

А. С. Моргун
Р. І. Малачковська

АНАЛІЗ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЗА МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВЗАЄМОДІЇ ГРУНТОВОЇ ОСНОВИ З ДИМОВОЮ ТРУБОЮ

Вінницький національний технічний університет

Проблеми оцінки несучої спроможності основ фундаментів під навантаженням є визначальними в практичному проектуванні, оскільки показником експлуатаційної придатності об'єктів є фактична несуча спроможність підземної частини споруди, влаштування якої вимагає врахування всіх властивостей ґрунту будівельного майданчика, так як фундамент повинен бути найбільш раціональним, а його осідання не мають перевищувати гранично допустимі значення.

Процес експлуатації споруд, а саме розрахунок їх стійкості, міцності, деформативності, вибору оптимального конструктивного рішення, неможливий без переходу до математичного описання. Сприяє цьому числовий експеримент, поява якого суттєво наблизила фундаментальні математичні проблеми до прикладних, пов'язала фізичний зміст задачі, математичне формулювання і числовий спосіб рішення.

З метою об'єктивнішого та повнішого аналізу несучої спроможності ґрунтів і прогнозу потенційних деформацій необхідні розрахунки напружено-деформованого стану (НДС) ґрунтів з використанням закономірностей нелінійної механіки ґрунтів.

До сьогоднішнього дня стоїть питання створення розрахункової моделі ґрунту, яка б давала можливість компактності, ясності процесу дослідження, можливості числового аналізу та обіймала всю множину його природних властивостей, основною з яких є дискретність (чи зерниста будова ґрунтів), що різнить його від твердих тіл. Врахування її відкриває більше можливостей для відповідності теорії та експерименту.

Дисперсне середовище ґрунтової основи має свої особливості деформування. Для визначення НДС в ґрунтовій основі на сучасному рівні розвитку механіки ґрунтів залучають моделі, орієнтовані на розкриття процесів деформування суцільного середовища. Відомо, що більшість фізичних явищ в механіці може бути описане за допомогою диференціальних рівнянь в частинних похідних, для розв'язку яких необхідно залучати сучасні числові методи: метод скінченних елементів (МСЕ), метод граничних елементів (МГЕ).

Відсутність вказівок в діючих ДБН про способи розрахунку деформацій основ під кільцевими фундаментами перешкоджає їх широкому впровадженню, хоча для ряду споруд (димові труби, градирні, телебашти) використання цих фундаментів найбільш доцільно.

В статті можливість достовірного прогнозування поведінки кільцевого фундаменту (яке виконується шляхом дискретизації граничної поверхні фундаменту та активної зони ґрунту за МГЕ) та деформування ґрунту в широкому діапазоні навантажень надає напрацьована математична модель. В якій у якості фундаментальних рішень використовувались вирази для переміщень і напружень, отримані Р. Міндліном від дії одичної зосередженої сили, прикладеної в середині пружного півпростору. На основі цих виразів компонувалась розрахункова матриця впливу МГЕ.

Результати прогнозування за МГЕ подано на графіках навантаження-осідання кільцевого фундаменту. Вірність вибору розрахункової дилатансійної моделі підтверджується відповідністю числових досліджень за МСЕ.

Ключові слова: числовий метод граничних елементів, метод скінченних елементів, нелінійний розрахунок основ, кільцевий фундамент, дилатансія.

Вступ

В останні роки практика все частіше вимагає від інженера та дослідника в області механіки ґрунтів вміння будувати нові моделі дисперсних ґрунтових середовищ, розв'язувати задачі про поведінку їх під навантаженням. У зв'язку з цим, стає все більш важливим глибоке розуміння властивостей цих середовищ і змісту основних концепцій законів нелінійної механіки ґрунтів та числового МГЕ.

На сьогодні числовий аналіз стає необхідним елементом проектування об'єктів геотехнічного будівництва. Вітчизняна геотехніка знаходиться на шляху інтенсивного розвитку – широке застосування числових методів дозволяє більш достовірно оцінювати несучу здатність ґрунтів та підняти навантаження на основу, тобто проектувати більш економічні фундаменти.

Робота присвячена кількісній оцінці механічних процесів в ґрунтовій основі кільцевих фундаментів. Кільцеві фундаменти є найбільш раціональними і економічними конструкціями фундаментів для димових труб.

В запропонованій моделі в рамках однієї розрахункової схеми ведеться розрахунок по деформаціях та несучі спроможності (за двома групами граничних станів).

Визначальні співвідношення

В роботі в якості фундаменту промислової димової труби, висотою 300 м (діаметр внизу – 25 м, діаметр вверху – 15 м) для числових досліджень взято кільцевий фундамент з зовнішнім діаметром 60 м та внутрішнім діаметром 12 м.

Для вивчення впливу гнучкості кільцевого фундаменту, його товщина варіювалась як 4,8 м та 2,7 м відповідно.

При проведенні аналізу взаємодії системи «грунт-кільцевий фундамент» розглянуто два типи ґрунтової основи: сухий рихлий пісок та щільний пісок. Властивості ґрунтів в моделі характеризували вісім фізико-механічних характеристик (табл. 1).

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики ґрунтів

Тип ґрунту	Модуль деформацій E , кН/м ²	Коефіцієнт Пуассона ν	Щільність ґрунту ρ , кН/м ³	Кут тертя φ , град.	Зчеплення c , кПа	Щільність ґрунту $\rho_{\text{мін}}$, кН/м ³	Щільність ґрунту $\rho_{\text{макс}}$, кН/м ³	Параметр переходу від конуса до циліндра ρ_0 , кН/м ²
I	102,752	0,4	1,6	30	4,0	1,607	2,36	- 2592,0
II	7633,028	0,3	2,0	45	1,0	1,472	2,028	- 2433,6

Математичним описом об'єктів проектування слугують, як правило диференційні рівняння в частинних похідних, точний розв'язок яких вдається отримати в небагатьох часткових випадках. У зв'язку з цим для аналізу об'єктів розробляються наближені методи розв'язку розрахункових рівнянь стану системи – системи п'ятнадцяти диференційних рівнянь (рівнянь рівноваги, геометричних рівнянь, фізичних рівнянь + граничні умови), в основі яких лежить варіаційне числення (МСЕ) чи інтегральні рівняння (МГЕ).

В роботі використано рівняння стану, що встановлюють залежність між переміщеннями і напруженнями на границі дослідного об'єкта, отримане К. Бреббія:

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

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,

де u , p – шукані вектори переміщень та напружень на границі фундаментної конструкції; інтеграл по області Ω (Ω – активна зона навколо фундаментної основи) включає вектор пластичних деформацій ε_p ; Γ – границя досліджуваного об'єкта; u^* , p^* – сингулярні фундаментальні рішення Р. Міндліна, що відповідають одиничним взбурюючим впливам в півпросторі.

При використанні такого підходу (рішень Р. Міндліна), граничні елементи вводяться для дискретного подання лише границі між ґрунтом і фундаментною конструкцією.

Таким чином абстрактну характеристику процесу деформування ґрунту подано за допомогою математичної моделі. Саме вона дає можливість числового аналізу та отримання даних прогнозного характеру, та управління ними.

В роботі прийнято модель ґрунту з фізичним рівнянням Гука на дограничній стадії деформування та умовою текучості Мізеса-Шлейхера-Боткіна і співвідношеннями неасоційованого закону пластичної течії на після граничній стадії деформування. Прийнято, що площа границі рівноваги співпадає з октаедричною.

Для розв'язання нелінійної задачі процесу деформування основ кільцевого фундаменту прийнято еволюційний алгоритм рішення, який базується на кроковому методі О. А. Ільюшина. На наступному кроці використовуються дані із попереднього кроку. На кожному кроці навантаження в кінці ітерації визначались напруження та проводилось порівняння з критерієм пластичності, в якості якого взято критерій Мізеса-Шлейхера-Боткіна. Ця поверхня текучості дає співвідношення між σ_m (перший інваріант T_σ) та σ_i (перший інваріант D_σ) на октаедричній площині і разом з рівняннями рівноваги (1) забезпечує кількість рівнянь і кількість невідомих для замикання моделі.

$$\begin{cases} f = T + \sigma_{окт} tg \Psi - \tau_s = 0 & \text{при } \sigma_{окт} \leq p_0 \\ f = T + \rho_0 tg \Psi - \tau_s = 0 & \text{при } \sigma_{окт} > p_0 \end{cases}, \quad (2)$$

де T – інтенсивність дотичних напружень (інтенсивність девіатора напруг), $\sigma_{окт}$ – гідростатичний тиск; Ψ – граничний кут тертя на октаедричній площині, аналогічний зчепленню, значення граничних 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, 2] чи максимальний гідростатичний тиск (межа переходу від конуса до циліндра).

Властивість ґрунту перебудовувати свою структуру при навантаженнях: збільшувати свій об'єм при зсуві, називають дилатансією (від англ. dilate – розширяться, термін був вперше введений в 1885 р. О. Рейнольдсом), а його здатність зменшувати свій об'єм під час зрушення – контракцією (від англ. contract – стискуватись). Робота ґрунту в нелінійній стадії моделювалась дилатансійною теорією В. М. Ніколаєвського, І. П. Бойка [1]. Коефіцієнт дилатансії $\Lambda(\rho)$ залежав від щільності ґрунту ρ [1].

Приріст пластичних деформацій ґрунтової основи визначається за формулою:

$$d\varepsilon_{ij}^p = \Lambda(\chi) \cdot d\gamma^p, \quad (3)$$

де $d\gamma^p$ – скалярний еквівалент приросту зсувної пластичної деформації на октаедричній площині; $d\varepsilon_{ij}^p$ – приріст не пружних змін об'єму, що супутні зсуву; Λ – швидкість дилатансії; χ – параметр зміцнення ґрунтового середовища (прийнято щільність ґрунту ρ , яка є своєрідною пам'яттю ґрунту). Відповідно до напрацьованої нелінійної дилатансійної моделі, повні деформації визначались:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p, \quad (4)$$

де $d\varepsilon_{ij}^e$ – приріст пружних деформацій ґрунту, $d\varepsilon_{ij}^p$ – приріст пружних деформацій ґрунту.

Результати досліджень

Основою числової реалізації МГЕ є перехід від функціональних інтегральних співвідношень до їх алгебраїчних аналогів.

Метод граничних елементів дає можливість розчленувати розрахункову систему рівнянь на основі розгляду кожного окремого граничного елемента (ГЕ). В роботі використано кусочно-лінійну апроксимацію.

Дискретизація та квантування неперервних процесів – це складові прийняття рішення в багатьох складних системах. На рис. 1 а,б подано дискретизації зони кільцевого фундаменту димової труби при висоті фундаменту $H = 4,8$ м та $H = 2,7$ м.

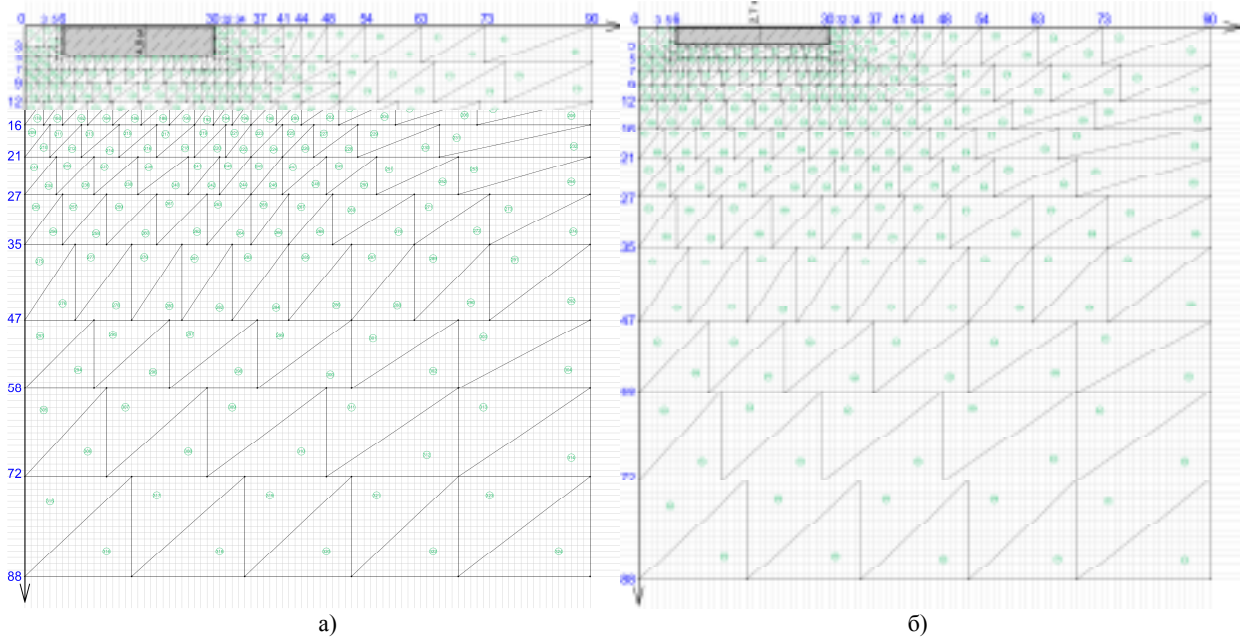


Рисунок 1 – Дискретизація активної зони кільцевих фундаментів: а) при $H = 4,8$ м, б) при $H = 2,7$ м

На рис. 2 наведено вигляд димової труби та кільцевого фундаменту.

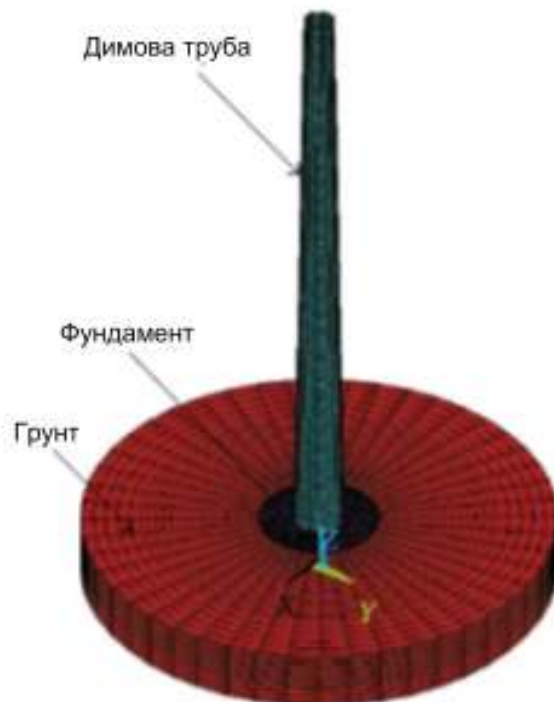


Рисунок 2 – Вигляд димової труби та кільцевого фундаменту

А на рис. 3 а, б – результати числових досліджень за МГЕ кільцевого фундаменту, висотою 4,8 м, для ґрунтів першого (а) типу та другого (б) типу.

Дані розрахунку за МГЕ поведінки під навантаженням кільцевого фундаменту, висотою 2,7 м, наведено на рис. 4 а, б.

Проведено порівняння результатів числових досліджень за МГЕ з даними розрахунків згідно програмного комплексу “ANSYS” за МСЕ [4].

При вазі димової труби 480 кН [4] величина прогнозованих осідань за МГЕ кільцевого фундаменту S (мм) подано в табл. 2.

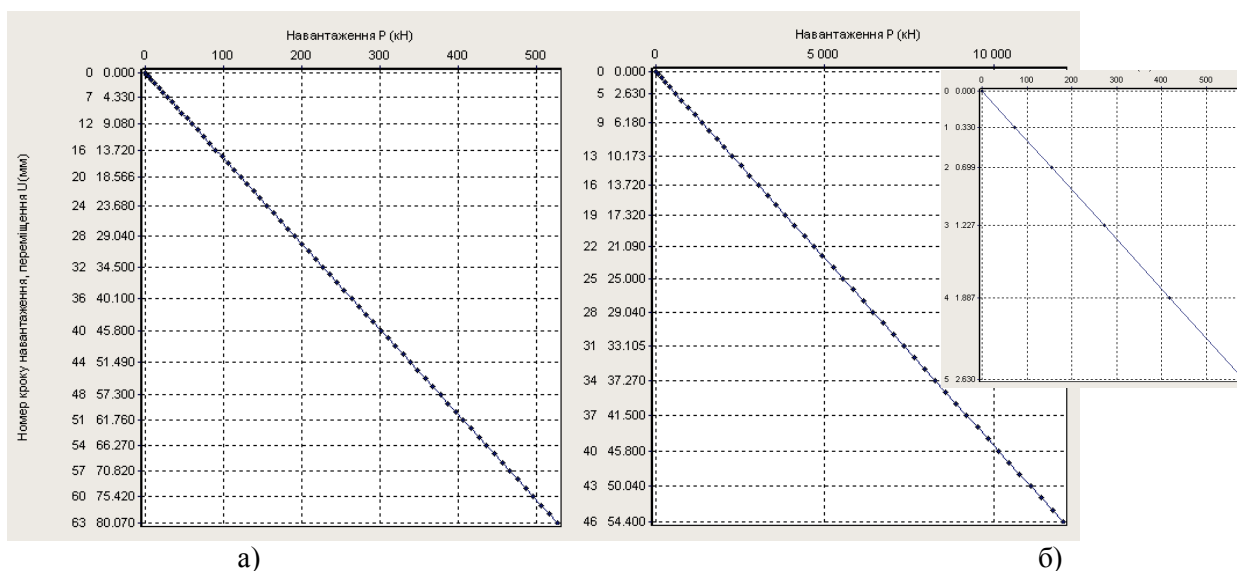


Рисунок 3 – Графік P – S при H = 4,8 м, а) ґрунту I типу, б) ґрунту II типу

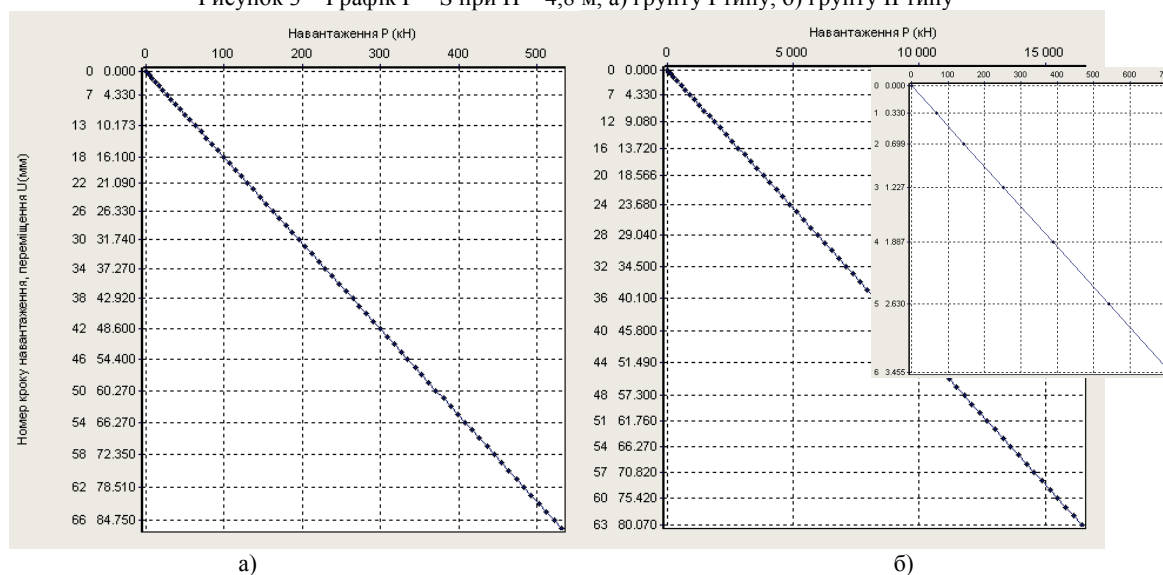


Рисунок 4 – Графік P – S при H = 2,7 м, а) ґрунту I типу, б) ґрунту II типу

Таблиця 2

Результати розрахунку осідань кільцевого фундаменту за МҒЕ та порівняння з МСЕ

Числовий метод досліджень	Висота кільцевого фундаменту			
	H = 4,8 м		H = 2,7 м	
	Тип ґрунту			
	I	II	I	II
МСЕ	72,52 мм	2,26 мм	82,60 мм	2,42 мм
МҒЕ	73,87 мм	2,33 мм	84,10 мм	2,67 мм

Аналіз результатів розрахунків осідань за числовим МҒЕ згідно запропонованої моделі підтверджує задовільну кореляцію з даними розрахунків [4] за МСЕ.

Висновки

1. Результати досліджень за удосконаленою математичною моделлю дозволяють проводити розрахунки кільцевих фундаментів згідно сучасних уявлень про нелінійну поведінку ґрунту, а

отриманий графік «навантаження-осідання» дає можливість отримати більш економічні умови їх роботи.

2. Теорія пластичності течії адекватно відображає характер деформування ґрунтів в широкому діапазоні навантажень.
3. Аналіз результатів розрахунків осідань за числовим МҒЕ згідно запропонованої моделі підтверджує задовільну кореляцію з даними розрахунків [4] за МСЕ.

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. – 2004. – Вип. 28. – с. 3-10.
1. Моргун А. С. Теорія пластичної течії в механіці ґрунтів: монографія / А. С. Моргун – Вінниця: ВНТУ. – 2013. – 108 с.
2. Бреббіа К. Методи граничних елементів / К. Бреббіа, Ж. Теллес, Л. Вроубел – Москва: Мир. – 1987. – 524 с.
3. Jayalekshmi B. R. Soil-Structure Interaction Analysis of 300m Tall Reinforced Concrete Chimney with Piled Raft and Annular Raft under Along-Wind Load / B. R. Jayalekshmi, S. V. Jisha, and R. Shivashankar // Hindawi Publishing Corporation: journal of Structures. 2013. – Vol. 2. – pp. 1-15.

REFERENCES

1. Boiko I. P. Naprugeno-deformovanyi stan gruntovogo masyvu pry pobudovi novyh fundamentiv poblyzu isnujuchykh budynkiv / I. P. Boiko, O. V. Saharov // Osnovy i fundamenti: Migvidomchyi naukovo-tehnichniy zbirnyk. – 2004. – Vyp. 28. – s. 3-10.
2. Morgun A. S. Teoriia plastychnoi techii v mehanitsi gruntiv / A. S. Morgun Vinnytsia: VNTU, – 2013. – 108 s.
3. Brebbiia K. Metody granychnykh elementiv / K. Brebbiia, G. Telles, L. Vroubel – Moskva: Mir, – 1987. – 524 s.
4. Jayalekshmi B. R. Soil-Structure Interaction Analysis of 300m Tall Reinforced Concrete Chimney with Piled Raft and Annular Raft under Along-Wind Load / B. R. Jayalekshmi, S. V. Jisha, and R. Shivashankar // Hindawi Publishing Corporation: journal of Structures. 2013. – Vol. 2. – pp. 1-15.

Моргун Алла Серафимівна – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету, e-mail: alla@morgun.com.ua; ORCID 0000-0002-4701-339X.

Малачковська Роксолана Ігорівна – аспірант кафедри будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету, e-mail: roksimalachkovska@gmail.com. ORCID: 0000-0001-7862-8154.

A. Morgun

R. Malachkovska

ANALYSIS AND PROGNOSIS BY THE METHOD OF BOUNDARY ELEMENTS OF THE INTERACTION OF THE SOIL BASIS WITH THE CHIMNEY

Vinnytsia national technical University

Problems of estimating the load bearing capacity of the foundations of the underlying loads are crucial in practical design, since the index of operational suitability of the objects is the actual carrying capacity of the underground part of the building, the installation of which requires taking into account all the properties of the soil of the construction site, since the foundation should be the most rational, and its subsidence should not exceed the maximum allowable values.

The process of exploitation of buildings, namely the calculation of their stability, strength, deformability, the choice of optimal constructive solution, is impossible without the transition to a mathematical description. It contributes to this numerical experiment, the appearance of which substantially brought fundamental mathematical problems to the applied, connected the physical content of the problem, mathematical formulation and numerical method of solution.

For the purpose of more objective and fuller analysis of soil bearing capacity and prediction of potential deformations, calculations of the stress-strain state (SSS) of soils with the use of regularities of non-linear soil mechanics are required.

To this day, the question is to create a settlement soil model that would provide the possibility of compactness, clarity of the research process, the possibility of numerical analysis and embraced the whole set of its natural properties, the main of which is the discreteness (or granular structure of soils), which differentiates it from solids. Its consideration offers more opportunities for the theory and experiment to fit.

The dispersed medium of the soil basis has its own peculiarities of deformation. At the current level of soil mechanics development, models are aimed at revealing the processes of deformation of a continuous medium to determine the SSS on a soil basis. It is known that most of the physical phenomena in mechanics can be described using differential equations in partial derivatives, for solution of which it is necessary to involve modern numerical methods: the finite element method (FEM), the method of boundary elements (BEM).

The lack of guidance in existing state building codes on how to calculate deformations of bases under ring foundations prevents their widespread adoption, although for a number of structures (smoke pipes, cooling towers, TV towers) the use of these foundations is most expedient.

In the article the possibility of reliable prediction of the behavior of the ring foundation (which is performed by sampling the boundary surface of the foundation and the active soil zone for the BEM) and deformation of the soil in a wide range of loads is provided by the elaborate mathematical model. In the article, the robust mathematical model provides the possibility of reliable prediction of the behavior of the ring foundation (which is performed by sampling the boundary surface of the foundation and the soil active zone for the MGE) and deforming the soil in a wide range of loads. In what as the fundamental solutions, expressions for displacements and stresses obtained by R. Mindlin from the action of the unit concentrated force applied in the middle of an elastic half-space were used. On the basis of these expressions, a calculated matrix of influence of the BEM was constructed.

The results of the forecasting by the BEM are presented in the loading-settling diagrams of the ring foundation. The fidelity of the choice of the settlement dilatation model is confirmed by the correspondence of numerical studies using the FEM.

Key words: numerical method of boundary elements, finite element method, nonlinear calculation of bases, ring foundation, dilatation.

Morgun Alla – dr. sciences, professor, head of the department of construction, urban and architecture of Vinnytsia national technical university, e-mail: alla@morgun.com.ua; ORCID 0000-0002-4701-339X.

Malachkovska Roksolana – post-graduate student of the department of construction, urban and architecture of Vinnytsia national technical university, e-mail: roksimalachkovska@gmail.com. ORCID: 0000-0001-7862-8154.

А. С. Моргун

Р. И. Малачковская

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПО МЕТОДУ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ С ДЫМОВОЙ ТРУБОЙ

Винницкий национальный технический университет

Проблемы оценки несущей способности оснований фундаментов под нагрузкой являются определяющими в практическом проектировании, так как показателем эксплуатационной пригодности объектов является фактическая несущая способность подземной части сооружения, устройство которой требует учета всех свойств почвы строительной площадки, так как фундамент должен быть наиболее рациональным, а его оседания не должны превышать предельно допустимые значения.

Процесс эксплуатации сооружений, а именно расчет их устойчивости, прочности, деформативности, выбора оптимального конструктивного решения, невозможно без перехода к математическому описанию. Способствует этому численный эксперимент, появление которого существенно приблизило фундаментальные математические проблемы к прикладным, связала физический смысл задачи, математическую формулировку и числовой способ решения.

С целью объективного и полного анализа несущей способности грунтов и прогноза потенциальных деформаций необходимы расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) почв с использованием закономерностей нелинейной механики грунтов.

До сегодняшнего дня стоит вопрос создания расчетной модели грунта, которая бы давала возможность компактности, ясности процесса исследования, возможности численного анализа и занимала все множество его природных свойств, главным из которых является дискретность (или зернистое строение почв), что отличает его от твердых тел. Учет ее открывает больше возможностей для соответствия теории и эксперимента.

Дисперсная среда грунтового основания имеет свои особенности деформирования. Для определения НДС в грунтовой основе на современном уровне развития механики грунтов привлекают модели, ориентированные на раскрытие процессов деформирования сплошной среды. Известно, что большинство физических явлений в механике может быть описано с помощью дифференциальных уравнений в частных производных, для решения которых необходимо привлекать современные численные методы: метод конечных элементов (МКЭ), метод граничных элементов (МГЭ).

Отсутствие указаний в действующих ГСН о способах расчета деформаций оснований под кольцевыми фундаментами препятствует их широкому внедрению, хотя для ряда сооружений (дымовые трубы, градирни, телебашни) использование этих фундаментов наиболее целесообразно.

В статье возможность достоверного прогнозирования поведения кольцевого фундамента (которое выполняется путем дискретизации граничной поверхности фундамента и активной зоны почвы по МГЭ) и деформирования грунта в широком диапазоне нагрузок предоставляет наработанная математическая модель. В которой в качестве фундаментальных решений использовались выражения для перемещений и напряжений, полученные Р. Миндлиным от действия единичной сосредоточенной силы, приложенной в середине упругого полупространства. На основании этих выражений компоновалась расчетная матрица влияния МГЭ.

Результаты прогнозирования по МГЭ представлены на графиках нагрузки-оседания килевого фундамента. Верность выбора расчетной дилатансионной модели подтверждается соответствием численных исследований по МСЭ.

Ключевые слова: численный метод граничных элементов, метод конечных элементов, нелинейный расчет оснований, кольцевой фундамент, дилатансия.

Моргун Алла Серафимовна – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой строительства, городского хозяйства и архитектуры Винницкого национального технического университета, e-mail: alla@morgun.com.ua; ORCID 0000-0002-4701-339X.

Малачковская Роксолана Игоревна – аспирант кафедры строительства, городского хозяйства и архитектуры Винницкого национального технического университета, e-mail: roksimalachkovska@gmail.com. ORCID: 0000-0001-7862-8154.