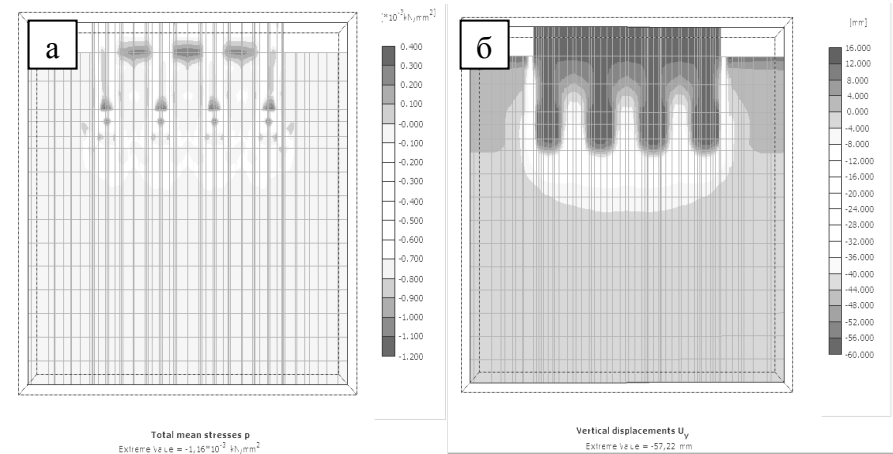


Рис. 6. Загальні напруження (а) та деформації (б) в масиві ґрунту навколо ростверку, паль та їх розширень за результатами 3D моделювання

Таким чином, порівнюючи результати чисельного моделювання та лоткового експерименту можемо зробити **висновок** про те, що просторова та плоска версії МСЕ достатньо адекватно оцінюють деформування системи

«стрічковий ростверк – набивні палі в пробитих свердловинах – основа» й можуть бути використані для розрахунків таких систем при відстані між осями палей до 3 діаметрів їх поперечного перерізу. Крім того, порівняння результатів 2D моделювання з результатами 3D моделювання доводять можливість коректного спрощення розрахункової схеми до плоскої постановки при даному кроці палей, що дозволить скоротити загальний час чисельних розрахунків.

1. Посібник з проектування та спорудження фундаментів у пробитих свердловинах (до СНиП 2.02.03-85) / К.: Державний комітет України у справах містобудування і архітектури. – 1997. – 72 с. **2.** Бартоломей, А.А. Прогноз осадок свайних фундаментів / А.А. Бартоломей, И.М. Омельчак, Б.С. Юшков. – М. : Стройиздат, 1994. – 384 с.
- 3.** Тугаенко, Ю.Ф. Процессы деформирования грунтов в основаниях фундаментов, свай и свайных фундаментов / Ю.Ф. Тугаенко. – Одесса: Астропринт, 2008. – 216 с.
- 4.** EN 1997-1. 2004. Eurocode 7. Geotechnical Design. Part 1. General Rules CEN/TC 250/SC7. European Committee for Standardization, Brussels. – 166 p. **5.** Шапиро, Д.М. Теория и расчетные модели оснований и объектов геотехники: монография / Д.М. Шапиро. – Воронеж: Научн. книга, 2012. – 164 с. **6.** Винников, Ю.Л. До оцінки напружено-деформованого стану основ фундаментів у пробитих свердловинах методом математичного моделювання// Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Зб. наук. праць. – Вип. 9. – Рівне: РДТУ, 2003. – С. 394 – 398.
- 7.** Henke, S. Numerical modeling of pile installation / S. Henke, J. Grabe // Proc. of 17th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Alexandria, 2009). – Amsterdam: IOS Press, 2009. – P. 1321 – 1324. **8.** Бойко, І.П. Процеси деформування основи паливових фундаментів в специфічних ґрунтових умовах / І.П. Бойко, В.О. Сахаров, О.О. Арешкович // Світ геотехніки. – 2010. – № 3 (27). – С. 30 – 33.
- 9.** Улицкий, В.М. Геотехническое сопровождение развития городов / В.М. Улицкий, А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин – СПб.: «Стройиздат Северо-Запад», 2010. – 551 с.
- 10.** Plaxis 3D Foundation. Reference Manual. Version 1.5 / R. Brinkgreve at al. – Delft: Delft University of Technology. – 2006. – 152 p. **11.** Plaxis 3D Foundation. Material Models Manual. Version 1.5 / R. Brinkgreve at al. – Delft: Delft University of Technology. – 2006. – 65 p. **12.** Мірошніченко, І.В. Лоткові дослідження деформованого стану водонасиченої глинистої основи набивних палей у пробитих свердловинах / І.В. Мірошніченко // Будівельні конструкції: Міжвід. науково-техн. збірник наук. праць (будівництво) – Вип. 75. – Кн. 1. – К.: ДП НДІБК, 2011. – С. 598 – 604.