

А. С. Моргун
І. М. Меть
Чен Яньмей
А. В. Колесник

ПРОГНОЗУВАННЯ НЕСУЧОЇ СПРОМОЖНОСТІ ПЛИТНОГО ФУНДАМЕНТА ЗА ЧИСЛОВИМ МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

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 напружено-деформованого стану та пов'язані з ним розрахунки найбільш відповідальні в будівництві. Вивчення механіки ґрунтів та техніки фундаментобудування має за мету розрахунок та конструювання споруд на ґрунтах чи в ґрунтах. Основною задачею при цьому є будівництво споруд з достатньою ступенем надійності.

Головною проблемою механіки ґрунтів і натеper залишається вибір адекватної теоретичної моделі. Дійсно, деформування дисперсного гранульованого матеріалу ґрунту проходить при взаємному проковзуванні зерен, реологія ґрунту складна, про це свідчить великий експериментальний матеріал. Сьогодні шлях розвитку механіки ґрунтів пов'язаний з дослідженням задач в рамках пружно-пластичної дилатансійної моделі та вдосконалення цієї моделі на основі експериментів.

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.

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

Вступ

Задача проектування основ і фундаментів висотних споруд є однією із самих складних задач у всьому комплексі проектування споруди. В роботі спрогнозовано за числовим методом граничних елементів поведінку під навантаженням матеріалу, що не опирається розтягу (ґрунту), в якому при навантаженні здійснюється перерозподіл напружень з більш навантажених ділянок на менш навантажені, і тому метод розв'язку задач деформативності ґрунту аналогічний методу рішення задач теорії пластичності.

Геотехніка знаходиться на шляху інтенсивного розвитку – широке застосування числових методів, заснованих на пружно-пластичних моделях, удосконалення нелінійних методів розрахунку дозволяє більш достовірно оцінювати несучу здатність ґрунтів та підняти навантаження на основу, тобто проектувати більш економічні фундаменти.

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 і фундаментів є важливою та актуальною задачею. Проведено числове дослідження та розв'язана прикладна задача по визначенню несучої спроможності плитного фундаменту.

Визначальні співвідношення

Числовий МГЕ потребує використання ЕОМ і, що є загальним для сучасних наближених числових методів, зводить розрахункові рівняння до розв'язків СЛАР високих порядків.

Запис системи 15 диференціальних розрахункових рівнянь в узгодженнях про підсумовування Ейнштейна має наступний вигляд [1, 2]:

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

де $\sigma_{ij,j} + b_j = 0$ – статичні рівняння рівноваги (теорія напружень заснована на вимогах рівноваги);

$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$ геометричні рівняння (вивчення деформацій являє собою по суті геометричний напрям аналізу, відомий під назвою теорія деформацій);

$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$ – фізичні рівняння середовища (фізичні рівняння являють математичну ідеалізацію механізму поведінки матеріалу).

В рівнянні (1):

u – заданий вектор переміщень на контактні границі фундаментної конструкції;

p – шуканий вектор напружень на границі;

u^* , p^* – ядра граничного рівняння [1] чи функції впливу МГЕ, це двочкові функції, їх компоненти – переміщення та напруження довільної точки поля в напрямку «і» (точка нагляду) від сили $P = 1$, прикладеної в «j» –му напрямку (джерелі) – прийнято рішення Р. Міндліна для переміщень та напружень, що відповідають одиничним взбуджуючим впливам ($P=1$) в півпросторі. Ядра інтегрального рівняння характеризують собою досліджуване середовище. Саме рішення Р. Міндліна тотожно задовольняють граничним умовам на границі (рівність нулю напружень на границі півпростору) і значно понижують об’єм обчислювальних робіт, необхідний для рішення задачі;

C_{ij} – постійна, визначається із умов руху тіла як цілого, з’являється при переводі крайової задачі до інтегрального рівняння (1) для отримання єдиного рішення.; Γ , ξ , x , Ω – відповідно гранична поверхня фундаментної конструкції, точка збурення, точка нагляду та границя трикутних осередків активної зони ґрунту [1, 2].

Незворотнє 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 [3, 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) [3]. Для розв’язку розрахункового рівняння (1) в роботі використано метод пружних рішень О. А. Ільюшина [5].

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

Рішення граничних задач подаються, як витікаючі із принципів взаємності (теорема Бетті).

Фундаментальні рішення Р. Міндліна (u^* , p^*) і є тим одиничним універсальним допоміжним станом принципу взаємності Бетті. Кожний інтеграл в рівнянні (1) являє собою роботу узагальненої сили одного стану на відповідних їм переміщеннях другого стану.

Числова реалізація розрахункового інтегрального рівняння МГЕ (1) для розв’язку задачі про несучу

спроможність пальового фундаменту передбачає виконання наступних основних етапів:

а) границя плитного фундаменту (бокова поверхня і низ) розбивались на ряд постійних граничних елементів (ГЕ), на яких задавались переміщення;

б) для кожного граничного елемента визначались коефіцієнти матриці впливу МГЕ з використанням фундаментальних рішень Р. Міндліна для півплощини [1] та формувалась глобальна матриця впливу і вектор-стовбець вільних членів, які приймаються з граничних умов задачі;

в) визначаються невідомі контактні напруження по бокові поверхні та під низом плитного фундаменту шляхом розв'язку скомпонованої системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР);

г) шляхом інтегрування знайдених величин напружень знаходиться несуча спроможність плитного фундаменту при заданому осіданні.

При розв'язанні задачі прийнято наступні вихідні положення:

1 – ґрунт до появи границі текучості рахується лінійно-деформованим тілом;

2 – навантаження передається ґрунту по бокові поверхні і в площині низу плитного фундаменту;

3 – границя активної зони знаходиться на глибині, де напруження від фундаменту не викликають залишкових деформацій ґрунту.

Конструктивне призначення фундаменту складається з того, щоб акумулювати всі навантаження від будівлі і передати їх на ґрунти основи. Звідси витікає, що при визначенні габаритних параметрів фундаменту (глибина закладання, висота, розміри подошви) мають враховуватись фізичні і механічні властивості ґрунтів основи.

В якості фундаментної конструкції, що зв'язує будівельний об'єкт і ґрунтову основу взято горизонтальний несучий елемент – плиту $H=0,7$ м.



Рисунок 1 – Фасад будівельного об'єкту

Оскільки несуча здатність фундаментної конструкції зумовлюється ґрунтовими умовами а не конструктивним рішенням будівлі, розроблена пружно-пластична математична модель враховує 8 фізико-механічних характеристик ґрунтової основи та дозволяє в рамках однієї розрахункової схеми об'єднати розрахунки за двома групами граничних станів – по несучі спроможності та деформаціях.

В якості межі переходу ґрунту до пластичної стадії роботи використано критерій Мізеса-Шлейхера-Боткіна [3], який в просторі головних напружень описується поверхнею, що складається із конічної і циліндричної частин, та неасоційований закон пластичної течії [3, 2].

Для розв'язку поставленої задачі використано покроковий метод пружних рішень Ільющина О. А. [5] – на кожному кроці наближення розв'язується пружна задача. Метод пружних рішень широко використовується для розв'язку різних прикладних задач теорії малих пружно-пластичних деформацій. Зазвичай достатньо декілька наближень щоб отримати достатню для цілей практики точність.

Прикладання числового МГЕ до розв'язків задач геомеханіки проілюстровано даними числового розрахунку.

Рішення будівельних задач пов'язано з необхідністю визначення фізико-механічних характеристик ґрунту. Особливістю цих показників ґрунту є їх прямиий зв'язок з технічними властивостями ґрунту, з його несучою спроможністю, так, як сучасні проекти фундаментів базуються виключно на цьому зв'язку. До вхідних параметрів моделі, які характеризують геологічну ситуацію основи будівельного майданчика та процес деформування ґрунтового середовища в роботі прийнято середньозважені фізико-механічні характеристики різновидів неспрощених суглинків та глин:

$$E=16900 \text{ КПа}, \nu=0.38, c=38.42 \text{ КПа}, \varphi=0.32 \text{ радіан}, \rho=1.894 \text{ т/м}^3,$$

$$\rho_{\min} = 1.818 \text{ т/м}^3, \rho_{\max} = 2.03 \text{ т/м}^3, P_0=1790 \text{ КПа. min}$$

Контактна з ґрунтом границя плитного фундаменту дискретизувалась прямолінійними граничними елементами (ГЕ). Активна зона оточуючої плитний фундамент ґрунтової основи (рис.2) дискретизувалась трикутними осередками.

На рис. 3 наведено отриманий графік навантаження – осідання згідно числових дослідження за МГЕ процесу деформування плитного фундаменту під навантаженням.

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

Експериментальні дослідження зафіксували величину осідання фундаментної плити $S=5,8$ см при вазі споруди 11000 кН, дані числового моделювання за МГЕ склали $S=5,73$ см.

Результати прогнозування за методом граничних елементів подано на графіках навантаження-осідання плитного фундаменту, рис. 3. Вірність вибору розрахункової дилатансійної моделі підтверджується відповідністю числових досліджень експерименту.

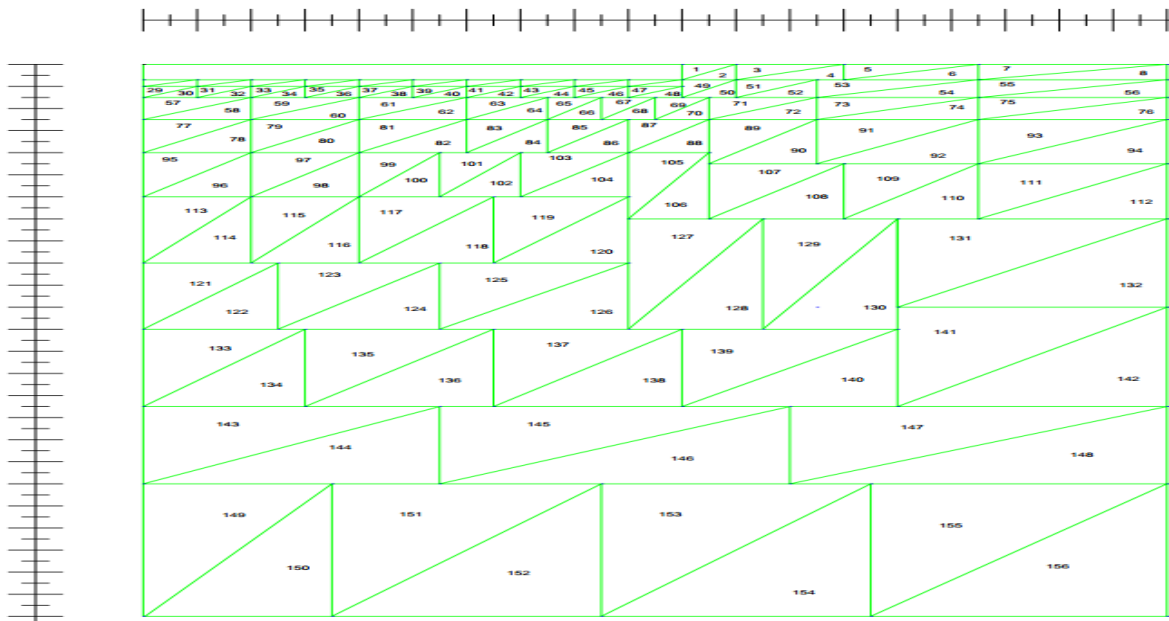


Рисунок 2 – Дискретизація активної зони навколо плитної основи

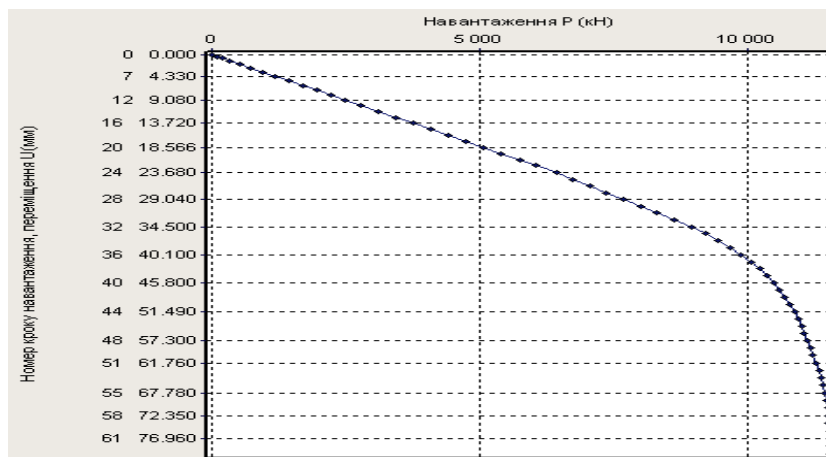


Рисунок 3 – Результати прогнозування за МГЕ поведінки під навантаженням плитного фундаменту споруди $H=0.7$ м.

Висновки

- Плитні фундаменти в умовах передачі на ґрунтову основу великих тисків є одним із найбільш ефективних видів фундаментних конструкцій, які забезпечують рівномірність осідання споруди.
- Програмні комплекси дозволяють отримувати ресурсозберігаючі проектні рішення та достовірність осідання, що підтверджено застосуванням числового методу граничних елементів.
- Приведені числові розв’язки мають як науковий, так і прикладний характер.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бреббиа К., Теллес Ж., Вробел Л. Методы граничных элементов. М.: Мир, 1987.
2. Morgun A.S. Теорія пластичної течії в механіці ґрунтів./А.С. Морґун – Вінниця, ВНТУ. – 2013 – 108 С.
3. Бойко И.П. Теоретические основы проектирования свайных фундаментов на упругопластическом основании / И.П. Бойко, Сб. КИСИ “Основания и фундаменты”. – 1985 – №18, С 11-18.
4. Николаевский В.Н. Современные проблемы механики грунтов // Определяющие механики грунтов // В.Н. Николаевский – М.: Стройиздат. 1975 г. – С. 210-227.
5. Иллюшин А.А.. Пластичность.М.: Гостехиздат. 1947.

REFERENCES

1. Brebbia K., Telles Zh., Vroubel L. Methods of boundary elements. Moscow: Mir, 1987.
2. Morgun A.S. The theory of plastic flow in soil mechanics./A.S. Morgun - Vinnytsia, VNTU. – 2013 – 108 p.
3. Boyko I.P. Theoretical foundations of the design of pile foundations on elastic-plastic foundations / I.P. Boyko, Sat. KISI "Foundations and Foundations". - 1985 - No. 18, P. 11-18.
4. Nikolaevsky V.N. Modern soil mechanics problems // Defining soil mechanics // V.N. Nikolaevskiy - M.: Stroyizdat. 1975 - pp. 210-227.
5. Ilyushin A.A. Plasticity. M.: Gostekhizdat. 1947.

Морґун Алла Серафимівна – професор кафедри будівництва, міського господарства та архітектури; Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: morgunallaS@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-4701-339X>

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

Чен Яньмей – магістр кафедри будівництва, міського господарства та архітектури; Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: 1058523239@qq.com

Колесник Андрій Вікторович – аспірант Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця.

A. Morgun
I. Met
Cheng Yanmei
A. Kolesnyk

PREDICTION OF THE BEARING CAPACITY OF A SLAB FOUNDATION BY THE NUMERICAL METHOD OF BOUNDARY ELEMENTS

Vinnytsia National Technical University

Construction is one of the leading branches of the national economy in the historical aspect of its development. The first design task is to determine the strength of building structures. Therefore, the study of the stress-strain state and related calculations are the most important in construction. The purpose of studying soil mechanics and foundation construction techniques is the calculation and construction of structures on or in soil. The main task is the construction of structures with a sufficient degree of reliability.

The selection of an adequate theoretical model remains the main problem of soil mechanics. Indeed, the deformation of the dispersed granular material of the soil takes place during the mutual sliding of the grains, the rheology of the soil is complex, as evidenced by a large amount of experimental material. Today, the path of development of soil mechanics is related to the study of problems within the framework of the elastic-plastic dilatation model and the improvement of this model based on experiments. A 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, therefore a discrete model is built using numerical methods that use the Poisson idea that the behavior of a complex model can be represented by the behavior of its individual component elements. The intensive development and widespread use of computers significantly brought fundamental mathematical problems closer to applied ones, and strengthened their mutual influence.

The emergence of a new, powerful and general method of research - a numerical experiment, more than ever before closely connected the physical content of the problem, its mathematical formulation, numerical methods of calculation and modern computers. The work uses the numerical method of boundary elements. A promising way to develop foundations and foundation structures is to use the ratios of the theory of plastic flow, and the level of development of soil mechanics significantly affects the economy and reliability of the decisions made.

Key words: reinforcement of foundations, stress-strain state, bearing capacity, numerical method of boundary elements.

Morgun Alla – Professor of the Department of Construction, Municipal Economy and Architecture; Vinnytsia National Technical University, Vinnitsa, e-mail: morgunallaS@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-4701-339X>

Met Ivan – Dean of FBCEI; Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: vanmet@ukr.net

Cheng Yanmei – Master of the Department of Construction, Urban Management and Architecture; Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: 1058523239@qq.com

Kolesnyk Andryi – Postgraduate of Vinnytsia National Technical University, e-mail: andreyengineer@gmail.com