

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗА МГЕ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМУВАННЯ ПЛИТНОГО ФУНДАМЕНТУ

Вінницький національний технічний університет

В роботі з позицій механіки дисперсного пружно-пластичного середовища викладено уявлення про особливості поведінки під впливом навантаження фундаментної плити 10 – поверхової будівлі. Наведена методика розрахунку цього конструктивного розв'язку фундаментів для висотної споруди за сучасними комп'ютерними технологіями на основі числового методу граничних елементів (МГЕ).

В залежності від властивостей ґрунту і діючих напружень осадка споруди здійснюється в результаті ущільнення чи витискування ґрунту з під фундаменту. В тому і другому випадку явище осідання обумовлено течією ґрунту, тому природно, що на перший план розв'язку статичних задач фундаментобудування виступає умова, чи рівняння, що визначають границю між твердим і текучим станом ґрунту в залежності від напружень. Прикладання числового МГЕ до розв'язку нелінійної задачі геомеханіки обґрунтовано теоретичними викладками, підкріплено та проілюстровано даними числового розрахунку.

Ключові слова: осідання, метод граничних елементів, плитний фундамент, розрахунок фундаменту, ґрунти.

Вступ

Забезпечення надійності роботи фундаментних конструкцій є визначальним при практичному проектуванні і вимагає як експериментального обґрунтування, так і числового моделювання. До сьогоднішнього дня ця задача є актуальним питанням геотехніки. Взаємодія фундаментної конструкції оточуючим ґрунтом носить складний, просторовий характер і залежить від багаточисленних факторів. На теперішній час вивчено не всі аспекти механізму деформування ґрунтової основи під навантаженням.

Урахування питань незворотного деформування ґрунтів (їх нелінійності) зближує розрахункові дані з натурними властивостями ґрунтів.

Натурні дослідження грають контрольну роль. Повний математичний опис незворотніх деформацій ґрунту приводить до черезмірно складної моделі. Тому здійснюється перехід до більш простих розрахункових схем. Відмічений вперше О. Рейнольдсом в 1885 р. ефект дилатансії (зміна об'єму, що супутня зсувним деформаціям) характерний для незворотнього деформування ґрунтів. Дилатансія – явище чисто кінематичне.

Визначальні співвідношення

Для створення математичного моделі незворотного деформування ґрунту в роботі було залучено теорію пружності та пластичності. Крім звичайних рівнянь рівноваги введено ще два додаткових. Перше з них сформульовано для компонент тензора напружень і в просторі напружень визначає миттєву поверхню текучості. Для визначення межі пружної поведінки ґрунтової основи використано октаедричну модель пружно-пластичного середовища Мізеса-Шлейхера-Боткіна [1], рис. 1.

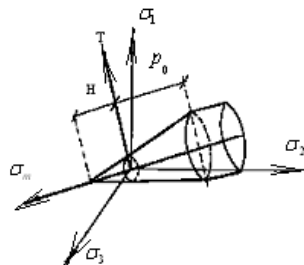


Рисунок 1 – Модифікований критерій пластичності Мізеса-Шлейхера-Боткіна в координатах головних напружень

Згідно цієї теорії граничне напруження зсуву по октаедричних площадках є функцією середнього нормального тиску.

$$T = f(\sigma_{окт}), \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}, \quad \sigma_{окт} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3).$$

У координатах головних осей $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ та меридіональному перерізі в площині гідростатичного тиску, рис. 1:

$$\begin{cases} f = T + \sigma_{окт} \operatorname{tg} \psi - \tau_s = 0, & \sigma_{окт} \leq p_0; \\ f = T + p_0 \operatorname{tg} \psi - \tau_s = 0, & \sigma_{окт} > p_0, \end{cases} \quad (2)$$

де T – інтенсивність дотичних напружень (інтенсивність девіатора напруг); $\sigma_{окт}$ – гідростатичний тиск; ψ – граничний кут тертя на октаедричній площині; τ_s – параметр на октаедричній площині, аналогічний зчепленню, значення дотичних напружень на октаедричній площині при $\sigma_m = 0$; p_0 – величина гідростатичного тиску на девіаторній площині, коли ґрунт працює як суцільне середовище (межа пластичної стисливості [1] чи максимальний гідростатичний тиск).

Поверхня текучості дає співвідношення між $\sigma_{окт}$ та T на октаедричній площині і разом з рівняннями рівноваги забезпечує кількість рівнянь та кількість невідомих для замикання моделі. Поверхню текучості використовують як паспорт міцності ґрунту. Якщо в точці ґрунтового масиву досягається критичний стан згідно критерію, то ґрунт буде зруйнованим і модель його механічних властивостей замінюється іншою, неголономною такою, що її неможливо проінтегрувати в загальному випадку для отримання кінцевих співвідношень між деформаціями і напруженнями.

Друге додаткове рівняння формується для компонент тензора швидкостей пластичних деформацій та визначає орієнтацію пластичних деформацій. Для визначення приросту пластичних деформацій $d\varepsilon_{ij}^p$ використано неасоційований закон пластичної течії

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

В якості додаткової умови (до закону пластичної течії) замість вимоги ортогональності вектора $d\varepsilon_{ij}^p$ до f (поверхні навантаження) використано перспективну теорію дисперсних середовищ В. М. Ніколаєвського – І. П. Бойка [1,2], що враховує дилатансію ґрунту та залежність деформування від історії навантаження і дає максимальну кореляцію числового дослідження з експериментом. Пластичні деформації ґрунту визначались як сума їх на попередніх кроках навантаження та приріст пластичних деформацій на текучому кроці навантаження:

$$\varepsilon^p = \sum d\varepsilon^p + d\varepsilon^p \delta, \quad (4)$$

де δ – дельта Кронекера. Приріст пластичних деформацій на даному текучому кроці навантаження:

$$d\varepsilon^p = d\varepsilon_{шар}^p + d\varepsilon_{дев}^p, \quad (5)$$

де $d\varepsilon_{шар}^p$ – приріст пластичних деформацій від шарового тензора напружень; $d\varepsilon_{дев}^p$ – приріст

пластичних деформацій від девіатора напружень.

$$d\varepsilon_{шарове}^p = \Lambda(\chi) \cdot d\gamma^p, \quad (6)$$

де $d\varepsilon_{шарове}^p$ – приріст непружних змін об’єму, що супутні зсуву, $d\gamma^p$ – приріст інтенсивності зсуву,

$\Lambda = \frac{d\varepsilon_v}{d\gamma}$ – швидкість дилатансії – додатковий параметр неасоційованої моделі пластичної течії,

χ – параметр зміцнення ґрунтового середовища (прийнято щільність ґрунту).

Прогнозувати розв’язок НДС ґрунту за допомогою кінематичних методів розрахунку неможливо із-за математичних ускладнень. Необхідні сучасні числові методи та моделі. Використано числовий МГЕ [3,4], в якому система диференціальних розрахункових рівнянь зводиться до інтегрального рівняння, яке потребує дискретизації лише границі і значно зменшує число вузлових точок. Числовий МГЕ потребує використання ЕОМ і, що є загальним для наближених числових методів, зводить розрахункові рівняння до розв’язків СЛАР високих порядків.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij,j} + b_j &= 0 \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \\ \sigma_{ij} &= C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \end{aligned} \right\} \Rightarrow C_{ij}(\xi)u_j(\xi) + \int_{\Gamma} p_{ij}^*(\xi, x)u_j(x)d\Gamma(x) = \int_{\Gamma} u_{ij}^*(\xi, x)p_j(x)d\Gamma(x), \quad (7)$$

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 розгляді нелінійної задачі інтегральне рівняння, отримане К. Бреббія [3,4], набуває вигляду:

$$c_{ij} \cdot u_j + \int_{\Gamma} p_{ij}^* u_j d\Gamma = \int_{\Gamma} u_{ij}^* p_j d\Gamma + \int_{\Omega} \sigma^* \varepsilon_{jk}^p d\Omega, \quad (8)$$

де, u – заданий вектор переміщень на контактні границі фундаментної конструкції; p – шуканий вектор напружень на границі; u^* , p^* , σ^* – ядра граничного рівняння (8) чи функції впливу МГЕ, це двоточкові 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 P . Міндіна для переміщень, напружень та похідних від напружень, що відповідають одиничним взбурюючим впливам ($P=1$) в півпросторі. Ядра інтегрального рівняння характеризують собою досліджуване середовище; C_{ij} – постійна, визначається із умов руху тіла як цілого, з’являється при переводі красвої задачі до інтегрального рівняння (8) для отримання єдиного рішення; Γ , ξ , x , Ω – відповідно гранична поверхня фундаментної конструкції, точка збурення, точка нагляду та границя трикутних осередків активної зони ґрунту [3, 4].

Числова реалізація рівняння стану (8) складається із етапів:

1. Контактна границя фундаментної плити та ґрунтової основи розбивається на ряд елементів (ГЕ), на яких граничні зусилля задаються за допомогою інтерполюючих функцій (використано постійні лінійні граничні елементи). Активна зона навколоплитної основи дискретизувалась трикутними осередками.

2. Рівняння записувалось в дискретній формі для кожного вузла границі та обчислювались інтеграли по кожному граничному елементу, використано числові схеми інтегрування Гауса та

Хемара. В результаті отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР).

3. Рішення СЛАР дає вектор невідомих напружень на границі, за якими визначається несуча спроможність фундаментної конструкції на кожному кроці навантаження, рис. 2.

Згідно наведеного алгоритму спрогнозовано поведінку роботи фундаментної плити товщиною 0.7 м. 10-ти поверхової висотної споруди.

Вхідними параметрами моделі, які характеризують геологічну ситуацію основи будівельного майданчика та процес деформування ґрунтового середовища в роботі прийнято середньозважені фізико-механічні характеристики різновидів неспадкових суглинків та глин $E=16900$ КПа, $\nu=0.38$, $c=38.42$ КПа, $\varphi=0.32$ радіан, $\rho=1.894$ т/м³, $\rho=1.818$ т/м³, $\rho=2.03$ т/м³, $p_0=1790$ КПа. Геологічні умови відповідають даним інженерних вишукувань.

На рис. 2 наведено дискретизацію активної зони навколо плитного фундаменту, на рис. 3 – отриманий графік навантаження – осідання згідно числових досліджень за МГЕ.

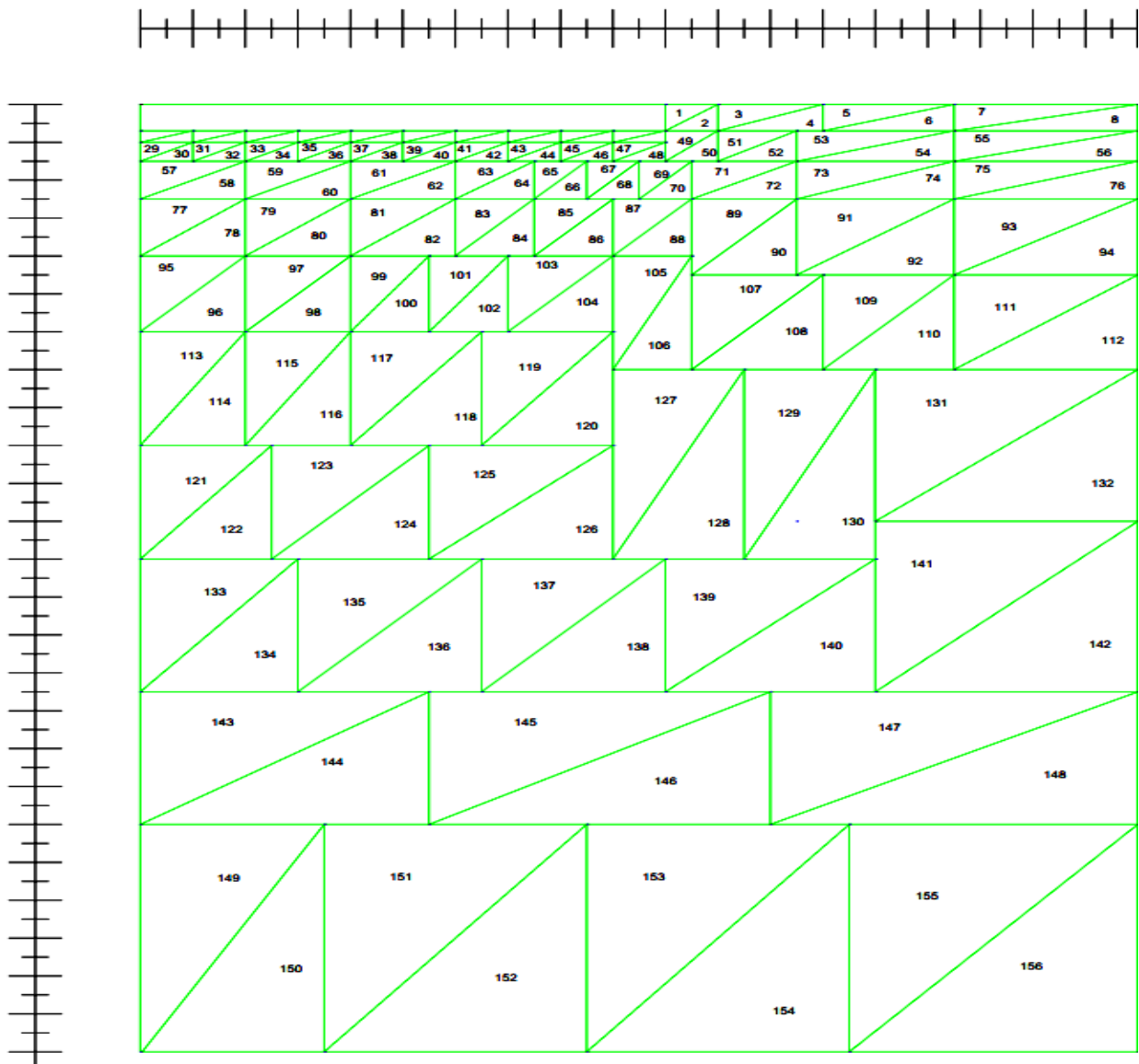


Рисунок 2 – Дискретизація активної зони навколо плитної основи

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

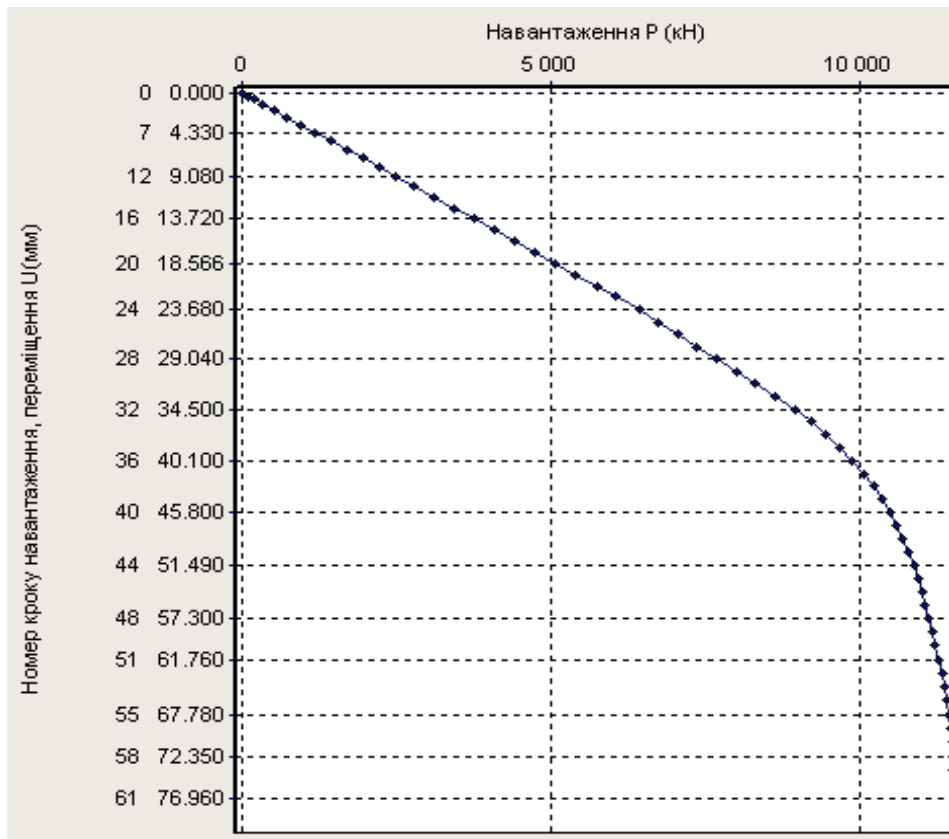


Рисунок 3 – Результати прогнозування за МГЕ поведінки під навантаженням плитного фундаменту споруди Н=0,7 м

Висновки

- Результати досліджень за удосконаленою математичною моделлю дозволяють проводити розрахунки фундаментної плити згідно сучасних уявлень про нелінійну поведінку ґрунту, а отриманий графік «навантаження-осідання» дає можливість отримати більш економічні умови роботи фундаментної плити. Порівняння результатів числових досліджень з натурними спостереженнями задовільне.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бойко І. П. Напружено-деформований стан ґрунтового масиву при побудові нових фундаментів поблизу існуючих будинків / І. П. Бойко, О. В. Сахаров // Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково – технічний збірник. – К. : КНУБА, 2004. – Вип. 28. – С. 3-10.
2. Николаевский В. Н. Современные проблемы механики грунтов / В. Н. Николаевский // Определяющие законы механики грунтов. – М. : Стройиздат, 1975. – С. 210-227.
3. Бреббия К. Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел.- М.: Мир. 1987.-525 с.
4. Моргун А. С. Нелінійні проблеми механіки ґрунтів / А. С. Моргун // Вінниця, ВНТУ, 2016. – 122 с.

Моргун Алла Серафимівна – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет.

Шевченко Ігор Ігорович – студент, Вінницький національний технічний університет.

**A. Morgun
I. Shevchenko**

THEORETICAL STUDIES FOR THE MGE PROCESS OF DEFORMATION OF THE PLATE FOUNDATION

Vinnitsia National Technical University

In work from positions of mechanics of the disperse elasto-plastic medium, ideas about the features of behavior under the influence of the load of the base plate of the 10-storey building are presented. The

technique for calculating this constructive solution of foundations for a high-rise construction using modern computer technologies based on the numerical method of boundary elements (MGE) is presented.

Depending on the properties of the soil and the operating stresses, the structure sludge is carried out as a result of compaction or extrusion of soil from under the foundation. In either case, the subsidence is due to the flow of soil, so it is natural that the decoupling of the static problems of foundation construction is a condition or equations that determine the boundary between the solid and the current state of the soil, depending on the stresses. The application of a numerical MGE to the solution of a nonlinear problem of geomechanics is justified by theoretical calculations, is supported and illustrated by numerical calculation data.

Key words: sediment, boundary element method, plate foundation, foundation calculation, soil.

Morgun Alla – Dr. tech. sci., professor, Head of the department of construction, municipal economy and architecture, Vinnytsia National Technical University.

Shevchenko Igor – student, Vinnytsia National Technical University.

А. С. Моргун

И. И. Шевченко

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗА МГЭ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЛИТНОГО ФУНДАМЕНТА

Винницкий национальный технический университет

В работе с позиций механики дисперсной упруго-пластической среды изложены представления об особенностях поведения под воздействием нагрузки фундаментной плиты 10 - этажного здания. Приведена методика расчета этого конструктивного решения фундаментов для высотного сооружения по современным компьютерными технологиями на основе численного метода граничных элементов (МГЭ).

В зависимости от свойств грунта и действующих напряжений осадка сооружения осуществляется в результате уплотнения или выдавливания грунта из-под фундамента. В том и другом случае явление оседания обусловлено течением грунта, поэтому естественно, что на первый план развязку статических задач фундаментостроения выступает условие, или уравнения, определяющее границу между твердым и текучим состоянием грунта в зависимости от напряжений. Приложение числового МГЭ к решению нелинейной задачи геомеханики обоснованно теоретическими выкладками, подкреплено и проиллюстрировано данными численного расчета.

Ключевые слова: осадка, метод граничных элементов, плитный фундамент, расчет фундамента, грунт.

Моргун Алла Серафимовна – д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой строительства, городского хозяйства и архитектуры, Винницкий национальный технический университет.

Шевченко Игорь Игоревич – студент, Винницкий национальный технический университет.