

РОЗРАХУНОК КРУГЛИХ ФУНДАМЕНТНИХ ПЛИТ ПРИ СКЛАДНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Розроблено методичку розрахунку круглих фундаментних плит за реальними діаграмами деформування матеріалів, яка підвищує достовірність результатів розрахунку.

Ключові слова: *кругла фундаментна плита, нерівномірні деформації підвалини, контактні напруження, переміщення поверхні підвалини.*

Постановка проблеми. Круглі фундаментні плити, що розглядаються в цій роботі, використовують як фундаментні конструкції для баштових споруд. Навантаження від споруд на них передаються через конічну оболонку у вигляді радіальних і кільцевих сил та моментів. Такі будівлі і споруди широко розповсюджені не тільки на територіях з міцними та надійними ґрунтами, але й на територіях із складними інженерно-геологічними умовами, коли підвалини під будівлями, що експлуатуються, можуть піддаватися додатковим, незалежним від зовнішнього навантаження деформаціям.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Територія України на 90% характеризується складними ґрунтовими умовами будівництва, де спостерігаються різні форми осідання земної поверхні за рахунок виймання корисних копалин, карстів, слабких просідаючих чи набухаючих ґрунтів, тощо. За таких умов початкове осідання відбувається нерівномірно або можливі інші деформаційні ґрунтові процеси, що не залежать від ваги будівлі, та здатні несподівано виникати протягом усього періоду експлуатації. Тому в складних умовах небезпека для будівель і непередбачуваність деформаційних ґрунтових процесів у підвалинах вища, ніж у звичайних умовах [1, 2].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на таке широке використання фундаментів зазначеного типу (для димових труб, водонапірних башт, силосів і т.д.), дослідження, присвячені проблемі врахування спільної роботи цих фундаментів з основою, носять фрагментарний характер. Існуючі методи розрахунку не досить точно відображають вплив найважливіших факторів та майже не враховують нелінійність роботи як залізобетону, так і підвалини.

Постановка завдання. Врахування реальних умов експлуатації, у тому числі й режимів навантаження, характеру силових та деформаційних впливів, дозволить підвищити достовірність результатів розрахунку круглих фундаментних плит.

Основний матеріал і результати. Більшість ґрунтів деформуються нелінійно та непружно, їх жорсткісні характеристики залежать від величин тисків (p), що діють на них, і визначаються як тангенс кутів нахилу до осі осідання (S), проведених з початку координат до точки на кривій деформування із заданими абсцисами p (рис. 1).

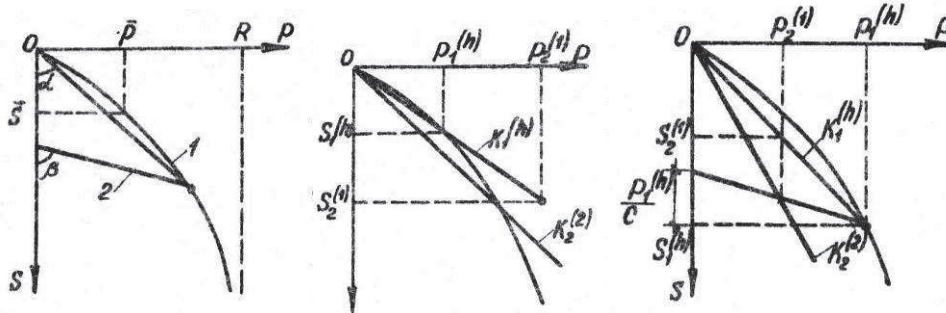
Деформації ґрунту не пов'язані із зовнішнім навантаженням, відображаються у розрахунковій схемі відповідними значеннями вертикальних і горизонтальних переміщень поверхні основи. Поздовжні сили стискання – розтягнення по підшві фундаменту від горизонтальних деформацій замінюються еквівалентними радіальними та коловими.

Графік деформування ґрунту будується за результатами штампових дослідів на стиск, і його необхідно апроксимувати залежністю виду

$$S = f(p) \quad (1)$$

або

$$p = f^{-1}(S). \quad (1a)$$



**Рисунок 1 – Схеми до перерахунку коефіцієнтів жорсткості підвалини:
1 – гілка навантаження, 2 – гілка розвантаження.**

Тоді коефіцієнт жорсткості підвалини обчислюють за формулою:

$$k = \frac{p}{S} = \frac{p}{f(p)}, \quad (2)$$

або

$$k = \frac{p}{S} = \frac{f^{-1}(S)}{S}. \quad (2a)$$

В окремому випадку, якщо діаграму деформування ґрунту апроксимують гіперболічною залежністю [2]

$$S = \frac{p \cdot \bar{S} \cdot (R/\bar{p} - 1)}{R - p}, \quad (3)$$

тоді коефіцієнт жорсткості буде визначатися за допомогою виразу:

$$k = \frac{R}{S + \bar{S} \cdot (R/\bar{p} - 1)}. \quad (4)$$

У цих формулах: R – граничний тиск на підвалину; \bar{S} – осідання при середньому тиску по підшві фундаменту p .

Непружні властивості ґрунту враховуються у випадку, коли і після впливів виникає зниження контактних тисків від величини p_1 до p_2 . Тоді коефіцієнт жорсткості буде визначатися за формулою

$$k = \frac{p_2}{S_1 - (p_1 - p_2)/c}, \quad (5)$$

де S_1 – осідання при тиску p_1 ; c – коефіцієнт жорсткості при розвантаженні, він є величиною постійною та визначається як тангенс кута нахилу кривої розвантаження до осі осідання.

Несуча здатність і жорсткість підвалини перебувають у певній залежності від величини деформації ґрунту. Знижені значення характеристик послабленої ділянки обчислюються згідно з вимогами нормативних документів [3-4] та роботи [5].

Контактні напруження залежать від жорсткості фундаментної конструкції. Для круглих плит, деформації яких описуються технічною теорією тонких пластин, жорсткість

визначається напружено-деформованим станом елемента, тобто стадією роботи (лінійно-пружна, пружно-пластична без тріщин, пружно-пластична з тріщинами та гранична). Після виникнення тріщин жорсткість залізобетонного елемента більшою мірою визначається арматурою, тому для правильного розв'язання контактної задачі необхідно попередньо призначити геометричні розміри та армування плити з лінійно-пружного розрахунку. Стадія роботи та діаграма деформування кожної точки цілком визначаються механічними характеристиками бетону й арматури, розташуванням арматури та коефіцієнтом армування.

Як уже було зазначено, на круглі плити, що служать фундаментами для баштових споруд, діють не тільки сили, нормальні до середньої поверхні, але й моменти, а також мембранні сили. При визначенні напружено-деформованого стану плити будемо виходити з того, що сили, які діють у її площині, не впливають на її згин, але при розрахунку враховуються всі діючі силові та деформаційні фактори. Таким чином, згин плити буде описуватися через функцію прогинів w , а плоскопружний стан – через функцію напруження ψ . Ці розв'язувальні рівняння записуються таким чином:

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial^2}{\partial r^2} \left(r D_r \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{D_v}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} + D_v \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{D_\varphi}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} + \frac{D_\varphi}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + D_v \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right) + \\ & + \frac{2}{r} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \varphi} \left(-D_{r\varphi} \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial \varphi} + \frac{D_{r\varphi}}{r} \frac{\partial w}{\partial \varphi} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \left(\frac{D_\varphi}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} + \frac{D_\varphi}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + D_v \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right) + \\ & + \frac{\partial(r m_r)}{\partial r} + \frac{\partial m_\varphi}{\partial \varphi} + r(q_n - k w) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & (r^2 + 1) \frac{\partial^2}{\partial r^2} \left[B_\varphi \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - r q_\varphi \varphi \right) + B_v \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{r}{2} q_r - \frac{r}{2} q_\varphi \varphi \right) \right] + \\ & + \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \left[B_r \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{r}{2} q_r - \frac{r}{2} q_\varphi \varphi \right) + B_v \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - r q_\varphi \varphi \right) \right] - \\ & - r \frac{\partial^2}{\partial r \partial \varphi} \left[B_{r\varphi} \left(-\frac{1}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial \varphi} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[B_{r\varphi} \left(-\frac{1}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial \varphi} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} \right) \right] + \\ & + 2r \frac{\partial}{\partial r} \left[B_\varphi \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - r q_\varphi \varphi \right) + B_v \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{r}{2} q_r - \frac{r}{2} q_\varphi \varphi \right) \right] - \\ & - r \frac{\partial}{\partial r} \left[B_r \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{r}{2} q_r - \frac{r}{2} q_\varphi \varphi \right) + B_v \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - r q_\varphi \varphi \right) \right] - \\ & - \frac{\partial^2}{\partial r^2} \left[B_{r\varphi} \left(-\frac{1}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial \varphi} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

де $D_r, D_\varphi, D_v, D_{r\varphi}$ – жорсткості плити;

$$D_v = 0,5 \cdot \nu_b (D_r + D_\varphi), \quad D_{r\varphi} = 0,5 \cdot (1 - \nu_b) (D_r + D_\varphi); \quad (8)$$

$$B_v = 0,5 \cdot \nu_b (B_r + B_\varphi);$$

$$B_{r\varphi} = (1 + \nu_b) (B_r + B_\varphi); \quad (9)$$

$$B_r = B_\varphi = B_n = \frac{1}{E_b h},$$

де q_r, q_φ, q_n – сили, що діють уздовж координатних ліній r, φ, n (n – нормаль до середньої поверхні); m_r та m_φ – зовнішні моменти, віднесені до середньої поверхні; E_b, ν_b – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона бетону; h – товщина плити.

Тоді зусилля плоскопружного стану, що виражаються через функцію напруження, записуються так [6]:

$$\left. \begin{aligned} N_r &= \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{r}{2} q_r - \frac{r}{2} q_\varphi \varphi \right) \cdot h \\ N_\varphi &= \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - r q_\varphi \varphi \right) \cdot h \\ N_{r\varphi} &= \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial \varphi} \right) \cdot h \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

а моментні зусилля – через деформації згину:

$$\left. \begin{aligned} M_r &= D_r \chi_r + D_v \chi_\varphi \\ M_\varphi &= D_\varphi \chi_\varphi + D_v \chi_r \\ M_{r\varphi} &= D_{r\varphi} \chi_{r\varphi} \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

де

$$\left. \begin{aligned} \chi_r &= -\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \\ \chi_\varphi &= -\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \\ \chi_{r\varphi} &= -\frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial \varphi} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \varphi} \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Поперечні сили визначаються через моментні зусилля:

$$\left. \begin{aligned} Q_r &= -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r M_r) - \frac{1}{r} \frac{\partial M_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} M_\varphi - m_r \\ Q_\varphi &= -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r M_{r\varphi}) - \frac{1}{r} \frac{\partial M_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{1}{r} M_{r\varphi} - m_\varphi \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

Розв'язання контактної задачі в особливих ґрунтових умовах ускладнюються тим, що обидва компоненти системи є анізотропними. Точного розв'язку можна досягти лише шляхом послідовних наближень ітераційним способом. Як умову збіжності будемо приймати різницю в кривизнах для двох сусідніх наближень, тому що зміна зусиль у конструкції від зміни деформації більша, ніж від зміни характеристик жорсткості підвалини.

Для розрахунку фундаментних конструкцій баштових споруд у складних ґрунтових умовах найбільш ефективним методом є метод кінцевих різниць, при цьому диференційні розв'язувальні рівняння замінюють системою скінченнорізницевих та лінійно-алгебраїчних рівнянь, які швидко розв'язуються за допомогою комп'ютера. Інша позитивна сторона методу сіток полягає в тому, що в складних ґрунтових умовах нерівномірна (не пов'язана з навантаженням від споруди) деформація підвалини описується дискретною функцією, що ускладнює розв'язок у диференційній формі, тоді як для методу сіток важливі значення тільки в кінцевих точках.

Якщо функцію вертикальних переміщень поверхні підвалини відносно координатної площини позначити через η , то повні вертикальні переміщення точок середньої площини плити відносно координатної площини w_2 будуть визначатися виразом [7]

$$w_2(r, \varphi) = \eta(r, \varphi) + Z(r, \varphi), \quad (14)$$

де $Z(r, \varphi)$ – переміщення точок середньої поверхні плити відносно поверхні деформування підвалини.

Тоді в рівнянні (6) замість осідань фундаменту w необхідно підставити значення повних переміщень фундаменту $w_2 = \eta + Z$.

Зовнішні силові навантаження на плиту визначаються як опорні реакції (сили і моменти) при розрахунку конічної оболонки від дії вертикальних навантажень F та зовнішнього моменту m . Верхня споруда замінюється безкінечно жорсткою діафрагмою, тоді зовнішні навантаження (F та m) передаються на оболонку у вигляді контурних вертикальних тисків, значення яких обчислюється за формулою

$$q_b = \frac{F}{A_g} + \frac{m \cdot \cos \varphi}{W_g}, \quad (15)$$

де A_d та W_d – площа й момент опору поперечного перерізу верхнього контуру оболонки.

Оболонку необхідно розраховувати варіаційно-різницеvim методом або методом кінцевих різниць, зводячи системи основних рівнянь (статичних, геометричних і фізичних) до однієї системи двох розв'язувальних рівнянь із двома невідомими функціями: функція прогинів уздовж нормалі до середньої поверхні оболонки та функція напружень. У результаті визначають нормальні, радіальні, кільцеві сили й моменти.

Тиск по підшві фундаменту в кожній точці визначається виразом

$$p = \frac{F+G}{A} + \frac{m \cdot \rho \cdot \cos \varphi}{W}, \quad (16)$$

де A та W – площа й момент опору плити; G – власна вага фундаменту з урахуванням ґрунтових умов; $\rho = r/R_n$ – безрозмірна координата точки; r та φ – її координати; R_n – радіус плити.

Знаючи значення реактивних тисків, за діаграмою деформування ґрунту (тобто за залежністю (1)) визначають коефіцієнти жорсткості підвалини за формулою (2). На ділянках (в точках) нульових та від'ємних значень реактивних тисків коефіцієнти жорсткості приймаються такими, що дорівнюють нулю.

Характерні значення кривизни обчислюють за вимогами нормативного документа [8].

Висновки. Розроблена методика розрахунку круглих фундаментних плит в умовах нерівномірних деформацій підвалини, що враховує нелінійні та непружні властивості залізобетону та ґрунту, а також геометричну нелінійність контактної задачі, дозволяє:

– визначити не тільки дійсний напружено-деформований стан фундаментних плит в умовах нерівномірних деформацій підвалини, а й виконати перевірний розрахунок цих плит, тобто визначити граничні силові та деформаційні впливи на них;

– установити вплив різних видів деформування підвалини (викривлення поверхні підвалини, виникнення уступу біля торця фундаменту) на напружено-деформований стан фундаментної плити.

Література

1. Кривошеев П.И. Проблемы строительства и защиты зданий и сооружений на подрабатываемых территориях на современном этапе / Кривошеев П.И. // Современные проблемы строительства: сб. тр. – Донецк: Донецкий ПромстройНИИпроект, ООО «Лебедь», 1999. – С. 143 – 144.
2. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення / НДІБК. – К.: НДІБК, 2009. – 72 с.
3. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування / НДІБК. – К.: НДІБК, 2009. – 161 с.
4. Методические рекомендации по учету нелинейных свойств основания при расчете конструкций по реальным диаграммам деформирования грунта / НИИСК. – К.: НИИСК, 1985. – 61 с.

5. Исследование несущей способности и податливости подрабатываемых оснований / Фадеев А.Б., и др. // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1986. – № 2. – С. 21 – 23.
6. Кончковский З. Плиты. Статические расчеты. / пер. с пол. М.В. Предтеченского; под ред. А.И. Цейтлина. – М.: Стройиздат, 1984. – 480 с.
7. Тімченко Р.О. Проектування і розрахунок урівноважуючих плитних фундаментів: Навч. посіб. для вищ. навч. заклад. / Тімченко Р.О. – Кривий Ріг: Мінерал, 2005. – 82 с.
8. Руководство по проектированию плитных фундаментов каркасных зданий и сооружений башенного типа /НИИОСП. – М.: Стройиздат, 1984. – 263 с.

Р.А. Тимченко, д.т.н., проф.

Д.А. Кришко, к.т.н., ст. преп.

А.В. Богатынский, асп.

ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

РАСЧЕТ КРУГЛЫХ ФУНДАМЕНТНЫХ ПЛИТ ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ

Разработана методика расчета круглых фундаментных плит по реальным диаграммам деформирования материалов, которая повышает достоверность результатов расчетов.

Ключевые слова: *круглая фундаментная плита, неравномерные деформации основания, контактные напряжения, перемещения поверхности основания.*

R.O. Timchenko, D.Sc., prof.

D.A. Krishko, Ph.D.,

A.V. Bogatynsky, postgraduate.

Kryvyi Rih National University

ROUND FOUNDATION CALCULATION IN CASE OF COMPLEX LOADING

This paper is devoted to method creating of round foundation calculation based on nature materials` deformation diagrams. This method increase reliability of calculation results.

Keywords: *round foundation slab, non-uniform bedding deformation, contact tensions, bedding surface displacements.*

Надійшла до редакції 17.10.2014

© Р.О. Тімченко, Д.А. Кришко, А.В. Богатинський