

УДК 624.131.7

ОДИН ІЗ ПІДХОДІВ ДООЦІНКИ СТІЙКОСТІ ГРУНТОВОГО МАСИВУ У РАМКАХ СІТКОВИХ МЕТОДІВ

І.І. Солодей,

д-р техн. наук, професор

В.М. Павленко,

аспірант

О.П. Куліков,

аспірант

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

DOI: 10.32347/2410-2547.2024.113.29-36

У даній роботі запропоновано алгоритм для оцінки стійкості схилу у рамках сіткових методів на основі напружено-деформованого стану схилу, отриманого за допомогою методу скінчених елементів. Проведено порівняння результатів розрахунків виконаних іншими методами для перевірки їх збіжності з отриманими запропонованим підходом.

Ключові слова: сіткові методи, теорія графів, коефіцієнт стійкості схилів, методи розрахунку схилів, моделювання схилів, метод скінчених елементів (МСЕ), НМСЕ (напіваналітичний метод скінчених елементів).

Вступ. Вирішення складних завдань в інженерній практиці потребує ретельного підходу та значної уваги до деталей у процесі їх розв'язання.

З виникненням більш точних і трудомістких методів розрахунку значна частина виконуваних операцій перекладається на комп'ютерні програми, створені для даних типів задач, що фактично віддаляє інженера від прямого вирішення задачі. У такому разі роль людини зводиться до введення вхідних даних розрахунку та аналізу результатів, без прямого доступу до контролю самого процесу розрахунку. У такому випадку значною мірою зростає залежність результатів від введених даних, що потребує обізнаності інженера не лише у теоретичних засадах даного методу вирішення задачі, а і конкретного інтерфейсу програмного комплексу. Враховуючи цей аспект доцільно для складних інженерних розрахунків використовувати різні програмні комплекси для основного і перевірного розрахунків. Не зайвим буде згадати, що всі методи розрахунку мають свої переваги і недоліки, саме тому буде ще краще, якщо використовувані програмні комплекси базуються на різних підходах до вирішення одного і того самого типу задач. Саме тому створення альтернативних підходів до вирішення певної групи задач завжди залишається актуальним.

Алгоритм запропонованого підходу до оцінки стійкості ґрунтового масиву. Головною перевагою сіткових методів можна назвати можливість представлення значного об'єму даних у зручному для аналізу вигляді. Також сіткові методи мають ряд простих для розуміння алгоритмів, що спрощують аналіз інформації та допомагають вирішувати широке коло задач. Використання даних методів для вирішення задач оцінки стійкості дає змогу розробити новий інструментарій для цього. Основи даних методів та деякі питання їх реалізації наведені в статті [1].

Розглядаючи алгоритм застосування цих методів до означеного класу задач можна виділити наступні етапи використання методу, що наведені на рис. 1. Основна ідея полягає в використанні комбінації методу скінчених елементів із сітковими методами для оцінки стійкості ґрунтових масивів.

Починати огляд етапів наведеного алгоритму слід із використання методу скінчених елементів, зазначивши, що потрібні ретельно підходити до процесу моделювання схилу для отримання достовірних результатів. Також застосування просунутих моделей ґрунту дозволяє отримати більш близькі до реального напружено-деформованого стану (НДС) схилу результати. Аналіз результатів розрахунку МСЕ дозволяє не лише отримати загальне уявлення про НДС масиву, але і виявити певні недоліки, що могли бути допущені на етапі моделювання. Певні питання розглядалися у статтях [3, 4].



Рис. 1. Блок-схема запропонованого алгоритму оцінки стійкості схилів

Побудова графу - важливий етап реалізації даного методу. У статті [1] детально розглянуто 2 методи перетворення скінченно-елементної моделі у сітку графу. Пропонуємо використовувати метод при якому вершини графу розміщуються у центрах ваги скінченних елементів. При побудові ребер графу необхідно, щоб вузли графу були поєднані достатньою кількістю ребер для отримання достовірних результатів. У даній статті будуть розглянуті результати тестових задач при побудові графів, для яких поєднувалися вузли, що знаходяться у центрах скінченних елементів, що мають хоча б один спільний вузол у розрахунковій схемі скінченно-елементної моделі. Такий підхід дає достатньо насичені ребрами графи та дозволяє поєднати вершини сусідніх скінченних елементів для збільшення кількості зв'язків у графі.

Детальніше розглянемо функцію ваги графів. Визначення ваги ребер графу виконується на основі НДС схилу після розрахунку схилу методом скінченних елементів. Як зазначалося у статті [1] про наближення ґрунтового схилу до граничного стану можна судити аналізуючи наближення напружень у схилі до їх граничних значень. Отже, поверхня лінії ковзання буде локалізуватися у місцях, де зрешуючі дотичні напруження будуть максимально близькими або перевищуватимуть опір ґрунту на зсув. Даний принцип використовується для визначення ваги переходу(ваги ребра) між вузлами графу. Для цього, використовуючи знайдені раніше напруження, що діють у скінченних елементах, визначаємо нормальні σ та дотичні напруження, що діють на площині, яка нахилена як ребро графу, тобто на кут θ за допомогою формул (1, 2) відповідно:

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta, \quad (1)$$

$$\tau = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta, \quad (2)$$

де σ_x , σ_y - нормальні напруження уздовж осі x і y відповідно, τ_{xy} - дотичні напруження, θ - кут нахилу площини, на якій діють нормальні і дотичні напруження до осі x . Значення кута θ приймаються додатними при повороті площини проти годинникової стрілки і від'ємними при повороті за годинниковою стрілкою. Слід відмітити, що при побудові графу складно досягнути такої кількості ребер, щоб отримати найбільш небезпечні площини дії напружень, тому

доцільним є варіювання кута θ у певному інтервалі значень і визначення нормальних і дотичних напружень, що відповідатимуть найбільш несприятливим умовам.

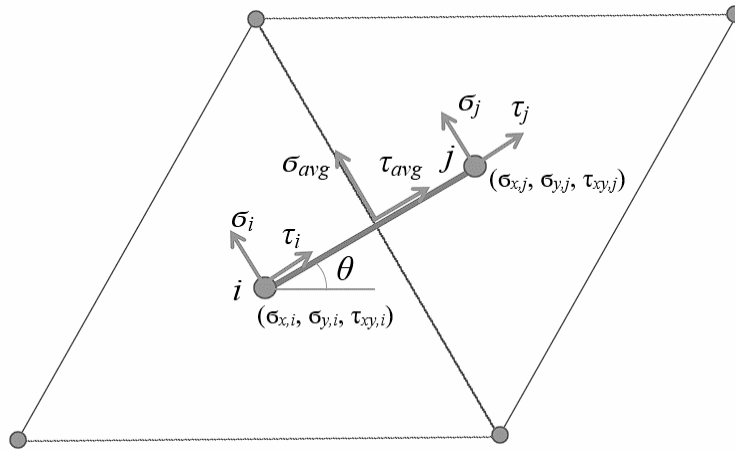


Рис. 2. Схема для пошуку усереднених значень напружень для визначення ваги ребра

Визначивши напруження, що діють на відповідно повернутій площині в обох вузлах графу, визначаємо середні значення напружень σ_{avg} і τ_{avg} (рис. 2). На основі даних напружень визначаємо вагу ребра графу за формулою:

$$W_{(i,j)} = \frac{c - \sigma_{avg} \tan \varphi}{\tau_{avg}}, \quad (3)$$

де c – питоме зчеплення ґрунту, φ – кут внутрішнього тертя ґрунту.

Визначивши вагу ребер графу можливо застосувати алгоритми для пошуку найкоротшого шляху між вузлами зваженого графу. Проблема його пошуку широко висвітлена у літературі [5, 6]. Найбільш відомими алгоритмами є: алгоритм Дейкстри, алгоритм Беллмана-Форда, алгоритм Джонсона, алгоритм Левіта, алгоритм пошуку A*, алгоритм Флойда-Воршелла. Деякі алгоритми можуть працювати як з додатними значеннями графу так і від'ємними. У цій публікації використовуватиметься алгоритм Дейкстри, який працює лише із додатними ребрами. У нашому випадку отримуються дотичні напруження різних знаків, що призводить до наявності ваги ребер із різними знаками. Таким чином, щоб забезпечити працездатність алгоритму, вага усіх ребер приймається додатною, проте до ребер, які відповідають ситуації, котра підвищує коефіцієнт стійкості, застосовуємо додатковий коефіцієнт ваги, що дозволяє покращити результати пошуку.

Визначивши найкоротший шлях, отримуємо змогу обрахувати коефіцієнт стійкості схилу, використовуючи наступну формулу:

$$k_{st} = \frac{\sum_i (c - \sigma_{avg} \tan \varphi) \Delta L}{\sum_i \tau_{avg} \Delta L}, \quad (4)$$

де σ_{avg} , τ_{avg} - отримані для ребра усереднені значення нормальних і дотичних напружень, ΔL – довжина ребра графу, c – питоме зчеплення ґрунту, φ – кут внутрішнього тертя ґрунту.

Останнім етапом можна назвати отримання поверхні ковзання, яка більшою мірою відповідатиме реальній її формі, ніж ламана лінія, що поєднує вузли найкоротшого шляху.

Слід також зазначити, що при розгляді алгоритму наведені вище формули відповідають плоскій постановці задачі, з критерієм руйнування згідно умови Кулона. Саме така постановка задачі використовувалася при випробуванні алгоритму шляхом вирішення тестових задач, результати розв'язку яких наведені в даній публікації. Якщо розглядати просторову постановку задачі, актуальним стає застосування модифікацій методу скінченних елементів, наприклад напіваналітичного методу скінченних елементів, використання якого дозволить зменшити трудомісткість розрахункового процесу. При розгляді більш досконалих моделей, що описують

нелінійну поведінку ґрунтового масиву, можна використовувати для визначення ваги графу інші підходи, такі як, наприклад, аналіз накопичення пластичних деформацій у ґрунті.

Наведений алгоритм дає змогу використовувати сіткові методи при розв'язанні задач стійкості схилів при цьому уникаючи складних ітераційних розрахунків на відміну від методу зниження міцності.

Випробування алгоритму. Для перевірки працездатності запропонованого методу було розв'язано ряд тестових задач. Дані тести для порівняння результатів були виконані за допомогою найбільш розповсюджених методів, а саме методами граничної рівноваги і методом зниження міцності ("strength reduction method"), детально розглянуті існуючі методи в публікації [2]. Розрахунки проводилися за допомогою ПК «Plaxis 2D» та ПК «Укіс» (компонент програм SCAD-Office), отримані результати порівнювалися із результатами, отриманими запропонованим методом, для якого оцінка напружено-деформованого стану проводилася за допомогою ПК «ЛІРА-САПР». Для розрахунків у ПК «Plaxis 2D» та ПК «ЛІРА-САПР» використовувалася модель ґрунту Кулона-Мора, оскільки була можливість використання даної моделі в обох ПК і отримання співставних результатів. Розв'язано 2 тестових задачі у 2 постановках кожна. Було розглянуто 2 однорідних схила (піщаний та глиняний), спочатку без додаткового навантаження, потім із додатковим навантаженням (160 кН/м та 280 кН/м відповідно). Фізико-механічні характеристики ґрунтів наведені в табл. 1. Розрахункові схеми схилу зображені на рис. 3-4. На основі отриманих результатів сформована зведена таблиця 2. Для зменшення кількості однотипного графічного матеріалу отримані поверхні ковзання представлені лише для 2 задач у постановці з додатковим навантаженням, що отримані різними методами (рис. 5-7). Відмітимо, що ПК «Plaxis 2D» не зображає безпосередньо лінії ковзання, про її характер можна судити по приросту деформацій. Збіжність результатів по відношенню до методу зниження міцності (ПК «Plaxis 2D») наведено на рис. 8.

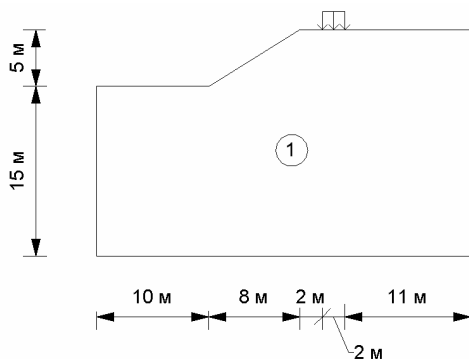


Рис. 3. Розрахункова схема для задачі №1

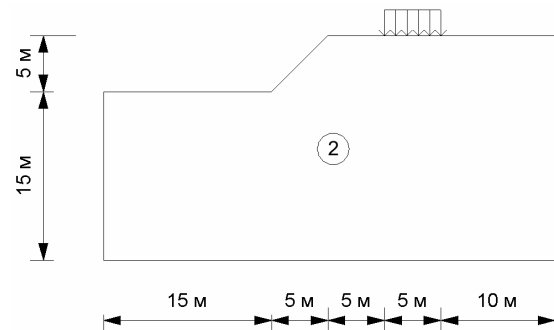


Рис. 4. Розрахункова схема для задачі №2

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики ґрунтів

Номер шару	Ґрунт	Природня вологість, дол. од.	Щільність ґрунту, г/см ³	Питома вага ґрунту, кН/м ³	Коефіцієнт пористості, дол. од.	Кут внутрішнього тертя, град.	Питома зчеплення, кПа	Модуль деформації, МПа
		<i>W</i>	ρ	γ	<i>e</i>	φ	<i>C</i>	<i>E</i>
1	Пісок ср. крупності	0,138	1,88	18,48	0,5	31	3	19
2	Глина напівтверда	0,381	1,89	18,5	0,831	16	50	15

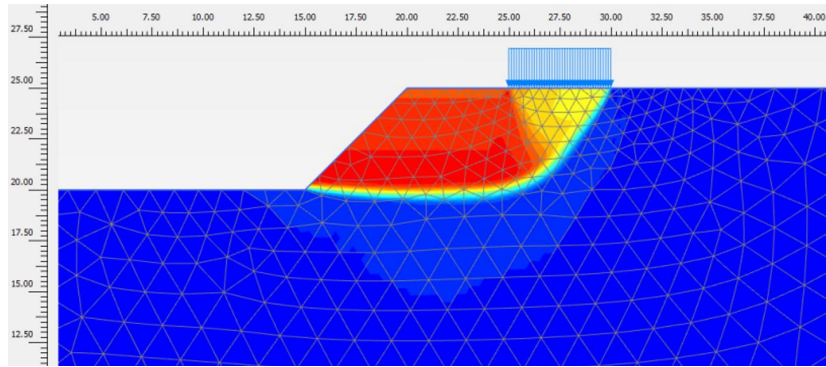


Рис. 5. Еюра приросту переміщень, отримана у ПК «Plaxis 2D» для задачі № 2 із додатковим навантаженням

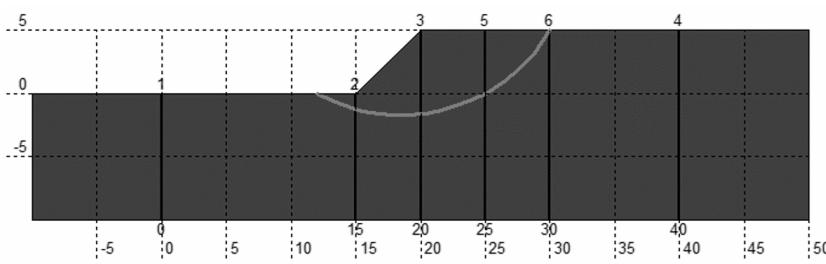


Рис. 6. Поверхня ковзання, отримана у ПК «Укіс» за спрощеним методом Бішопа для задачі № 2 із додатковим навантаженням

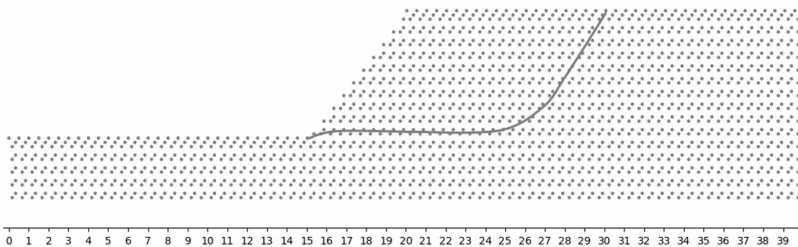


Рис. 7. Поверхня ковзання, отримана запропонованим методом для задачі № 2 із додатковим навантаженням

Таблиця 2

Отримані результати розрахунків

Програмний комплекс, використаний для розрахунку	Група методів, на якій заснований програмний комплекс елементів	Використаний метод розрахунку стійкості	Коефіцієнт стійкості			
			Задача №1		Задача №2	
			Постановка №1- Піщаний схил	Постановка №2- Піщаний схил з додатковим навантаженням	Постановка №1- Глиняний схил	Постановка №2- Глиняний схил з додатковим навантаженням
«Укіс» (компонент SCAD-Office)	Методи граничної рівноваги	Метод зниження міцності	1,471	1,041	3,643	1,314
		Феленіус	1,446	1,375	3,529	1,268
		Бішоп спрощений	1,518	1,498	3,639	1,413
		Ямбу спрощений	1,394	1,27	3,337	1,256
ПК «ЛІРА-САПР»	Метод скінченних елементів	Ямбу корегований	1,466	1,315	3,062	1,176
		Запропонований метод	1,447	1,152	3,389	1,284

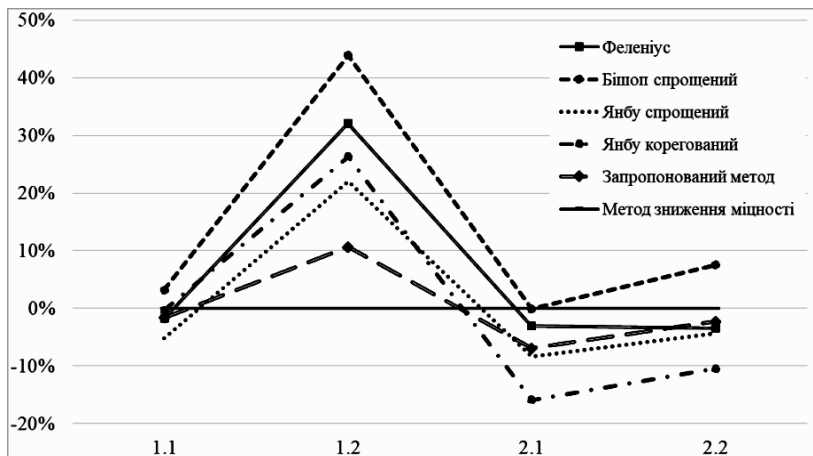


Рис. 8. Відхилення значень коефіцієнту стійкості по відношенню до методу зниження міцності ПК «Plaxis»

Висновки. Отримані результати мають досить високу збіжність із традиційними методами, що підтверджує можливість використання запропонованого методу для розв'язку означеного класу задач. Головною перевагою даного методу є можливість уникнути складних ітераційних розрахунків при визначенні коефіцієнта стійкості і можливість локалізувати поверхню ковзання. Проте цей метод потребує подальшого дослідження і напрацювання більшої бази перевірочних розрахунків для підтвердження його працездатності і ефективності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Солодей І.І., Павленко В.М.* Використання теорії графів для оцінки стійкості зсувних і зсувонебезпечних схилів // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник – К.: КНУБА, 2024. – Вип. 112. – С. 19-27. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.112.19-27>
2. *Солодей І.І., Петренко Е.Ю., Павленко В.М.* Класифікація і причини виникнення зсувних процесів та методи розрахунку схилів // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник – К.: КНУБА, 2022. – Вип. 109. – С. 184-202. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.184-202>.
3. *Солодей І.І., Петренко Е.Ю., Павленко В.М.* Особливості методів оцінки стійкості зсувних та зсувонебезпечних схилів // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник – К.: КНУБА, 2023. – Вип. 111. – С. 25-38. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.111.25-38>.
4. *Солодей І.І., Петренко Е.Ю., Павленко В.М.* Постановка задачі моделювання зсувних процесів в пластичних ґрунтах // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник – К.: КНУБА, 2023. – Вип. 110. – С. 47-62. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.47-62>.
5. *Bondy J.A., Murty U.S.R.* Graph theory with applications. – New York: Elsevier Science Publishing Co., 1976. – 270p.
6. *Wilson R.J.* Introduction to Graph Theory. – Harlow: Longman, 1996 – 179p.

REFERENCES

1. *Solodei I.I., Pavlenko V.M.* Vykorystannia teorii hrafiv dlia otsinky stiikosti zsvnykh i zsvonebezpechnykh skhyliv (Application graph theory to evaluate the stability of landslide slopes) // Opir materialiv i teoriia sporud: nauk.-tekh. zbirnyk – K.: KNUBA, 2022. – Vyp. 112. – S. 19-27. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.112.19-27>
2. *Solodei I.I., Petrenko E.Yu., Pavlenko V.M.* Klasyfikatsiia i prychny vynyknennia zsvnykh protsesiv ta metody rozrakhunku skhyliv (Classification and causes of landslide processes and slope calculation methods) // Opir materialiv i teoriia sporud: nauk.-tekh. zbirnyk – K.: KNUBA, 2022. – Vyp. 109. – S. 184-202. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.184-202>
3. *Solodei I.I., Petrenko E.Yu., Pavlenko V.M.* Osoblyvosti metodiv otsinky stiikosti zsvnykh ta zsvonebezpechnykh skhyliv (Features of the methods of the slope stability evaluation.) // Opir materialiv i teoriia sporud: nauk.-tekh. zbirnyk – K.: KNUBA, 2023. – Vyp. 111. – S. 25-38. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.111.25-38>
4. *Solodei I.I., Petrenko E.Yu., Pavlenko V.M.* Postanovka zadachi modeliuвання zsvnykh protsesiv v plastychnykh ґruntakh (Statement of the problem of simulation of shear processes in low-cohesion plastics soils) // Opir materialiv i teoriia sporud: nauk.-tekh. zbirnyk – K.: KNUBA, 2023. – Vyp. 110. – S. 47-62. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.47-62>
5. *Bondy J.A., Murty U.S.R.* Graph theory with applications. – New York: Elsevier Science Publishing Co., 1976. – 270p.
6. *Wilson R.J.* Introduction to Graph Theory. – Harlow: Longman, 1996 – 179p.

Солодей І.І., Павленко В.М., Куліков О.П.

ОДИН ІЗ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ СТІЙКОСТІ ҐРУНТОВОГО МАСИВУ У РАМКАХ СІТКОВИХ МЕТОДІВ

Важливим етапом для створення можливості використання зсувних і зсувонебезпечних територій в господарській діяльності є оцінка їх стійкості. Для вирішення цього складного завдання розроблено значну кількість різноманітних методів, кожен із яких має свої переваги і недоліки. В даній роботі запропоновано метод оцінки стійкості схилів у рамках сіткових методів. Цей метод реалізується в комплексі з методом скінченних елементів, що дозволяє оцінити напружено-деформованого стан та за допомогою сіткових методів визначити коефіцієнт стійкості і локалізувати поверхню сковзання.

У роботі детально наведено алгоритм використання сіткових методів для такого роду задач. Суть його полягає у трьох ключових етапах, першим із них можна виділити використання методу скінченних елементів для визначення діючих напружень у схилі. Другий - створення сітки на основі скінчено-елементної моделі, що дозволяє досить легко перейти до зручного для аналізу сіткового графу. Третій полягає у використанні алгоритмів для аналізу графів і обробці результатів. При цьому, одним із найважливіших етапів для працездатності алгоритмів пошуку найкоротшого шляху є підбір функції ваги ребер графу, у даній роботі наведено приклад використання діючих напружень.

Також у роботі висвітлено результати розв'язку кількох тестових задач для оцінки їх збіжності між запропонованим та іншими розповсюдженими методами для оцінки стійкості схилів. Розрахунки проводилися за допомогою ПК «Plaxis 2D» та ПК «Укіс», а для оцінки напружено-деформованого стану для запропонованого методу використовувався ПК «ЛІРА-САІР». Запропонований метод показав достатньо високу збіжність результатів з іншими методами.

Ключові слова: сіткові методи, теорія графів, коефіцієнт стійкості схилів, методи розрахунку схилів, моделювання схилів, метод скінченних елементів (МСЕ), напіваналітичний метод скінченних елементів (НМСЕ).

Solodei I.I., Pavlenko V.M., Kulikov O.P.

ONE OF THE APPROACHES TO ASSESSING THE STABILITY OF THE SOIL MASSIF WITHIN THE GRID METHODS

An important stage for creating the possibility of using landslide and landslide-prone territories in economic activity is the assessment of their stability. To solve this difficult task, a significant number of various methods have been developed, each of which has its own advantages and disadvantages. In this work, a method for assessing the stability of slopes within the framework of grid methods is proposed. This method is implemented in a complex with the finite element method, which allows to estimate the stress-strain state and to determine of the stability coefficient and localize the slip surface using grid methods.

The algorithm for using grid methods for this type of problem is given in detail in the paper. Its essence consists of three key stages, the first using the finite element method to determine the acting stresses in the slope. The second is the creation of a grid based on a finite-element model, which makes it quite easy to switch to a grid graph convenient for analysis. The third is the use of algorithms for analyzing graphs and processing the results. At the same time, one of the most important stages for the efficiency of the algorithms for finding the shortest path is the selection of the weight function of the edges of the graph, an example of the use of acting stresses is given in this work.

Also, the work highlights the results of solving several test problems to evaluate their convergence between the proposed and other widespread methods for assessing the stability of slopes. Calculations were carried out with Plaxis 2D PC and Ukis PC, and LIRA-SAPR PC was used to estimate the stress-strain state for the proposed method. The proposed method showed sufficiently high convergence of results with other methods.

Keywords: grid methods, graph theory, slope stability coefficient, slope calculation methods, slope modelling, finite element method (FEM), semi-analytical method of finite elements (SAFEM).

УДК 624.131.7

Солодей І.І., Павленко В.М., Куліков О.П. Один із підходів до оцінки стійкості ґрунтового масиву у рамках сіткових методів // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірник – К.: КНУБА, 2024. – Вип. 113. – С. 29-36.

У даній роботі запропоновано алгоритм для оцінки стійкості схилу у рамках сіткових методів на основі напружено-деформованого стану схилу, отриманого за допомогою методу скінчених елементів. Проведено порівняння результатів розрахунків виконаних іншими методами для перевірки їх збіжності з отриманими запропонованим підходом.

Табл. 2. Іл. 8. Бібліогр. 6 назв.

UDC 624.131.7

Solodei I.I., Pavlenko V.M., Kulikov O.P. One of the approaches to assessing the stability of the soil massif within the grid methods // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles- K.: KNUBA, 2024. – Issue 113. – P. 29-36.

In this paper, an algorithm is proposed for assessing slope stability within the grid methods based on the stress-strain state of the slope obtained using the finite element method. The results of calculations performed by other methods were compared to check their convergence with those obtained by the proposed approach.

Tab. 2. Fig. 8. Ref. 6.

Автор: доктор технічних наук, професор, професор кафедри будівельної механіки СОЛОДЕЙ Іван Іванович
Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури
Робочий тел.: +38 (044) 241-55-55
Мобільний тел.: +38 (050)357-44-90
E-mail: solodei.ii@knuba.edu.ua
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7638-3085>

Автор: аспірант кафедри будівельної механіки ПАВЛЕНКО Василь Михайлович
Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури
Мобільний тел.: +38 (098) 783-46-10
Email: pavlenko_vm@knuba.edu.ua
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4525-5405>

Автор: аспірант кафедри будівельної механіки КУЛІКОВ Олександр Петрович
Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил 31, Київський національний університет будівництва і архітектури
Мобільний тел.: +38 (066) 108-91-99
Email: kulikov_or-2023@knuba.edu.ua
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-2614-7318>