

## МЕХАНІКА КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ КІЛЬЦЕВИХ ФУНДАМЕНТІВ З ОСНОВАМИ ЗА МГЕ

Вінницький національний технічний університет

### Анотація

Тези присвячено актуальному питанню проектування основ і кільцевих фундаментів сучасних споруд, які є однією із самих складних задач в усьому комплексі проектування споруд. Проектувальник має справу з наявною дисперсною геологічною будовою та вельми неоднорідними фізико-механічними характеристиками ґрунтів майданчика забудови. Висока деформативність ґрунтів, яка визначає деформацію основи і будівлі в цілому, потребує удосконалення методів розрахунку фундаментних конструкцій. Адже відомо, що 75 % аварійних ситуацій в будівництві виникає внаслідок невірної оцінки міцності і деформативності ґрунтових основ. Кільцеві фундаменти глибокого закладання застосовують при будівництві унікальних споруд – з великим навантаженням на основу, а також при будівництві заглиблених приміщень будівель, підземних гаражів, пішохідних переходів і тунелів, відстойників, водозабірних споруд, мостових опор та інше.

**Ключові слова:** Числовий метод граничних елементів, кільцеві фундаменти, несуча спроможність

### Abstract

The thesis is devoted to the topical issue of designing bases and ring foundations of modern structures, which are one of the most difficult tasks in the entire complex of structure design. The designer has to deal with the existing dispersed geological structure and highly heterogeneous physical and mechanical characteristics of the soils of the construction site. The high deformability of soils, which determines the deformation of the foundation and the building as a whole, requires improved methods for calculating foundation structures. After all, it is known that 75% of construction accidents occur as a result of incorrect assessment of the strength and deformability of soil foundations. Deep-seated ring foundations are used in the construction of unique structures with a high load on the foundation, as well as in the construction of buried premises, underground garages, pedestrian crossings and tunnels, sumps, water intake structures, bridge piers, etc.

**Key words:** Numerical method of boundary elements, ring foundations, bearing capacity.

### Вступ

Фундаменти глибокого закладання різняться від фундаментів, що споруджуються у відкритих котлованах наступними специфічними особливостями:

- не потребують попередньої розробки котлованів;
- робота ґрунту під дією зовнішніх навантажень проходить по іншому ніж у фундаментах у відкритому котловані, так виключається випір ґрунту на поверхню;
- умова роботи фундаменту глибокого закладання дозволяє передавати на них значні горизонтальні навантаження і моменти;
- несуча спроможність таких фундаментів суттєво вища, так, як вертикальні навантаження сприймаються не лише ґрунтом під подошвою фундаменту, але і силами тертя, що розвиваються по внутрішні і зовнішні бокових поверхнях цих фундаментів.

На теперішній час використовуються наступні типи фундаментів глибокого закладання: опускні колодязі і кесони, глибокі опори (набивні стовпи), фундаменти, що споруджуються методом «стіна в ґрунті».

Найбільш типовим представником кільцевих фундаментів глибокого закладання є опускні колодязі та кесони.

В останні роки практика все частіше вимагає від інженера та дослідника в області механіки ґрунтів вміння будувати нові моделі дисперсних середовищ, розв'язувати задачі про поведінку таких середовищ під навантаженням. В зв'язку з цим стає все більш важливим глибоке розуміння

особливостей властивостей дисперсних середовищ (грунтових основ фундаментів споруд), а також і основного змісту основних концепцій і законів нелінійної дисперсної механіки ґрунтів та числового МГЕ.

Згідно сучасних нормативних документів, допустимі деформації на ґрунтову основу і споруду оцінюються по деформаціях, загрозливих з точки зору їх експлуатації. Осідання ґрунту 1-2 см практично відповідає ще лінійній стадії роботи ґрунту (фазі ущільнення), тим більше роботі наземних залізобетонних конструкцій, зусилля в яких на цьому етапі підкоряються закону Гука і принципу незалежності дії сил (принципу суперпозицій). В умовах експлуатації робота ґрунту в основах носить пружньо-пластичний характер, що приводить до нелінійної залежності графіка “навантаження - осідання”.



Рис. 1. Результати експериментальних досліджень залежності  $s = f(P)$

Графік “навантаження - осідання” показує наявність резервів, які не використовуються при проектуванні фундаментів згідно діючих норм в рамках лінійної їх роботи. Пружній розрахунок дає завищене значення корисного навантаження. Розрахунки по граничних станах дають можливість максимально використовувати несучу спроможність основ, завдяки чому досягається значний економічний ефект. Ґрунти сприймають зовнішнє навантаження по іншому, ніж суцільні тверді тіла, адже вони трифазові структури: тверді частинки, пори, вода.

Для сьогодення математичне прогнозування – одне із головних і найбільш економічних прийомів теоретичних і прикладних досліджень актуальних проблем фундаментобудування.

Математичною моделлю конструктивних елементів (фундаментів) підземної частини споруди на мікрорівні є система диференційних рівнянь в частинних похідних, що описує процеси в суцільних середовищах з заданими краєвими умовами.

Інженерні задачі механіки ґрунтів описуються еліптичними диференційними рівняннями в частинних похідних (класичними рівняннями Лапласа). Ці диференціальні рівняння в частинних похідних можна ефективно розв’язувати, використовуючи потенціал методу граничних елементів, який є продовженням розвитку числових методів скінчених елементів. На теперішній час це один з найбільш дійових числових методів розв’язання крайових прикладних задач геомеханіки. Перетворення розрахункової системи 15-ти диференційних рівнянь в частинних похідних (рівнянь рівноваги, геометричних, фізичних) в інтегральне рівняння (1) та пошук його числового розв’язку – суть МГЕ. При розгляді задачі визначення несучої здатності висячих суцільних паль та кільцевих паль (в тім числі, і кільцевих фундаментів глибокого закладання) розрахункове інтегральне рівняння рівноваги паль в ґрунті має вигляд [1,2]:

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

воно пов’язує значення переміщення  $U$  (потенціалу) і його нормальної похідної  $q = du/dx$  (поток) в кожному граничному вузлі на границі дослідної фундаментної конструкції.

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

Модель базується на теорії пластичної течії в формі неасоційованого закону, використання дилатансійних співвідношень В.Н. Ніколаєвського [3] та І.П. Бойка [4], процедури крокового навантаження по методу пружних рішень О.А. Ільюшина [4].

Основною розрахунковою характеристикою матеріалів є нормативний опір  $R_n$ . У якості нормативного опору для пластичних матеріалів приймається найменше значення межі текучості.

В якості критерія переходу роботи ґрунту в пластичний стан в роботі використано критерій Мізеса-Шлейхера-Боткіна, який в просторі головних напружень описується поверхнею, що складається із конічної та циліндричної частин, рис. 2.

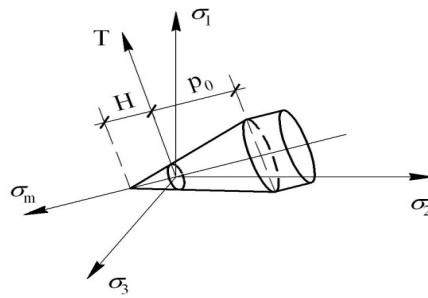


Рис. 2. Модифікований критерій текучості Мізеса-Шлейхера-Боткіна

Циліндрична частина критерію описує стан ґрунту, при досягненні в ньому максимальної щільності, рахується, що ґрунт в такому стані працює як суцільне середовище. Таким чином, пороговий характер пластичних деформацій:

$$\begin{aligned} f &= \sigma_i + \sigma_m \operatorname{tg} \psi - \tau_s & \text{при } \sigma_m \leq p_0, \\ f &= \sigma_i + p_0 \operatorname{tg} \psi - \tau_s & \text{при } \sigma_m > p_0, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\sigma_i$  – інтенсивність девіатора напруг;  $\sigma_m$  – гідростатичний тиск;  $\psi$ ,  $\tau_s$  – кут внутрішнього тертя та зчеплення на октаедричній площині,  $p_0$  – межа переходу від конуса до циліндра.

У використаній математичній моделі компоненти вектора приростів деформацій визначались згідно теорії пластичної течії та розглядались як сума приростів пружної та пластичної складових:

$$de_{ij} = de_{ij}^e + de_{ij}^p, \quad (3)$$

де  $de_{ij}^e$  – прирости пружної складової деформацій, що визначаються згідно закону Гука, прирости пластичних деформацій – за неасоційованим законом пластичної течії (4).

В роботі при моделюванні пористого середовища ґрунту використано неасоційований закон пластичної течії (4):

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

Для корегування напрямку вектора приростів пластичних деформацій  $d\varepsilon_{ij}^p$  використано співвідношення дилатансійної теорії ґрунтового середовища В. М. Ніколаєвського, І. П. Бойка [3,4]:

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

де  $d\varepsilon_{ij}^p(\text{шар})$  – приріст об'ємних деформацій при зсуві ґрунту

$d\gamma^p$  – приріст інтенсивності зсуву,  $\Lambda$  – швидкість дилатансії.

Поведінка системи “кільцева паля – основа” в роботі вивчалась з урахуванням зміни властивостей її елементів, локальних складових – вхідних параметрів системи. В моделі їх 28. Десять з них – це фізико – механічні характеристики ґрунту, решта описували геометрію дослідної фундаментної конструкції:

модуль деформації ґрунту  $E = 20.57$  МПа; коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0.307$ ; зчеплення  $c = 11$  кПа; кут внутрішнього тертя  $\varphi = 0.325$  рад.; щільність ґрунту  $\rho = 1.814$  кН/м<sup>3</sup>; мінімальна щільність ґрунту  $\rho_{\min} = 1.67$  кН/м<sup>3</sup>; максимальна щільність ґрунту  $\rho_{\max} = 2.2$  кН/м<sup>3</sup>; структурна щільність ґрунту  $\rho_s = 2.713$  кН/м<sup>3</sup>; октаедричне напруження (кПа) при переході з пружної в пластичну стадію роботи  $p_0 = -1890$  кПа.

При числовій реалізації (1) дискретизувалась лише контактна поверхня кільцевого фундаменту та ґрунту, контактна границя розбивалась на ряд граничних лінійних елементів, очікувана активна зона деформацій основи дискретизувалась трикутними осередками (рис. 4-7).

При дослідженнях за МГЕ несучої спроможності круглих та кільцевих опор на піску взято співвідношення внутрішнього радіуса ( $r$ ) до зовнішнього ( $R$ )  $r/R = 0,3; 0,4; 0,5$  (рис. 3) за умови рівності зовнішнього радіуса  $R = 5$  см.

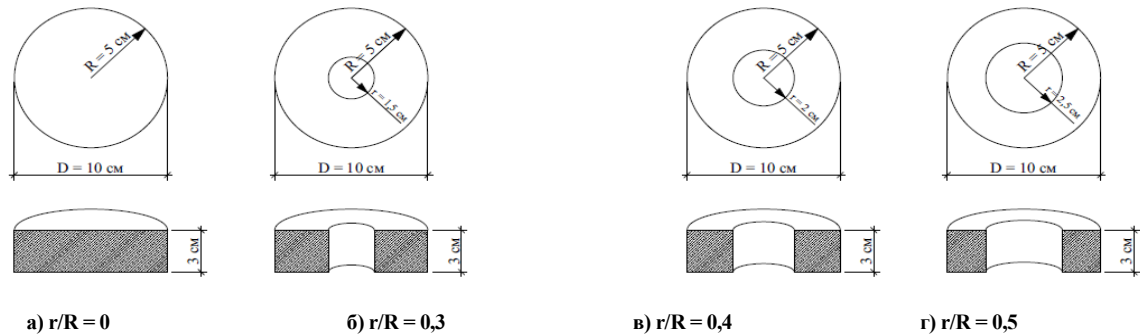


Рис. 3. Розглянуті види круглих та кільцевих опор

Дані числового розрахунку за МГЕ круглих та кільцевих опор наведено на рис. 4-7.

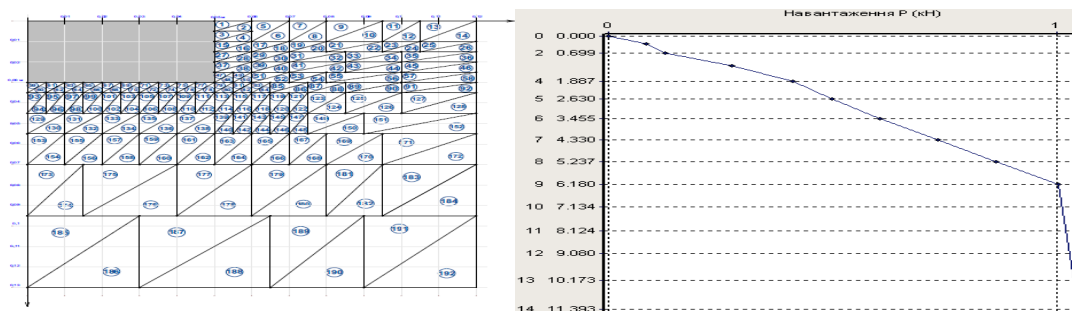


Рис. 4. Дискретизація активної зони та графік «навантаження-осідання» круглої опори

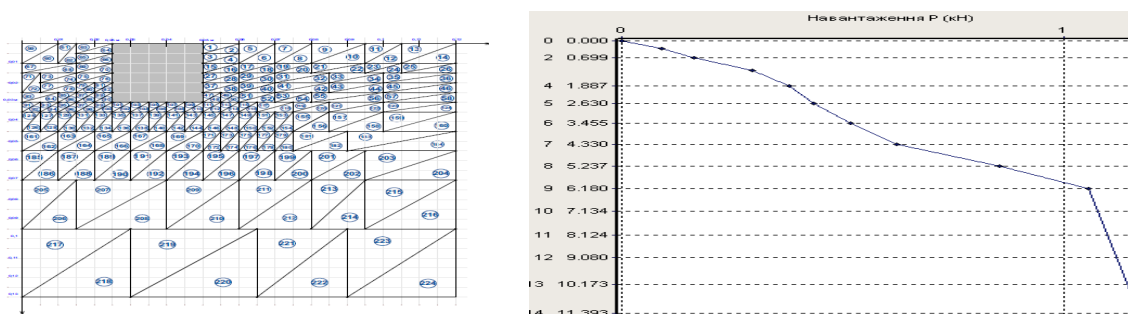


Рис. 5. Графік «навантаження-осідання» та дискретизація кільцевої опори ( $r/R = 0,3$ )

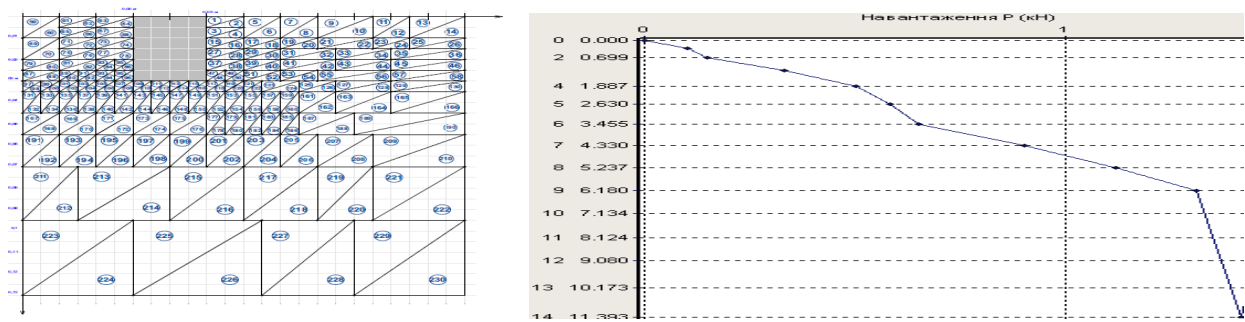


Рис. 6. Графік «навантаження-осідання» та дискретизація кільцевої опори ( $r/R = 0,4$ )

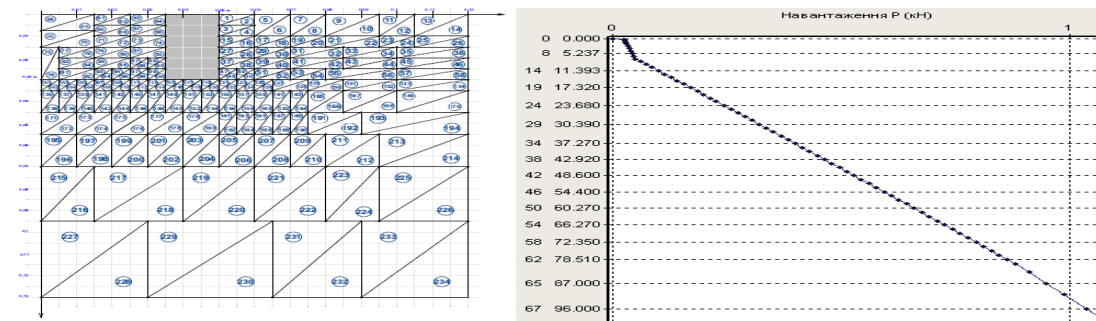


Рис. 7 – Графік «навантаження-осідання» та дискретизація кільцевої опори ( $r/R = 0,5$ )

## Висновки

1. Урахування в моделі пластичної поведінки ґрунту під навантаженням дало можливість встановити характерні закономірності перерозподілу зусиль в процесі взаємодії кільцевого фундаменту з основами за МГЕ. Із аналізу числового дослідження роботи кільцевих фундаментів на графіках на рис. 4 - 7 – несуча спроможність кільцевих фундаментів збільшується із збільшенням  $r/R$  в порівнянні із круговою опорою одного і того ж радіуса і сягає максимального значення при  $r/R = 0,4$ . Це співвідношення можна розглядати як оптимальне.

2. Несуча спроможність кільцевої опори в діапазоні відношення внутрішнього і зовнішнього радіусів  $0,4 \leq r/R \leq 1$  є найбільшою і вона більше, ніж у круглій опорі з аналогічними властивостями піску.

3. Проблема пошуку та використання єдиних підходів при аналізі поведінки систем фундаментних конструкцій, різних за геометрією, стає особливо актуальною нині завдяки швидкому розвитку ЕОМ та числових методів моделювання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Моргун А. С. Теорія пластичної течії в механіці ґрунтів // А. С. Моргун. – Вінниця : ВНТУ. – 2013 – 108с.
2. Brebbia K. Applications of MGE in engineering // K. Brebbia, S. Walker. -1982.
3. Ніколаєвський В. Н. Дилатансія та закони незворотного деформування ґрунтів / В. Н. Ніколаєвський // 36. Основи, фундаменти та механіка ґрунтів. - 1979. - № 5. - С. 29-31.
4. Бойко І. П. Напружено – деформований стан ґрунтового масиву при побудові нових фундаментів поблизу існуючих будинків // Основи і фундаменти. Міжвідомчий науково – технічний збірник. / І.П. Бойко, В.О. Сахаров. – К.: КНУБА, 2004 – С. 3 – 10.

Моргун Алла Серафимівна, д.т.н., проф, проф. каф. ПЦБ ФБЦЕІ ВНТУ, м. Вінниця, [morgunallaS@gmail.com](mailto:morgunallaS@gmail.com)

Меть Іван Миколайович, к.т.н., декан ФБЦЕІ ВНТУ, м. Вінниця, [met@vntu.edu.ua](mailto:met@vntu.edu.ua)

Мороз Сергій Миколайович, магістрант каф. ПЦБ ФБЦЕІ ВНТУ, м. Вінниця, [moroz\\_serg@gmail.com](mailto:moroz_serg@gmail.com)