

МЕТОДИКА ЧИСЛОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗА МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ (МГЕ) РОБОТИ КІЛЬЦЕВИХ ФУНДАМЕНТІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація. В роботі подано результати числових досліджень за МГЕ визначення несучої спроможності та деформативності круглої та кільцевої опор на піску, адже несуча спроможність фундаменту залежить і від його форми. Кільцеві фундаменти є найбільш підходящими і економічними для симетричних наземних споруд.

Ключові слова: кільцевий фундамент, числовий метод граничних елементів, нелінійна задача, напружено-деформований стан.

Abstract. The paper presents the results of numerical studies for the MBE determination of the reference pressure of the round and ring supports on the sand, because the bearing capacity of the foundation depends on its shape. Ring foundations are the most suitable and economical for symmetrical ground structures.

Keywords: ring foundation, numerical method of boundary elements, nonlinear problem, tense-deformed state.

На сьогоднішній день в промисловому та аграрному будівництві для зведення симетричних надземних споруд, таких як силоси, ангари, елеватори для зберігання зерна, зернові сушарки, вентиляційні та димові труби атомних реакторів, баштові градирні, резервуари та ін., використовують кільцеві фундаменти. Це зумовлено тим, що їх будівництво є більш економічним, а тримкість вищою, аніж у круглих фундаментах.

Тому виникає необхідність врахування кількісних та якісних відмінностей в роботі цих відповідальних конструкцій, особливості яких можуть вплинути на експлуатаційну здатність всієї інженерної споруди, та напрацювання достовірних методів прогнозування та розрахунку їх тримкості, що враховуватимуть складність їх конфігурації, нерегулярність фізичної структури ґрунту, нелінійність його роботи.

Вперше теорію оцінки граничної тримкості опори при зсувному руйнуванні запропонував австрійський та американський геолог та інженер-будівельник Карл Терцагі в 1943 році та модифікував її для різних типів фундаментів [1]. У 1970 році Волтер Хансон продовжив цю роботу [2]. Їх методи знаходять використання й досі. В ряді робіт приведені рішення по напружено-деформованому стані (НДС) основ під кільцевими штампами. Це роботи В.Г. Шаповала, В.Б. Швеця, К.Є. Єгорова, М.Н. Бородачова, Ю.Ф. Тугаєнка, С.І. Куцака [3] та ін.. Проте експериментальних даних про НДС таких фундаментів недостатньо [1-9], деколи вони носять суперечливий характер, а методи їх розрахунку недосконалі.

Одна із проблем фундаментобудування – створення надійних, науково обґрунтованих, методів розрахунку осідань фундаментів. Попередження руйнування є дуже важливою задачею будівництва, тому виникає потреба визначення кількісної міри міцності кільцевих фундаментних конструкцій та знаходження їх найбільш оптимального варіанту.

Тримкість фундаментів напряму пов'язана з їх формою, параметрами та ґрунтовими умовами. Урахування форми опор при дії вертикального навантаження, визначення переміщень та напружень на контактні кільцевого фундаменту та основи проводилось за числовим методом МГЕ з урахуванням глибини прикладання навантаження та передачі навантаження на ґрунт по внутрішній та зовнішній бокових поверхнях та по підшві кільцевого фундаменту. Використано аналітичні залежності Р. Міндліна для визначення переміщень та напружень від $P=1$ в півпросторі. Розрахункове інтегральне рівняння поведінки фундаментної конструкції в ґрунті, отримане К. Бреббія [4]:

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

де $p_{ij}^*(\xi, x), u_{ij}^*(\xi, x)$ – фундаментальні функції Р. Міндліна для напружень та переміщень, ξ – точка прикладання $P=1$, x – точка спостереження; $p_j(x)$ – шуканий вектор напружень на границі об'єкта, $u_j(\xi)$ – заданий вектор переміщень на границі об'єкта.

Для числової реалізації рівняння (1) записувалось в дискретній формі для кожного граничного вузла та обраховувались значення інтегралів за формулами подвійного числового інтегрування Гауса. В результаті отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь з n невідомими напруженнями в вузлах на границі кільцевого фундаменту.

Реакція кільцевого фундаменту на зовнішні дії розглядалась як динамічна зміна стану системи, в процесі якої вона прагне мінімізувати свою повну потенційну енергію.

Розв'язок нелінійної задачі базувався на використанні загальної ідеї методу пружних рішень О.А. Іллюшина та дилатансійних співвідношень В.М. Ніколаєвського, І. П. Бойка [5,6]:

$$d\varepsilon^P_{шар} = \lambda(\rho)d\gamma^P, \quad (2)$$

де $d\varepsilon^P_{шар}$ – скалярний еквівалент простору об'ємної деформації ґрунту (не пружних об'ємних деформацій); $d\gamma^P$ – інтенсивність приросту пластичної деформації зсуву; $\lambda(\rho)$ – коефіцієнт дилатансії.

Для визначення величини пластичних деформацій використано неасоційований закон пластичної течії [7]:

$$d\varepsilon_{ij}^P = \frac{\partial E}{\partial \sigma_{ij}}, F \neq f, \quad (3)$$

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

Для моделювання механіки контактної взаємодії круглих та кільцевих фундаментів з ґрунтовою основою та перебігу процесу їх деформування в якості вхідних параметрів розрахункової дилатансійної моделі використовуємо пісок з наступними характеристиками [8], наведеними в табл. 1:

Таблиця 1 – Геологічні характеристики піску

Відносна щільність	Кут внутрішнього тертя $C, ^\circ$	Питома щільність, $\gamma, \text{кН/м}^3$	Зчеплення, кПа	Максимальна питома щільність, кН/м^3	Мінімальна питома щільність, кН/м^3
55°	35	15	8	18,58	12,14

При дослідженнях за МГЕ несучої спроможності круглих та кільцевих опор на піску [8] взято співвідношення внутрішнього радіуса (r) до зовнішнього (R) $r/R = 0,3; 0,4; 0,5$ (рис. 1). За умови рівності зовнішнього радіуса $R = 5$ см.

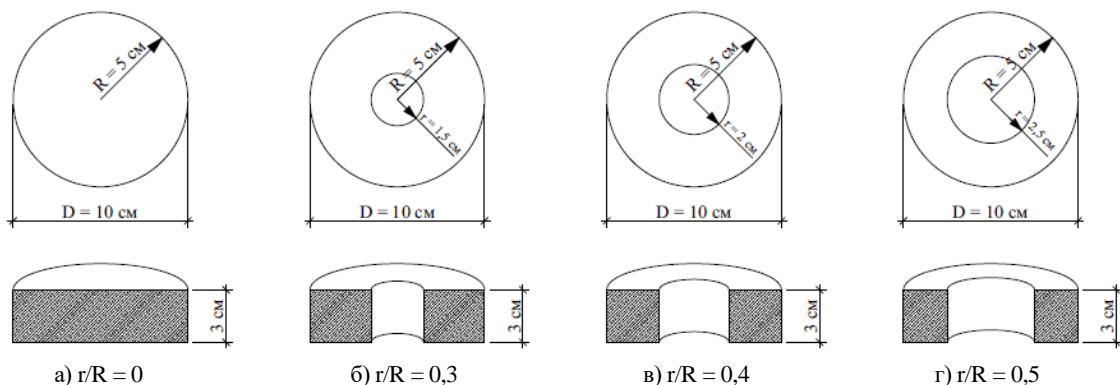


Рисунок 1 – Розглянуті види круглих та кільцевих опор

Скінченно-елементна схема розрахунку тримкості (несучої спроможності) основи та графік «навантаження-осідання» круглої опори наведено на рис. 2 (по вертикалі переміщення подано в мм). Порівняння даних в табл. 2.

Таблиця 2 – Порівняння числових (за МГЕ) та експериментальних даних несучої спроможності круглої опори

Відносна щільність, °	Осідання, см	Несуча спроможність P, кН	
		експериментальна	за МГЕ
55	5	0,67	0,64
	10	1,04	1,02

Графіки «навантаження-осідання» для кільцевих опор наведено на рис. 3 (по вертикалі переміщення подано в мм).

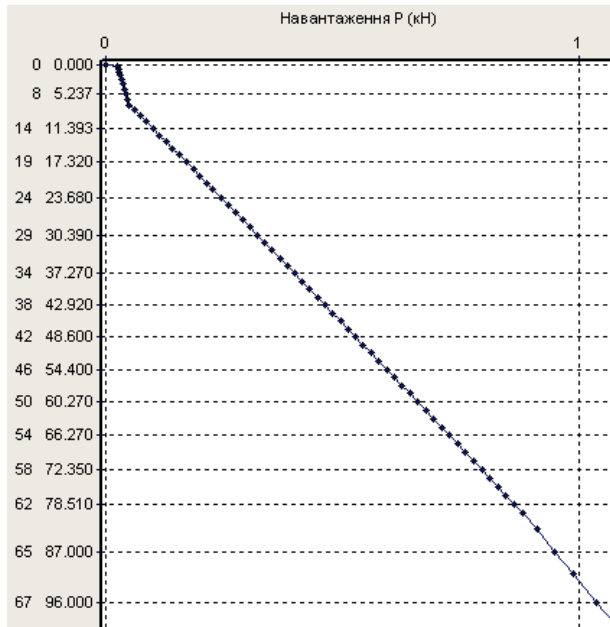


Рисунок 2 – Графік «навантаження-осідання» та дискретизація круглої опори

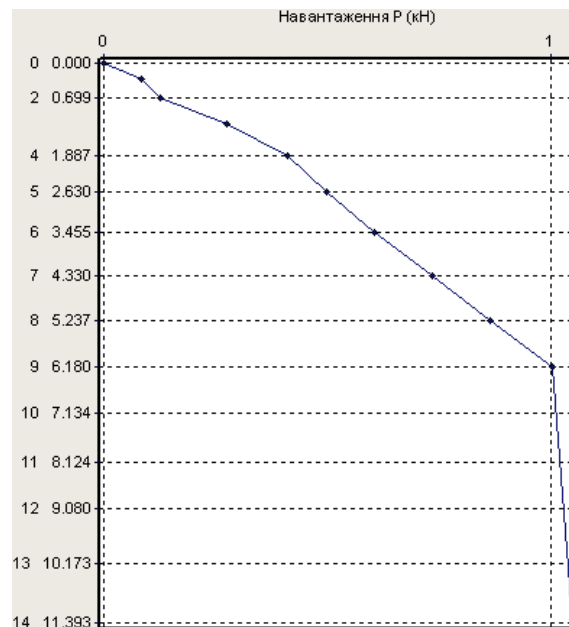


Рисунок 3,а – Графік «навантаження-осідання» та дискретизація кільцевої опори ($r/R = 0,3$)

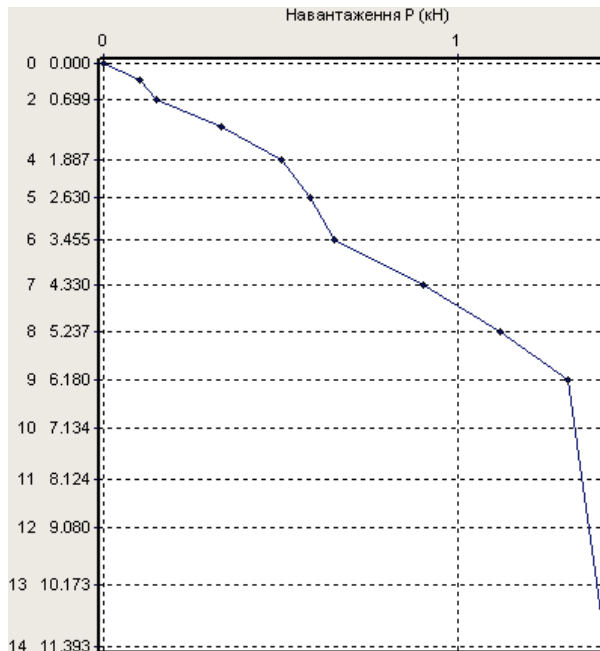


Рисунок 3,б – Графік «навантаження-осідання» та дискретизація кільцевої опори ($r/R = 0,4$)

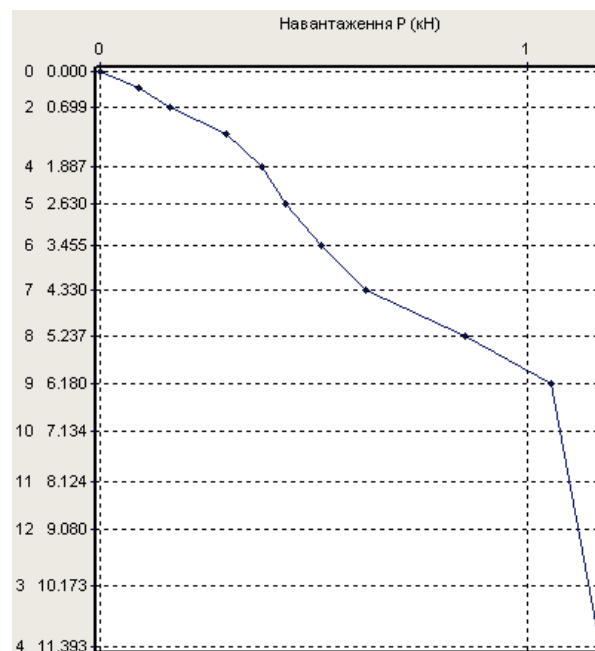


Рисунок 3,в – Графік «навантаження-осідання» та дискретизація кільцевої опори ($r/R = 0,5$)

Із графіків на рис. 3 – тримкість 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. При подальшому збільшенні r/R тримкість кільцевої опори зменшується. Отримані данні числового моделювання за МГЕ добре співпадають з результатами експериментальних досліджень [9].

Зменшення тримкості кільцевих опор при $r/R > 0,4$ в [9] пояснюється створенням додаткової внутрішньої поверхні руйнування зсуву, яку запропонували Дж. Терцагі та В. Хансен [1,2], рис. 4. Ця додаткова внутрішня поверхня руйнування зсуву починається від внутрішнього краю кільцевої опори та закінчується в кінці клиновидної зони поверхні зовнішнього зсувного руйнування, рис. 4.

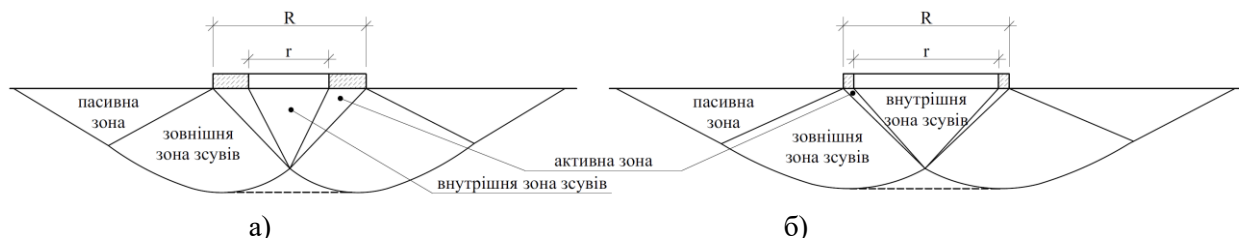


Рисунок 4 – Поверхня руйнування зсуву для кільцевої опори при а) $r/R = 0,3$ і б) $r/R = 0,5$

Отже, аналітичний прогноз напружено-деформованого стану запропонованої математичної моделі виявив відповідність експериментальним дослідженням геомеханічної системи «кільцевий фундамент - основа». Несуча спроможність кільцевої опори в діапазоні відношення внутрішнього і зовнішнього радіусів $0,4$ є найбільшою і вона більше, ніж у круглої опори з аналогічними властивостями піску.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Terzaghi, J. C., (1943), "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley, New Yourk.
2. Hansen, W. E., Peck, R.B. and Thornburn (1970), "Foundation Engineering", John Wiley and Sons, New York, U.S.A. 33. Limited. 589p.
3. Тугасенко Ю.Ф. Деформації основи кільцевих фундаментів / Ю.Ф. Тугасенко, С.І. Кушак // основи, фундаменти, механіка ґрунтів. – М. : Стройиздат, 1985. – С. 14-17.
4. Бреббиа К. Методи граничних елементів / К. Бреббиа, Ж. Теллес, Л. Вроубел. – М. : Мир, 1987. – 525 с.
5. Николаевский В. Н. Современные проблемы механики ґрунтов / В. Н. Николаевский // Определяющие законы механики ґрунтов. – М. : Стройиздат, 1975. – С. 210-227.
6. 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.
7. Моргун А. С. Нелінійні проблеми механіки ґрунтів : монографія / А. С. Моргун. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 122 с.
8. Моргун А. С. Метод граничних елементів в розрахунках кільцевих фундаментів : монографія / А. С. Моргун. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 117 с.
9. Hashim G. Rasheed Al-Sumaiday, Israa S. Hussain Al-Tikrity. Experimental Investigation of the Bearing Pressure for Circular and Ring Footings on Sand : Tikrit Journal of Engineering Sciences/Vol.20/No.3/March 2013, (64-74).

Моргун Алла Серафимівна – д.т.н., професор, завідувач кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: Alla@morgun.com.ua.

Малачковська Роксолана Ігорівна – аспірант, кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: roksimalachkovska@gmail.com.

Morgun Alla S. – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Construction, Urban and Architecture, National Technical University, Vinnitsa, e-mail: Alla@morgun.com.ua.

Malachkovska Roksolana I. – post-graduate, Department of Construction, Urban and Architecture, Vinnitsia National Technical University, Vinnitsa, e-mail: roksimalachkovska@gmail.com.