

## Розподіл напружень у основі стрічкових фундаментів з врахуванням впливу коефіцієнта пористості

Олег Малишев<sup>1</sup>, Павло Олійник<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури  
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037,  
<sup>1</sup>omalyshev@ukr.net, orcid.org/0000-0002-2804-6217  
<sup>2</sup>oliinykpm@gmail.com, orcid.org/0000-0001-7000-737X

DOI: 10.32347/0475-1132.38.2019.22-27

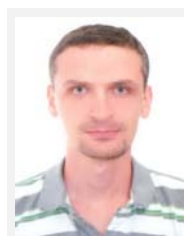
**Анотація.** У статті звернуто увагу, що характер розподілу напружень має важливе значення при визначенні деформацій основи фундаментів, розрахунок яких є головним для стрічкових фундаментів.

Описано, що напруження в ґрунтах безпосередньо під навантаженням значно перевищують теоретичні, визначені за формулами теорії пружності. Приведено формули, що дають можливість визначити складові напружень від полосового навантаження, рівномірно розподіленого по підшві стрічкового фундаменту, згідно теорії лінійно-деформованого середовища.

Описано, що для визначення достовірних значень деформацій, використання рівнянь теорії пружності є недостатнім. Вказано на необхідність враховувати додаткові умови, які впливають із фізичної природи ґрунтів, як дисперсного середовища, тобто зміну коефіцієнта пористості при зміні тиску за законом ущільнення.

Звернуто увагу на вирішення задачі про розподіл напружень в ґрунтовому масиві від навантаження, прикладеного на поверхні з врахуванням коефіцієнта пористості ґрунтів. Приведено формули, що дають можливість визначити складові напружень від полосового навантаження, рівномірно розподіленого по підшві стрічкового фундаменту з урахуванням стану ґрунту.

Досліджено вплив коефіцієнта пористості на характер розподілу напружень у основі стрічкових фундаментів, отримано дані для можливості аналітичних розрахунків.



**Олег Малишев**  
доцент кафедри  
геотехніки  
к.т.н.



**Павло Олійник**  
аспірант кафедри  
геотехніки

Визначено коефіцієнти залежності вертикальних напружень від прикладеного навантаження для ґрунтів з різним коефіцієнтом пористості. Виконана порівняльна оцінка отриманих результатів з приведеними теоретичними рішеннями.

Для наглядної оцінки впливу коефіцієнта пористості на характер розподілу напружень в основі, приведено графіки залежності коефіцієнта зміни напружень  $\alpha$  від відносної глибини  $\zeta$ .

**Ключові слова.** Коефіцієнт пористості, характер розподілу, напруження, стрічковий фундамент.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Характер розподілу напружень має важливе значення при визначенні деформацій основи фундаментів, розрахунок яких є головним для стрічкових фундаментів. Для визначення достовірних значень деформацій, використання рівнянь теорії пружності є недостатнім. Необхідно враховувати додаткові умови, які впливають із фізичної природи ґрунтів, як дисперсного середовища, тобто зміну коефіцієнта пористості при зміні тиску за законом ущільнення.

## АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження багатьох авторів, за даними [4,5], показують, що напруження в ґрунтах безпосередньо під навантаженням значно перевищують теоретичні, визначені за формулами теорії пружності. З метою наближення теоретичних напружень до експериментальних, в формули теорії пружності вводились коефіцієнти концентрації напружень. Модифікації формул теорії пружності з використанням таких коефіцієнтів досить умовні і є чисто емпіричні. Вони не враховують фізичних і механічних характеристик конкретних ґрунтів. У роботах [4,5] зроблено спроби врахувати стан ґрунтів, при розрахунках, але виконати ці розрахунки аналітично не можна.

## МЕТА РОБОТИ

Дослідити вплив коефіцієнта пористості на характер розподілу напружень у основі стрічкових фундаментів, отримати дані для можливості аналітичних розрахунків, виконати порівняльну оцінку отриманих результатів з приведеними теоретичними рішеннями.

## ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Згідно [1,2,3] напруження в ґрунтах визначаються за допомогою теорії лінійно-деформованого середовища. При цьому припускається, що стиск основи від власної ваги і зовнішнього навантаження

закінчився, навантаження основи виконується без розвантаження, а зовнішній тиск на основу не перевищує розрахункового опору. Ця модель основана на припущенні, що для визначення напруженого стану ґрунтового середовища в стабілізованому стані можуть бути використані відповідні рішення теорії пружності. В такому випадку напруження в скелеті ґрунту мають задовольняти рівнянням теорії пружності.

Для визначення складових напружень в основі для випадків дії на її поверхні вертикального зовнішнього навантаження, що найбільш часто зустрічаються в практиці проектування, служать формули та таблиці.

Для стрічкових фундаментів при рівномірно розподіленому навантаженні по полосі (Рис. 1), згідно теорії лінійно-деформованого середовища, складові напружень мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \frac{p}{\pi} \left[ \frac{\operatorname{arctg} \frac{b_1 - x}{z} + \operatorname{arctg} \frac{b_1 + x}{z}}{2b_1 z(x^2 - z^2 - b_1^2)} - \frac{1}{(x^2 + z^2 - b_1^2)^2 + 4b_1^2 z^2} \right]; \\ \sigma_x &= \frac{p}{\pi} \left[ \frac{\operatorname{arctg} \frac{b_1 - x}{z} + \operatorname{arctg} \frac{b_1 + x}{z}}{2b_1 z(x^2 - z^2 - b_1^2)^2} + \frac{1}{(x^2 + z^2 - b_1^2)^2 + 4b_1^2 z^2} \right]; \\ \tau_{zx} &= \frac{p}{\pi} \frac{4b_1 x z^2}{(x^2 + z^2 - b_1^2)^2 + 4b_1^2 z^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

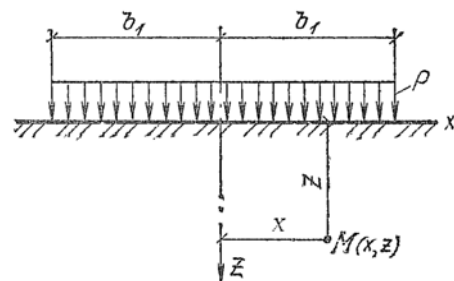


Рис.1. До визначення напружень в основі при дії на її поверхні рівномірного полосового навантаження.

Fig.1. By determining the stresses in the basis of action on its surface uniform load bandwidth.

Для практичних розрахунків в нормативних документах [1] та технічній літературі [2,3] приводяться коефіцієнти залежності вертикальних напружень від прикладеного навантаження – коефіцієнти зміни напружень з глибиною  $\alpha$ . Такі коефіцієнти для стрічкових фундаментів приведено в Табл. 1.

В роботі [5] показано вирішення задачі про розподіл напружень в ґрунтовому масиві від навантаження, прикладеного на поверхні з врахуванням коефіцієнта пористості ґрунтів. Приведено формули, що дають можливість визначити складові напружень від дії зосередженої сили, яка діє на поверхні для будь-яких площадок, паралельних горизонтальній площині. З наведених виразів виведено формули у випадку полосового навантаження, рівномірно розподіленого по підшві стрічкового фундаменту шириною  $2b_1$ . Змінні інтегрування приведені на рис. 2.

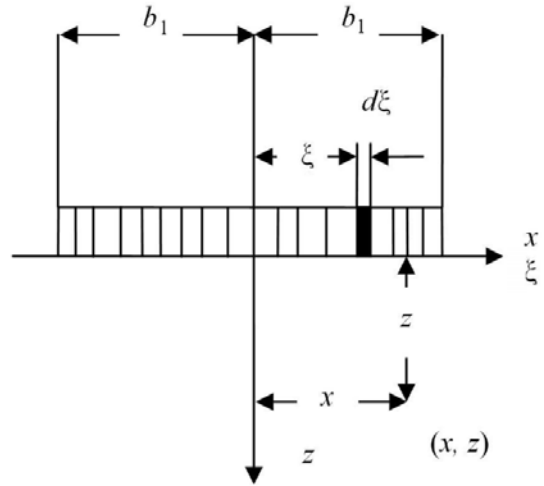


Рис.2. Змінні інтегрування при визначенні напружень в основі при дії на її поверхні рівномірного полосового навантаження.

Fig.2. Integral variables for determining the stresses in the base from uniform load bandwidth on its surface.

Складові напружень з врахуванням коефіцієнта пористості ґрунтів мають наступний вигляд:

$$\sigma_z = \frac{2kp}{\pi} \left[ \int_{-b_1}^{b_1} \frac{e^{-\arctg\left(\frac{x-\xi}{z}\right)^2} \cdot z^2}{\left[(x-\xi)^2 + z^2\right]^2} \left[ z \left( 1 + \frac{1}{ke^{-\arctg\left(\frac{x-\xi}{z}\right)^2}} \right) - 3\arctg\left(\frac{x-\xi}{z}\right)(x-\xi) + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + 2\arctg\left(\frac{x-\xi}{z}\right)^3(x-\xi) - 2\arctg\left(\frac{x-\xi}{z}\right)^2 z \right] d\xi \right];$$

$$\sigma_x = \frac{2kp}{\pi} \left[ \int_{-b_1}^{b_1} \frac{e^{-\arctg\left(\frac{x-\xi}{z}\right)^2} (x-\xi)^2}{\left[(x-\xi)^2 + z^2\right]^2} \left[ z \left( 1 + \frac{1}{ke^{-\arctg\left(\frac{x-\xi}{z}\right)^2}} \right) - 3\arctg\left(\frac{x-\xi}{z}\right)(x-\xi) + \right. \right. \\ \left. \left. \left. + 2\arctg\left(\frac{x-\xi}{z}\right)^3(x-\xi) - 2\arctg\left(\frac{x-\xi}{z}\right)^2 z \right] d\xi \right]; \quad (2)$$

$$\tau_{xz} = \frac{2kp}{\pi} \left[ \int_{-b_1}^{b_1} \frac{e^{-\arctg\left(\frac{x-\xi}{z}\right)^2} (x-\xi)z}{\left[(x-\xi)^2 + z^2\right]^2} \left[ z \left( 1 + \frac{1}{ke^{-\arctg\left(\frac{x-\xi}{z}\right)^2}} \right) - 3\arctg\left(\frac{x-\xi}{z}\right)(x-\xi) + \right. \right. \\ \left. \left. \left. + 2\arctg\left(\frac{x-\xi}{z}\right)^3(x-\xi) - 2\arctg\left(\frac{x-\xi}{z}\right)^2 z \right] d\xi \right].$$

Табл. 1: Коефіцієнт зміни вертикальних напружень в основі стрічкових фундаментів,  $\alpha$   
 Table 1: The coefficient of vertical stress variation in the base of strip foundations,  $\alpha$

$\zeta$	ДБН [1]	Запропонована методика при величині коефіцієнта пористості		
		0,6	0,8	1,0
0	1,000	1,000	1,000	1,000
0,4	0,977	1,029	1,046	1,063
0,8	0,881	0,984	1,018	1,052
1,2	0,755	0,923	0,979	1,035
1,6	0,642	0,845	0,913	0,981
2,0	0,550	0,763	0,834	0,905
2,4	0,477	0,686	0,756	0,826
2,8	0,420	0,619	0,685	0,751
3,2	0,374	0,561	0,623	0,685
3,6	0,337	0,511	0,569	0,627
4,0	0,306	0,468	0,523	0,577
4,4	0,280	0,432	0,482	0,533
4,8	0,258	0,400	0,447	0,495
5,2	0,239	0,372	0,417	0,461
5,6	0,223	0,348	0,390	0,432
6,0	0,208	0,327	0,366	0,406
6,4	0,196	0,308	0,345	0,382
6,8	0,185	0,291	0,326	0,361
7,2	0,175	0,275	0,309	0,343
7,6	0,166	0,262	0,294	0,326
8,0	0,158	0,249	0,280	0,310
8,4	0,150	0,238	0,267	0,296
8,8	0,143	0,227	0,255	0,283
9,2	0,137	0,218	0,245	0,271
9,6	0,132	0,209	0,235	0,261
10,0	0,126	0,201	0,226	0,250
10,4	0,122	0,193	0,217	0,241
10,8	0,117	0,186	0,209	0,232
11,2	0,113	0,180	0,202	0,224
11,6	0,109	0,174	0,195	0,217
12,0	0,106	0,168	0,189	0,210

В Табл. 1  $\zeta = 2z/b$  або  $z/b_1$  – відносна глибина.

Приведені формули дають можливість отримати аналітичний вираз компонентів вектора переміщень і тензора напружень у вигляді інтегралів по області, яку займає підшва стрічкового фундаменту. Але визначення цих величин ускладнено тим, що підінтегральні вирази неможна вирішити аналітично. Тому нами вирішена дана задача із використанням сучасних програмних комплексів. Результатом є коефіцієнти зміни напружень з глибиною  $\alpha$ , при різних коефіцієнтах пористості. Такі коефіцієнти зміни напружень для стрічкових фундаментів приведено в Табл. 1.

Для наглядної оцінки впливу коефіцієнта пористості на характер розподілу напружень в основі, приведено графіки залежності коефіцієнта  $\alpha$  від відносної глибини  $\zeta$  (Рис. 3).

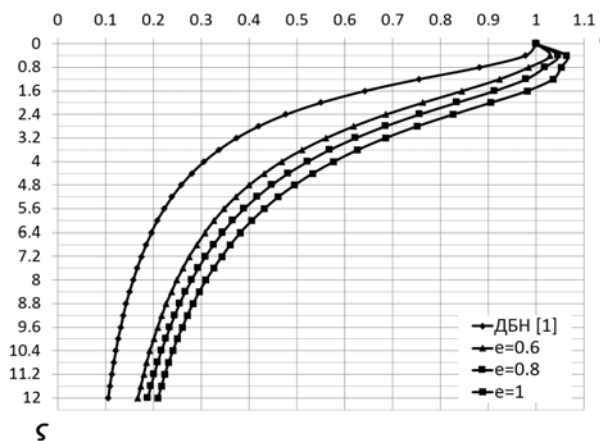


Рис.3. Графіки залежності коефіцієнта  $\alpha$  від відносної глибини  $\zeta$ .

Fig.3. Charts of the dependence of the coefficient  $\alpha$  on the relative depth  $\zeta$ .

Якщо прийняти за 100% значення коефіцієнта  $\alpha$  для суцільної основи, то значення коефіцієнта  $\alpha$  при врахуванні коефіцієнта пористості будуть більшими відповідно: при  $e=0.6$  – на 5...60%,  $e=0.8$  – на 7...79%,  $e=1.0$  – на 9...99%.

Відмінність значень коефіцієнта  $\alpha$  збільшується із глибиною.

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Враховуючи вище приведенне, а також дані робіт [4,5], можна зробити наступні висновки про вплив коефіцієнта пористості на характер розподілу напружень у основі стрічкових фундаментів:

Коефіцієнт пористості суттєво впливає на характер розподілу напружень у основі стрічкових фундаментів.

Із збільшенням коефіцієнта пористості, напруження по осі стрічкових фундаментів збільшуються до 100%.

З глибиною вплив коефіцієнта пористості на розподіл напружень збільшується, порівняно із результатами розрахунків за теорією пружності.

Врахування впливу коефіцієнта пористості дає можливість точніше визначити напружено-деформований стан, а відповідно і отримувати більш ефективні параметри фундаментів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування: ДБН В.2.1-10-2009. – К.: Укрархбудінформ, 2009. – 104 с.
2. Основания, фундаменты и подземные сооружения: справочник проектировщика / Горбунов-Посадов М. И., Ильичев В. А., Крутов В. И. [и др.]; под общ. ред. Е. А. Сорочана и Ю. Г. Трофименкова. – М.: Стройиздат, 1985. – 480 с.
3. Флорин В.А. Основы механики грунтов. Том 1. Общие зависимости и напряжения сооружений. – Л.: Госстройиздат, 1959. – 359 с.
4. Цимбал С.Й. Розподіл напружень в основі стовпчастих фундаментів / С.Й. Цимбал, В.К. Чибіряков // Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – К.: КНУБА, 2005. – Вип. 29. – С. 132-137.
5. Цимбал С.Й. Розподіл напружень в основі стрічкових фундаментів / С.Й. Цимбал, М. Шахмохаммаді // Опір матеріалів і теорія споруд: Науково-технічний збірник. – К.: КНУБА, 2009. – Вип. 84. – С. 147-154.

## REFERENCES

1. Osnovy ta fundamenti sporud. Osnovni polozhennya proektuvannya: DBN V.2.1-10-2009. (2009). Kyiv: Ukrarhbuildinform, 104 (in Ukrainian).
2. Gorbunov-Posadov M.I., Ilyichev V.A., Krutov V.I. [and others]; under the general editorship Sorochan E.A. and Trofimenkov Y.G. (1985). Osnovaniya, fundamenti i podzemnye sooruzheniya: spravochnik proektirovshchika [Base, foundations and underground structures: reference book of the designer]. Moscow: Stroyizdat, 480 (in Russian).
3. Florin V.A. (1959). Osnovy mexaniki gruntov. Tom 1. Obschie zavisimosti i napryazheniya sooruzheniy. [Basics of soil mechanics. Volume 1. General dependencies and stress structures]. Leningrad: Gosstroyizdat, 359 (in Russian).
4. Tsymbal S.Y., Chibiyarakov V.K. (2005). Rozpodil napruzhen' v osnovi stovpchastykh fundamentiv. [Distribution of stresses on the base of columnar foundations]. *Osnovy i fundamenti: Mizhvidomchij naukovo-tekhnichnij zbirnyk*. Kyiv: KNUBA, 29. 132-137 (in Ukrainian).
5. Tsymbal S.Y., Shahmohammadi M. (2009). Rozpodil napruzhen' v osnovi strichkovykh fundamentiv. [Distribution of stresses on the base of strip foundations]. *Opir materialiv i teoriya sporud. Naukovo-tekhnichnij zbirnyk*. Kyiv: KNUBA, 84. 147-154 (in Ukrainian).

**Distribution of stresses on the base of strip foundations with consideration influence of the porosity coefficient**

*Oleg Malyshev  
Pavlo Oliinyk*

**Summary.** The article draws attention to the fact that the nature of the stress distribution is important in determining the deformations foundations based, the calculation of which is central for the strip foundations.

Described that the stresses in soils directly under the load considerably exceed the theoretical, determined by the formulas of elasticity theory. Formulas are given that make it possible to determine the constituent stresses from the band loading, evenly distributed along strip foundations

based, according to the linearly deformed media theory.

It is insufficient to use elasticity theory equations to determine the true values of deformations. The necessity of taking into account the additional conditions arising from the physical nature of soils, as a dispersed environment, that is, a change in the porosity coefficient when the pressure under the compression law is changed.

Shows solving of stress distribution problem in ground base from the load applied on the surface, taking into account the coefficient of soil porosity. Formulas are given that make it possible to determine the components of stresses from the band loading, evenly distributed along strip foundations based, taking into account the soils state.

The influence of the porosity coefficient on the nature of the stresses distribution on the base of tape foundations is investigated, data are obtained for the possibility of analytical calculations.

The coefficients of dependence of vertical stresses on the applied load for soils with different porosity coefficient are determined. A comparative estimation of the obtained results with the resulted theoretical decisions is carried out.

For a visual assessment of porosity coefficient effect on the nature of stresses distribution in the base, graphic dependence of the coefficient of stress variation  $\alpha$  from the relative depth  $\zeta$ .

**Key words.** Porosity coefficient, distribution pattern, stress, strip foundation.