

МЕХАНІКА ГРУНТІВ ТА ФУНДАМЕНТИ

УДК 614.843

DOI 10.31649/2311-1429-2023-1-69-73

Б. Б. Корчевський

А. В. Колесник

ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК АРМОВАНИХ ОСНОВ З
УРАХУВАННЯМ АНІЗОТРОПІЇ ГРУНТІВ

Вінницький національний технічний університет

Введення в ґрунт горизонтальних арматурних елементів, що мають деформаційні показники в повздовжньому напрямку набагато вищі, перетворює його на анізотропне середовище. Тобто, середовище, в якому характеристики міцності у вертикальному і горизонтальному напрямку суттєво відрізняються.

В даній статті розглянуто випадок коли арматурні елементи вкладаються горизонтально, і їх товщина набагато менша товщини шарів ґрунту, тому нею можна знехтувати і приймати характеристики міцності і деформацій армоґрунту в горизонтальному напрямку як для неармованого. У вертикальному напрямку наявність арматури в масиві ґрунту суттєво змінює його характеристики. Це підтверджено отриманими результатами модельних випробувань.

Розрахунок армованих основ зводиться головним чином до визначення впливу параметрів армування на розподіл напружень і відповідно деформацій в шарах армоґрунту.

Ключові слова: армовані основи, анізотропія ґрунтів, деформації армоґрунту, параметри армування.

Вступ

Рішення базується на основних формулах напруженого стану анізотропної напівплощини, занавантаженої лінійним навантаженням. Основа представлена лінійно-деформівним пористим середовищем, стан якого характеризується модулями деформацій E_x , E_z , коефіцієнтами Пуассона ν_x , ν_z і модулем зсуву G_z . Після розв'язання системи рівнянь рівноваги і рівнянь сумісності авторами роботи [1] отримані формули (1) для визначення складових напружень:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= -\frac{2P}{\pi} \frac{Az^3}{(z^4 + a_2 z^2 x^2 + a_3 x^4)}; \\ \sigma_x &= -\frac{2P}{\pi} \frac{Ax^2 z}{(z^4 + a_2 z^2 x^2 + a_3 x^4)}; \\ \tau_{xz} &= -\frac{2P}{\pi} \frac{Az^2 x}{(z^4 + a_2 z^2 x^2 + a_3 x^4)};\end{aligned}\quad (1)$$

де

$$\begin{aligned}a_2 &= \frac{2(1+\nu_z) - 2(1+\nu_x)\nu_x \delta}{(1-\nu_z^2)\delta}; & a_3 &= \frac{1-\nu_x^2}{(1-\nu_z^2)\delta}; \\ A &= \frac{1}{2} \sqrt{2\sqrt{a_3} + a_2}; & \delta &= \frac{E_x}{E_z}; & \nu_z &= \frac{E_x}{2G_z} - 1\end{aligned}$$

δ – коефіцієнт деформаційної анізотропії;

x , z – координати точки, що розглядається, відповідно горизонтальні і вертикальні.

Максимальне дотичне і головні напруження середовища згідно теорії пружності визначаються виразами:

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2} \\ \sigma_1 &= \frac{\sigma_z + \sigma_x}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2} \\ \sigma_2 &= \frac{\sigma_z + \sigma_x}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2}\end{aligned}\quad (2)$$

В нашому випадку розглядаємо напруження під центром навантаження, тобто при $x=0$. Тоді рівняння (2) приймуть вигляд:

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= \sqrt{\left(\frac{\sigma_z(x=0) - \sigma_x(x=0)}{2}\right)^2 + \tau_{xz(x=0)}^2} \\ \sigma_1 &= \frac{\sigma_z(x=0) + \sigma_x(x=0)}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_z(x=0) - \sigma_x(x=0)}{2}\right)^2 + \tau_{xz(x=0)}^2} \\ \sigma_2 &= \frac{\sigma_z(x=0) + \sigma_x(x=0)}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_z(x=0) - \sigma_x(x=0)}{2}\right)^2 + \tau_{xz(x=0)}^2}\end{aligned}\quad (3)$$

З рівнянь (1) компоненти напруження $\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz}$ при $x=0$ виражаються як:

$$\begin{aligned}\sigma_x(x=0) &= 0 \\ \sigma_z(x=0) &= \frac{2P}{\pi z}; \\ \tau_{xz(x=0)} &= 0\end{aligned}\quad (4)$$

Підставивши (4) в (3) отримуємо:

$$\begin{aligned}\tau_{\max(x=0)} &= P \frac{A}{\pi z}; \\ \sigma_1(x=0) &= P \frac{2A}{\pi z}\end{aligned}\quad (5)$$

Основна частина

Вводимо допущення, що по всій довжині горизонтального арматурного елемента дотичні напруження в ґрунті зберігають свої максимальні значення, тобто τ_{\max} . Такі напруження повинні враховуватись в межах об'єму впливу арматурного елемента [2-3], що йде в запас міцності.

На підставі цих міркувань отримаємо

$$F = 2b_{\text{арм}} \tau_{\max} dx. \quad (6)$$

Інтегруючи вираз (6) і підставляючи значення τ_{\max} з (5), отримаємо

$$F = 2b_{\text{арм}} \int_0^{L_{\text{арм}}/2} \tau_{\max} dx = 2b_{\text{арм}} \frac{L_{\text{арм}}}{2} \tau_{\max} = \varpi_a P \frac{A}{\pi z} \quad (7)$$

де $b_{\text{арм}}$ - ширина арматурних елементів; $L_{\text{арм}}$ - довжина арматурних елементів.

Зусилля T знаходимо аналогічно із врахуванням максимальних вертикальних стискаючих напружень, що діють по контакту з арматурою.

$$T = 2b_{\text{арм}} f \int_0^{L_{\text{арм}}/2} \sigma_1 dx = 2b_{\text{арм}} \frac{L_{\text{арм}}}{2} f P \frac{2A}{\pi z} = \varpi_a f P \frac{2A}{\pi z}, \quad (8)$$

де f – коефіцієнт тертя; $\varpi_{\text{арм}}$ – площа контакту арматури.

Переріз арматурних елементів можна отримати, якщо задати розрахунковий опір матеріалу, що для них застосовується:

$$F_{\text{арм}} = \frac{T}{R_{\text{арм}}} = \frac{\varpi_{\text{арм}} f P \frac{2A}{\pi z}}{R_{\text{арм}}}. \quad (9)$$

Для кожного шару, що розглядається, можна визначити значення зусиль розтягу і сил тертя:

$$F = \sigma'_{арм} P \frac{A}{\pi z}; \quad (10)$$

$$T = \sigma'_{арм} f P \frac{2A}{\pi z}; \quad (11)$$

З виразу (11) граничне і нормальне горизонтальне подовження кінців арматурних елементів визначається співвідношеннями:

$$U_{Гр} = \int_0^{L_{арм}/2} \frac{T dx}{E_z \sigma_{арм}} = \frac{L_{арм} \sigma_{арм} f P \frac{2A}{\pi z}}{2 E_z \sigma_{арм}} = L_{арм} f P \frac{A}{E_z \pi z}; \quad (12)$$

$$U_H = \int_0^{B/2} \frac{T dx}{E_z \sigma_{арм}} = \frac{B \sigma_{арм} f P \frac{2A}{\pi z}}{2 E_z \sigma_{арм}} = B f P \frac{A}{E_z \pi z}; \quad (13)$$

Використовуючи формули (5), (12), можна визначити вертикальну відстань $h_{ар}$ між арматурними шарами. Нехай:

$$\tau_{max} = \frac{G_z U_{Гр}}{h_{арм}}. \quad (14)$$

Тоді
$$h_{арм} = \frac{G_z U_{Гр}}{\tau_{max}}, \quad (15)$$

$$\tau_{max} = P \frac{A}{\pi z}; \quad U_{Гр} = L_{арм} f P \frac{A}{E_z \pi z}$$

G_z – модуль зсуву анізотропних армованих ґрунтів;

Деформації зсуву анізотропних ґрунтів досліджувались рядом авторів [5;6] і були отримані відповідні залежності.

В інженерній практиці часто використовують співвідношення Сен-Венана для визначення модуля зсуву, котре має вигляд:

$$G_z = \frac{E_x E_z}{E_x + E_z (1 + 2\nu_{zx})}; \quad (16)$$

де E_x - модуль деформації неармованих підвалин у горизонтальному напрямку; E_z - модуль деформації армованих підвалин у вертикальному напрямку; ν_{zx} - коефіцієнт Пуассона в площині армування при навантаженні, що діє по нормалі до неї (по осі z).

З врахуванням (16) і значень τ_{max} , $U_{Гр}$ вираз (15) прийме вигляд

$$h_{арм} = \frac{\frac{E_x E_z}{E_x + E_z (1 + 2\nu_{zx})} L_{арм} f P \frac{A}{E_z \pi z}}{P \frac{A}{\pi z}} = L_{арм} f \frac{E_x}{E_x + E_z (1 + 2\nu_{zx})}. \quad (17)$$

Виразимо модуль деформації армованих основ у вертикальному напрямку E_z , через довжину арматури $L_{арм}$ і крок армування $h_{арм}$:

$$E_z = \frac{\left(\frac{E_x L_{арм} f}{h_{арм}} - E_x \right)}{1 + 2\nu_{zx}} \quad (18)$$

Визначимо модуль зсуву G_z анізотропних армованих ґрунтів, врахувавши параметри армування, а також анізотропні властивості ґрунту. Для цього скористаємось залежністю, яка приведена в роботі [7]:

$$G_z = \frac{E_z}{\left(2(1+\nu_x)\nu_z + (1-\nu_z^2\delta)(4K^2-2) \sqrt{\frac{1-\nu_x^2}{\delta(1-\nu_z^2\delta)}} \right)} \quad (19)$$

$\delta = \frac{E_x}{E_z}$ - коефіцієнт деформаційної анізотропії; K - коефіцієнт, що враховує параметри армування, анізотропні властивості ґрунту і його стан:

$$K = 1 + 3(1-\delta) \left(\frac{4(1+e)}{1 + \left(\frac{z}{2b}\right)^2} \right)^3, \quad (20)$$

де e - коефіцієнт пористості ґрунту; $b = B/2$ - половина ширини фундаменту, м;
 z - відстань від підшови фундаменту по глибині до шару армування, що розглядається, м;
 при одношаровому армуванні $z = h_{зак}$;

при багатошаровому армуванні $z = h_{зак} + h_{арм} \times (n-1)$;

$h_{зак}$ - глибина закладання першого шару; $h_{арм}$ - вертикальна відстань між шарами армування (крок армування); n - кількість шарів армування.

З врахуванням (18) коефіцієнт деформаційної анізотропії прийме вигляд:

$$\delta = \frac{1 + \nu_{zx}}{\left(\frac{L_{арм}^f}{h_{арм}} - 1 \right)} \quad (21)$$

Тоді коефіцієнт K для багатошарового армування з врахуванням (21):

$$K = 1 + 3 \left(1 - \frac{1 + \nu_{zx}}{\left(\frac{L_{арм}^f}{h_{арм}} - 1 \right)} \right) \left(\frac{4(1+e)}{1 + \left(\frac{h_{зак} + h_{арм}n}{B} \right)^2} \right)^3 \quad (22)$$

Підставляючи (18), (21) і (22) в (19), ми можемо визначити модуль зсуву G_z з врахуванням параметрів армування і анізотропних властивостей ґрунту.

Висновки

- Отримані вирази максимальних дотичних і головних напружень армованого ґрунту з врахуванням анізотропного середовища.
- Визначено залежність по підбору перерізу арматурних елементів ґрунтових основ від розрахункового опору матеріалів, що для них застосовуються.
- Отримано розрахункові залежності модуля деформації армованих основ у вертикальному напрямку E_z , через довжину арматури і крок армування.
- Визначено модуль зсуву G_z анізотропних армованих ґрунтів, з врахуванням параметрів армування, а також анізотропних властивостей ґрунту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Цимбал С.І., Куценко Г.В. Врахування анізотропії і неоднорідності основ при визначенні в ньому напружень. *Науково-технічний журнал «Основи та підвалини»* - Київ, 1989. - № 22. - с.97-100.
2. Друкований М.Ф., Корчевський Б.Б., Шокарев В.С. Теоретичні аспекти та проблеми армування підвалів в будівництві. *Науково-технічний журнал «Будівельні конструкції»* №53. Книга 2 - К.: НДІБК - 2000, с.100-107.
3. Друкований М.Ф., Шокарев В.С. Класифікація методів армування ґрунтів. *Науково-технічний журнал «Будівельні конструкції»* №55. - К.: НДІБК - 2001, с.36-37.
4. Друкований М.Ф., Корчевський Б.Б. Зміцнення ґрунтових підвалів армуючими подушками з скловолокнистих сіток. Результати лабораторних випробувань *Науково-технічний журнал «Будівельні конструкції»* №53. Книга 2 - К.: НДІБК -

2000, с.94-99.

5. Чорний Г.І., Шокар'єв В.С., Чорний В.Г. Деякі аспекти теорії міцності та несучої здатності армованого ґрунту. *Науково-технічний журнал «Будівельні конструкції»* №55. - К.: НДІБК – 2001, с.173-184.
6. Barden L. Stresses and displacements in a cross-anisotropic soil. *Geotechnique*, 1998. – v.XIII. - № 3. - p.198-210.
7. Smith A.K.C., Hroth C.P. The failure of model reinforced earth walls. – TRRL suppl., № 457. p.108-131.

REFERENCES

1. Tsymbal S.I., Kutsenko G.V. Taking into account anisotropy and heterogeneity of foundations when determining stresses in it. *Naukovo-tekhnichnyy zhurnal "Fundamentals and Foundations"* - Kyiv, 1989. - No. 22. - pp. 97-100.
2. Drukovany M.F., Korchevskiy B.B., Shokarev V.S. Theoretical aspects and problems of foundation reinforcement in construction. *Naukovo-tekhnichnyy zhurnal "Building structures"* No. 53. Book 2 - K.: NDIBK - 2000, p. 100-107.
3. Drukovany M.F., Shokarev V.S. Classification of soil reinforcement methods. *Naukovo-tekhnichnyy zhurnal "Building structures"* No. 55. - K.: NDIBK - 2001, p. 36-37.
4. Drukovany M.F., Korchevskiy B.B. Strengthening of soil foundations with reinforcing pillows made of fiberglass mesh. Results of laboratory tests. *Naukovo-tekhnichnyy zhurnal "Building structures"* No. 53. Book 2 - K.: NDIBK - 2000, p.94-99.
5. Cherny G.I., Shokarev V.S., Cherny V.G. Some aspects of the theory of strength and bearing capacity of reinforced soil. *Naukovo-tekhnichnyy zhurnal "Building structures"* No. 55. - K.: NDIBK - 2001, p. 173-184.
6. Barden L. Stresses and displacements in a cross-anisotropic soil. *Geotechnique*, 1998. – v.XIII. - № 3. - p.198-210.
7. Smith A.K.C., Hroth C.P. The failure of model reinforced earth walls. – TRRL suppl., № 457. p.108-131.

Корчевський Богдан Болеславович - кандидат технічних наук, доцент кафедри опору матеріалів, теоретичної механіки та інженерної графіки, Вінницький національний технічний університет, e-mail: b.b.korchevskiy@gmail.com

Колесник Андрій Вікторович – аспірант Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця.

B. Korchevskiy
A. Kolesnyk

THEORETICAL CALCULATION OF REINFORCED FOUNDATIONS TAKING INTO ACCOUNT ANISOTROPY OF SOILS

Vinnitsia National Technical University

The introduction of horizontal reinforcing elements into the soil, which have much higher deformation rates in the longitudinal direction, turns it into an anisotropic medium. That is, an environment in which the strength characteristics in the vertical and horizontal directions are significantly different.

This article considers the case when the reinforcing elements are laid horizontally, and their thickness is much smaller than the thickness of the soil layers, so it can be neglected and the characteristics of the strength and deformations of the reinforced soil in the horizontal direction can be taken as for unreinforced. In the vertical direction, the presence of reinforcement in the soil mass significantly changes its characteristics. This is confirmed by the obtained results of model tests.

The calculation of reinforced foundations is reduced mainly to the determination of the influence of reinforcement parameters on the distribution of stresses and, accordingly, deformations in the layers of reinforced soil.

The solution is based on the basic formulas of the stress state of an anisotropic half-plane loaded with a linear load. The base is represented by a linearly deformable porous medium, the state of which is characterized by the deformation moduli E_x , E_z , the Poisson coefficients ν_x , ν_z and the shear modulus G_z .

We introduce the assumption that along the entire length of the horizontal reinforcing element, the tangential stresses in the soil retain their maximum values τ_{\max} . Such stresses should be taken into account within the scope of influence of the reinforcing element [2-3], which is included in the margin of strength.

Obtained expressions of the maximum tangential and principal stresses of the reinforced soil, taking into account the anisotropic medium.

The dependence of the selection of the cross-section of reinforcing elements of soil foundations on the calculated resistance of the materials used for them is determined.

Calculated dependences of the modulus of deformation of reinforced bases in the vertical direction E_z , due to the length of the reinforcement and the reinforcement step, were obtained.

The shear modulus G_z of anisotropic reinforced soils is determined, taking into account the parameters of the reinforcement, as well as the anisotropic properties of the soil.

Keywords: reinforced foundations, soil anisotropy, reinforced soil deformations, reinforcement parameters.

Bogdan Korchevskiy – Ph. D., associate professor of the Department of Strength of Materials, Theoretical Mechanics and Engineering Graphics, Vinnitsia National Technical University, e-mail: b.b.korchevskiy@gmail.com

Kolesnyk Andriy – Postgraduate of Vinnitsia National Technical University, e-mail: andreyengineer@gmail.com