

А. С. Моргун, д. т. н.; проф.; О. В. Франчук

## ДІАГНОСТУВАННЯ РОБОТИ КІЛЬЦЕВОГО ФУНДАМЕНТУ ЗА МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

За числовим методом граничних елементів проведено прогнозування несучої спроможності кільцевих та круглих фундаментів відповідальних споруд, проведено порівняння їх роботи, обґрунтовано більш доцільний варіант фундаментної конструкції.

**Ключові слова:** метод граничних елементів, кільцеві та круглі фундаментні конструкції, нелінійна стадія поведінки ґрунту.

### Вступ

Кільцеві та круглі фундаменти – найбільш поширені фундаментні конструкції для таких відповідальних конструкцій, як: бункери, димові труби, резервуари.

Результати моніторингу осідань будівель показують значні розбіжності між їхніми фактичними і розрахунковими значеннями. Це пояснюють умовністю розрахункових схем, неврахуванням процесів зміцнення ґрунтів.

Прогнозування напружено-деформованого стану системи "кільцевий фундамент – основа" можливе за умови орієнтації на нові технології розрахунку із застосуванням засобів числового моделювання, заснованих на наукових платформах, які швидко розвиваються й дозволяють піднімати рівень адекватності.

У роботі процедура моделювання ґрунтується на методі граничних елементів (МГЕ). Властивість кільцевих фундаментів реалізовувати несучу здатність як по внутрішній, так і по зовнішній боковій поверхнях і вістрі надає кільцевим фундаментам значну перевагу.

### Постановка задачі, визначальні співвідношення

У статті досліджено особливості деформування та несучу спроможність кільцевого фундаменту та проведено порівняння з роботою круглого фундаменту таких же розмірів (рис. 1).

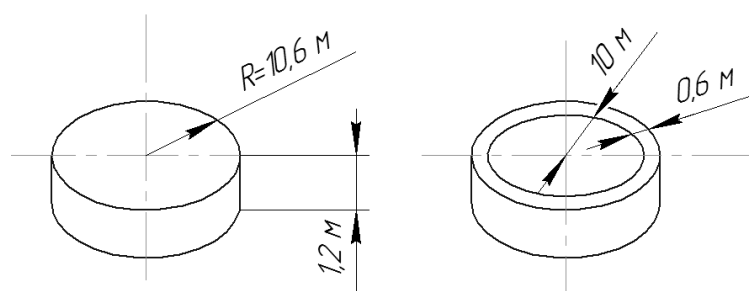


Рис. 1. Конструкція круглого та кільцевого фундаменту

Розрахункове інтегральне рівняння поведінки фундаментної конструкції в ґрунті, отримане К. Бреббія [1]:

$$c_{i,j}(\xi)u_j(\xi) + \int_{\Gamma} p_{i,j}^*(\xi, x)u_j(x)d\Gamma(x) = \int_{\Gamma} u_{i,j}^*(\xi, x)p_j(x)d\Gamma(x), \quad (1)$$

де  $p_i(x)$  – шуканий вектор напружень на границі об'єкта;  $u_i(\xi)$  – заданий вектор переміщень на границі об'єкта;  $p_{i,j}^*(\xi, x), u_{i,j}^*(\xi, x)$  – фундаментальні функції Р. Міндліна.

Для числового розв'язку задачі залучено МГЕ, механіку суцільних і пористих середовищ. Одночасна наявність у ґрунті зон, що працюють як у пружній, так і в пластичних стадіях, для моделювання його поведінки необхідно використання теорії пружності та пластичності.

Розрахунок круглого фундаменту проведено за моделлю розв'язку нелінійної задачі механіки ґрунтів, яка оснований на нелінійній дилатансійній моделі [2,3]. Матричний запис інтегрального граничного рівняння рівноваги [1] для граничного вузла має вигляд:

$$HU = GP + DE^P, \quad (2)$$

де  $H = \int_{\Gamma} \rho^* \Phi d\Gamma$ ;  $G = \int_{\Gamma} U^* \Phi d\Gamma$  – інтеграли по кожному граничному елементу бокової поверхні та нижньої поверхні, їх обраховують за схемами числового інтегрування двовимірних квадратур Гаусса,  $G$  – матриця впливу МГЕ;  $U^*$ ,  $\rho^*$  – ядра граничного рівняння, матриці впливу Гріна, у цій роботі – це фундаментальні сингулярні розв'язки Р. Міндліна;  $\Gamma$ ,  $\xi$ ,  $x$  – відповідно границя, точка збурення, точка нагляду;

$D = \int_{\Omega} \sigma^* \Phi^T d\Omega$  – матриці  $D$  відповідають інтеграли, що містять непружні деформації.

За критерій переходу до граничного стану прийнято узагальнений критерій Мізеса – Шлейхера – Боткіна.

$$f = \begin{cases} \tau_{окт} + \sigma_{окт} tg \psi - \tau_s = 0 \text{ при } \sigma_{окт} > \rho_0; \\ \tau_{окт} + \rho_0 tg \psi - \tau_s = 0 \text{ при } \sigma_{окт} < \rho_0, \end{cases} \quad (3)$$

де  $\tau_{окт}$ ,  $\sigma_{окт}$  – інтенсивність дотичних напружень та гідростатичний тиск на октаедричній площині,  $\rho_0$  – точка переходу від конуса до циліндра в умові Мізеса – Шлейхера – Боткіна,  $\tau_s$  – дотичні напруження при  $\sigma_{окт} = 0$ .

Для визначення величини пластичних деформацій використано неасоційований закон пластичної течії [4].

$$d\varepsilon^p = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{i,j}}, \quad F \neq f, \quad (4)$$

де  $d\varepsilon^p$  – приріст тензора пластичних деформацій ґрунту;  $d\lambda$  – скалярний множник;  $F$  – пластичний потенціал, функція історії деформування;  $\sigma$  – тензор напружень;  $f$  – поверхня навантаження.

Для знаходження приросту тензора об'ємних деформацій використано дилатансійне співвідношення В. М. Ніколаєвського, І. П. Бойка [2, 3]:

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

де  $d\varepsilon_{шар}^p$  – скалярний еквівалент приросту об'ємної деформації ґрунту (непружних об'ємних деформацій);  $d\gamma^p$  – інтенсивність приросту пластичної деформації зсуву;  $\Lambda(\rho)$  – коефіцієнт дилатансії, який залежить від щільності ґрунту  $\rho$  і може приймати як додатні (дилатансія), так і від'ємні (контрактансія) [2, 3] значення.

На рис. 2 показано числовий прогноз за МГЕ поведінки круглого фундаменту під навантаженням.

Середньозважені показники інженерно-геологічних вишукувань слугували вхідними параметрами моделі.

Середньозважені характеристики шарів ґрунту

$E, \text{МПа}$	$\varphi, ^\circ$	$\rho^{min}, \text{т/м}^3$	$\rho^{max}, \text{т/м}^3$	$\rho, \text{т/м}^3$	$\nu$	$C, \text{кПа}$	$e$
18	19	1,2538	2,0428	1,895	0,35	27,81	0,7952

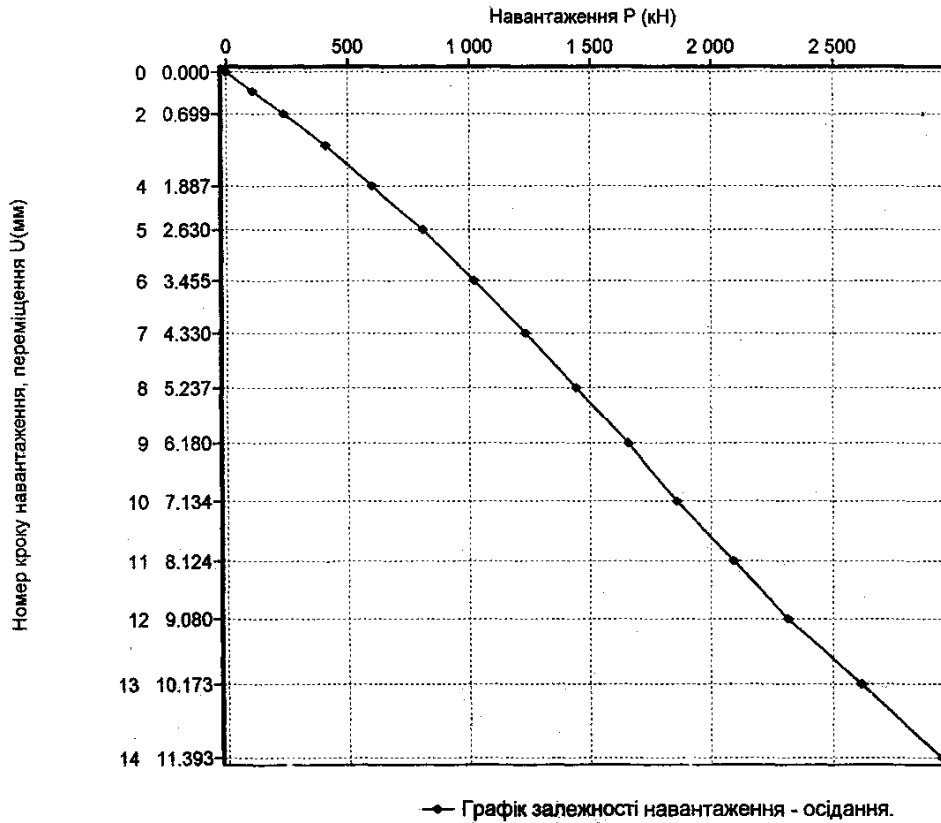


Рис. 2. Графік залежності «навантаження – осідання» для круглого фундаменту

Для визначення за МГЕ несучої спроможності кільцевого фундаменту, поданого на рис. 1, складено програму алгоритмічною мовою Delphi. Бокові поверхні контакту з ґрунтом кільцевого фундаменту та підшва дискретизувались постійними граничними елементами.

Розрахункове граничне рівняння МГЕ, що пов’язує  $\sigma - \varepsilon$  на границі (контактні поверхні фундаменту з ґрунтом):

$$cU + \int_{\Gamma} UG^* d\Gamma = \int_{\Gamma} qU^* d\Gamma, \tag{6}$$

де  $U, q$  – переміщення та напруження на границі фундаменту;  $U^*, G^*$  – фундаментальні розв’язки Р. Міндіна для пружної півплощини;  $c$  – коефіцієнт, що дорівнює 1/2 для постійних граничних елементів.

Матричний запис розрахункового граничного рівняння рівноваги можна подати в матричній формі:

$$A \cdot \vec{Y} = F, \tag{7}$$

де  $F$  – вектор переміщення,  $\vec{Y}$  – вектор шуканих зусиль на границі фундаментної конструкції ( $\tau_{s1}, \tau_{s2}$  – дотичні напруження на зовнішній та внутрішній бокових поверхнях кільцевого фундаменту та  $\sigma_e$  – нормальні напруження по його підшві);  $A$  – матриця впливу МГЕ, яки

компонували з розв'язків Р. Міндліна для пружної півплощини.

Матриця  $|A|$  для кільцевого фундаменту складалась із 9 підматриць, які формувались із фундаментальних розв'язків Р. Міндліна:

$$\begin{pmatrix} KS1S1 & KS2S1 & KBS1 \\ KS1S2 & KS2S2 & KBS2 \\ KS1B & KS2B & KBB \end{pmatrix} \bullet \begin{pmatrix} \tau_{s1} \\ \tau_{s2} \\ \sigma_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,01 \\ 0,01 \\ 0,01 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

де  $KS1S1, KS2S1, KBS1$  – переміщення вузлових точок граничних елементів (ГЕ) зовнішньої бокової поверхні від одиничних значень  $\tau_{s1}, \tau_{s2}, \sigma_e$ ;

$KS1S2, KS2S2, KBS2$  – переміщення вузлових точок ГЕ внутрішньої бокової поверхні кільцевого фундаменту від одиничних значень  $\tau_{s1}, \tau_{s2}, \sigma_e$ ;

$KS1B, KS2B, KBB$  – переміщення вузлових точок ГЕ підшви від одиничних значень  $\tau_{s1}, \tau_{s2}, \sigma_e$ .

Вектор  $F$  (права частина рівняння (7)) задали коли переміщення фундаменту складало 0,01 м.

Несуча спроможність кільцевого фундаменту за МГЕ за умови осідання 1 см склала 2185 кН. За даними прогнозного осідання за МГЕ круглого фундаменту, при  $s = 1$  см несуча спроможність 2600 кН (див. рис. 2). Та необхідно зазначити, що площа контакту по підшві круглого фундаменту складає 353 м<sup>2</sup>, а кільцевого фундаменту – всього лише 38,83 м<sup>2</sup>, тобто на порядок ( $\approx$  у 9,09 разів) більша, при цьому несуча спроможність кільцевого фундаменту всього на 16% менша.

### Висновки

Набув подальшого розвитку метод аналізу напружено-деформаційного стану круглих та кільцевих фундаментів, який враховує нелінійну поведінку ґрунту.

При обґрунтуванні доцільності вибору тієї чи іншої фундаментної конструкції кільцевий фундамент забезпечить при практично однаковій несучій спроможності значну економію витрат матеріалу.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бреббия К. Методы граничных элементов / Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. – М. : Мир, 1987. – 525 с.
2. Бойко І. П. Наружено-деформований стан ґрунтового масиву при побудові нових фундаментів поблизу існуючих будинків / І. П. Бойко, В. О. Сахаров // Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – К.: КНУБА. 2004. Вип. 28. – С. 3 – 10.
3. Николаевский В. Н. Современные проблемы механики ґрунтов / Николаевский В. Н. // Определяющие проблемы механики ґрунтов. – М.: Стройиздат, 1975. – 285 с.
4. Моргун А. С. Застосування МГЕ у розрахунках паль в пластичному середовищі ґрунту / Моргун А. С. – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2001. – 64 с.

**Моргун Алла Серафимівна** – завідувач кафедри промислового та цивільного будівництва, Вінницький національний технічний університет.

**Франчук Ольга Василівна** – магістрант інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання.

Вінницький національний технічний університет.