

УДК 519.642:624.044:624.15

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

## ДИАГНОСТИКА РАБОТЫ КОЛЬЦЕВОГО ФУНДАМЕНТА ПО МЕТОДУ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

За численным методом граничных элементов проведено прогнозирование несущей способности кольцевых и круглых фундаментов ответственных сооружений, проведено сравнение их работы, обоснован более целесообразный вариант фундаментной конструкции.

**Ключевые слова:** метод граничных элементов, кольцевые и круглые фундаментные конструкции, нелинейная стадия поведения грунта.

### Введение

Кольцевые и круглые фундаменты – наиболее распространённые фундаментные конструкции для таких ответственных конструкций, как: бункеры, дымовые трубы, резервуары.

Результаты мониторинга осадок зданий показывают значительные расхождения между их фактическими и расчетными значениями. Это объясняется условностью расчетных схем, неучетом процессов укрепления грунтов.

Прогнозирование напряженно-деформированного состояния системы "кольцевой фундамент – основа" возможно при ориентации на новые технологии расчета с применением средств численного моделирования, основанных на научных платформах, которые быстро развиваются и позволяют поднимать уровень адекватности.

В работе процедура моделирования базируется на методе граничных элементов (МГЭ). Свойство кольцевых фундаментов реализовывать несущую способность как по внутренней, так и по внешней боковой поверхностям и острию предоставляет кольцевым фундаментам значительное преимущество.

### Постановка задачи, определяющие соотношения

В статье исследованы особенности деформирования и несущей способности кольцевого фундамента и проведено сравнение с работой круглого фундамента таких же размеров (рис. 1).

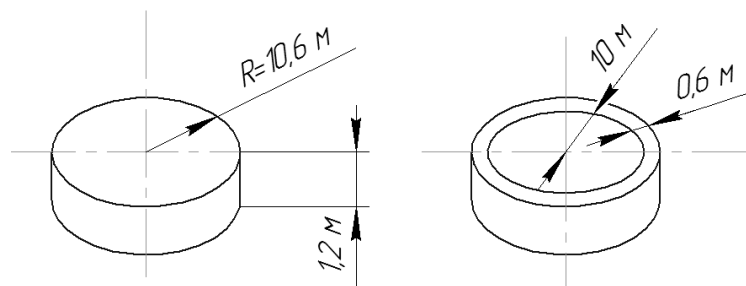


Рис. 1. Конструкция круглого и кольцевого фундамента

Расчетное интегральное уравнение поведения фундаментной конструкции в грунте, полученное К. Бреббия [1]:

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

где  $p_i(x)$  – искомый вектор напряжений на границе объекта;  $u_i(\xi)$  – заданный вектор

перемещений на границе объекта;  $p_{i,j}^*(\xi, x), u_{i,j}^*(\xi, x)$  – фундаментальные функции Р. Миндлина.

Для численного решения задачи привлечено МГЭ, механику сплошных и пористых сред. Одновременное наличие в почве зон, работающих как в упругой, так и в пластических стадиях, для моделирования её поведения необходимо использование теории упругости и пластичности.

Расчет круглого фундамента проведено по модели решения нелинейной задачи механики грунтов, основанной на нелинейной дилатансионной модели [2, 3]. Матричная запись интегрального предельного уравнения равновесия [1] предельного узла имеет вид:

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

где  $H = \int_{\Gamma} \rho^* \Phi d\Gamma$ ;  $G = \int_{\Gamma} U^* \Phi d\Gamma$  – интегралы по каждому граничному элементу боковой поверхности и нижней поверхности, которые исчисляются по схемам численного интегрирования двумерных квадратур Гаусса,  $G$  – матрица влияния МГЭ;  $U^*, \rho^*$  – ядра предельного уравнения, матрицы влияния Грина, в данной работе – это фундаментальные сингулярные решения Р. Миндлина;  $\Gamma, \xi, x$  – соответственно граница, точка возмущения, точка надзора;

$D = \int_{\Omega} \sigma^* \Phi^T d\Omega$  – матрице  $D$  соответствуют интегралы, включающие неупругие деформации.

В качестве критерия перехода к предельному состоянию принято обобщенный критерий Мизеса – Шлейхера – Боткина.

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

где  $\tau_{окт}, \sigma_{окт}$  – интенсивность касательных напряжений и гидростатическое давление на октаэдрической плоскости,  $\rho_0$  – точка перехода от конуса к цилиндру в условии Мизеса – Шлейхера – Боткина,  $\tau_s$  – касательные напряжения при  $\sigma_{окт} = 0$ .

Для определения величины пластических деформаций использован неассоциированный закон пластического течения [4].

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

где  $d\varepsilon^P$  – прирост тензора пластических деформаций грунта;  $d\lambda$  – скалярный множитель;  $F$  – пластический потенциал, функция истории деформирования;  $\sigma$  – тензор напряжений;  $f$  – поверхность нагрузки.

Для нахождения прироста тензора объемных деформаций использовано дилатансионное соотношение В. М. Николаевского, И. П. Бойко [2, 3]:

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

где  $d\varepsilon_{шар}^P$  – скалярный эквивалент прироста объемной деформации грунта (неупругих объемных деформаций);  $d\gamma^P$  – интенсивность прироста пластической деформации сдвига;  $\Lambda(\rho)$  – коэффициент дилатансии, который зависит от плотности грунта  $\rho$  и может принимать как положительные (дилатансия), так и отрицательные (контрактансия) [2, 3]

значения.

На рис. 2 показано числовой прогноз по МГЭ поведения круглого фундамента под нагрузкой.

Средневзвешенные показатели инженерно-геологических изысканий служили входными параметрами модели.

Таблица 1

Средневзвешенные характеристики слоев грунта

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

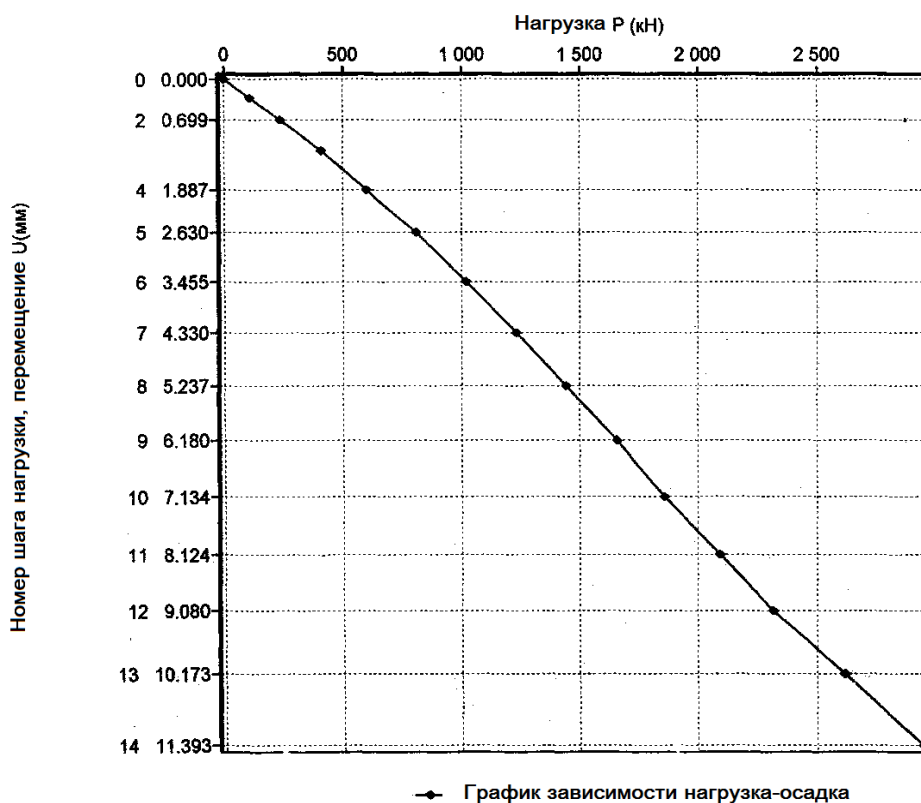


Рис. 2. График зависимости «нагрузка – осадка» для круглого фундамента

Для определения по МГЭ несущей способности кольцевого фундамента, представленного на рис. 1, составлена программа на алгоритмическом языке Delphi. Боковые поверхности контакта с грунтом кольцевого фундамента и подошва дискретизировались постоянными граничными элементами.

Расчетное предельное уравнение МГЭ, что связывает  $\sigma - \varepsilon$  на границе (контактной поверхности фундамента с грунтом):

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

где  $U, q$  – перемещения и напряжения на границе фундамента;  $U^*, G^*$  – фундаментальные решения Р. Миндлина для упругой полуплоскости;  $c$  – коэффициент, равный 1/2 для постоянных граничных элементов.

Матричную запись расчетного предельного уравнения равновесия можно представить в матричной форме:

$$A \cdot \vec{Y} = F, \quad (7)$$

где  $F$  – вектор перемещения,  $\vec{Y}$  – вектор искомых усилий на границе фундаментной конструкции ( $\tau_{s1}, \tau_{s2}$  – касательные напряжения на наружной и внутренней боковых поверхностях кольцевого фундамента и  $\sigma_e$  – нормальные напряжения по его подошве);  $A$  – матрица влияния МГЭ, которая компоновалась из решений Р. Миндлина для упругой полуплоскости.

Матрица  $|A|$  для кольцевого фундамента состояла из 9 подматриц, которые формировались из фундаментальных решений Р. Миндлина:

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

где KS1S1, KS2S1, KBS1 – перемещения узловых точек граничных элементов (ГЭ) внешней боковой поверхности от единичных значений  $\tau_{s1}, \tau_{s2}, \sigma_e$ ;

KS1S2, KS2S2, KBS2 – перемещения узловых точек ГЭ внутренней боковой поверхности кольцевого фундамента от единичных значений  $\tau_{s1}, \tau_{s2}, \sigma_e$ ;

KS1B, KS2B, KBB – перемещения узловых точек ГЭ подошвы от единичных значений  $\tau_{s1}, \tau_{s2}, \sigma_e$ .

Вектор  $F$  (правая часть уравнения (7)) задали, когда перемещение фундамента составляло 0,01 м.

Несущая способность кольцевого фундамента по МГЭ при осадке 1 см составила 2185 кН. По данным прогнозированной осадки по МГЭ круглого фундамента, при  $s = 1$  см несущая способность 2600 кН (см. рис. 2). Но необходимо отметить, что площадь контакта по подошве круглого фундамента составляет 353 м<sup>2</sup>, а кольцевого фундамента – всего лишь 38,83 м<sup>2</sup>, то есть на порядок ( $\approx$  в 9,09 раз) больше, при этом несущая способность кольцевого фундамента всего на 16% меньше.

### Выводы

Получил дальнейшее развитие метод анализа напряженно-деформационного состояния круглых и кольцевых фундаментов, учитывающий нелинейное поведение грунта.

При обосновании целесообразности выбора той или иной фундаментной конструкции кольцевой фундамент обеспечит при практически одинаковой несущей способности значительную экономию расхода материала.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреббия К. Методы граничных элементов / Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. – М. : Мир, 1987. – 525 с.
2. Бойко І. П. Наружно-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 грунтов / Николаевский В. Н. // Определяющие проблемы механики грунтов. – 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 Серафимовна** – заведуючий кафедрой промышленного и гражданского строительства.

**Франчук Ольга Васильевна** – магистрант института строительства, теплоэнергетики и газоснабжения.

Винницкий национальный технический университет.