

УДК 519.642:624.044:624.15

А. С. Моргун, д-р. техн. наук, проф., О. В. Франчук, студ.

МЕТОД ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В РОЗРАХУНКАХ НЕСУЧОЇ СПРОМОЖНОСТІ КІЛЬЦЕВИХ ТА КРУГЛИХ В ПЛАНІ ФУНДАМЕНТНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Проведено порівняння несучої спроможності основи круглого та кільцевого фундаменту на основі розрахунку за числовим методом граничних елементів. Встановлено економічніший варіант фундаментної конструкції.

Вступ

Для забезпечення нормальної експлуатації важких відповідальних споруд проектується фундаменти глибокого закладання, в яких вертикальні зусилля від споруди сприймаються не лише площиною підшви фундаменту, а й боковою поверхнею за рахунок сил тертя.

Кільцеві та круглі фундаменти є одними з найпоширеніших фундаментних конструкцій, які застосовуються для бункерів, резервуарів, димових труб. При цьому фундаменти проєктуються з безперервним контактом їхньої підшви з основою.

Однією із актуальних задач фундаментобудування є розробка і впровадження сучасніших та економічніших методів розрахунку будівельних конструкцій (фундаменти складають значну їх частину), спрямованих на виявлення і реалізацію їх резервів.

Не дивлячись на уявну простоту, процеси, що відбуваються в ґрунтах, як об'єкт дослідження та контролю дуже складні. На теперішній час вивчено не всі аспекти механізму деформування ґрунтової основи під навантаженням.

Наукові дослідження в галузі механіки ґрунтів завжди були спрямовані на удосконалення методів проєктування основ і фундаментів. Для забезпечення надійності проєктування основ і фундаментів споруд необхідно враховувати у моделюванні складні і численні фізико-механічні характеристики ґрунтів.

Постановка задачі, визначальні співвідношення

Для аналітичного розгляду задачі формування математичного еквівалента поведінки матеріалу ґрунту під навантаженням використано механіку суцільних та пористих середовищ. Одночасна наявність в ґрунті зон, що мають як пружні так і пластичні властивості потребує для моделювання його поведінки залучення теорії пружності та теорії пластичності.

Відомо, що розв'язання змішаної задачі теорії пружності і теорії пластичності ґрунтів значно наближає до дійсності результати розрахунків осідань. Перехід до автоматизованих методів розрахунку різко змінив пріоритети в бік необхідності розробки достовірніших математичних моделей нелінійно деформованих ґрунтових масивів, складених із шарів із різними властивостями.

У розрахунку використано достатньо обґрунтовану нелінійну дилатансійну модель ґрунтової основи у поєднанні з числовим методом граничних елементів (МГЕ) та кроковою ітераційною процедурою. Модель враховує дилатансію ґрунту та одночасну наявність в ґрунтовій основі зон як граничного так і дограничного станів.

В пружних областях виконуються рівняння рівноваги та сумісності деформацій (геометричні рівняння). Залежність між σ та ϵ описується законом Гука. У разі роботи ґрунту в пластичній області крім звичайних диференціальних рівнянь рівноваги використано умову граничного стану ґрунтового середовища — залежність Мізеса–Шлейхера–Боткіна — залежність між $\tau_{\text{окт}}$ і $\sigma_{\text{окт}}$.

$$f = \begin{cases} \tau_{\text{окт}} + \sigma_{\text{окт}} \operatorname{tg} \psi - \tau_s = 0, & \text{якщо } \sigma_{\text{окт}} > \rho_0; \\ \tau_{\text{окт}} + \rho_0 \operatorname{tg} \psi - \tau_s = 0, & \text{якщо } \sigma_{\text{окт}} < \rho_0. \end{cases} \quad (1)$$

де $\tau_{\text{окт}}, \sigma_{\text{окт}}$ — інтенсивність дотичних напружень та гідростатичний тиск на октаедричній площині, ρ_0 — точка переходу від конуса до циліндра в умові Мізеса–Шлейхера–Боткіна, [1], τ_s — дотичні напруження, коли $\sigma_{\text{окт}} = 0$.

Для визначення залишкових деформацій Р. Мізесом була запропонована теорія пластичного потенціалу, яка встановлює залежність між напруженням і швидкістю пластичних деформацій.

Для описання ковзання ґрунту в пластичних зонах в роботі використано неасоційований закон пластичної течії, який є математичною ідеалізацією механізму поведінки матеріалу ґрунту :

$$d\epsilon^p = d\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{i,j}}, \quad F \neq f, \quad (2)$$

де F — пластичний потенціал — функція історії навантаження ґрунту, f — поверхня навантаження.

Пластичні ковзання ґрунту, тобто вплив пластичності ґрунту проявляється в розвитку переміщень і перерозподілі внутрішніх зусиль в елементах. Фундаментні конструкції «вміють» пристосовуватися, тобто, самостійно за рахунок нелінійних деформацій послаблювати зусилля в найнавантажениших місцях і передавати на менш навантажені.

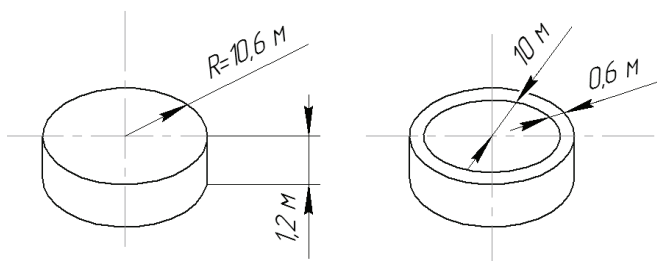


Рис. 1. Конструкція круглого та кільцевого фундаменту

На перерозподіл зусиль в кільцевих фундаментах суттєво впливає низка факторів. Зазвичай під перерозподілом зусиль розуміють відхилення дійсного перерозподілу зусиль від розподілу зусиль, отриманих із пружного розрахунку. Кількісну оцінку цього впливу в роботі проаналізовано на конкретному прикладі. До розгляду взято круглий фундамент $R = 10,6$ м та кільцевий фундамент з товщиною стінки $0,6$ м з одна-

ковою висотою $h = 1,2$ м та тим самим значенням зовнішнього радіусу (рис. 1).

Середньозважені дані інженерно-геологічних вишукувань ґрунтової основи наведені в табл.

Середньозважені характеристики шарів ґрунту

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

Примітки. Е — модуль деформації ґрунту ; φ — кут внутрішнього тертя; ρ — щільність ґрунту ; ν — коефіцієнт поперечного розширення; С — зчеплення; e — коефіцієнт пористості ґрунту.

В роботі за МГЕ спрогнозовано несучу спроможність основи круглого та кільцевого фундаменту, показаних на рис. 1.

Розміри прийнятого в розрахунок ґрунтового масиву взято такі, щоб за межами активної зони напружено-деформований стан (НДС) ґрунту не мав істотного впливу на НДС моделі. Дискретизація активної зони навколо фундаментного ґрунту включає задання підобластей трикутної форми (рис. 2). Дискретні елементи брались досить малими в місцях концентрації напружень для отримання прийнятних результатів.

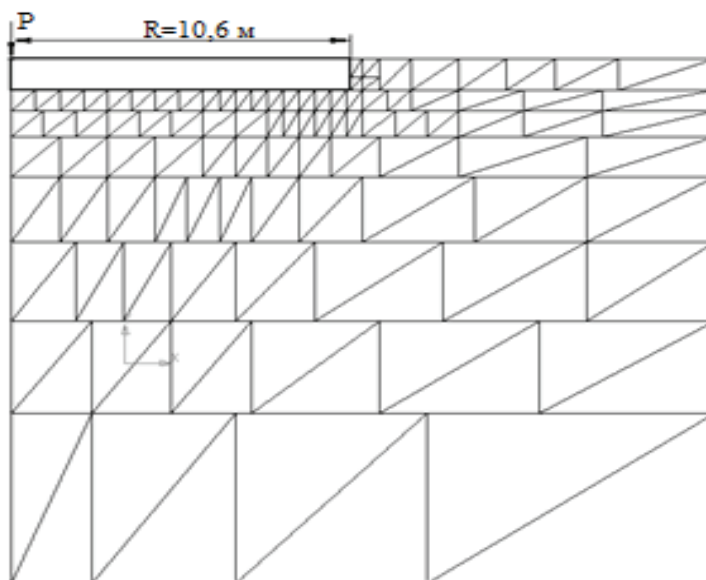


Рис. 2. Дискретизація активної зони ґрунту круглого фундаменту

Результати досліджень

Графік залежності «навантаження-осідання» для круглого фундаменту, отриманий за даними проведеного за МГЕ числового експерименту показаний на рис. 3.

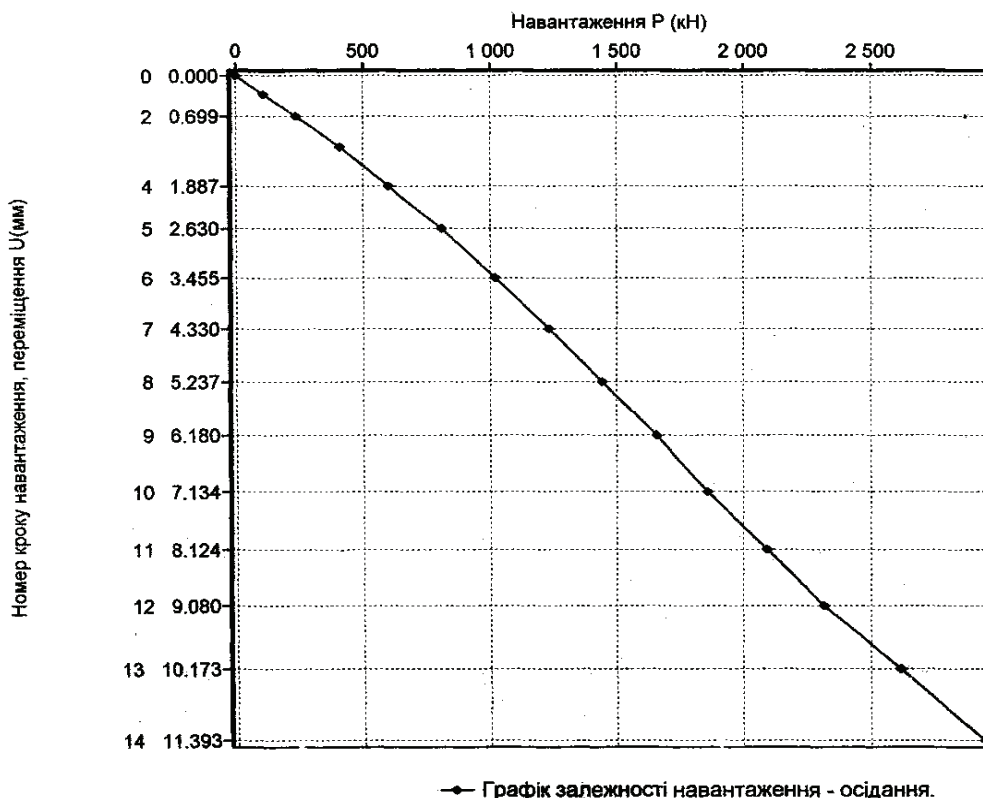


Рис. 3. Графік залежності P-S для круглого фундаменту

Для визначення за МГЕ несучої спроможності основи кільцевого фундаменту написано програму на алгоритмічній мові Delphi. Бокові поверхні контакту з ґрунтом кільцевого фундаменту та підшва дискретизувались постійними граничними елементами.

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

$$cU + \int_{\Gamma} UG^* d\Gamma = \int_{\Gamma} qU^* d\Gamma, \quad (3)$$

де U, q — переміщення та напруження на границі фундаменту; U^*, G^* — фундаментальні розв'язки Р. Міндліна для пружної півплощини; c — коефіцієнт, рівний $1/2$ для постійних граничних елементів.

Рівняння (3) можна подати в матричній формі

$$A \cdot \bar{Y} = F, \quad (4)$$

де F — вектор переміщення; \bar{Y} — вектор шуканих зусиль на границі фундаментної конструкції (τ_{s1}, τ_{s2} — дотичні напруження на зовнішній та внутрішній бокових поверхнях кільцевого фундаменту та σ_e — нормальні напруження по його подошві); A — матриця впливу МГЕ, компонувалась із розв'язків Р. Міндліна для пружної півплощини.

Матриця $|A|$ для кільцевого фундаменту складалась із 9 підматриць, які формувались із фундаментальних розв'язків Р. Міндліна, [1]:

$$\begin{vmatrix} KS1S1 & KS2S1 & KBS1 \\ KS1S2 & KS2S2 & KBS2 \\ KS1B & KS2B & KBB \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \tau_{s1} \\ \tau_{s2} \\ \sigma_e \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,01 \\ 0,01 \\ 0,01 \end{vmatrix}, \quad (5)$$

де $KS1S1, KS2S1, KBS1$ — переміщення вузлових точок граничних елементів (ГЕ) 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 подошви від одиничних значень $\tau_{s1}, \tau_{s2}, \sigma_e$.

Вектор F (права частина рівняння (5)) задавався при переміщенні фундаменту $0,01$ м.

Несуча спроможність основи кільцевого фундаменту за МГЕ з осіданням 1 см складала 2185 кН. За даними прогнозного осідання за МГЕ круглого фундаменту у разі $s = 1$ см, несуча спроможність 2600 кН (див. рис. 3). Необхідно відзначити, що площа контакту по подошві круглого фундаменту складає 353 м², а кільцевого фундаменту всього лише $38,83$ м², тобто на порядок (\approx в $9,09$ разів) більша.

Висновки

1. Таким чином, один із варіантів підвищення функціональної безпеки будівлі досягається переважно за рахунок підвищення несучої спроможності фундаментної конструкції.

2. Обґрунтовуючи доцільність вибору тієї чи іншої фундаментної конструкції, кільцевий фундамент за однакової несучої спроможності забезпечить значну економію витрат матеріалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Моргун А. С. Комп'ютерні технології розрахунку фундаментних конструкцій на основі методу граничних елементів / А. С. Моргун, І. М. Меть, А. В. Ніцевич. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. — 162 с. — ISBN 978-966-641-313-3.
2. Моргун А. С. Моделювання ефекту взаємодії системи «будівля–фундамент–основа» числовим методом граничних елементів / А. С. Моргун, І. М. Меть, А. В. Ніцевич. — Вінниця : ВНТУ, 2010. — 132 с. — ISBN 978-966-641-341-6.
3. Моргун А. С. МГЕ в розрахунках паль / А. С. Моргун. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. — 132 с. — ISBN 966-7199-96-7.

Рекомендована кафедрою промислового та цивільного будівництва

Стаття надійшла до редакції 20.06.12
Рекомендована до друку 11.10.12

Моргун Алла Серафимівна — завідувач кафедри промислового та цивільного будівництва;

Франчук Ольга Василівна — студентка Інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця