

СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА

УДК 624.151

М. С. Грицук, Ryszard Hulboj, А. М. Грицук

РАЦИОНАЛЬНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ ДЛЯ УСТРОЙСТВА СБОРНЫХ И МОНОЛИТНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ ФУНДАМЕНТОВ

UDC 624.151

M. S. Hrytsuk, Ryszard Hulboj, A. M. Hrytsuk

RATIONAL DESIGN MODELS OF SOIL FOUNDATIONS FOR PRECAST AND IN-SITU CONTINUOUS FOOTINGS

Аннотация

Излагается определение несущей способности грунтового основания выпуклого профиля для устройства сборных или монолитных ленточных фундаментов с плоской подошвой. За счет более рационального распределения реактивного давления конструкции ленточных фундаментов являются более экономичными, чем типовые.

Ключевые слова:

нагрузка, грунт, уравнение, расчетная схема, основание, ленточный фундамент, давление, напряжения, перемещения, фундаментная плита, экономический эффект.

Abstract

The paper deals with determining the bearing capacity of soil foundation having a convex profile for precast or in-situ continuous footings with a flat foundation bed. It is established that because of the more rational distribution of soil pressure the designs of continuous footings are more cost-effective, than the typical ones.

Key words:

load, soil, equation, design model, foundation, continuous footing, pressure, stresses, displacements, foundation plate, economic effect.

Введение

Известны исследования [1] по определению напряженно-деформированного состояния плит ленточных фундаментов с выпуклой (криволинейной или призматической) формой опирания, которые являются более экономичными, чем типовые. При этом здесь установлено, что при неравномерном распределении реактивного давления под фунда-

ментными плитами с выпуклой подошвой (от 0 по краям и до максимального значения в центре плиты) предельная несущая способность грунта значительно больше, чем под плитами с плоской подошвой, определенной по данным нормы [2]. Это дает возможность уменьшить ширину фундаментных плит и, тем самым, получить дополнительный экономический эффект.

Такой же экономический эффект можно получить, используя типовые плиты на грунтовых основаниях рациональной формы. Для этого подготовка грунтового основания устраивается из крупного или гравелистого песка по ширине фундамента в виде параболы или трапеции (рис. 1). Наиболее рациональное распределение реактивного давления будет, если по центру оно будет максимальным, а по краям меньше или равным нулю. Чтобы получить такую эпюру реактивного давления, необходимо определить высоту и форму песчаной подготовки. При этом при полной нагрузке фундамент на грунт должен опираться по всей его ширине.

**Определение
напряженно-деформированного
состояния грунтового основания**

Для решения задачи используются физические, геометрические и статические уравнения теории упругости:

– физические уравнения:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E_0}{1-\mu^2} (\varepsilon_x + \mu \varepsilon_y); \\ \sigma_y &= \frac{E_0}{1-\mu^2} (\varepsilon_y + \mu \varepsilon_x); \\ \tau_{xy} &= \frac{E_0}{2(1+\mu)} \gamma_{xy};\end{aligned}\quad (1)$$

– геометрические уравнения:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x};\end{aligned}\quad (2)$$

– дифференциальные уравнения равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0;$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \gamma = 0, \quad (3)$$

где γ – объемный вес грунта, кН/м³; $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ – напряжения в плоской системе координат, кПа; E_0 – модуль деформации грунтового основания, МПа; μ – коэффициент Пуассона; u и v – перемещения по осям x и y , м.

Записанную систему из восьми уравнений с восемью неизвестными можно привести к системе из двух уравнений в перемещениях. Для этого необходимо подставить (2) в (1), а затем в (3). В результате получим

$$\begin{aligned}&\frac{E_0}{1-\mu^2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\mu E_0}{1-\mu^2} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \\&+ \frac{E_0}{2(1+\mu)} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right) = 0; \\&\frac{E_0}{1-\mu^2} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\mu E_0}{1-\mu^2} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \\&+ \frac{E_0}{2(1+\mu)} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) = 0.\end{aligned}\quad (4)$$

Для решения системы (4) можно использовать метод конечных разностей (МКР). Для этого частные производные заменялись конечными разностями в виде [3]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial x} &= (u_{i+1,j} - u_{i-1,j}) / 2\Delta x; \\ \frac{\partial v}{\partial y} &= (v_{i,j+1} - v_{i,j-1}) / 2\Delta y;\end{aligned}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{u_{i+1,j} + u_{i-1,j} - 2u_{i,j}}{\Delta x^2};$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{v_{i,j+1} + v_{i,j-1} - 2v_{i,j}}{\Delta y^2};$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} = \frac{u_{i+1,j+1} + u_{i-1,j-1} - u_{i+1,j-1} - u_{i-1,j+1}}{4\Delta x \Delta y}; \quad \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} = \frac{v_{i+1,j+1} + v_{i-1,j-1} - v_{i+1,j-1} - v_{i-1,j+1}}{4\Delta x \Delta y}. \quad (5)$$

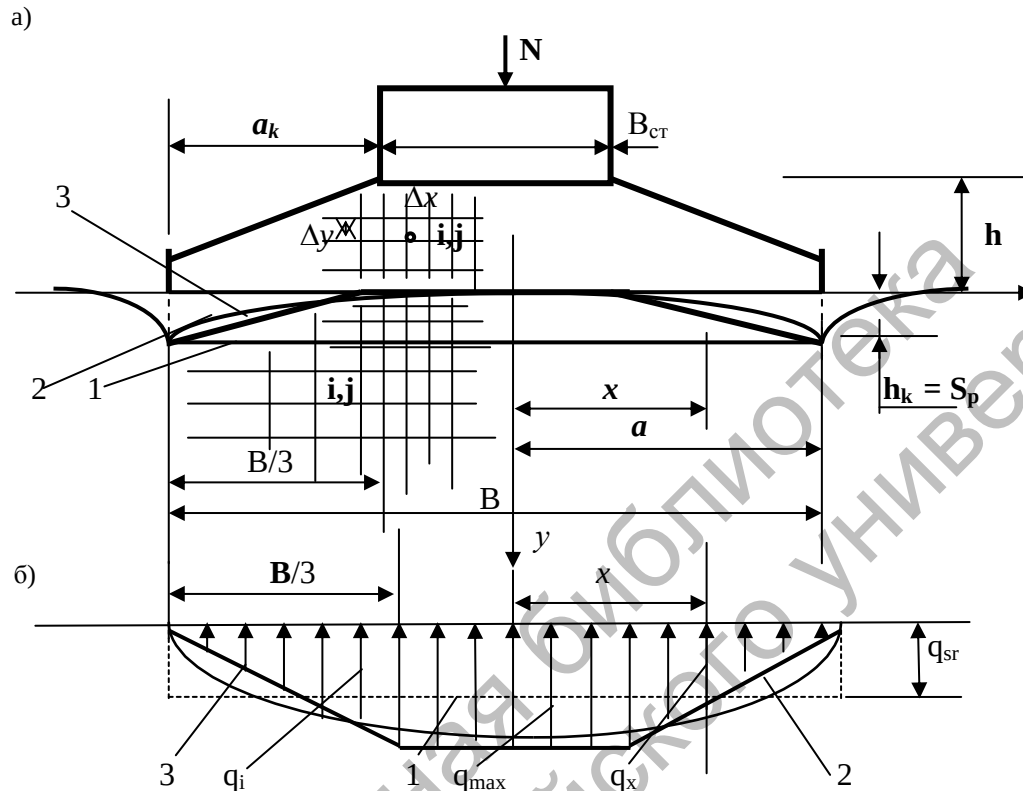


Рис. 1. Расчетная схема ленточного фундамента на грунтовом основании (а); распределение реактивного давления (б): 1 – плоское основание; 2 – выпуклое по параболе; 3 – выпуклое в форме трапеции

В результате получили систему из двух алгебраических уравнений с двумя неизвестными, из которых определяют перемещения u и v для точки (i, j) сетки, аппроксимирующей грунтовое основание:

$$\begin{aligned} u_{i,j} = & A_{11}(u_{i+1,j} + u_{i-1,j}) + A_{12}(v_{i-1,j-1} - v_{i-1,j+1} - \\ & - v_{i+1,j-1} + v_{i+1,j+1}) + A_{13}(u_{i,j+1} + u_{i,j-1}); \\ v_{i,j} = & A_{21}(v_{i+1,j} + v_{i-1,j}) + A_{22}(u_{i+1,j+1} - \\ & - u_{i-1,j+1} - u_{i+1,j-1} + u_{i-1,j-1}) + \\ & + A_{23}(v_{i,j+1} + v_{i,j-1}), \end{aligned} \quad (6)$$

где $A_{11}, A_{12}, \dots, A_{23}$ – коэффициенты, зависящие от E_0, μ и размеров сетки $\Delta x \cdot \Delta y$:

$$A_{11} = \frac{\Delta y^2}{2\Delta y^2 + (1 - \mu)\Delta x^2};$$

$$A_{12} = \frac{0,125(1 + \mu)\Delta x \Delta y}{2\Delta y^2 + (1 - \mu)\Delta x^2};$$

$$A_{13} = \frac{0,5(1 - \mu)\Delta x^2}{2\Delta y^2 + (1 - \mu)\Delta x^2};$$

$$A_{21} = \frac{\Delta x^2}{2\Delta x^2 + (1 - \mu)\Delta y^2};$$

$$A_{22} = \frac{0,125(1 + \mu)\Delta x \Delta y}{2\Delta x^2 + (1 - \mu)\Delta y^2};$$

$$A_{23} = \frac{0,5(1 - \mu)\Delta y^2}{2\Delta x^2 + (1 - \mu)\Delta y^2}.$$

Система (6) записывается для каждой внутренней точки сетки и решается итерационным методом [3] с помощью электронной техники. Перемещения точек по краям сетки определяются из граничных условий.

Граничные условия

По уравнениям системы (6) определяются перемещения точек сетки, лежащих внутри контура. Перемещения точек на контуре определяются из граничных условий (см. рис. 1):

– размеры аппроксимированного основания принимаются такими, чтобы вертикальные и горизонтальные перемещения точек сетки были минимальными и их можно приравнять нулю. По данным [3] ширина принимается равной 3...4 В, а по глубине 4...5 В. Тогда считается, что

$$u_{i,j} = v_{i,j} = 0;$$

– под подошвой фундамента принимаем

$$\sigma_y = -q_x, \quad (7)$$

где q_x – реактивное давление грунта.

Если принять, что реактивное давление распределяется в форме трапеции, как более рациональное, то из условия равновесия максимальное давление в горизонтальной части основания $q_{\max}$ будет равно $1,5 q_{\text{ср}}$ (где $q_{\text{ср}} = N / B$). В этом случае вертикальные перемещения точек под подошвой фундамента v_{ij} можно определить из второго уравнения системы (1). Учитывая (2) и (5), получим

$$\sigma_y = \frac{\mu E_0}{2(1-\mu^2)\Delta x} (u_{i+1,j} - u_{i-1,j}) + \frac{E_0}{2(1-\mu^2)\Delta y} (v_{i,j+1} - v_{i,j}) = -q_x.$$

Откуда

$$v_{i,j} = \frac{\mu \Delta y}{\Delta x} (u_{i+1,j} - u_{i-1,j}) +$$

$$+ v_{i,j+1} + \frac{2q_x(1-\mu^2)\Delta y}{E_0}. \quad (8)$$

Для определения осадки фундамента необходимо вычислить вертикальные перемещения точек на поверхности основания по его ширине. Так, по данным [1, формула (2.20)] имеем, что вертикальные перемещения параболической поверхности основания можно определить из уравнения

$$V = -\frac{4q_{\max}a}{3\pi E_0} (1-\mu^2) \times \left[\frac{3}{2}(1-x_1) \ln \frac{1-x_1}{2} + \frac{3}{2}(1+x_1) \ln \frac{1+x_1}{2} - \left(1-x_1^2\right) - \frac{1+x_1^3}{2} \times \ln \frac{1+x_1}{2} - \frac{1-x_1^3}{2} \times \ln \frac{1-x_1}{2} \right], \quad (9)$$

где x_1 – приведенная координата точки, для которой определяется вертикальное перемещение в полуплоскости, $x_1 = x / a$; a – полуширина фундамента.

Если основание имеет трапециевидальную форму, то вертикальное перемещение фундамента можно определить по [1, уравнение (2.31)]. Для однородного грунта $E_x = E_y = E_0$, следовательно,

$$S_0 = \frac{1}{\alpha_3} \left(\frac{N \Delta y \mu}{(1-\mu^2)E_0 \Delta x} - \frac{\mu \Delta y}{(1+\mu) \Delta x} U_{n-1,j} + 2 \sum_{i=n}^{m-1} V_{i,j-1} + V_{m,j-1} \right), \quad (10)$$

где $\alpha_3 = 2(m-n) + 1$; m – номер точки, находящейся на оси симметрии; n – номер первой точки под подошвой фундамента.

Если фундамент монолитный, то для устройства выпуклого основания необходимо использовать вкладыши треугольного сечения по всей длине ленточного фундамента, что влечет за собой дополнительные расходы на его возведение. Поэтому при применении монолитных ленточных фундаментов для определения их экономической эффективности необходимо учитывать стоимость всех видов работ.

**Определение
напряженно-деформированного
состояния фундаментных плит**

Задача по расчету плит ленточного фундамента решается в условиях плоской деформации с использованием метода конечных разностей (МКР) [1]. Расчетная схема фундамента представляет собой сечение плиты, аппроксимированное сеткой с размерами ячеек $\Delta x_n \cdot \Delta y_n$. При этом принимается, что тело фундамента является однородным и изотропным. Только в нижней зоне, где укладываются арматурные сетки, при расчетах можно использовать приведенный модуль упругости, который учитывает совместную работу бетона и арматуры.

Плита принимается абсолютно жесткой, если ее гибкость t , определенная по [4, формула (11)], будет меньше 1.

$$t = 10 \frac{E_0 a^3}{E_1 h^3}.$$

Наибольшей гибкостью обладает плита ФЛ32. Для нее имеем

$$t = 10 \frac{30}{30 \cdot 10^3} \frac{1,6^3}{0,5^3} = 0,32,$$

где E_1 – модуль упругости бетона класса С_{20/25}, $E_1 = 30 \cdot 10^3$ МПа; E_0 – модуль деформации основания, $E_0 = 30$ МПа; h – толщина плиты, $h = 0,5$ м; a – полу-длина плиты, $a = 1,6$ м.

Так как $t = 0,32 < 1$, то при определении напряженно-деформированного состояния грунтового основания деформации плит не учитываем.

Выводы

Предлагаемые расчетные схемы устройства грунтовых оснований, выпуклых по ширине плиты, позволяют более рационально распределить реактивное давление как для сборных, так и для монолитных ленточных фундаментов с максимальным давлением в центре и минимальными по краям. Это дает возможность запроектировать более экономичные конструкции ленточных фундаментов с экономией материалов 10...20 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грицук, М. С. Рациональные конструкции плитных фундаментов / М. С. Грицук. – Брест : БПИ, 1997. – 218 с.
2. СНБ 5-01-01-99. Основания и фундаменты зданий и сооружений. – Минск : МАиС, 1999. – 35 с.
3. Винокуров, Е. Ф. Итерационный метод расчета оснований и фундаментов с помощью ЭВМ / Е. Ф. Винокуров. – Минск : Наука и техника, 1973. – 246 с.
4. Горбунов-Посадов, М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов. – М. : Стройиздат, 1973.

LIST OF LITERATURE

1. Hrytsuk, M. S. Rational designs of panel-wall foundations / M. S. Hrytsuk. – Brest : BPI, 1997. – 218 p.
2. SNB 5-01-01-99. Foundations and footings of buildings and structures. – Minsk : MAiS, 1999. – 35 p.

3. **Vinokurov, E. F.** Iteration method of computerized calculation of foundations and footings / E. F. Vinokurov. – Minsk : Nauka i tekhnika, 1973. – 246 p.

4. **Gorbunov-Posadov, M. I.** Calculation of structures on elastic foundation / M. I. Gorbunov-Posadov. – M. : Strojizdat, 1973.

LIST OF LITERATURE (TRANSLITERATION)

1. **Hrytsuk, M. S.** Rastionalnye konstruksii plitnykh fundamentov / M. S. Hrytsuk. – Brest : BPI, 1997. – 218 p.

2. **SNB 5-01-01-99.** Osnovaniya i fundamenty zdaniy i sooruzheniy. – Minsk : MAiS, 1999. – 35 p.

3. **Vinokurov, E. F.** Iteratsionnyy metod rascheta osnovaniy i fundamentov s pomoshch'yu EVM / E. F. Vinokurov. – Minsk : Nauka i tekhnika, 1973. – 246 p.

4. **Gorbunov-Posadov, M. I.** Raschet konstruksij na uprugom osnovanii / M. I. Gorbunov-Posadov. – M. : Strojizdat, 1973.

Статья сдана в редакцию 16 сентября 2011 года

Михаил Степанович Грицук, д-р техн. наук, проф., Брестский государственный технический университет. Тел.: 8-029-795-08-11.

Ryszard Hulboj, магистр, докторант, Политехника Ченстоховска, RP.

Александр Михайлович Грицук, ассистент, Брестский государственный технический университет.

Mikhail Stepanovich Hrytsuk, DSc, Professor, Brest State Technical University. Tel.: +375-297-95-08-11.

Ryszard Hulboj, MA, doctoral candidate of Czestochowa University of Technology, RP.

Aleksandr Mikhailovich Hrytsuk, assistant lecturer, Brest State Technical University.