



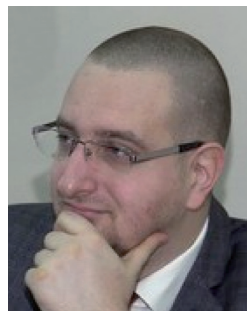
Doi: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2023-2>

УДК 624.131



САМОРОДОВ О. В.

Доктор техн. наук, професор, завідувач кафедри геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, e-mail: osamorodov@ukr.net, тел. +38 (050) 301-76-99, ORCID: 0000-0003-4395-9417



АЛЕКСАНДРОВИЧ В. А.

Канд. техн. наук, доцент кафедри геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, e-mail:

Vadym.Aleksandrovych@kname.edu.ua
тел. +38 (063) 386-67-90,
ORCID: 0000-0002-3406-2408



ТАБАЧНИКОВ С. В.

Канд. техн. наук, доцент кафедри геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, e-mail:

Serhii.Tabachnikov@kname.edu.ua,
тел. +38 (093) 253-02-86,
ORCID: 0000-0002-2619-8612



ГАВРИЛЮК О. В.

Ст. викл. кафедри геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, e-mail:

Olha.Havryliuk@kname.edu.ua,
тел. +38 (095) 556-60-11,
ORCID: 0000-0002-7057-2499

ВПЛИВ ГРАНИЧНИХ УМОВ НА РОЗПОДІЛЬЧУ ЗДАТНІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ МОДЕЛІ ГРУНТОВОЇ ОСНОВИ У ВИГЛЯДІ ЛІНІЙНО- ДЕФОРМОВАНОГО ШАРУ СКІНЧЕННОЇ ШИРИНИ

АНОТАЦІЯ

У статті проаналізовано існуючі підходи щодо розподілу вертикальних стискаючих напружень по глибині ґрунтової основи від рівномірно розподіленого навантаження на поверхні, які, в основному, пропонуються для розрахунку габаритів умовних плитних фундаментів при визначенні осідань пальових фундаментів та розмірів піщаних подушок при підсиленні слабких ґрунтів. Разом з тим, при моделюванні та чисельних розрахунках системи «основа – фундамент – споруда» (далі – система «ОФС») у потужних розрахункових комплексах SOFiSTiK, ABAQUS, Plaxis, SCAD, Ліра тощо, як правило, застосовується саме модель ґрунтової основи у вигляді суцільного шару скінченної ширини, при цьому задаються будь-які закономірності деформування ґрунтів

під навантаженнями, в тому числі й у часі. У статті досліджується вплив крайових обмежень у плані моделі суцільного лінійно-деформованого (пружного) шару скінченної ширини на її розподільчу здатність та деформативність від навантаженого фундаменту на поверхні. Проведено чисельні розрахунки напружено-деформованого стану рівномірно навантаженого фундаменту різної відносної згинальної жорсткості (гнучкості), що взаємодіє з шаром визначеної потужності (стисловою товщею) та жорсткими горизонтальними обмеженнями по ширині (розміри моделі по ширині), за допомогою програми SCAD. На підставі аналізу результатів чисельних розрахунків для плоскої задачі (плоска деформація) обґрунтована ширина моделі лінійно-деформованого шару скінченної



ширини, що враховує розподіл стискаючих напружень по глибині під кутом $\alpha \approx 20 \div 25^\circ$ до вертикалі від країв навантаженого фундаменту. При цьому ширина моделі згідно з кутом розподілу $\alpha \approx 20 \div 25^\circ$ практично не впливає на середні осідання та максимальні моментні зусилля фундаменту у порівнянні зі збільшенням розмірів моделі по ширині.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: фундамент, ґрунтова основа, пружна модель, кут розподілу, ширина моделі, напружено-деформований стан.

EFFECTS OF BOUNDARY CONDITIONS ON THE DISTRIBUTION CAPABILITY AND STRESS-STRAIN PERFORMANCE OF THE SOIL BASE MODEL IN THE FORM OF A LINEARLY DEFORMABLE LAYER OF FINITE WIDTH

ABSTRACT

The paper examines the available approaches to the distribution of vertical compressive stresses over the depth of the soil base from a uniformly distributed load on the surface, which are mostly proposed to calculate the dimensions of conventional slab foundations when determining the settlement of pile foundations and the dimensions of sand beds when reinforcing weak soils. Furthermore, when performing simulation and numerical calculations of the base-foundation-building (BFB) using the potent calculation software packages, such as SOFiSTiK, ABAQUS, Plaxis, SCAD, Lira and others, it is the model of the soil base that is generally used in the form of a continuous layer of finite width, with any patterns of soil deformation under load, including time deformation, being specified. The paper investigates the effect of boundary constraints in plan of the model of a continuous linearly deformable (elastic) layer of finite width on its distribution capability and stress-strain performance from a loaded foundation on the surface. Numerical calculations of the stress-strain state of a uniformly loaded foundation with different relative bending stiffness (flexibility), which interacts with a layer of a certain depth (compressible depth) and strict horizontal constraints in terms of width (the width dimensions of the model), were performed using the SCAD software. Based on the analysis of the results of numerical calculations for the plane problem (plane-strain deformation), the width of the model of a linearly deformable layer of finite width, which considers the distribution of compressive loads over the depth at an angle of $\alpha \approx 20 \div 25^\circ$ to the vertical from the edges of the loaded foundation, was justified. In this case, the width of the model according to the angle of distribution of $\alpha \approx 20 \div 25^\circ$ has virtually

no effect on the average settlements and the maximum moment forces of the foundation in comparison with the increase in the width of the model.

KEYWORDS: foundation, soil base, elastic model, angle of distribution, width of the model, stress-strain state.

ВСТУП

Існують аналітичні просторові моделі суцільного лінійно-деформованого середовища (півпростору або шару), що розроблялися для розрахунку деформацій основ фундаментів [1÷3] та й залишаються у державних будівельних нормах України [4, 5]. Однак, сьогодні, через потужний розвиток інформаційних технологій, найбільш розповсюдженою моделлю ґрунтової основи є модель суцільного шару скінченної ширини (рис. 1), яка, окрім обмеження вертикальних деформацій на деякій глибині H , також має обмеження горизонтальних деформацій на деякій відстані від навантаження у плані ($L_x \times L_y$). Для розрахунку фундаментів, що працюють з ґрунтовою основою в умовах плоскої деформації, ця модель також може бути плоскою, як окремий випадок. Вченими І. Я. Лучковським [6], З. Г. Тер-Мартirosяном, Пак Чун Сун та Махмудом Назір Башеті отримані аналітичні рішення напружено-деформованого стану ґрунтової основи з навантаженнями на поверхні з використанням моделей суцільного лінійно-деформованого (пружного) шару скінченної ширини.

При моделюванні та чисельних розрахунках системи «ОФС» у потужних розрахункових комплексах SOFiSTiK, ABAQUS, Plaxis, SCAD, Ліра тощо, як правило, застосовується саме модель ґрунтової основи у вигляді суцільного шару скінченної ширини, при цьому задаються будь-які закономірності деформування ґрунтів під наванта-

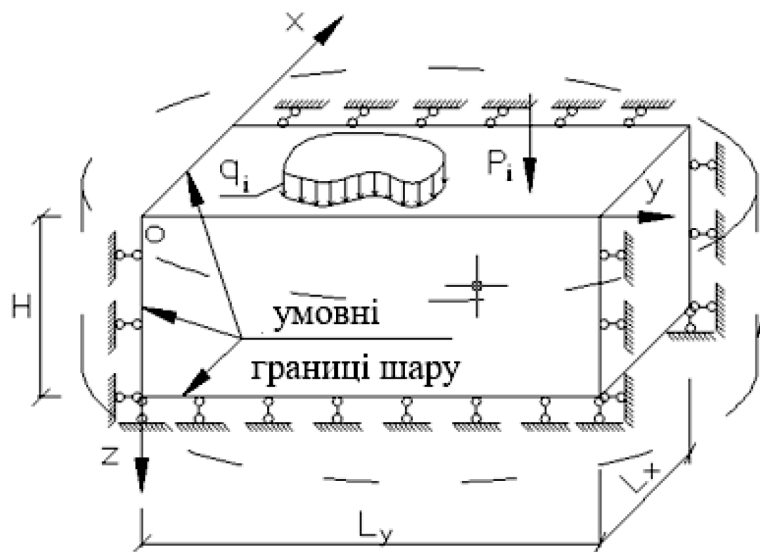


Рисунок 1 – Модель ґрунтової основи у вигляді суцільного шару скінченної ширини



женнями, в тому числі й у часі.

Загальновідомо, що для отримання надійних та достовірних результатів розрахунку напружено-деформованого стану конструкцій фундаментів у системі «ОФС» необхідно обрати таку модель ґрунтової основи з відповідними параметрами, яка є близькою до реального ґрунтового середовища за двома критеріями: розподільчою здатністю та деформативністю фундаментів споруд. На практиці модель лінійно-деформованого шару скінченної ширини є найбільш розповсюдженою, так як вимагає лише завдання деформаційних характеристик ґрунту (модуля загальної деформації E та коефіцієнта Пуассона ν). Однак, значна розподільча здатність моделі викликає виникнення надмірних реакцій на краях конструкцій фундаментів та, відповідно, збільшення моментних зусиль від загального вигину фундаментів, особливо великорозмірних. У попередніх публікаціях авторів було запропоновано методику призначення параметрів лінійно-деформованого шару (наведений модуль деформації ґрунту E_0 та наведена стислива товща H_0) для адекватного моделювання взаємодії великорозмірних плитних фундаментів з ґрунтовою основою, яка дозволяє отримати адекватні осідання й знизити розподільчу здатність моделі [7], але вплив граничних умов у плані не досліджувався.

В існуючій технічній літературі пропонуються різні підходи (рис. 2) щодо призначення кута нахилу α (далі – кут розподілу α) до вертикалі для розподілу вертикальних стискаючих напружень по глибині ґрунтової основи, які після аналізу можна розділити на два основних умовних підходи:

- «кута внутрішнього тертя»

$$\alpha \approx \varphi = 30^\circ \div 45^\circ, \quad (1)$$

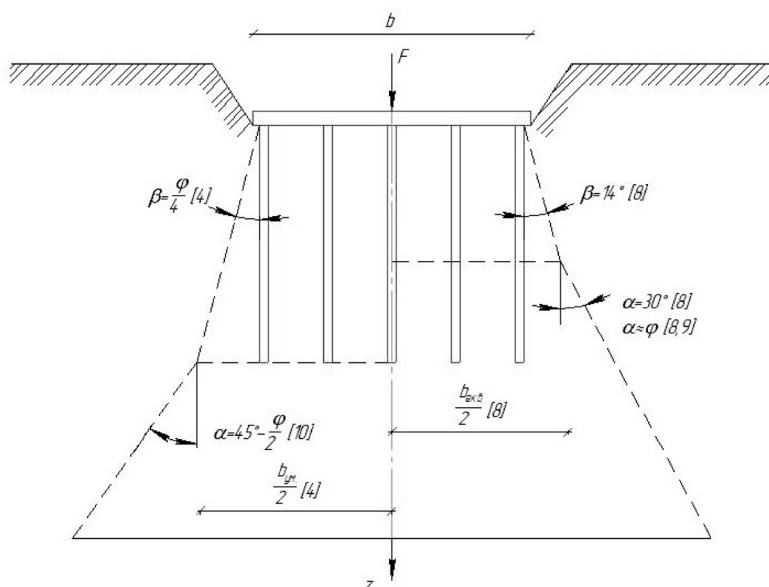


Рисунок 2 – Різні схеми до розподільчої здатності ґрунтової основи

- «тиску на підпірну стіну»

$$\alpha = 45^\circ - \varphi/2, \quad (2)$$

де φ – кут внутрішнього тертя ґрунту, град.

Підхід «кута внутрішнього тертя» використовується для визначення параметрів еквівалентного плитного фундаменту при розрахунках осідань пальових фундаментів [8], а також для визначення параметрів піщаних подушок [9].

Підхід «тиску на підпірну стіну» використовується при визначенні тиску ґрунту на підпірні стіни від місцевих навантажень на поверхні [10].

При $\varphi=30^\circ$, як можна побачити з формул (1) та (2), кут розподілу стає рівним $\alpha=30^\circ$ за обома підходами, що й було раніше запропоновано Томлінсоном (Tomlinson, M.J., 1977) [8] при розрахунках осідань пальових фундаментів методом еквівалентного (умовного) плитного фундаменту.

На рис. 2 також показано різні кути розподілу до бічної поверхні крайніх паль: $\beta=\varphi/4$ [4] та $\beta=14^\circ$ [8] для розподілу дотичними силами стискаючих напружень по глибині ґрунтової основи, що приймаються для визначення габаритів еквівалентного (умовного [4]) плитного фундаменту.

Наведені вище інженерні підходи, в основному, пропонуються для розрахунку габаритів умовних фундаментів та їх осідань.

Водночас, слід зазначити, що у Німеччині, як правило, на підставі рекомендацій геотехнічного товариства [11] інженери при моделюванні у розрахункових комплексах призначають геометричний профіль моделі ґрунтової основи пальових фундаментів виходячи з ширини фундаменту b та/або довжини паль (див. рис. 3), тобто при цьому кут розподілу взагалі буде дорівнювати $\alpha>45^\circ$.

Виходячи з вищенаведеного, на сьогодні немає єдиного підходу щодо розподільчої здатності ґрунтових основ, тому дослідження впливу крайових умов у плані (згідно з кутом розподілу α) моделі суцільного лінійно-деформованого шару скінченної ширини на напружено-деформований стан конструкцій фундаментів є актуальною задачею для адекватного моделювання системи «ОФС».

МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є обґрунтування підходу (методики) для призначення мінімально допустимих геометричних параметрів моделі ґрунтової основи у вигляді суцільного лінійно-деформованого шару скінченної ширини для адекватного моделювання системи «ОФС».



МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для дослідження впливу крайових обмежень у плані моделі суцільного лінійно-деформованого шару скінченної ширини на її розподільчу здатність та деформативність від навантаженого фундаменту на поверхні обрано плоску постановку задачі (плоска деформація) (рис. 4).

За допомогою комплексу SCAD Office 21.1 (ліц. №17280) створено скінченно-елементну модель взаємодії ґрунтової основи з фундаментом. Ґрунтова основа представлена пластинчастими скінченними елементами з постійними деформаційними характеристиками: $E=1,0$ кПа та $\nu=0,3$. Фундамент змодельовано стержневими скінченними елементами. Характеристики фундаменту представлено у табл. 1 та прийнято різну відносну згинальну жорсткість (гнучкість) згідно з пропозиціями Горбунова-Посадова М.І. [2, 9]:

$$t = 10 \frac{Eb^3}{E_k h^3}, \quad (3)$$

де E та E_k – модулі деформації ґрунту й матеріалу фундаменту відповідно;

b та h – ширина й товщина (висота) фундаменту.

На рис. 4 показано загальний вигляд скінченно-елементної розрахункової моделі взаємодії ґрунтової основи з фундаментом різної згинальної жорсткості.

У комплексі SCAD методом скінченних елементів проведено чисельні розрахунки напружено-деформованого стану рівномірно навантаженого ($q=1,0$ кН/м) фундаменту різної відносної згинальної жорсткості (гнучкості, t), що взаємодіє з шаром товщиною H та шириною L , що дорівнює

$$L = b + 2 \cdot H \cdot \operatorname{tg}(\alpha_i) \quad (4)$$

з обмеженням лінійних переміщень в перпендикулярних напрямках до контуру моделі (рис. 5).

Дослідження виконані для моделей ґрунтової основи з наступними співвідношеннями потужності шару H до ширини фундаменту b : $H/b=5$,

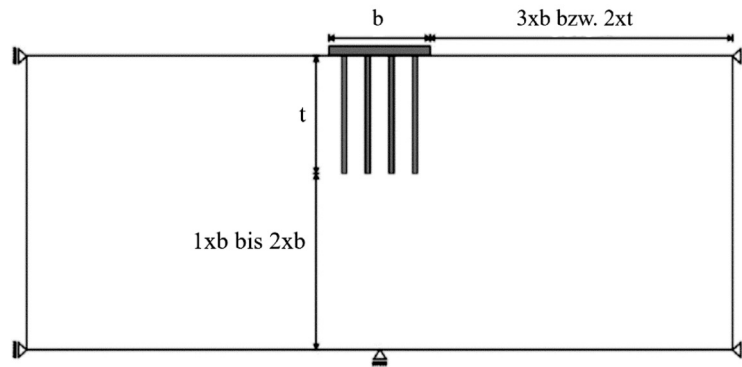


Рисунок 3 – Геометричний профіль моделі ґрунтової основи пальового фундаменту (рекомендація Німецького геотехнічного товариства)

$H/b=4$, $H/b=3$, $H/b=2$ та $H/b=1$. Покрокове обмеження горизонтальних переміщень по ширині моделі відбувалося згідно з кутом розподілу α від 45° до 0° з кроком 5° . Для прикладу, на рис. 3 схематично показано логіку побудови скінченно-елементної моделі ґрунтової основи при $H/b=5$ з урахуванням кута розподілу α .

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ

У якості критеріїв оцінки адекватності роботи моделі прийнято наступні співвідношення:

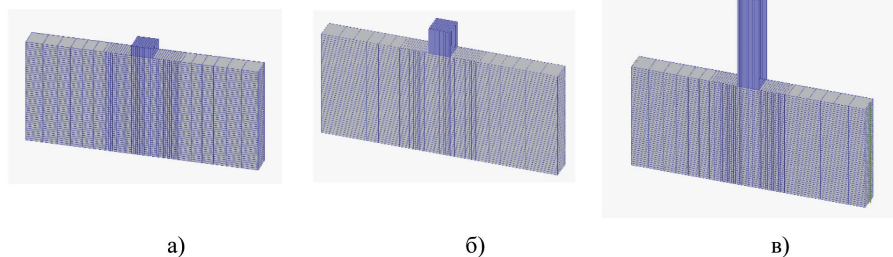


Рисунок 4 – Загальний вигляд моделей з фундаментами різної гнучкості: а – «гнучкий»; б – «скінченної жорсткості»; в – «абсолютно жорсткий»

Таблиця 1 - Механічні та геометричні характеристики фундаменту

Тип фундаменту	Ширина фундаменту, b , м	Висота фундаменту, h , м	Модуль деформації, E_k , кН/м ²	Коефіцієнт Пуассона, ν , од.	Відносна згинальна жорсткість (гнучкість) фундаменту, t , од.
«Гнучкий»	1,0	0,5	1,0	0,2	80
«Скінченної жорсткості»	1,0	1,25	1,0	0,2	5
«Абсолютно жорсткий»	1,0	4,6	1,0	0,2	0,1

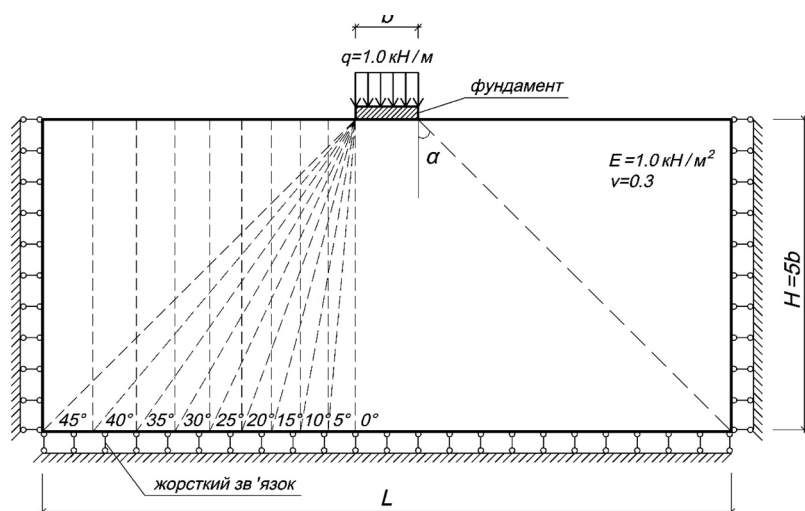


Рисунок 5 – Схема для визначення граничних умов за шириною моделі при $H/b=5$

– для розподільчої здатності:

$$\overline{M}_{\max} = \frac{M_{\max, \alpha_i}}{M_{\max, \alpha=45^\circ}} \quad (5)$$

де $M_{\max, \alpha_i}$ – значення максимального згинального моменту у середині фундаменту при куті розподілу α_i , кН·м;

$M_{\max, \alpha=45^\circ}$ – значення максимального згинального моменту у середині фундаменту при куті розподілу $\alpha=45^\circ$, кН·м;

– для деформативності:

$$\overline{s}_{\text{сер.}} = \frac{s_{\text{сер.}, \alpha_i}}{s_{\text{сер.}, \alpha=45^\circ}} \quad (6)$$

де $s_{\text{сер.}, \alpha_i}$ – значення середнього осідання по ширині фундаменту при куті розподілу α_i , см;

$s_{\text{сер.}, \alpha=45^\circ}$ – значення середнього осідання по ширині фундаменту при куті розподілу $\alpha=45^\circ$, см.

На рис. 6–8 графічно показано результати розрахунків $\overline{M}_{\max}$ та $\overline{s}_{\text{сер.}}$ для співвідношень: $H/b=5$, $H/b=2$ та

$H/b=1$. На рис. 9 показано графік залежності $\overline{M}_{\max}$ від H/b для $\alpha=20^\circ$ та $\alpha=25^\circ$.

По-перше, аналіз результатів розрахунку (див. рис. 6–8) показує, що при $\alpha=0^\circ$ чисельне рішення методом скінченних елементів приводить до точних рішень теорії пружності для рівномірно завантаженого лінійно-деформованого шару:

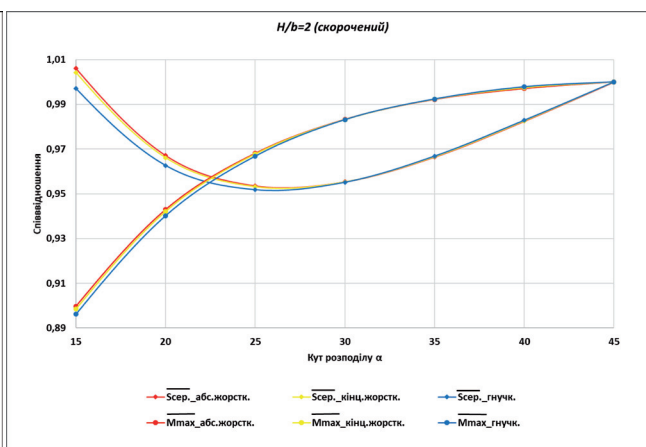
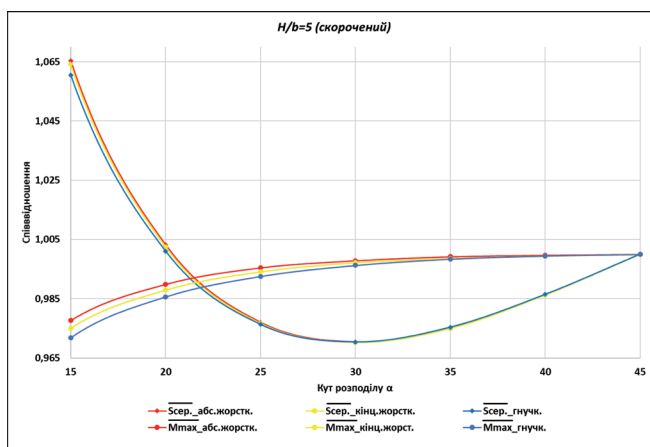
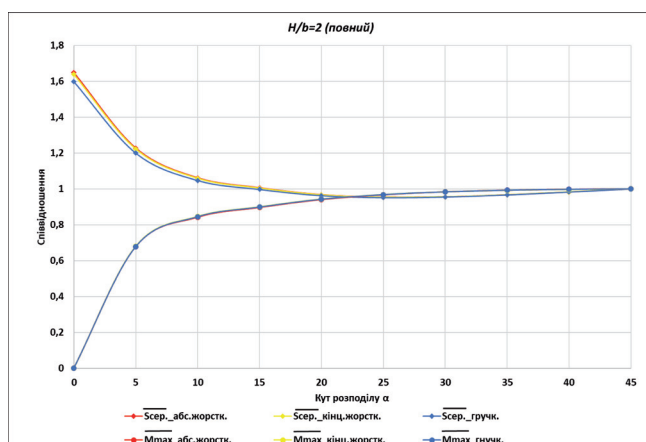
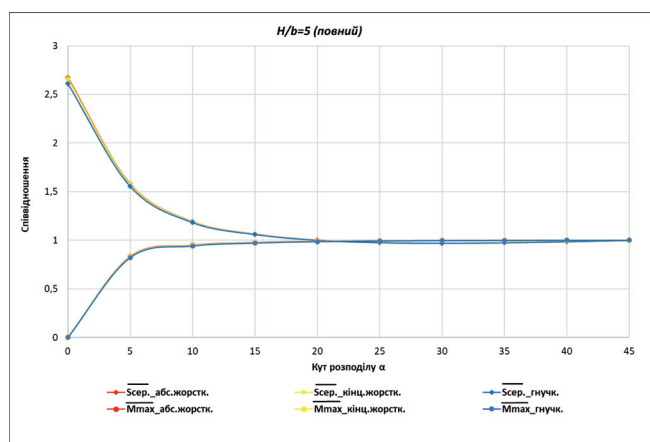


Рисунок 6 – Співвідношення $\overline{M}_{\max}$ та $\overline{s}_{\text{сер.}}$ при $H/b=5$

Рисунок 7 – Співвідношення $\overline{M}_{\max}$ та $\overline{s}_{\text{сер.}}$ при $H/b=2$

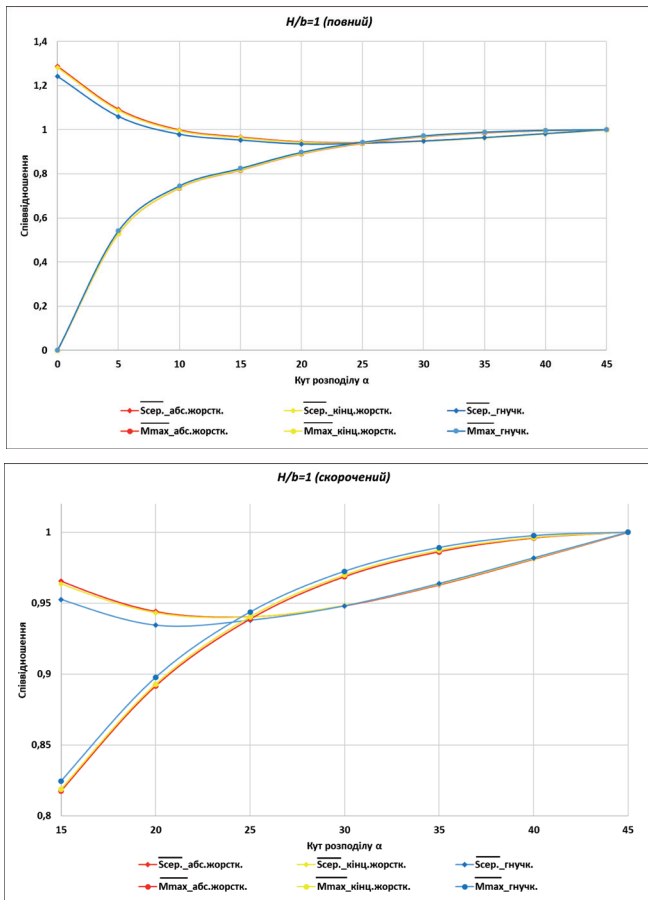


Рисунок 8 – Співвідношення $\overline{M_{\max}}$ та $s_{\text{сер.}}$ при $H/b=1$

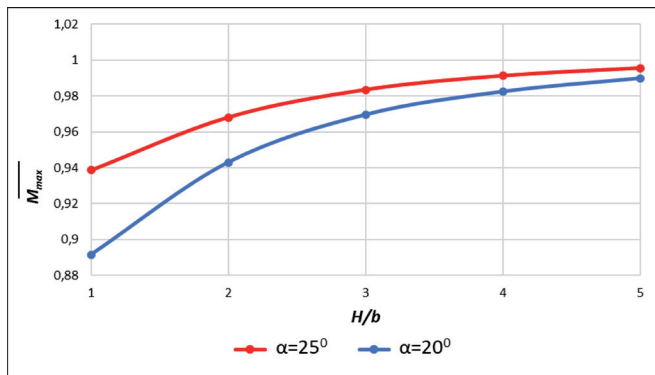


Рисунок 9 – Графік залежності $\overline{M_{\max}}$ від H/b

$$M_{\max, \alpha=0^\circ} = 0;$$

$$s_{\text{сер.}, \alpha=0^\circ} = \frac{\nu q H}{(1-\nu) E}.$$

Аналіз результатів розрахунків показує, що для співвідношень $H/b=5$ (див. рис. 6), $H/b=4$ та $H/b=3$ розподільча здатність та деформативність ґрунтової основи практично не змінюються до кута розподілу $\alpha \approx 20^\circ$, тоді як для співвідношень

$H/b=2$ та $H/b=1$ – до кута розподілу $\alpha \approx 25^\circ$.

Слід зазначити, що для великорозмірних фундаментів ($b > 10\text{м}$), які взаємодіють з реальними ґрунтовими умовами, як правило, співвідношення потужності стисливої товщі H до ширини фундаменту b не перевищує $H/b=2$, що також прийнято у рекомендаціях на підставі схеми на рис. 3.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано існуючі підходи щодо розподілу вертикальних стискаючих напружень по глибині ґрунтової основи від рівномірно розподіленого навантаження на поверхні, що вказує на відсутність єдиного підходу щодо розподільчої здатності ґрунтових основ для адекватного моделювання системи «ОФС».
2. Проведено чисельні дослідження впливу жорстких горизонтальних обмежень по ширині (розміри моделі по ширині) на напружено-деформований стан рівномірно навантаженого фундаменту різної відносної згинальної жорсткості (гнучкості), що взаємодіє з лінійно-деформованим шаром (стисливою товщею) за допомогою програми SCAD.
3. На підставі аналізу результатів чисельних розрахунків для плоскої задачі (плоска деформація) обґрунтована мінімальна допустима ширина моделі лінійно-деформованого шару скінченної ширини, що враховує розподіл стискаючих напружень по глибині під кутом $\alpha \approx 20^\circ \div 25^\circ$ до вертикалі від країв навантаженого фундаменту. При цьому ширина моделі згідно з кутом розподілу $\alpha \approx 20^\circ \div 25^\circ$ практично не впливає на середні осідання та максимальні моментні зусилля фундаменту у порівнянні з кутом $\alpha=45^\circ$, що запропоновано у роботах [6, 7, 11].

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Егоров К.Е. К вопросу деформации основания конечной толщины / К.Е. Егоров // Механика ґрунтов: труды ин-та НИИ оснований и подземных сооружений. 1958. № 34. С. 5-33.
2. М.И. Горбунов-Посадов. Осадки фундаментов на слое ґрунта, подстилаемом скальным основанием / М.: Стройиздат, 1946. 60 с.
3. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83) / НИИОСП им. Герсегованова. М.: Стройиздат, 1986. 415 с.
4. Основи та фундаменти споруд: Зміна №1 до ДБН В.2.1-10-2009. К.: Мінрегіонбуд України, 2011. 55 с.



5. ДБН В.2.1-10:2018 Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення. Київ: Мінрегіон України, ДП «Укрархбудінформ», 2018. 36 с.
6. Лучковский И.Я. Взаимодействие конструкций с основанием / И.Я. Лучковский. – Харків: ХДАГХ (Бібліотека журналу ITE), 2000. Том 3. 264 с.
7. Lutchkovsky, I.J. Definition of the parameters of an elastic finite layer: [text] / I.J. Lutchkovsky, O.V. Samorodov // Proceedings of the XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. Edinburgh, Scotland: 2015. P. 3711-3715.
8. Byrne, G., Berry, AD. A Guide to Practical Geotechnical Engineering in Southern Africa. 4th edition. Published by Franki, 2008. 423 pp.
9. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти: підручник / Л.М. Шутенко, О.Г. Рудь, О.В. Кічаєва, О.В. Самородов, О.В. Гаврилюк; за ред. Л. М. Шутенка ; пер. з рос. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 563 с.
10. Настанова з проектування підпірних стін: ДСТУ-Н Б В.2.1-31:2014. Київ: Мінрегіон України, 2015. 86 с.
11. Empfehlungen des Arbeitskreises "Numerik in der Geotechnik" – EANG. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (ed.), 2014. 196 pp.
- Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. Edinburgh, Scotland.
8. Byrne, G., & Berry, A. D. (2008). A Guide to Practical Geotechnical Engineering in Southern Africa (4th ed.). Published by Franki.
9. Shutenko, L. M., Rud, O. G., Kichaeva, O. V., Samorodov, O. V., & Gavryliuk, O. V. (2017). Mechanics of soils and foundations: a textbook. Edited by L. M. Shutenko. Kharkiv: Kharkiv National University of Municipal Economy named after O. M. Beketov.
10. DSTU-N B V.2.1-31:2014. (2015). Guidelines for the design of retaining walls. Kyiv: Minregion of Ukraine.
11. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.v. (2014). Recommendations of the Working Group "Numerics in Geotechnics".

Стаття надійшла до редакції 26.05.2023 року

REFERENCES

1. Egorov, K. E. (1958). On the deformation of a finite thickness foundation. Mechanics of Soils: Proceedings of the Institute of Foundations and Underground Structures, 34, 5-33.
2. Gorbunov-Posadov, M. I. (1946). Settlements of foundations on a layer of soil underlain by bedrock. Moscow: Stroyizdat.
3. NIIOSP named after N. M. Gersevanov. (1986). Manual for the design of foundations for buildings and structures (to SNiP 2.02.01-83). Moscow: Stroyizdat.
4. Amendment No. 1 to DBN V.2.1-10-2009. (2011). Foundations and foundations of structures: Kyiv: Minregionbud of Ukraine.
5. DBN V.2.1-10:2018.(2018). Bases and foundations of buildings and structures. Main provisions. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Utility Services of Ukraine, SE Ukrarkhbudinform.
6. Luchkovsky, I. Y. (2000). Interaction of structures with the foundation (Vol. 3). Kharkiv: KDAAGH (Library of the journal ITE)
7. Lutchkovsky, I. J., & Samorodov, O. V. (2015). Definition of the parameters of an elastic finite layer. In Proceedings of the XVI European Conference on Soil Mechanics and