

БУДІВНИЦТВО

УДК 642:624.044:624.15

А. С. Моргун¹
В. Ю. Плясовиця¹

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗА МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЕФОРМАТИВНОСТІ БУРОНАБИВНИХ ПАЛЬ З РОЗШИРЕНОЮ ОСНОВОЮ

¹Вінницький національний технічний університет

За числовим методом граничних елементів проведено розрахунок несучої спроможності буронабивних паль з розширенням та без нього.

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

Вступ

Практика проектування, спорудження та експлуатації будівель в лесових ґрунтах, а також аналіз експериментальних досліджень показують, що в цих ґрунтах ефективними є буронабивні палі з розширеною п'ятою.

Відсутність достатньої кількості натурних досліджень та методів розрахунку стримують їх широке впровадження, тому тема статті є актуальною. В експлуатаційних умовах напруження в елементах будівельних конструкцій, зазвичай, нижче межі пружності. Принаймні саме до цього прагне проектувальник. Його завжди тривожить небажаність наслідків переходу конструкції в «заграничний» стан. Та в основах сучасних висотних будівель напруження сягають до 1 МПа і встає нагальна потреба достовірного прогнозування поведінки такої ґрунтової основи, що працює за межею пропорційності.

Щоб правильно оцінити дійсні осідання будівлі потрібно заглибитись в закономірності поведінки ґрунтових основ в пластичній стадії, тим більше, що «заграничний» стан лежить в основі багатьох технологічних процесів, не лише будівельних.

Постановка задачі, визначальні співвідношення

Деформування ґрунтового середовища характеризується одночасним перебігом значної кількості складних фізико-механічних процесів. Тому в розрахунку їх напружено-деформованого стану (НДС) бажано обмежитись найвагомішими впливами.

Ґрунтам властива поява незворотних пластичних деформацій практично з моменту їх навантаження, за яких ґрунт набуває властивостей анізотропії. Залежність формозміни від шарового тензора напружень, а об'ємних деформацій від девіатора напружень — особливість поведінки ґрунту. Цей ефект перехресного впливу інваріантів тензора напружень і швидкостей деформацій один на одного названо ще у 1881 році Рейнольдом дилатансією [1]. Задача геомеханіки з точки зору математики описується класичним рівнянням Лапласа, до неї додаються ще конкретні граничні умови. Для розв'язання цієї нелінійної задачі механіки ґрунтів використано фундаментальні досягнення сучасних числових методів — перехід від крайової задачі рівнянь рівноваги фундаментної конструкції в ґрунті до інтегральних рівнянь здійснено за допомогою числового методу граничних елементів. К. Бреббія, Ж. Теллесом, Л. Вроубелом [2] за допомогою метода зважених нев'язок отримано інтегральне граничне рівняння рівноваги, яке встановлює зв'язок між напруженнями та деформаціями на границі палі:

$$c_{ij} \dot{u}_j + \int_{\Gamma} \rho^*_{ij} \dot{u}_{ij} d\Gamma = \int_{\Gamma} u_{ij}^* \dot{\rho}_i d\Gamma + \int_{\Omega} \dot{\sigma}^* \dot{\varepsilon}^p_{jk} d\Omega, \quad (1)$$

де u — заданий вектор швидкостей переміщень на границі палі (граничні умови типу Діріхле);

p — шуканий вектор швидкостей напружень на поверхні палі; u^* , p^* , $\dot{\sigma}^*$ — ядра граничного рівняння, фундаментальні розв'язки P . Міндліна для переміщень, напружень та похідних від напружень від дії $P = 1$ в середині пружної півплощини; інтеграл по області Ω в (1) включає вектор пластичних деформації основи ε_p ; Γ — границя палі.

В числовій реалізації рівняння (1) дискретизується лише поверхня спряження палі та ґрунту, оскільки розв'язок P . Міндліна автоматично задовольняє граничним умовам на вільній від напружень поверхні півпростору.

Для моделювання поведінки ґрунту в пластичній стадії з метою врахування дисипативних ефектів, крім рівнянь рівноваги (1), в модель вводилось ще два додаткових: а) критерій переходу до пластичного стану (умову граничної рівноваги) та б) залежність між напруженнями та швидкостями деформацій для пластичного стану. Перше додаткове рівняння формулювалось для компонент тензора напружень i в просторі головних напружень визначало миттєву поверхню текучості, за яку прийнято модифіковану умову текучості Мізеса–Шлейхера–Боткіна:

$$\begin{cases} f = T + \sigma_m \cdot \operatorname{tg} \psi - \tau_s, & \text{якщо } \sigma_m \leq P_0; \\ f = T + P_0 \cdot \operatorname{tg} \psi - \tau_s, & \text{якщо } \sigma_m > P_0, \end{cases} \quad (2)$$

де f — поверхня навантаження; σ_m — гідростатичний тиск; T — інтенсивність девіатора напружень; ψ — кут внутрішнього тертя на октаедричній площині; τ_s — параметр, аналогічний зчепленню; P_0 — параметр ґрунтового середовища, який характеризує перехід від конуса до циліндра [1].

Поверхня текучості (2) передбачає руйнування по октаедричних площадках та складається з конічної та циліндричної поверхонь. Умова (2) найбільш прийнятна в механіці сипких середовищ.

Згідно з класичною теорією пластичності (Hill, 1950), пластичні деформації пропорційні похідній функції текучості за напруженнями. Це означає, що вектор пластичних деформацій перпендикулярний поверхні текучості f . Цю класичну теорію пластичної течії називають асоційованим законом. Але в теорії міцності Мора–Кулона для ґрунтів з'являється необхідність врахування дилатансії ґрунту — зміни об'єму уразі зсуву. Тому в доповнення до функції текучості f введено пластичний потенціал F . Саме такий підхід використано в роботі.

Фізичні рівняння рівноваги ґрунту в фазі зсувів записувались згідно з неасоційованим законом пластичної течії

$$dE_{ij}^p = d\lambda \frac{dF}{d\sigma}, \quad F \neq f, \quad (3)$$

де F — термодинамічна функція стану (дисипативна функція пористого середовища ґрунту); $d\lambda$ — скалярний коефіцієнт простого навантаження.

В загальному випадку для ґрунтів асоційований закон течії не працює, тобто вектор приросту пластичних деформацій не ортогональний граничній поверхні.

За даними експериментів в дисперсному середовищі ґрунту характеристики поля напружень і поля швидкостей деформацій змінюють свої кути під час нелінійного деформування, і тому розв'язання таких задач значно ускладнюється. Замість вимоги ортогональності вектора швидкостей деформацій $d\varepsilon_{ij}^p$ до поверхні навантаження f (яку встановлює закон пластичної течії) використано друге додаткове рівняння, основу побудови якого склали експериментальні дані про поведінку реальних ґрунтів. Рівняння (3) визначало орієнтацію вектора швидкостей пластичних деформацій та характеризувало особливість застосування моделей суцільних середовищ до тіл, що ущільнюються. Для моделювання процесів ущільнення ґрунтів, стисливість яких в сотні раз перебільшує стисливість будівельних матеріалів наземних споруд, використовувалась система найсучасніших уявлень В. М. Ніколаєвського, і І. П. Бойка [1] про дилатансійну теорію ґрунтового середовища. Для корегування неспіввісності тензорів напружень та деформацій при роботі ґрунту в пластичній стадії використано рівняння:

$$d\varepsilon_{ij}^p(\text{шар}) = \Lambda(\chi) d\gamma^p, \quad (4)$$

де $d\varepsilon_{ij}^p(\text{шар})$ — скалярний еквівалент приросту непружних об'ємних деформацій (шарової частини тензора деформацій); $d\gamma^p$ — скалярний еквівалент приросту інтенсивності зсуву; $\Lambda(\chi)$ — швидкість дилатансії; χ — параметр зміцнення ґрунтового середовища, взято щільність ґрунту ρ .

Таке роздільне використання рівнянь стану (1—4) практично зручне, легко реалізується без ризику втрати фізичного змісту задачі.

З виходом вектора напружень на граничну поверхню в середовищі ґрунту з'являються пластичні деформації, що локалізуються в поверхнях ковзання. У разі виникнення граничного напруженого стану умова спільної роботи середовища (ґрунту) замінюється умовою проковзування у зв'язку з появою площадок ковзання.

З математичної точки зору площадки ковзання — це площадки сильного дотичного розриву, на яких також спостерігається розрив швидкостей.

Згідно із запропонованою методикою проведено числове дослідження спільної роботи системи «основа—буронабивна палля» та процес утворення пластичних деформацій. Математична модель поєднує розрахунок фундаментних конструкцій за обома граничними станами та дозволяє отримати як якісні, так і кількісні показники поведінки фундаментних конструкцій в конкретних ґрунтових умовах.

Прогноз розвитку НДС буронабивних паль довжиною 10,5 м, діаметром 0,83 м з розширенням 1,6 м та без нього виконано моделюванням за числовим МГЕ. Розглядався процес їх навантаження. Це дає можливість багаторазового вивчення різних варіантів проектних рішень шляхом зміни вхідних параметрів.

Показники властивостей породи грають важливу роль у вхідних параметрах математичної моделі та визначають ступінь надійності та точності проведених розрахунків. Як відомо, за нормативні значення характеристик ґрунтів беруть їх середньоарифметичні значення у зв'язку з великою різномірністю числових характеристик досліджень та неточностей самих вимірювань під час геологічних досліджень. Ґрунти в основах споруд розглядаються як масив і їх деформація є інтегральним ефектом. З цих міркувань за характеристики прошарків ґрунтів будівельного майданчика взято середньоарифметичні значення результатів геологічних досліджень: $E = 31970$ КПа; $\nu = 0,35$; $\rho = 1,87$ т/м³; $\phi = 0,436$ радіан; $C = 1,37$ КПа.

Результати прогнозування за МГЕ несучої спроможності буронабивних паль (рис. 1, 2) порівнювались з дослідженнями паль таких самих розмірів, проведених при проектуванні фундаментів під об'єкт меморіалу музею Великої Вітчизняної війни в м. Києві [4], який розташований на сильно пересіченому рельєфі (різниця висот відміток сягає 100 м.) з верхнім шаром просадкових лесових порід.

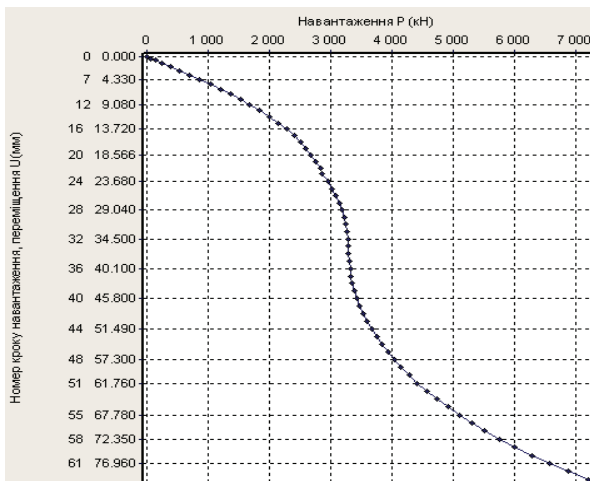


Рис. 1. Графік залежності «навантаження—осідання» буронабивної палі $L = 10,5$ м, $d = 0,83$ м без розширення

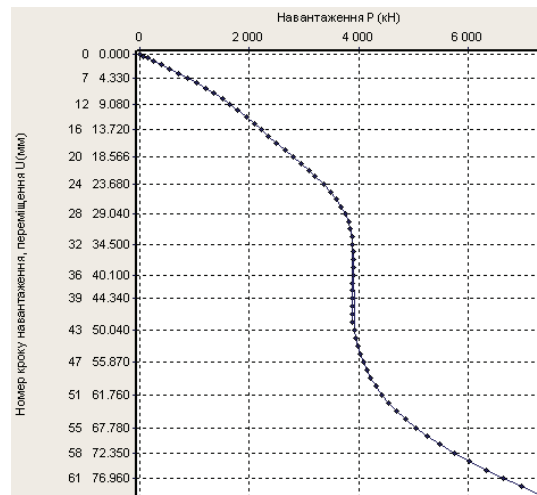


Рис. 2. Графік залежності «навантаження—осідання» буронабивної палі $L = 10,5$ м, $d = 0,83$ м з розширенням 1,6 м

Натурні експерименти показали, що несуча спроможність буронабивних паль складає 3250 кН та палі з розширенням — 3850 кН, що відповідає критичним точкам кінця ущільнення на графіках «навантаження—осідання» на рис. 1, 2.

З метою реалізації закладених в ДБН принципів розрахунку за граничними станами, що постулюють повніше використання несучої спроможності основ фундаментів, при проектуванні доцільно використовувати нелінійну дилатансійну модель [1, 3], яка корелюється з даними натурних експериментів.

Висновки

1. Виконана за числовим МГЕ модель прогнозування роботи під навантаженням буронабивних пал з розширенням.
2. Врахування нелінійності роботи ґрунту дозволяє краще відображати реальні властивості ґрунтів та наближає прогнозні теоретичні рішення до натурних даних дійсної роботи фундаментів споруд.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бойко И. П. Напряженно-деформированное состояние упруго-пластического дилатирующего основания свайных фундаментов / И. П. Бойко // Основания и фундаменты. — К. : Будівельник, 1986. — Вып. 19. — С. 79.
2. Бреббия К. Методы граничных элементов / Бреббия К., Телес Ж., Вроубел Л. ; пер. с англ. Л. Г. Корнейчука ; под ред. Э. И. Григолюка. — М. : Мир, 1987. — 524 с.
3. Моргун А. С. Комп'ютерні технології розрахунку фундаментних конструкцій на основі методу граничних елементів / А. С. Моргун, І. М. Меть, А. В. Ніцевич. — Вінниця : ВНТУ, 2009. — 162 с.
4. Романов Д. А. Фундаменты под объекты Украинского государственного музея истории Великой Отечественной войны / Д. А. Романов, Г. Н. Кислый // ОФМГ. — 1982. — № 4. — С. 8—10.

Рекомендована кафедрою будівництва, міського господарства та архітектури ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 30.08.2016

Моргун Алла Серафимівна — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри будівництва, міського господарства та архітектури.

Вінницький національний технічний університет;

Плясовиця Віталій Юрійович — пошукач кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, директор будівельної фірми «Плясовиці», Вінниця

A. S. Morgun¹
V. Yu. Pliasovytsia¹

Prediction of Deformability of Bored Piles with Expanded Base by Method of Boundary Elements

¹Vinnitsia National Technical University

Using the numerical method of boundary elements (MGE) there has been predicted the stress-strain state (SSS) of bored piles with or without extension to determine their bearing capacity.

Keywords: stress-strain state, method of boundary elements, load-bearing capacity.

Morgun A. S. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Building, Municipal Economy and Architecture;
Pliasovytsia V. Yu. — Researcher of the Chair of Building, Municipal Economy and Architecture, Director of the Building Company;

А. С. Моргун¹
В. Ю. Плясовиця¹

Прогнозирование по методу граничных элементов деформативности буронабивных свай с расширенным основанием

¹Винницкий национальный технический университет

Используя численный метод граничных элементов (МГЕ), спрогнозировано напряженно-деформированное состояние (НДС) буронабивных свай с расширением и без него с целью определения их несущей способности.

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;

Плясовиця Віталій Юрьевич — соискатель кафедры строительства, городского хозяйства и архитектуры, директор строительной фирмы «Плясовицы», Вінниця