

А. С. Моргун¹
О. І. Доскоч¹
І. І. Шевченко¹

ПРОГНОЗ ДЕФОРМУВАННЯ БУРОНАБИВНИХ ПАЛЬ З РОЗШИРЕННЯМ З ГРУНТОВОЮ ОСНОВОЮ ЗА МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

¹Вінницький національний технічний університет

Сучасне висотне будівництво підняло питання необхідності врахувань в проектних розрахунках всієї складності ґрунтових умов, їх перерозподільних властивостей, особливостей деформування фундаментних конструкцій та необхідності розглядати основу і фундамент як єдину систему, хоча складові цієї системи мають різну природу. Результати моніторингу осідань будівель показують значні розбіжності між фактичними і розрахунковими їх значеннями. Це пояснюється умовністю розрахункових схем, неврахуванням реальних процесів навантаження ґрунтів. Міцність ґрунту суттєво залежить від траєкторії навантаження, початкової щільності, співвідношення девіаторної та кульової частини тензора напружень, тобто з ефектами дилатансії та контрактансії. Тому розвиток і уточнення розрахункових моделей основ споруд є актуальним для сьогодення.

На сьогодні в прикладних технічних науках процес розрахунку неможливий без переходу до математичного моделювання. Дисперсним ґрунтам властиві ефекти дилатансії — зміни об'єму при зсуві, під дією навантаження тверді частинки ґрунту переміщуються в поровий простір, що спричиняє одночасну зміну об'єму та форми. Тому для розрахунку ґрунтових основ крім апарату теорії пружності необхідне залучення пластичних математичних моделей. Основна задача проектування — зведення до мінімуму осідань ґрунту під фундаментами, оскільки завдяки цьому зменшуються додаткові навантаження наземних конструкцій, які і без того знаходяться під дією постійних і тимчасових навантажень.

В роботі за пружно-пластичною дилатансійною моделлю, використовуючи числовий метод граничних елементів, спрогнозовано поведінку під навантаженням буронабивної палі довжиною $L = 12$ м, діаметром $d = 0,6$ м з розширенням $1,6$ м в зоні п'яти палі. Буронабивні палі з розширенням широко розповсюджені в промисловому та цивільному будівництві, мають техніко-економічні перспективи використання. П'ята пальового фундаменту сприймає $28...35$ % навантаження. Розширення стовбура палі в зоні п'яти збільшує як поверхню п'яти, так і розміри бокової поверхні, що сприяє підвищенню несучої спроможності палі та зменшує осідання.

Ключові слова: буронабивна паля з розширенням, напружено-деформований стан (НДС), метод граничних елементів (МГЕ).

Вступ

Потенціал несучої спроможності залізобетонних паль за матеріалом недовикористовується. Для підвищення несучої спроможності паль по ґрунту, з метою вирівняння ситуації, в палях влаштовують розширення. Наявність розширень в палі дозволяє в 2—3 рази підвищити розрахункове навантаження на палю по ґрунту [1].

Процеси, що проходять в ґрунтах під дією їх навантаження дуже складні як об'єкти досліджень і контролю, і наразі вивчено не всі аспекти деформування ґрунтової основи під навантаженням.

На сьогодні постає задача дослідження НДС споруд за допомогою ЕОМ та сучасних числових методів, які забезпечують економічне та надійне проектне рішення, тому тема роботи є актуаль-

ною та має важливе прикладне і наукове значення.

Збільшення несучої спроможності буронабивних паль з розширенням пояснюється [1] збільшенням сил тертя по боковій поверхні, площа якої у паль з розширенням значно зростає. Під впливом опорного розширення п'ята обтискується ґрунтом основи. Опорне розширення буронабивних паль впливає на жорсткість як нижніх ділянок верхньої циліндричної частини палі, так і на верхні ділянки п'яти палі [1].

Метою дослідження є обґрунтування розрахунку таких фундаментів сучасним числовим методом граничних елементів (МГЕ).

Постановка задачі, визначальні співвідношення

Фундаментна конструкція має забезпечити міцність будівлі, а це вимагає найточнішого прогнозу деформацій. Сучасний математичний апарат механіки ґрунтів оснований на розв'язках теорії пружності (закон Гука лежить в основі багатьох важливих інженерних теорій) і теорії граничної рівноваги. Етап пружно-пластичного деформування від кінця пружної стадії до втрати стійкості не достатньо досліджений за допомогою розрахункових методів. Водночас резерви пружно-пластичної зони дозволяють збільшити навантаження на фундаменти тоді, коли осідання в пружній стадії не досягають гранично допустимого для певної споруди значення.

Задачі геомеханіки на теперішній час моделюються диференційними рівняннями в частинних похідних і відносяться до класу крайових задач. Проектне рішення визначення несучої спроможності буронабивної палі з розширенням обґрунтовано з використанням основного інтегрального рівняння методу граничних елементів, яке є синтезом статичних, геометричних, фізичних рівнянь. До розгляду взято буронабивну палю довжиною $L = 12$ м, діаметром $d = 0,6$ м з розширенням в області п'яти палі 1,6 м. Дискретизацію активної зони цієї палі показано на рис. 1.

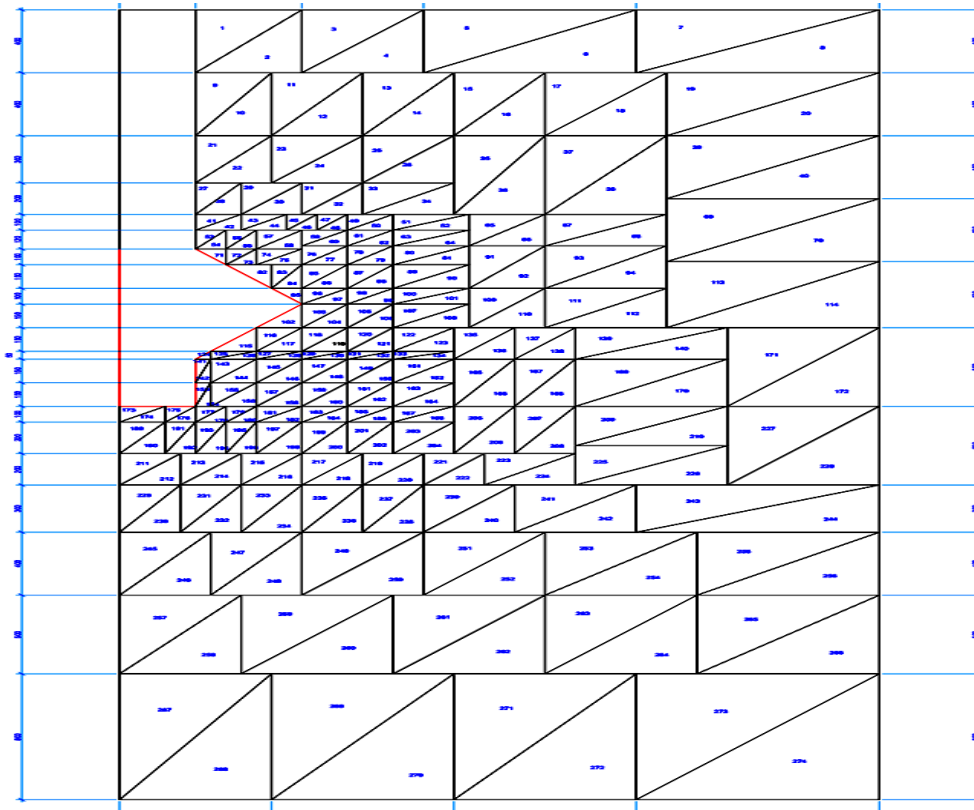


Рис. 1. Схема дискретизації активної зони буронабивної палі $L = 12$ м з розширенням 1,6 м

У числовому розрахунку палі за МГЕ враховується 9 геологічних чинників впливу зі всієї сукупності властивостей ґрунтів. Їх середньозважені значення: модуль деформації ґрунту $E = 20,57$ МПа; коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,307$; зчеплення $c = 11$ кПа; кут внутрішнього тертя $\varphi = 0,325$ рад.; щільність ґрунту $\rho = 1,814$ кН/м³; мінімальна щільність ґрунту $\rho_{\min} = 1,67$ кН/м³; максимальна щільність ґрунту $\rho_{\max} = 2,2$ кН/м³; структурна щільність ґрунту $\rho_s = 2,713$ кН/м³; октаедричне напруження (кПа) при переході з пружної в пластичну стадію роботи $p_0 = -1890$ кПа.

Для визначення несучої спроможності та деформативності буронабивної палі з розширенням залучено програмний комплекс, який використовує метод граничних елементів [2].

Рівняння стану буронабивної палі з розширенням під навантаженням в розрахунку визначало інтегральне рівняння [2], [3]

$$C_{ij} \cdot u_{ij} + \int_{\Gamma} p_{ij}^* \cdot u_{ij} d\Gamma = \int_{\Gamma} p_{ij} \cdot u_{ij}^* d\Gamma + \int_{\Omega} \sigma_{ij}^* \cdot \varepsilon_{ij}^{пл} d\Omega, \quad (1)$$

де U — заданий вектор переміщень на границі палі; p_{ij} — вектор напружень на цій границі; U^* , p^* , σ^* — ядра граничного рівняння — це розв'язки Р. Міндліна для $P = 1$ у півпросторі для переміщень, напружень і похідних від напружень, відповідно; C_{ij} — матриця, яка визначається з умов руху тіла як цілого; Γ , ξ , X — відповідно, гранична поверхня фундаментної конструкції, точка прикладання $P = 1$, точка спостереження. Рівняння (1) є граничним інтегральним рівнянням щодо значень шуканих функцій (напружень по боковій поверхні та підшві палі) на границі дослідного об'єкта. Ця важлива обставина надає найбільшій привабливості цьому рівнянню, яке стає вельми прийнятним для досліджень числовими методами.

Визначення несучої здатності та величини осідання фундаментної конструкції проводилось в такій послідовності:

- дискретизація граничної контактної поверхні фундаментної конструкції та активної зони ґрунту (рис. 1);
- компоновка розрахункових матриць впливу МГЕ на основі розв'язків Р. Міндліна;
- запис розрахункових систем рівнянь;
- розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь, отримання НДС фундаментної конструкції на кожному етапі навантаження;
- визначення областей граничного стану із аналізу вектора пластичних деформацій;
- прийняття і обґрунтування проектного рішення про несучу спроможність буронабивної палі з розширенням.

Для розгляду тривимірної задачі пружно-пластичної поведінки ґрунтової основи споруди границя контакту фундаментної конструкції та ґрунту дискретизувалась лінійними граничними елементами (ГЕ), а підвалини, де очікуються пластичні деформації, дискретизувались 167 внутрішніми осередками трикутної форми (рис. 1).

Матричне співвідношення інтегрального граничного рівняння рівноваги (1) для граничного вузла ξ_i має вигляд

$$HU = GP + DE^P, \quad (2)$$

де $H = \int_{\Gamma} \rho^* \Phi d\Gamma$, $G = \int_{\Gamma} U^* \Phi d\Gamma$ — інтеграли по кожному граничному елементу бокової поверхні та нижньої поверхні (п'яти), обчислюються за схемами числового інтегрування двовимірних квадратур Гауса [2], [3], G — матриця впливу МГЕ; U^* , p^* — ядра граничного рівняння, матриці впливу Гріна, в цій роботі — це фундаментальні сингулярні розв'язки Р. Міндліна; Γ , ξ , x — відповідно, границя, точка збурення, точка спостереження; $D = \int_{\Omega} \sigma^* \Phi^T d\Omega$ — матриці D відповідають інтегра-

ли, які включають непружні деформації.

Інтеграли по внутрішніх осередках ґрунту Ω обчислюються за схемою напіваналітичного інтегрування з використанням формул Хамера [2], [3].

Мінливість процесу деформування ґрунту основи споруди в роботі проведено за дилатансійною математичною моделлю Ніколаєвського–Бойка [4], [5]. Поведінку ґрунту в нелінійній стадії описано неасоційованим законом пластичної течії. Для врахування дисипативних ефектів ґрунту до рівняння (1) додавались:

- а) неасоційований закон пластичної течії

$$d\varepsilon_{ij}^{пл} = d\lambda \frac{dF}{d\sigma_{ij}}, \quad F \neq f, \quad (3)$$

де F — пластичний потенціал (дисипативна функція пористого середовища ґрунту); f — критерій переходу до пластичного стану; $d\lambda$ — скалярний множник;

б) критерій переходу в пластичний стан.

Настання граничного стану визначалося згідно з октаедричною теорією міцності Мізеса–Шлейхера–Боткіна, яка припускає руйнування ґрунту по октаедричних площадках

$$\begin{cases} f = T + \sigma_{\text{окт}} \cdot \text{tg}\psi - \tau_s = 0, & \text{якщо } \sigma_{\text{окт}} \leq p_0, \\ f = T + p_0 \cdot \text{tg}\psi - \tau_s = 0, & \text{якщо } \sigma_{\text{окт}} > p_0, \end{cases} \quad (4)$$

де T — інтенсивність дотичних напружень (інтенсивність девіатора напруг), $\sigma_{\text{окт}}$ — гідростатичний тиск; ψ — граничний кут тертя на октаедричній площині, аналогічний куту внутрішнього тертя, τ_s — значення граничних напружень на октаедричній площині, коли $\sigma_m = 0$; p_0 — величина гідростатичного тиску на девіаторній площині, коли ґрунт працює як суцільне середовище (межа переходу від конуса до циліндра в теорії Мізеса–Шлейхера–Боткіна).

Як додаткова умова до неасоційованого закону пластичної течії (3) замість вимоги ортогональності вектора пластичних деформацій $d\varepsilon_{ij}^p$ до поверхні навантаження f використано дилатансійну теорію ґрунтового середовища Ніколаєвського–Бойка [4], [5] (для корегування неспіввідності тензорів напруг і тензорів деформацій роботи навантаженого ґрунту в пластичній стадії):

$$d\varepsilon_{\text{шар}}^p = \Lambda \cdot d\gamma, \quad (5)$$

де $d\varepsilon_{\text{шар}}^p$ — приріст непружних змін об'єму, що супроводжують зсув; $d\gamma$ — приріст інтенсивності зсуву.

Напрацьована дилатансійна модель з'єднує розрахунок ґрунтових основ за обома граничними станами (за деформаціями та несучою здатністю) у рамках єдиної розрахункової схеми. На рис. 2 за використання розробленої моделі спрогнозовано несучу здатність палі в залежності від величини її деформації для вищезазначеної геологічної ситуації будівельного майданчика споруди.

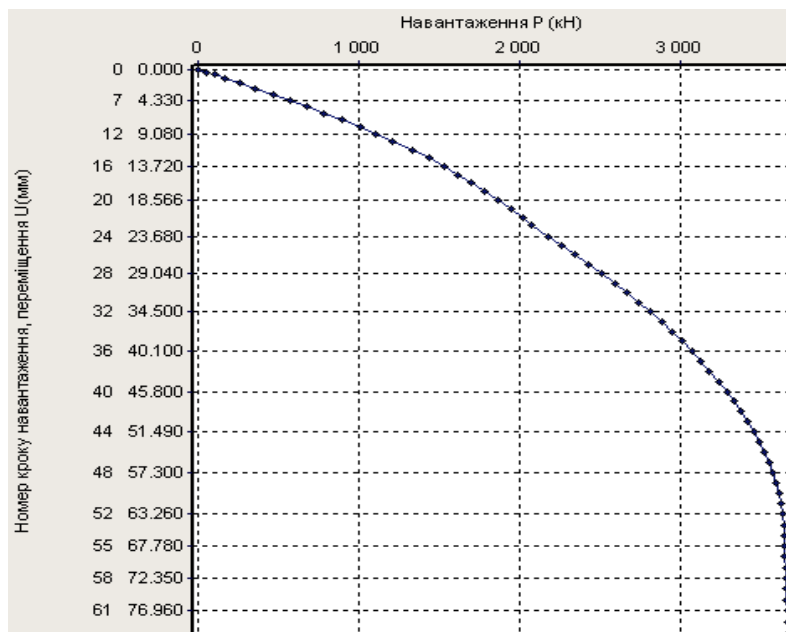


Рис. 2. Графік залежності «навантаження–осідання» буронабивної палі довжиною $L = 12$ м, діаметром $d = 0,6$ м з розширенням в області п'яти палі $1,6$ м

Матеріали статті частково апробовано авторами на Всеукраїнській науково-практичній Інтернет конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» і висвітлені в тезах доповіді [6].

Висновки

1. Числові дослідження за МГЕ несучої спроможності по ґрунту буронабивної палі довжиною 12 м, діаметром 0,6 м з розширенням в зоні п'яти палі 1,6 м відповідають даним нормативних дос-

ліджень та добре корелюють з розрахунком цієї палі за допомогою програмного комплексу «Palуа», в основі якого закладено положення розрахунку паль за нормативними документами. Величина несучої спроможності палі згідно з ПК «Palуа» склала 2888 кН.

2. Запропонована дилатансійна модель дає можливість відслідковувати НДС ґрунтової основи на всіх етапах навантаження та отримати графік роботи фундаментної конструкції «навантаження—осідання».

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Е. А. Сорочан, *Фундаменты промышленных зданий*. Москва: Стройиздат, 1986, 303 с.
 [2] К. Бреббия, Ж. Теллес, и К. Вроубел, *Методы граничных элементов*: пер. с англ. Москва: Мир, 1988, 523 с.
 [3] А. С. Моргун, *Застосування МГЕ у розрахунках паль в пластичному середовищі ґрунту*. Вінниця: Універсум-Вінниця, 2001, 64 с.
 [4] В. Н. Николаевский, *Современные проблемы механики грунтов. Определяющие законы механики грунтов*. Москва: Стройиздат, с. 210-227, 1975.
 [5] І. П. Бойко, В. О. Сахаров, «Напружено-деформований стан ґрунтового масиву при побудові нових фундаментів поблизу існуючих будинків,» *Основи і фундаменти*, міжвідомчий наук.-техн. зб. Київ, Україна: КНУБА, с. 3-10, 2004.
 [6] А. С. Моргун, О. І. Доскоч, І. І. Шевченко, «Прогнозування за числовим МГЕ поведінки під навантаженням буронабивних паль з розширенням,» тези доповіді на Всеукраїнській науково-практичній Інтернет конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи». ВНТУ. 2020. 2 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/28842/8709.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.

Рекомендована кафедрою будівництва, міського господарства та архітектури ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 6.02.2020

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

Доскоч Олександра Ігорівна — студентка факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання;

Шевченко Ігор Ігорович — аспірант кафедри будівництва, міського господарства та архітектури.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

A. S. Morgun¹
O. I. Doskoch¹
I. I. Shevchenko¹

Prognosis of Deformation of Boring Piles with Expansion with the Ground Basis after Method of Border Elements

¹Vinnitsia National Technical University

Modern high-rise building, raised the issue of the need to consider in design calculations the complexity of ground conditions, their redistributive properties, characteristics of deformation of foundation structures and the need to consider the basis and foundation as a single system, although the components of this system are of different nature. The results of the monitoring sediment of buildings show significant discrepancies between their actual and estimated values. This is due to the conventional numerical schemes, to the neglect of the processes on the load of soil. The strength of the soil significantly depends on the trajectory of loading, the initial density, the ratio deviator and ball part of stress tensor, i.e. with the effects of dilatancy and contractancy. Therefore, the development and refinement of computational models of foundations of structures is relevant to the present day.

Today in the applied technical Sciences the process is not possible without switching to mathematical modeling. Dispersible soils tend to have effects of dilatancy — volume changes when you shift under load the solid particles of the soil move in the pore space, which inevitably leads to one of the temporary changes in the volume and shape. Therefore, for the calculation of the soil bases in addition to the theory of elasticity it is necessary to use plastic mathematical models. The main objective in the design is to minimize subsidence of the soil under the foundations, because this helps to reduce additional loads in the superstructure that must accept a number of permanent and temporary loads.

In the work on elastic-plastic dilatancy model and the numerical TE there has been predicted the behavior under load of boring pile, with $L = 12$ m, diameter $d = 0,6$ m and 1,6 m extension at the heel of the piles. Boring piles with the extension are commonly used in industrial and civil engineering, have a technical and economic perspective. Fifth pile Foundation takes 28...35 % of the load. The extension of the pile shaft in the heel area increases as the surface of the heel and the dimensions of the side surface, thereby increasing the bearing capacity of piles and reduce sediment.

Keywords: boring pile with expansion, tensely-deformed state (VAT), method of border elements.

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

Doskoch Oleksandra I. — Student of the Department of Building, Power Engineering and Gas Supply;

Shevchenko Ihor I. — Post-Graduate Student of the Chair of Construction, Urban Economy and Architecture

А. С. Моргун¹
О. И. Доскоч¹
И. И. Шевченко¹

Прогноз деформирования буронабивных свай с расширением с грунтовым основанием по методу граничных элементов

¹Вінницький національний технічний університет

Современное высотное строительство вызвало необходимость учета в проектных расчетах всей сложности грунтовых условий, их перераспределительных свойств, особенностей деформирования фундаментных конструкций и необходимости рассматривать основу и фундамент как единую систему, хотя составляющие этой системы имеют различную природу. Результаты мониторинга осадок зданий показывают значительные расхождения между фактическими и расчетными их значениями. Это объясняется условностью расчетных схем, неучитыванием реальных процессов загрузки грунтов. Прочность грунта существенно зависит от траектории нагружения, начальной плотности, соотношений девиаторной и шаровой части тензора напряжений, т. е. с эффектами дилатансии и контрактансии. Потому развитие и уточнение расчетных моделей оснований сооружений является актуальным на сегодня.

Сегодня в прикладных технических науках процесс расчета не возможен без использования математического моделирования. Дисперсным грунтам свойственны эффекты дилатансии — изменения объема при сдвиге, под действием нагрузки твердые частицы грунта перемещаются в поровое пространство, что неизбежно ведет к одновременному изменению объема и формы.

Поэтому для расчета грунтовых оснований кроме аппарата теории упругости необходимо использование пластических математических моделей. Основная задача при проектировании — сведение к минимуму просадок гранта под фундаментами, поскольку благодаря этому уменьшаются дополнительные нагрузки наземных конструкций, которые и без того находятся под действием постоянных и временных нагрузок.

В работе с использованием упруго-пластичной дилатансионной модели и числового МГЭ спрогнозировано поведение под нагрузкой буронабивной сваи $L = 12$ м, диаметром $d = 0,6$ м с расширением 1,6 м в области пяты сваи. Буронабивные сваи с расширением широко распространены в промышленном и гражданском строительстве, имеют технико-экономические перспективы использования. Пята свайного фундамента воспринимает 28...35 % нагрузки. Расширение ствола сваи в области пяты увеличивает как поверхность пяты, так и размеры боковой поверхности сваи, что способствует повышению несущей способности свай и уменьшает осадку.

Ключевые слова: буронабивная свая с расширением, напряженно-деформированное состояние (НДС), метод граничных элементов (МГЭ).

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

Доскоч Александра Игоревна — студент факультета строительства, теплоэнергетики и газоснабжения;

Шевченко Игорь Игоревич — аспирант кафедры строительства, городского хозяйства и архитектуры