

БУДІВНИЦТВО<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-142-1-13-17>

УДК 519.642:624.044:624.15

А. С. Моргун¹
В. О. Задорожнюк¹
А. В. Баранюк¹

ОПТИМІЗАЦІЯ ПЛИТНОГО ФУНДАМЕНТУ ВИСОТНОЇ БУДІВЛІ ЗА МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

¹Вінницький національний технічний університет

Розглянута актуальна проблема фундаментобудування та механіки ґрунтів — пружно-пластичне моделювання сумісної роботи системи «ґрунтова основа—плитний фундамент» з метою визначення несучої спроможності фундаменту та вибору його оптимальної товщини. Розвиток будівельної галузі пов'язаний з впровадженням в будівельну практику нових технологій прогнозного розрахунку. Суттєві збільшення ваги сучасних споруд, яке передається на основу, викликає необхідність розвитку нелінійних методів розрахунку буронабивних паль, які в цих умовах є найефективнішими видами фундаментних конструкцій.

Будівництво споруд є трудомістким процесом, який потребує виважених, чітко прорахованих кроків та розв'язання складних математичних задач. Особливо це стосується влаштування частини споруди, яка сприймає навантаження і передає їх на основу — фундамент. Надзвичайно важливо забезпечити стійкість і малопросадковість споруди, тим самим уникнути її можливого нерівномірного просідання чи руйнування. Для цього необхідно забезпечити прогнозування і числову реалізацію розрахунків конструкцій. Тому в статті запропоновано рівняння рівноваги фундаменту, зануреного в ґрунтове середовище, яке відповідає диференціальному рівнянню Лапласа. А основним розрахунковим рівнянням моделі роботи ґрунту є інтегральне рівняння, отримане К. Бреббія.

Використання числового МГЕ до розв'язку нелінійної задачі геомеханіки обґрунтовано теоретичними викладками, підкріплено та проілюстровано даними числового розрахунку.

Нелінійну задачу процесу деформування основ розв'язано за допомогою крокового методу О. А. Ілюшина. Робота ґрунту моделювалась за теорією В. М. Ніколаєвського та І. П. Бойка. Визначались повні деформації, які складались з проростів пружних та пластичних деформацій. Компонівка розрахункової матриці впливу МГЕ виконувалась на основі розв'язків Р. Міндліна.

Результати прогнозування за МГЕ показано на графіку «навантаження—осідання» фундаментної плити. Правильність вибору розрахункової дилатансійної моделі підтверджується відповідністю числових досліджень експериментальним дослідженням.

Ключові слова: метод граничних елементів, напружено деформований стан, оптимізація, плитний фундамент, висока будівля.

Вступ

З огляду на актуальність питання розробки нових технологій розрахунку фундаментних конструкцій, питома вага яких в загальному обсязі будівництва складає 40...50 %, проведено числове дослідження за МГЕ з визначення несучої здатності плитного фундаменту восьмиповерхової житлової споруди.

Поведінка реальних деформованих середовищ (ґрунтів) має глибший зміст, ніж співвідношення механіки суцільних середовищ. В цьому випадку часткові теорії, що ґрунтуються на експерименті і сформульовані для визначених класів матеріалів і діапазонів зміни параметрів, стають прийнятнішими для практичного використання. Традиційні інженерні методики не дозволяють достатньо достовірно оцінити НДС основ без врахування незворотності їх деформацій а також приймати ефективні проектні рішення.

Розвиток нелінійної механіки ґрунтів та створення потужної комп'ютерної бази в проектних та наукових організаціях дали поштовх до напрацювання програмних комплексів, в яких реалізуються математичні моделі ґрунту з урахуванням їх пружно-пластичної поведінки.

Особливості поведінки конкретного матеріалу (в цьому випадку — ґрунту) в залежності від умов деформування проявляються частіше всього у визначальних співвідношеннях (рівняння стану) для цього матеріалу. За напружень, близьких до поверхні руйнування, проходить перебудова внутрішньої структури середовища ґрунту. Деформування — це процес руйнування ґрунту, створення нових форм його структури, його адаптації.

Метою роботи є прогнозування за МГЕ нелінійної поведінки плитного фундаменту висотної семиповерхової будівлі під статичним навантаженням.

Результати досліджень

Врахування особливостей деформування підземної частини споруди залишається найскладнішою задачею. Для сьогодення метод математичного моделювання на ЕОМ став одним з головних і найекономічніших прийомів теоретичних і прикладних досліджень актуальних проблем науки та народного господарства. Математична модель найкомпактніше подає наукову інформацію про досліджуваній об'єкт. Числове моделювання відкриває можливість прогнозування осідань і кренів фундаментів споруд ще на стадії їх проектування.

Прогнозування нерівномірного деформування ґрунтів основи шляхом числового моделювання взаємного впливу елементів системи «ґрунтова основа — фундамент» дає можливість альтернативного пошуку найнебезпечнішої комбінації внутрішніх зусиль та виявлення критичного стану ґрунтової основи. Такий підхід дозволяє підвищити надійність проектування будівель в умовах нерівномірних деформацій ґрунтової основи. Він повністю збігається з принципом Європейських норм [1], які орієнтовані на пошук найнебезпечнішої ситуації для забезпечення надійної експлуатації споруди.

Розглядаючи тривимірну задачу визначення несучої здатності фундаментної плити (розмірами 32×20 м), розрахункова система з 15 диференціальних рівнянь теорії пружності приведена К. Бреббія [4] до інтегрального рівняння рівноваги фундаментної конструкції в ґрунті, яке пов'язує значення U і його нормальної похідної $q = du/dx$ в кожному граничному вузлі на границі досліджуваної фундаментної конструкції.

$$C(\xi)U(\xi) + \int_{\Gamma} U(x)q^*(\xi, x)d\Gamma(x) = \int_{\Gamma} q(x)U^*(\xi, x)d\Gamma(x), \quad (1)$$

$U^*(\xi, x)$, $q^*(\xi, x)$ — фундаментальні розв'язки Р. Міндліна для переміщень та напружень в пружній півплощині. Коефіцієнт $C(\xi) = 1/2$ для гладкої границі. Матричний вигляд рівняння (1)

$$A \cdot Y = F, \quad (2)$$

де A — матриця впливу МГЕ, отримана з фундаментальних розв'язків Р. Міндліна; Y — шуканий вектор напружень на границі плити (дотичні напруження τ_i по боковій поверхні та нормальні напруження під подошвою σ_l); F — заданий вектор переміщень.

Для ґрунтів, як для пористих середовищ, що ущільнюються, властиві ефекти дилатансії. Особливістю механічної поведінки ґрунтів є факт, що гідростатичний тиск здійснює вплив на формозміну, а дотичні напруження впливають на ущільнення. Поведінка дисперсного ґрунту описувалась моделлю пружно-пластичного стиску із зсувом для пористого середовища на основі нелінійних методів рішень геотехнічних задач теорії пластичної течії з введенням функції, що виражає поверхню течії (4), та кінематичних співвідношень пластичної течії (5) [2]. Досягнення межі текучості пов'язане з приходом граничної рівноваги відповідно до умови Мізеса–Шлейхера–Боткіна

$$\begin{cases} f = \sigma_i + \sigma \cdot \operatorname{tg} \psi - \tau_s, & \text{якщо } \sigma \leq p_0, \\ f = \sigma_i + p_0 \cdot \operatorname{tg} \psi - \tau_s, & \text{якщо } \sigma > p_0, \end{cases} \quad (3)$$

де σ — гідростатичний тиск; σ_i — інтенсивність девіатора напруг; ψ — кут внутрішнього тертя; τ_s — параметр, аналогічний зчепленню; p_0 — параметр ґрунтового середовища.

Взаємозв'язок між швидкостями пластичних деформацій і напруженнями при роботі ґрунту в нелінійній стадії зсувів описувався за неасоційованим законом пластичної течії

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{dF}{d\sigma_{ij}}, \quad F \neq f, \quad (4)$$

де F — пластичний потенціал, функція історії деформування, f — критерій переходу до пластичного стану; λ — скалярний коефіцієнт простого навантаження, який визначається в ході розв'язання пластичної задачі; $d\sigma_{ij}$, $d\varepsilon_{ij}^p$ — приріст тензора напружень і тензора пластичних деформацій [2], [3].

Для корегування неспіввісності T_σ і T_ε при зсувах використано дилатансійну умову [2]

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

де $d\varepsilon_{ij(\text{шар})}^p$ — приріст об'ємних деформацій при зсуві ґрунту; Λ — швидкість дилатансії; $d\gamma^p$ — скалярний еквівалент приростів інтенсивності зсувів.

Процес числового моделювання для аналізу НДС системи передбачає послідовне розв'язання низки задач для кожного кроку навантаження. Як відомо, зв'язок $\sigma - \varepsilon$ в ґрунтах не носить лінійний характер. Тому визначення постійних лінійної пропорційності обмежувалось нескінченно малими змінами приростів напружень ($\Delta\sigma$) і відповідних їм приростів деформацій ($\Delta\varepsilon$). Широке використання плитних фундаментів зумовлює попереднє визначення їх несучої спроможності для конкретних інженерно-геологічних умов будівельного майданчика. Вхідні дані відповідають робочому проекту будівлі та звіту з інженерно-геологічних вишукувань. Ґрунтова основа розглядалась як пружно-пластичне тіло з середньозваженими інженерно-геологічними показниками. Заміна інженерно-геологічних показників багат шарового ґрунтового середовища показниками еквівалентного квазіодн шарового середовища є достатньо ефективним прийомом.

Параметрами математичної моделі ґрунту є: модуль деформацій $E = 20,17$ МПа, вхідна щільність ґрунту $\rho = 1,84$ т/м³, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,33$, питоме зчеплення $C = 33,11$ КПа, кут внутрішнього тертя $\phi = 0,34$ рад, величина гідростатичного тиску $p_0 = -1870$ КПа — точка переходу від конуса до циліндра в критерії пластичності Мізеса–Шлейхера–Боткіна [2], [3].

Дослідження проводились шляхом числового моделювання спільної роботи системи «ґрунтова основа—фундамент» за допомогою методу граничних елементів (МГЕ) на базі автоматизованої програми для наукових досліджень в тривимірній постановці з використанням пружно-пластичної моделі ґрунту.

Бокова поверхня та підшва фундаментної плити розділялись на граничні елементи (ГЕ) (рис. 1). Навколо плитна ґрунтова зона (активна зона ґрунту) дискретизувалась трикутними осередками. З огляду на симетрію розглядалась лише половина фундаментної конструкції.

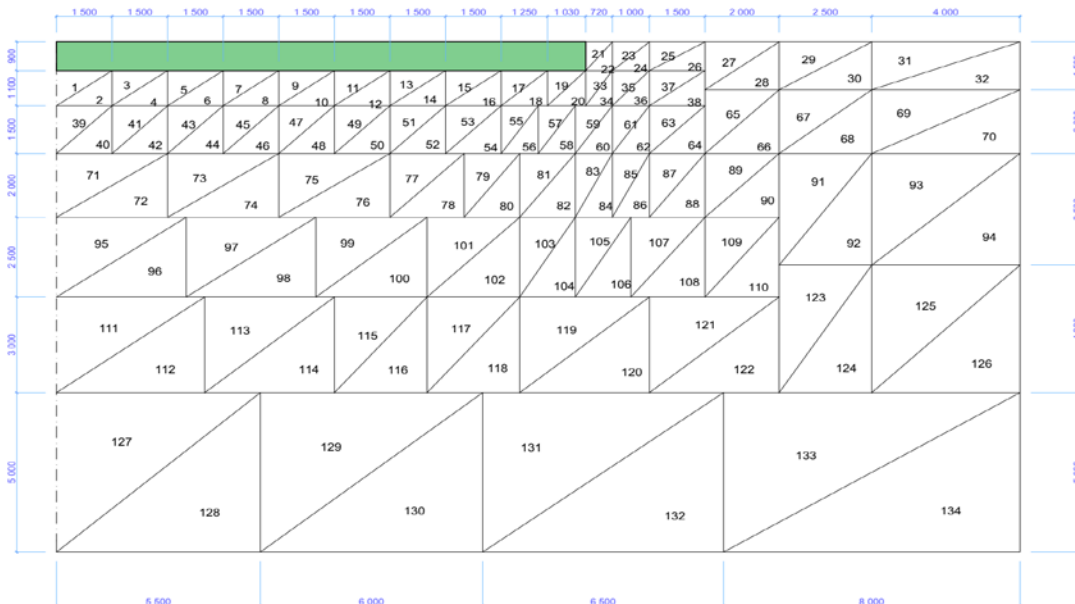


Рис. 1. Дискретизація активної зони ґрунтової основи

В першому варіанті розрахунку товщина фундаментної плити $H = 0,9$ м. Отриманий графік «навантаження–осідання» показано на рис. 2а. Несуча спроможність склала 16000 кН.

З метою оптимізації фундаментної конструкції в другому варіанті розрахунку взято $H = 0,6$ м. Результати нелінійного прогнозування на рис. 2б. Несуча спроможність склала 15400 кН. Вона

ненабагато менша за даними плити висотою 0,9 м, що можна пояснити тим, що вирішальне значення в фундаментних плитах має площа підшви обпирання на ґрунту, а не їх бокова поверхня. Оскільки в другому економічнішому варіанті $H = 0,6$ м, то запропоновано використовувати фундаментну плиту з $H = 0,6$ м.

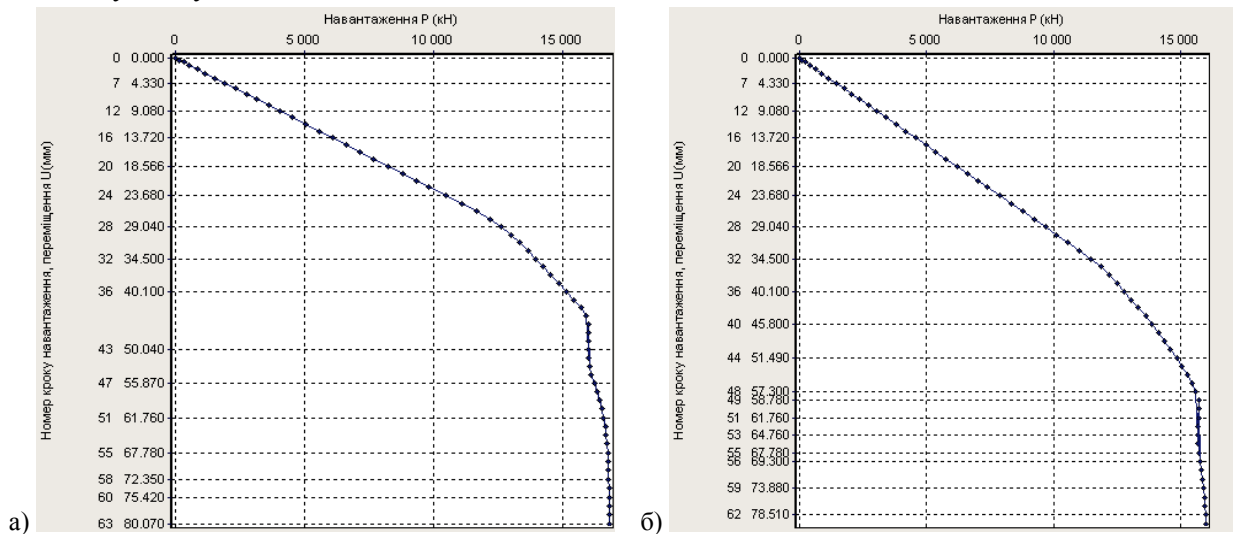


Рис. 2. Графіки «навантаження-осідання» для фундаментної плити при: а — $H = 0,9$ м; б — $H = 0,6$ м

Висновок

Прогноз деформацій основ будівель є пріоритетною задачею механіки ґрунтів, особливо в сучасному будівництві з тисками в основах до 1 МПа.

Пружно-пластичний розрахунок основ за запропонованою математичною моделлю дозволив істотно якісніше за інженерні методи оцінити НДС ґрунтової основи будівельного майданчика та прийняти економічно ефективно проектне рішення щодо зменшення висоти фундаментної плити.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Eurocode 7. Geotechnical design. Part 2. Design assisted by laboratory testing. European Committee for Standardization Brussels, 2000.
- [2] И. П. Бойко, Теоретические основы проектирования свайных фундаментов на упруго-пластическом основании. Москва, СРСР: Будівельник, 1985.
- [3] А. С. Моргун, І. М. Меть, та А. В. Ніцевич, Моделирование эффекта взаимодействия системы «будівля-фундамент-основа» за числовым методом граничных элементов. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2010.
- [4] Э. И. Григолюк, Ред., *Методы граничных элементов*. Москва, СРСР: Мир, 1987.

Рекомендована кафедрою кафедри будівництва, міського господарства та архітектури ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 10.12.2018

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

Задорожнюк Віолета Олегівна — аспірантка кафедри будівництва, міського господарства та архітектури;

Баранюк Андрій Володимирович — студент факультету будівництва, теплоенергетики та газопостачання.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

A. S. Morgun¹
V. O. Zadorozhniuk¹
A. V. Baraniuk¹

Optimization of Slab Foundation of a High-Rise Building by the Method of Boundary Elements

¹Vinnitsia National Technical University

The theme is devoted to the actual problem of foundation engineering and soil mechanics - elastic-plastic modeling of the joint operation of the "ground foundation — slab foundation" system in order to determine the bearing capacity of the foundation and the choice of its optimal thickness. The development of the construction industry is associated with the intro-

duction in the building practice of new technologies of predictive calculation. Significant increase in the weight of modern structures, which is transferred to the basis, necessitates the development of non-linear methods for calculating drill piles, which in these conditions are the most effective types of foundation structures.

Construction of buildings is a labor-intensive process that requires well-balanced, well-calculated steps and solving complex mathematical problems. This is especially true for the installation of a part of the building, which perceives the load and transfers them to the foundation — the foundation. It is extremely important to provide stability and low occupancy of the structure, thus avoiding its possible uneven subsidence or destruction. To do this, ensure prediction and numerical implementation of calculations of structures. Therefore, the model of the equation of equilibrium of the foundation immersed in the soil medium, which satisfies the Laplace differential equation, is developed. The main calculation equation of the soil model is the integral equation obtained by K. Brebbia.

The attachment of numerical MGE to the solution of the nonlinear problem of geomechanics is substantiated by theoretical calculations, supported and illustrated by numerical calculations.

Nonlinear task of the process of deformation of bases is solved using step method of O. A. Iliushin. The soil was modeled by theory of V. M. Nikolaievskiy and I. P. Boiko. Full deformations were determined, which consisted of increments of elastic and plastic deformations. The layout of the calculation matrix of the influence of the MGE was performed on the basis of the decisions of R. Mindlin.

The results of the forecast for the IHE are given on the plot of the "loading-settling" of the base plate. The fidelity of the choice of the settlement dilatation model is confirmed by the correspondence of numerical studies with experimental research.

Keywords: method of boundary elements, stress-deformed state, slab foundation, optimization, high building.

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

Zadorozhniuk Violetta O. — Post-Graduate Student of the Chair of Construction, and Urban Architecture;

Baraniuk Andrii V. — Student of the Department of Building, Heat Power Industry and Gas-Supplying

A. С. Моргун¹
В. О. Задорожнюк¹
А. В. Баранюк¹

Оптимизация плитного фундамента высотного здания по методу предельных элементов

¹Вінницький національний технічний університет

Рассмотрена актуальная проблема фундаментостроения и механики грунтов — упруго-пластическое моделирование совместной работы системы «грунтовая основа—плитный фундамент» с целью определения несущей способности фундамента и выбора оптимальной толщины. Развитие строительной отрасли связано с внедрением в строительную практику новых технологий прогнозного расчета. Существенные увеличения веса современных сооружений, которое передается на основание, вызывает необходимость развития нелинейных методов расчета буронабивных свай, которые в этих условиях являются наиболее эффективными видами фундаментных конструкций.

Строительство сооружений является трудоемким процессом, требующим взвешенных, четко просчитанных шагов и решения сложных математических задач. Особенно это касается устройства части сооружения, воспринимающей нагрузки, и передает их на основание — фундамент. Чрезвычайно важно обеспечить устойчивость и малопросадочность сооружения, тем самым избежать ее возможного неравномерного проседания или разрушения. Для этого необходимо обеспечить прогнозирование и числовую реализацию расчетов конструкций. Поэтому предложенное в статье уравнение равновесия фундамента, погруженного в грунтовую среду, отвечает дифференциальному уравнению Лапласа. А основным расчетным уравнением модели работы почвы является интегральное уравнение, полученное К. Бреббия.

Использование числового МГЭ к решению нелинейной задачи геомеханики обоснованно теоретическими выкладками, подкреплено и проиллюстрировано данными численного расчета.

Нелинейная задача процесса деформирования основ решена с помощью пошагового метода А. А. Илюшина. Работа почвы моделировалась по теории В. М. Николаевского и И. П. Бойко. Определялись полные деформации, которые состояли из приростов упругих и пластических деформаций. Компонировка расчетной матрицы влияния МГЭ выполнялась на основе решений Р. Миндлина.

Результаты прогнозирования по МГЭ представлены на графике «нагрузка—осадка» фундаментной плиты. Правильность выбора расчетной дилатансионной модели подтверждается соответствием численных исследований экспериментальным исследованиям.

Ключевые слова: метод граничных элементов, напряженно-деформированное состояние, оптимизация, плитный фундамент, высотное здание.

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

Задорожнюк Виолетта Олеговна — аспирант кафедры строительства, городского хозяйства и архитектуры;

Баранюк Андрей Владимирович — студент факультета строительства, теплоэнергетики и газоснабжения