

МЕХАНІКА ҐРУНТІВ ТА ФУНДАМЕНТИ

УДК 519:642:624:044:624.15

DOI 10.31649/2311-1429-2022-1-32-37

А. С. Моргун
І. М. Меть
І. І. Шевченко

ПОШУК РЕЗЕРВІВ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ПІРАМІДАЛЬНИХ ПАЛІ ЗА МҐЕ

Вінницький національний технічний університет

Будівництво – одна із провідних галузей народного господарства в історичному аспекті його розвитку. Першою задачею проектування є визначення міцності будівельних конструкцій. Тому дослідження НДС та пов'язані з ним розрахунки найбільш відповідальні в будівництві.

Математична модель технічного об'єкта на мікрорівні – система диференціальних рівнянь в частинних похідних, точне рішення якої отримати можна лише в небагатьох часткових випадках, тому будується дискретна модель з застосуванням числових методів, які використовують ідею Пуассона, що поведінку складної моделі можна подати поведінкою її окремих складових елементів. Інтенсивний розвиток та широке застосування ЕОМ суттєво наблизило фундаментальні математичні проблеми до прикладних, посилило їх взаємовплив. Поява нового, потужного та загального методу дослідження – числового експерименту, як ніколи раніше тісно пов'язала фізичний зміст задачі, її математичне формулювання, числові методи розрахунку та сучасні ЕОМ. В роботі використано числовий метод граничних елементів.

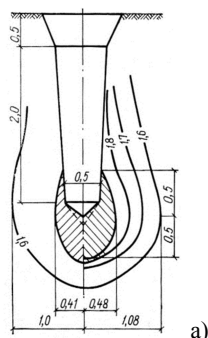
Перспективним шляхом розвитку основ та фундаментних конструкцій є використання співвідношень теорії пластичної течії, а рівень розвитку механіки ґрунтів суттєво впливає на економічність і надійність прийнятих рішень. Одним із різновидів підняття несучої спроможності палі є крім врахування нелінійної роботи ґрунтової основи також влаштування шляхом розширення ґрунтової основи добавок щебеню. Ущільнений ґрунт в зоні п'яти дозволяє передавати на палю більш високі навантаження.

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

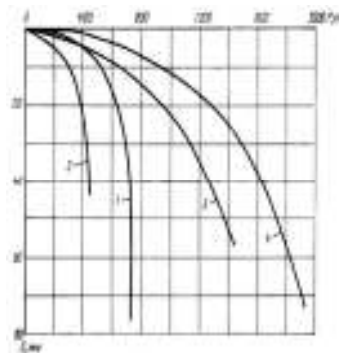
Вступ

Реальні задачі геомеханіки моделюються диференціальними рівняннями в частинних похідних і зводяться до класу крайових задач, аналітичне рішення яких отримати практично неможливо. Виходом з положення є залучення числових методів та ЕОМ.

Створення нового розрахункового апарату з прогнозу деформацій основ є важливою та актуальною задачею. Проведено числове дослідження та розв'язана прикладна задача по визначенню несучої спроможності пірамідальної палі з розширенням. Пірамідальні палі при рівних з призматичними палями осіданнях і рівних об'ємах мають в 1,6 раз більшу несучу спроможність [1]. На рис. 1 наведено розподіл об'ємної маси скелету ґрунту навколо витрамбованого котловану пірамідальної палі та розміри розширення в нижній частині а також експериментальні графіки залежності осідань палі від навантаження [1]. Статичні дослідження [1] були проведені на 4-х фундаментах довжиною 2.5 м, з яких перший був виконаний без розширення (№ 1 на графіку), другий – без торця (№ 2), третій (№ 3) і четвертий (№ 4) – з розширенням основи шляхом втрамбування щебеня об'ємом відповідно 0,8 і 1,2 м³ крупністю 20-40 мм.



а)



б)

Рисунок 1 – а) розміри пірамідальної палі та розширення, б) експериментальні графіки «навантаження-осідання» [1]

В роботі використано напрацьований К. Бреббія числовий МҒЕ [2], який зводить крайову задачу до інтегрального рівняння (1), а числове інтегрування більш стійкий процес ніж числове диференціювання.

МҒЕ значно розширив можливості рішення крайових задач, добре реалізується на ЕОМ. Основний принцип МҒЕ – поведінка суцільного складного середовища може бути апроксимована сумарною поведінкою складових елементів цього середовища (дискретною моделю). МҒЕ засновано на дискретному поданні лише зовнішньої границі дослідного об'єкта. Удосконалення існуючого та створення нового розрахункового апарату з прогнозу деформацій основ є важливим та актуальним науковим завданням.

Визначальні співвідношення

Проектування палі під навантаженням пов'язане з необхідністю аналізу неперервних фізичних процесів в ґрунті, математичним описом яких є система із 15 диференціальних рівнянь в частинних похідних (крайова задача).

Зведення крайової задачі (1) до еквівалентного інтегрального рівняння МҒЕ дозволяє на одиницю понизити розмірність задачі, так тривимірну задачу МҒЕ переводить в двовимірну [2,3].

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij,j} + b_j &= 0 \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \\ \sigma_{ij} &= C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \end{aligned} \right\} \Rightarrow C_{ij}(\xi) u_j(\xi) + \int_{\Gamma} p_{ij}^*(\xi, x) u_j(x) d\Gamma(x) = \int_{\Gamma} u_{ij}^*(\xi, x) p_j(x) d\Gamma(x), \quad (1)$$

де $\sigma_{ij,j} + b_j = 0$ – статичні рівняння рівноваги; $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$ – геометричні рівняння;

$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$ – фізичні рівняння середовища.

При обчисленні крайових задач за МҒЕ необхідно використання фундаментального розв'язку. Використано розв'язок Р. Міндліна (для вертикальної сили, прикладеної в середині пружного півпростору). В механіці ґрунтів суті задачі найбільш відповідає розв'язок Р. Міндліна.

За сингулярні рішення, позначені * в рівнянні (1), взято розв'язки Р. Міндліна для півплощини [3], які в найбільшій мірі відповідають фізичній суті задачі, адже навантаження від наземної частини споруди фундаменти передають на ґрунт на деякій глибині.

Показники властивостей породи грають роль в математичних моделях числових параметрів та визначають стійкість, надійність, точність проведених розрахунків. Фізико-механічні характеристики ґрунтової основи (суглинок з супіссю) [1]:

$$\rho = 1.68 \text{ т/м}^3, \quad \rho_{dry} = 1.79 \text{ т/м}^3, \quad w = 0.14, \quad e = 0.84, \quad E = 12 \text{ МПа}, \quad \varphi = 26^\circ, \\ c = 38 \text{ КПа}, \quad \rho_s = 1.55 \text{ г/см}^3, \quad \nu = 0.35$$

Для числового моделювання багатопарова основа ґрунту замінялась квазіоднорідним середовищем із середньозваженими в рамках активної зони фізико-механічними характеристиками ґрунту, рис. 2а. Дискретизація та квантування неперервних процесів – це складова прийняття рішень в складних системах.

На теперішній час математична модель МҒЕ – це перехід від крайової задачі до еквівалентного інтегрального рівняння, першим етапом розв'язку якого є дискретизація. Оскільки МҒЕ розмірність вихідної задачі понижує на одиницю, задача поведінки палі під навантаженням зводиться до вісесиметричної, що дає можливість дискретизації активної зони навколопальнової ґрунтової основи скінченими елементами у вигляді плоских трикутників та перевести тривимірну задачу до двовимірної. Розбиття дослідної зони на скінчені елементи – важливий етап. Від виду розбиття залежить точність отриманих результатів. Осередки мають бути густіше в зонах, де очікуються високі концентрації напружень.

Дискретизацію поверхні палі проведено постійними граничними елементами – шукані напруження та деформації σ , u мають постійне значення по довжині ГЕ і рівне σ , u в вузлі ГЕ, який знаходиться посередині цього ГЕ.

Оскільки експериментальний графік залежності (P-S) для ґрунтів носить нелінійний характер, доцільно для удосконалення їх розрахунків залучати моделі нелінійної механіки – моделі пружно-пластичного середовища. Для ґрунтів, як для пористих середовищ, що ущільнюються, властиві ефекти дилатансії.

Незворотне деформування ґрунту (дилатансія та контракція ґрунту) описувалась неасоційованим законом пластичної течії

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{dF}{d\sigma_{ij}}, \quad F \neq f \quad (2)$$

та дилатансійними співвідношеннями Ніколаєвського- І. П. Бойка [4,5].

$$d\varepsilon_{ij}^e = d\varepsilon_{шарове}^p + d\varepsilon_{девіаторне}^p, \quad d\varepsilon_{шарове}^p = \lambda(x)d\gamma^p \quad (3)$$

де $d\gamma^p$ – скалярна характеристика формозміни, другий інваріант девіатора деформацій $I_2(D\varepsilon)$; $\lambda(x)$ – коефіцієнт дилатансії.

$$d\varepsilon_{девіаторне}^p = D_{ij}d\lambda \quad (4)$$

де D_{ij} – девіатор напруг; $d\lambda$ – скалярний коефіцієнт простого навантаження.

В якості критерія переходу роботи ґрунту в пластичний стан (граничний напружений стан) використано умову Мізеса-Шлейхера-Боткіна, яка в просторі головних напружень подається поверхнею із конічної частини та циліндричної частини (циліндр Мізеса) [4]. Для розв’язку розрахункового нелінійного рівняння (1) в роботі використано метод пружних рішень О. А. Льюшіна [6].

Урахування в моделі пластичної поведінки ґрунту під навантаженням дало можливість встановити характерні закономірності перерозподілу зусиль в процесі взаємодії пірамідальної палі з основами за МГЕ.

Таким чином, несуча спроможність палі визначалась з використанням математичного моделювання, яке складається з процесу створення моделі, оперування нею з метою отримання відомостей про реальний об’єкт. Математична модель забезпечує: – зменшення часу на підготовку аналізу, – зменшує матеріалоемність досліджень, особливо при проектуванні великомасштабних об’єктів, – дає можливість проведення експериментів на критичних режимах

При реалізації на ЕОМ алгоритм визначення НДС палі складався із етапів:

1. Формування вихідних даних. 2. Інтегрування фундаментальних рішень Р. Міндліна для отримання матриці впливу (матриці піддатливості) МГЕ. 3. Компоновка розрахункової СЛАР. 4. Знаходження коренів СЛАР.

5. Визначення несучої спроможності фундаментної конструкції, отримання графіка «навантаження – осідання».

Кожний елемент матриці піддатливості МГЕ $\begin{vmatrix} K_{SS} & K_{SB} \\ K_{BS} & K_{BB} \end{vmatrix}$ – це переміщення по напрямку, що відповідає відповідній стрічці від $P=1$, прикладеної в точці, яка визначається відповідним стовпцем матриці. Матриця піддатливості формувалась на основі рішень Р. Міндліна. Результати числових досліджень за МГЕ наведено на рис. 2, 3, 4.

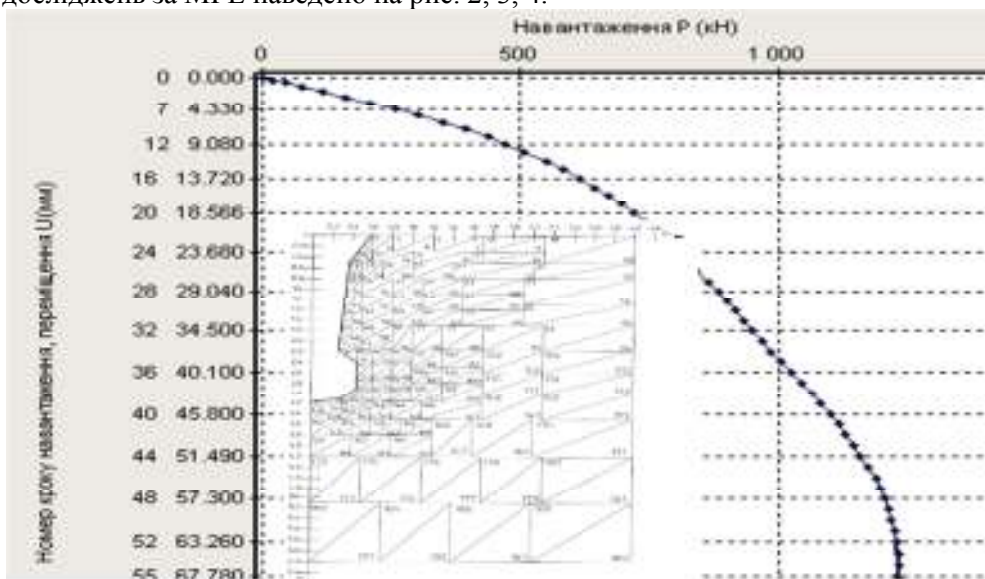


Рисунок 2 – Графік «P-S» пірамідальної палі з розширенням основи шляхом втрамбування щебеня об’ємом в $0,8 \text{ м}^3$, отриманий за МГЕ та дискретизація активної зони основи

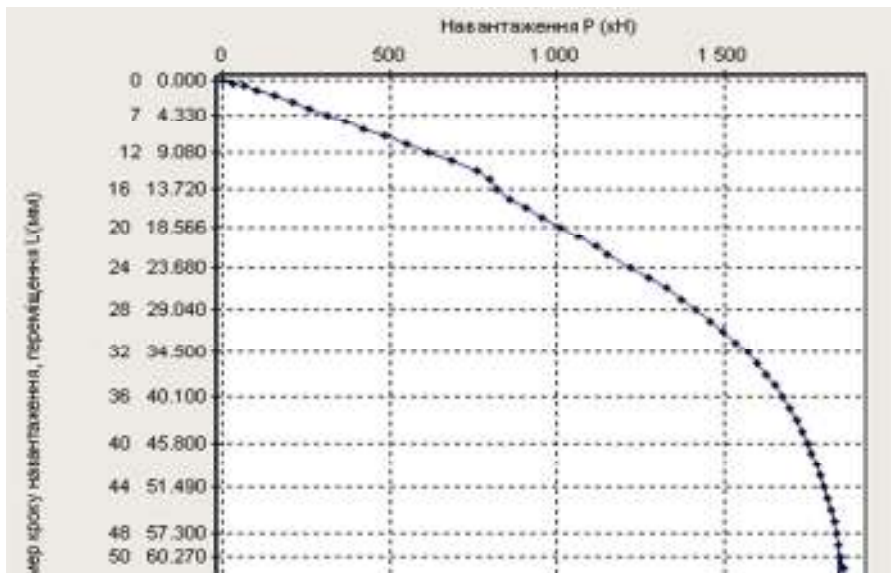


Рисунок 3 – Графік «P-S» пірамідальної палі з розширенням основи шляхом втрамбування щебеня об'ємом в $1,2 \text{ м}^3$, отриманий за МГЕ

Залежності «P-S» на рис. 2, 3 характеризуються плавними кривими без чітковиражених перегинів, це показує, що несуча спроможність палі під третім фундаментом –при 1400 кН, і під четвертим – при 1900 кН. ще не вичерпана.





Рисунок 4 – а) Графік «P-S» пірамідальної палі без втрамбування щебеня та б) – без торця, отримані за МГЕ

Результати польових досліджень [1] та числові дані за МГЕ роботи пірамідальної палі без добавок щебеня (крива 1 на рис. 1,б та рис. 4а) показують, що при допустимому осіданні фундаменту 25 мм граничним навантаженням для цього фундаменту є 500 кН., а для палі без торця (крива 2 на рис. 1,б та рис. 4б) – всього лиш 250 кН. Це свідчить про те, що наявність торця дає можливість використовувати вертикальне навантаження для привантаження призми випору ґрунту, що примикає до верхньої частини палі і цим підняти опір палі. При співставленні результатів досліджень можна встановити, що влаштування розширень шляхом втрамбування щебеня в рівні п'яти палі піднімає навантаження на фундамент з 500 кН до 1450 кН, практично в три рази.

З метою відпрацювання параметрів алгоритму та оцінки похибок результати числового дослідження порівняно з експериментом.

Таблиця 1

Порівняльна таблиця даних розрахунку за МГЕ та експериментом

| Кількість втрамбованого щебеня в m^3 | Несуча спроможність палі за даними експерименту при $S=5.3$ см | Несуча спроможність палі за МГЕ при $S=5.3$ см |
|--|--|--|
| 0.8 | 1400 кН | 1420 кН |
| 1.2 | 1770 кН | 1800 кН |
| без щебеня | 750 кН | 740 кН |
| без щебеня і торця | 410 кН | 405 кН |

Збільшення об'єму втрамбованого щебеня при $S=5.3$ см піднімає несучу спроможність пірамідальної палі на 370 кН.

Висновки

1. Пружно-пластичні моделі ґрунту є ефективними нелінійними методами, що дозволяють розрахунковим шляхом оцінити вплив зафіксованих в експериментах зон підвищеної деформативності основ та врахувати їх при проектуванні.

2. Запропонована методика дає можливість відслідковувати НДС ґрунтової основи на всіх етапах навантаження та отримувати графік роботи фундаментної конструкції «навантаження–осідання».

3. Перехід до моделей, що враховують неоднорідність та нелінійність основи, робить дослідження НДС основи більш точним, та математично більш складним.

4. Наявність під п'ятою палі втрамбованого щебеня дає можливість підняття несучі

спроможності паль.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. В.И. Крутов, В. Л. Рафальзук, Ю.В. Власов. Фундаменты в вытрамбуваных котлованах с уширенным основанием. М.: Стройиздат, ОФМГ №3, 1978, с. 3-6.
2. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. М.: Мир, 1987.
3. Моргун А.С. Теорія пластичної течії в механіці ґрунтів./А.С. Моргун – Вінниця, ВНТУ. – 2013 – 108 С.
4. Бойко И.П. Теоретические основы проектирования свайных фундаментов на упругопластическом основании / И.П. Бойко, Сб. КИСИ “Основания и фундаменты”. – 1985 – №18, С 11-18.
5. Николаевский В.Н. Современные проблемы механики грунтов // Определяющие механики грунтов // В.Н. Николаевский – М.: Стройиздат. 1975 г. – С. 210-227.
6. А.А. Иллюшин. Пластичность.М.: Гостехиздат. 1947.

REFERENCES

1. V.I. Krutov, V. L. Rafal'zuc, YU.V. Vlasov. Fundamenty v vytrambuvanykh kotlovanakh s ushirenym osnovaniyem. M.: Stroyizdat, OFMG №3, 1978, s. 3-6.
2. Brebbiya K., Telles ZH., Vroubel L. Metody granichnykh elementov. M.: Mir, 1987.
3. Morgun A.S. Teoriya plastichnoy techiy v mekhanitsi gruntiv./A.S. Morgun – Vinnitsya, VNTU. – 2013 – 108 S.
4. Boyko I.P. Teoreticheskiye osnovy proyektirovaniya svaynykh fundamentov na uprugoplasticheskom osnovanii / I.P. Boyko, Sb. KISI “Osnovaniya i fundamenti”. – 1985 – №18, S 11-18.
5. Nikolayevskiy V.N. Sovremennyye problemy mekhaniki gruntov // Opredelyayushchiye mekhaniki gruntov // V.N. Nikolayevskiy – M.: Stroyizdat. 1975 g. – S. 210-227.
6. A.A. Ilyushin. Plastichnost'.M.: Gostekhizdat. 1947.

Моргун Алла Серафимівна – д.т.н., проф., каф. БМГА Вінницького національного технічного університету; alla@morgun.com.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4701-339x>.

Мет Іван Миколайович – декан ФБТЕГП; Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: vanmet@ukr.net

Шевченко Ігор Ігорович – аспірант кафедри будівництва, міського господарства та архітектури; Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: gumbubble51@gmail.com

A. Morgun

I. Met

I. Shevchenko

SEARCH FOR RESERVES OF BEARING CAPACITY OF PYRAMIDAL PILES USING BEM

Vinnitsia National Technical University

Construction – is one of the prominent branches of the national economy in the historical aspect of its development. The leading task of the designing is to determine the strength of building structures. Therefore, TDS research and related calculations are most responsible in construction.

Mathematical model of a technical object at the micro level is a system of differential equations in partial derivatives, the exact solution of which can be obtained only in a few partial cases, so a discrete model is built using numerical methods that use Poisson's idea . Intensive development and widespread use of computers significantly brought fundamental mathematical problems closer to applied ones, strengthened their interaction. The emergence of a new, powerful and general method of research - numerical experiment, as never before closely linked the physical content of the problem, its mathematical formulation, numerical methods of calculation and modern computers. The numerical method of boundary elements is used in the work.

A promising way to develop foundations and foundation structures is the usage of the relations of the theory of plastic flow, and the level of development of soil mechanics significantly affects the efficiency and reliability of decisions. One of the types of raising the bearing capacity of piles is, in addition to taking into account the nonlinear work of the soil base, also the arrangement by expanding the soil base of gravel additives. Compacted soil in the heel area allows to transfer higher loads to the pile.

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

Morgun Alla – Professor of the Department of Construction, Municipal Economy and Architecture; Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, e-mail: morgunallaS@gmail.com.

Met Ivan – Dekan of FBTEGP; Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, e-mail: vanmet@ukr.net

Shevchenko Igor – graduate student of the Department of Construction, Municipal Economy and Architecture; Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, e-mail: buttonubble51@gmail.com.