

УДК 642:624.044:624.15

А. С. Моргун¹
В. Ю. Плясовиця¹**ВЗАЄМОДІЯ ФУНДАМЕНТІВ У ВИТРАМБОВАНИХ
КОТЛОВАНАХ З ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОЮ ОСНОВОЮ**¹Вінницький національний технічний університет

За числовим методом граничних елементів (МГЕ) розв'язано контактну задачу взаємодії палі з розширенням у нижній частині у витрамбованому котловані з ґрунтовою основою. Показано, що таким палям властива підвищена несуча спроможність завдяки значному збільшенню міцністних та деформативних характеристик ґрунтів ущільнених зон.

Ключові слова: напружено-деформований стан, метод граничних елементів, несуча спроможність.

Вступ

Одним з резервів підняття ефективності пального фундаментобудування є використання раціонального типу паль, до яких відносяться набивні палі. Вони не потребують по відношенню до забивних великого розходу сталі і бетонується у свердловинах без опалубки. Як, відомо, капітальне будівництво — одна з найметалоємніших галузей народного господарства, а економія металу — актуальна економічна задача сьогодення. Бурунабивні палі можна використовувати в різних природних умовах і для любих споруд. При влаштуванні бурунабивних паль можна досягнути рівності несучої спроможності по ґрунту і по матеріалу, що дозволяє економити матеріали (для забивних паль, несуча спроможність ствола використовується лише не 20...50 %, а для набивних — на 75 % і більше). Виключається необхідність в зрубванні паль, забезпечується висока точність розташування паль в плані і в вертикальній площині, скорочуються транспортні затрати.

Як, відомо, набивні палі можуть виготовлятися в пробурених свердловинах (бурунабивні палі) і в свердловинах, улаштованих пробивкою, протискуванням, вібропротискуванням, віброзаглибленням інвентарного лідера чи обсадної труби. Значної уваги заслуговують короткі набивні палі (4...8 м, з навантаженням на опору 1000...1500 кН) в пробитих, протиснутих свердловинах, удароштамповані, штампабивні, віброформовані. Вони відрізняються від бурунабивних паль більшою мірою використання несучої спроможності ґрунтів основи, яка наближається до забивних паль, так як створюється ущільнена зона по боковій та лобовій поверхні палі. Таким чином, такі палі дозволяють використовувати переваги забивних паль та мати найкращі техніко-економічні показники.

Постановка задачі, визначальні співвідношення

Метою роботи є отримання за числовим МГЕ прогнозу процесу деформування віброштампованої палі з розширенням, показаної на рис. 1а.

Зміна фізико-механічних і деформативних характеристик ущільнених ґрунтів, а також зміна зони розповсюдження ущільнення ґрунту навколо палі досліджувались на експериментальній ділянці при витрамбовуванні свердловини $l = 5,2$ м за допомогою навіски до монтажного крану [1] вагою 210 кН. Діаметр свердловини зверху 1,6 м, знизу — 1 м. Для створення розширеної основи було втрамбовано 22 м³ щебеню. В табл. 1 наведено отримані з експерименту [1] фізико-механічні характеристики інженерно-геологічних елементів (ІГЕ) ґрунтової основи природного залягання (рис. 1а).

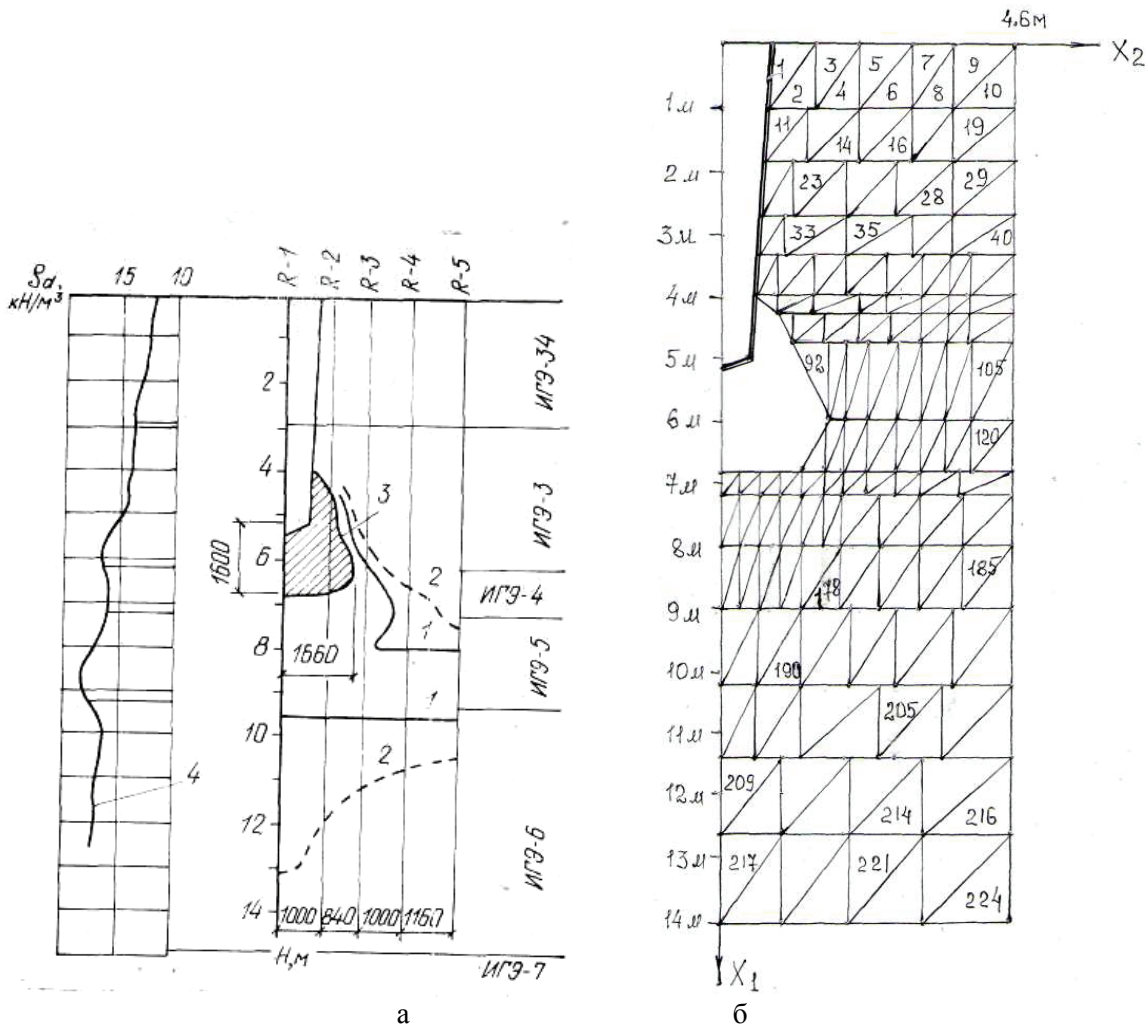


Рис. 1: а — результати радіоізотопних досліджень ґрунтів котловану; б — схема дискретизації активної зони; 1 — межі ущільненої зони з показником щільності сухого ґрунту $\rho_d = 18 \text{ т/м}^3$; 2 — $\rho_d = 17 \text{ т/м}^3$; 3 — розширена основа з витрамбовуваного щебеню; 4 — графік зміни природної щільності ґрунту ρ_{dnp} ; R1—R5 — розміщення радіометричних свердловин в експериментальних дослідженнях [1].

Дані фізико-механічних характеристик ґрунту

ПЕ	Природна вологість W в долях одиниці	Щільність сухого ґрунту ρ_{dry} , т/м^3	Границя розкочення W_p	Число пластичності I_p	Модуль деформації E , МПа
ПЕ 3А — лесовидні суглинки, $h = 2,9 \text{ м}$	0,44	1,32	0,2	10	5
ПЕ 3 — лесовидні суглинки, $h = 3,5 \text{ м}$	0,16	1,38	0,2	10	14
ПЕ 4 — лес, $h = 1,0 \text{ м}$	0,14	1,55	0,2	10	15
ПЕ 5 — суглинки моренні, $h = 2,1 \text{ м}$	0,16	1,65	0,19	10	24
ПЕ 6 — суглинки моренні, $h = 4,50 \text{ м}$	0,17	1,63	0,19	10	23
ПЕ 7 — піски мілкі середньої щільності	0,06	16	0,19	10	25

Зміну характеристик ρ , ρ_d , w , E після підготовки свердловин та втрамбування 22 м^3 щебеню виконано [1] радіоізотопними дослідженнями — вибурюванням радіометричних свердловин через 50 см , рис. 1а. Після радіоізотопних досліджень по осі котлованів виконувались шурфи і траншеї для лабораторного визначення c , ϕ , E . Максимальне значення ρ_d під розширеною осно-

вою склало $1,99 \text{ т/м}^3$ (природне значення $\rho_{d \text{ пр}} = 1,55 \text{ т/м}^3$). Значення модуля деформацій E для ПГЕ-3, ПГЕ-4, ПГЕ-5 склало, відповідно 32, 45 і 54 МПа, що в 2,5...3 більше E для ґрунтів природного залягання.

Згідно з даними досліджень за втрамбування надважкою трамбівкою (масою 210 кН) ущільнення ґрунтів розповсюджується на глибину 5...6 м від низу витрамбованого котловану, а в сторони — до 4...4,5 м, що визначило розміри активної навколопальнової зони в числовому розрахунку за МГЕ. Ущільнена активна зона, в якій виникають деформації ґрунту у разі навантаження палі (14 м — по вертикалі, 4,6 м по горизонталі), дескретизувалась 224 трикутними осередками (рис. 1б).

Експериментальні дослідження [1] показують, що ґрунти значно доущільнюються при девіаторному навантаженні. В розрахунку цей фактор ураховується використанням дилатансійної теорії Ніколаєвського В. М. — Бойка І. П. [3, 4].

Для теоретичних розрахунків математичною моделлю поведінки ґрунтової основи під навантаженням слугує система диференціальних рівнянь в частинних похідних, яка зведена К. Бреббія [2] до інтегрального розрахункового рівняння (1), і задача розв'язувалась на основі розгляду цього інтегрального рівняння МГЕ

$$C_{ij}(\xi)u_j(\xi) + \int p_{ij}^*(\xi, x)u_j(x)d\Gamma(x) = \int u_{ij}^*(\xi, x)p_j(x)d\Gamma(x), \quad (1)$$

де u_{ij}^* , p_{ij}^* — базисні функції, що відповідають полю вагових функцій, які задовольняють рівнянню рівноваги Лапласа в області Ω . За вагові функції прийнято фундаментальні рішення Р. Міндліна для переміщень та напружень в півплощині.

Основне інтегральне рівняння МГЕ [5] має такий вигляд:

$$F = |K|Y, \quad (2)$$

де $|K|$ — глобальна матриця коефіцієнтів впливу, що враховує взаємодію палі і основи (з фізичної точки зору коефіцієнти матриці впливу — це переміщення точок бокової поверхні і вістря палі від дії $P = 1$); Y — вектор стовпець невідомих (дотичні та нормальні напруження на граничних елементах бокової поверхні і вістря палі); F — заданий вектор переміщень.

Математична модель ґрунту формувалась в рамках неасоційованого закону пластичної течії, яка базується на принципі максимуму швидкості механічної роботи (принципу максимуму Мізеса). Теорія пластичної течії визначає приріст компонентів тензора пластичних деформацій, пропорціонального градієнту деякої функції, що називають пластичним потенціалом (7). При компоновці математичної моделі пластичної поведінки ґрунту величина повних деформацій подавалась через складові

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \sum \varepsilon_{ij}^p + d\varepsilon_{ij}^p \delta_{ij}; \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ij}^p = d\varepsilon_{ij}^p(\text{шарове}) + \varepsilon_{ij}^p(\text{девіаторне}), \quad (4)$$

де ε_{ij}^e — пружна частина деформацій ґрунту; $\sum \varepsilon_{ij}^p$ — пластична частина деформацій; $d\varepsilon_{ij}^p$ — приріст пластичних деформацій; δ_{ij} — дельта Кронекера.

Введення додаткового дилатансійного співвідношення дозволяє зробити пластичну течію однозначно визначеною.

Приріст незворотних змін об'ємних пластичних деформацій визначається за співвідношеннями сучасної дилатансійної теорії ґрунтового середовища В. М. Ніколаєвського, І. П. Бойка [3, 4].

$$d\varepsilon_{ij}^p(\text{шарове}) = \Lambda(\chi)d\gamma^p, \quad (5)$$

де Λ — швидкість дилатансії; $d\gamma^p$ — приріст інтенсивності деформацій зсуву;

$$\Lambda = \frac{\varepsilon_m}{\gamma}, \quad (6)$$

де ε_m — швидкість зміни об'ємної деформації на девіаторній площині; γ — скалярна характеристика формозміни — другий інваріант девіатора швидкостей деформацій T_e ; χ — параметр зміцнення ґрунтового середовища (прийнято щільність ґрунту).

Ґрунтам властивий змінний коефіцієнт дилатансії Λ , в них T_σ і T_e — некоаксіальні. Поява неспіввісності T_σ і T_e потребує використання неасоційованого закону пластичної течії.

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{df}{d\sigma_{ij}}; \quad F \neq f, \quad (7)$$

де F — враховує термічну форму руху ґрунту в результаті тертя його частинок (внутрішнє тертя, яке веде до дисипації енергії при пластичному деформуванні та прояві ефектів дилатансії).

F підбирається таким чином, щоб забезпечити орієнтацію вектора $d\varepsilon_{ij}^p$ у відповідності з дослідними даними.

Розв'язання такої нелінійної задачі геомеханіки (поведінка віброштампованої палі під навантаженням) проведено методом пружних розв'язків О. А. Іллюшина. Ітераційний метод «пружних» рішень О. А. Іллюшина є дієвим наближеним методом, який дозволяє звести розв'язок нелінійної пружно-пластичної задачі до послідовного розв'язку лінійних задач [5]. Числовий розрахунок цієї нелінійної задачі проведено за допомогою складеної на алгоритмічній мові Delphi програми, яка враховує дилатансію ґрунту. «Теоретичні результати розрахунку подано на рис. 2 у вигляді графіка «навантаження—осідання».

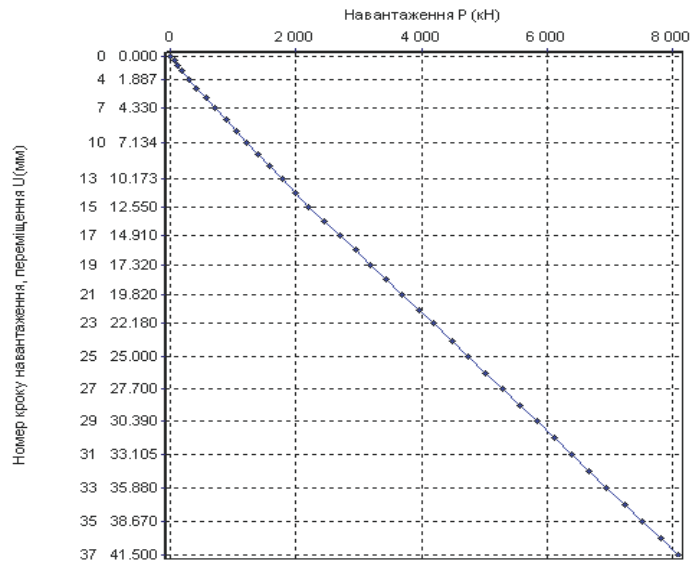


Рис. 2. Графік залежності «навантаження — осідання»

Висновки

1. Числовий експеримент підтвердив лінійний характер залежності осідання від навантаження. Згідно з даними експерименту [1], коли $s = 4$ см, $P = 8070$ кН, за фактичної лінійної залежності $P-s$.
2. На рис. 2 «зриву» палі не спостерігається, тобто несуча спроможність виштампованої палі в інтервалі навантажень $P = 2000 \dots 8000$ кН не вичерпується.
3. З порівняння теоретичних і експериментальних даних деформування випливає висновок, що запропонована модель задовільно описує динаміку процесу деформування. Це дозволяє прогнозувати величину переміщень раціональних типів фундаментів у витрамбованих котлованах, обґрунтовано вживати заходи, що забезпечують їх нормальну експлуатацію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Константиновский Д. И. Совершенствование способа устройства фундаментов в вытрамбованных котлованах под крупные промышленные сооружения. / Д. И. Константиновский, Е. В. Третьяков. — М. : Изд-во литературы по строительству // ОФМГ. — 1987. — № 6. — С. 18—20.
2. Бреббия К. Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел. — М. : Мир, 1987. — 525 с.
3. Бойко І. П. Напружено-деформований стан ґрунтового масиву при побудові нових фундаментів поблизу існуючих будинків / І. П. Бойко, О. В. Сахаров // Основи і фундаменти : міжвідомчий наук.-техн. зб. — К. : КНУБА. — 2004. — Вип. 28. — С. 3—10.
4. Николаевский В. Н. Современные проблемы механики грунтов / В. Н. Николаевский // Определяющие законы механики грунтов. — М. : Стройиздат, 1975. — С. 210—227.
5. Моргун А. С. Нелінійні проблеми механіки ґрунтів / А. С. Моргун. — Вінниця : ВНТУ, 2016. — 122 с.

Рекомендовано кафедрою будівництва, міського господарства та архітектури ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 29.12.2016

Моргун Алла Серафимівна — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, e-mail: alla@morgun.com.ua ;

Плясовиця Віталій Юрійович — здобувач кафедри будівництва, міського господарства та архітектури.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

A. S. Morgun¹
V. Yu. Pliasovytsia¹

Interaction of Foundations in Rammed Foundation Pits with Elastic-Plastic Founding

¹Vinnytsia National Technical University

With the use of numerical method of border elements there has been solved the pin task of interaction of pile in the rammed foundation pit with expansion in the lower part with the ground founding and it has emphasized, that such piles have bearing capacity due to the considerable increase of strength and deformation descriptions of soils of close-settled zones.

Keywords: mode of deformation, method of boundary element, load-bearing capacity.

Morgun Alla S. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Building, Municipal Economy and Architecture, e-mail: alla@morgun.com.ua ;

Pliasovytsia Vitalii Yu. — Post-Graduate Student of the Chair of Building, Municipal Economy and Architecture

A. С. Моргун¹
В. Ю. Плясовица¹

Взаимодействие фундаментов в утрамбованных котлованах с упругопластическим основанием

¹Винницкий национальный технический университет

С использованием числового метода граничных элементов решена контактная задача взаимодействия свай с расширением в нижней части в утрамбованном котловане с грунтовым основанием. Показано, что таким сваям свойственна повышенная несущая способность благодаря значительному повышению прочностных и деформационных характеристик грунтов уплотнённых зон.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, метод граничных элементов, несущая способность.

Моргун Алла Серафимовна — д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой строительства, городского хозяйства и архитектуры, e-mail: alla@morgun.com.ua ;

Плясовица Виталий Юриевич — соискатель кафедры строительства, городского хозяйства и архитектуры