

УДК 624.131.7

ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДІВ ОЦІНКИ СТІЙКОСТІ ЗСУВНИХ ТА ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНИХ СХИЛІВ

І.І. Солодей,

доктор технічних наук, професор

Е.Ю. Петренко,

кандидат технічних наук, доцент

В.М. Павленко,

аспірант

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

DOI: 10.32347/2410-2547.2023.111.25-38

У роботі розглянуто дві групи методів оцінки стійкості схилу. Наведено основний математичний апарат деяких методів граничної рівноваги і основні особливості методу скінченних елементів для даного типу задач. Виконано порівняльний розрахунок уявного схилу за допомогою різних груп методів.

Ключові слова: зсуви, коефіцієнт стійкості, методи розрахунку схилів, моделювання схилів, метод скінченних елементів (МСЕ).

Вступ. Оцінка стійкості зсувних і зсувонебезпечних схилів і укосів являє собою складну інженерну задачу, важливість розв'язку якої зумовлена необхідністю безпечної експлуатації даних територій у господарській діяльності. Питання, які пов'язані з даним типом задач, привертають увагу науковців, однак не дивлячись на значну кількість праць у цій галузі, залишаються актуальними для досліджень і обговорень.

Забезпечення стійкості схилів і укосів є комплексною проблемою, що включає декілька основних видів задач [21]: визначення коефіцієнту стійкості схилу, побудова та визначення розмірів поверхні ковзання, побудову епюри зсувного тиску. Різновиди задач у сукупності із складністю інженерно-геологічних умов та значною кількістю природних та техногенних факторів, що можуть впливати на схил або укіс, зумовили появу великої кількості методів для їх вирішення. Більшість з них не є універсальними і значною мірою зосереджені на розв'язанні конкретного типу задачі. У статті [5] наведено стислий огляд існуючих методів без розгляду математичного апарату, на якому вони базуються.

Методи граничної рівноваги. Одними найбільших розповсюджених підходів до розв'язання задач стійкості схилів є методи граничної рівноваги. Для розрахункових моделей даної групи характерним є прийняття ряду спрощень: використання гіпотези твердого відсіку; використання заздалегідь визначеної поверхні ковзання за рахунок аналітичних методів або натурних спостережень; нехтування силами взаємодії між відсіками, на які розбитий схил; тощо. Незважаючи на це, вони залишаються основними інженерними методами оцінки стійкості схилів і є найбільш апробованими у геотехнічній практиці.

У цій групі методів розроблені узагальнені підходи урахування гідродинамічних і сейсмічних сил, але досить часто для спрощення розрахунків їх напрямком приймається таким, що співпадає з напрямком дії зрушуючих сил. Це призводить до зменшення коефіцієнту стійкості, а відповідно і до зменшення запасу стійкості схилу. У розглянутих методах для урахування гідродинамічних сил використовуються 2 підходи - або додавання гідродинамічного тиску до зрушуючих сил, або на основі так званого «методу зважування». За відсутності напірних ґрунтових вод усі фізико-механічні характеристики ґрунтів приймаються в насиченому водою стані, а гідродинамічний тиск в такому разі не враховується.

Метод круглоциліндричної поверхні ковзання. Даний метод широко розповсюджений у будівельній практиці і застосовується за допомогою різних прийомів,

тому відомий під різними назвами [1, 4, 7, 8, 9, 10, 14, 17]: В. Фелленіуса, шведський метод круглоциліндричних поверхонь ковзання, метод Терцаги, метод Петтерсона, метод вертикальних елементів, метод Бішопа, метод Како, метод вагового тиску та інші. Метод базується на припущенні, що сповзання ґрунту може статися лише в результаті обертання масиву навколо центру O (рис. 1). Поверхня ковзання $B-B$ у такому випадку буде представлена дугою деякого кола з радіусом r . Сповзаючий масив при цьому розглядається як деякий твердий блок, усі точки якого приймають участь в одному загальному русі.

Одним з найпростіших є метод моментів, сутність якого полягає у тому, що масив розглядається під впливом двох чинників: моменту, що обертає масив $M_{об}$ і моменту M_{ymp} , що утримує масив, а коефіцієнт стійкості K_{cm} у такому випадку визначається співвідношенням цих моментів:

$$K_{cm} = \frac{M_{ymp}}{M_{об}}. \quad (1)$$

Обертальний момент визначається добутком зсувних сил на плече до центру обертання O , а утримуючий момент добутком сил опору зсуву на аналогічне плече.

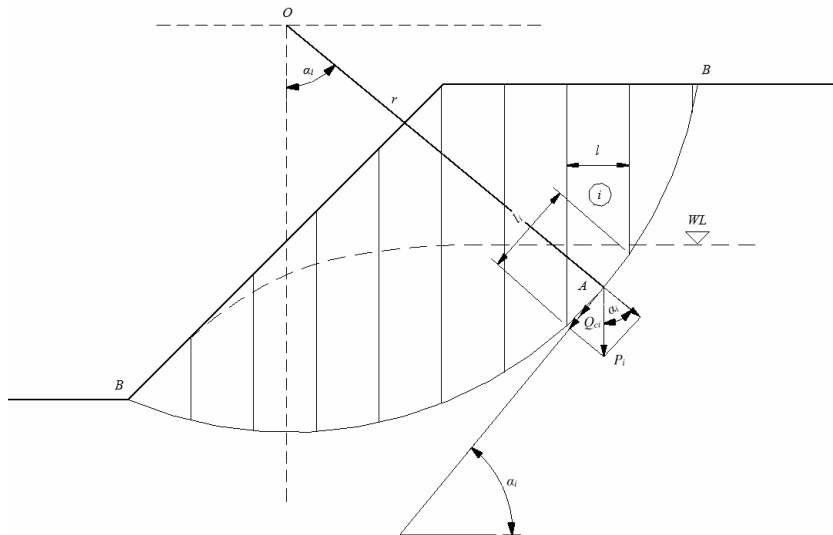


Рис. 1. Розрахункова схема до методу круглоциліндричної поверхні

Для врахування неоднорідності схилу і зміни кута нахилу дотичної до поверхні ковзання необхідно розділити уявний зсувний масив на певну кількість розрахункових відсіків, для кожного з яких визначають сили опору зсуву і зрушуючі сили. Відповідно коефіцієнт запасу стійкості схилу набуває наступного вигляду:

$$K_{cm} = \frac{\sum M_{ymp}}{\sum M_{об}}. \quad (2)$$

Остаточні формули коефіцієнту стійкості схилу матимуть наступний вигляд. За відсутності ґрунтових вод:

$$K_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i \cos \alpha_i \tan \phi_i + c_i l_i)}{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i \sin \alpha_i + Q_{ci})}, \quad (3)$$

де P_i – повна вага i -го відсіку ґрунту, c_i, ϕ_i – питоме зчеплення і кут внутрішнього тертя ґрунту на рівні підшви відсіку, Q_{ci} – сейсмічна сила.

де ψ_p – кут опору зсуву, що визначається за формулою $\psi_p = \arctan F_p$, де, у свою чергу, F_p – коефіцієнт опору зсуву.

Знак сили H_i визначається в залежності від кута нахилу поверхні ковзання α_i . За умови, що кут α_i за напрямком збігається з напрямком поверхні ковзання, α_i та H_i матимуть позитивне значення і навпаки.

Коефіцієнт запасу стійкості K_{cm} зсувного тіла уцьому випадку буде визначатися наступним виразом:

$$K_{cm} = \frac{\sum R_i}{\sum H_i + \sum j_i \cos \beta_{\phi i} + \sum Q_{ci}}, \quad (7)$$

де $\sum j_i \cos \beta_{\phi i}$ – складова, що враховує фільтраційний тиск, $\sum Q_{ci}$ – складова, що враховує сейсмічні сили. У розгорнутому вигляді формули обчислення коефіцієнта стійкості методом горизонтальних сил набувають вигляду:

$$K_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} P_i (\tan \alpha_i - \tan(\alpha_i - \psi_{pi}))}{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i \tan \alpha_i + j_i \cos \beta_{\phi i} + Q_{ci})}. \quad (8)$$

Горизонтальний тиск E_i від розрахункового відсіку на нижче розташовані (рис. 2) буде рівним різниці між розпором H_i і силою опору R_i . Використовуючи формули коефіцієнта стійкості, отримаємо для горизонтального тиску:

$$E_i = K_{cm}(H_i + j_i \cos \beta_{\phi i} + Q_{ci}) - R_i. \quad (9)$$

Напрямок сейсмічної сили у випадку її наявності у формулах наведено для ситуації, коли він співпадає із напрямком основної зрушуючої сили, що веде до спрощення розрахунків. Слід зазначити, що це спрощення збільшує значення горизонтального тиску, а отже підвищує запас стійкості. Відповідно, сумарний горизонтальний зсувний тиск буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} E_{zc} &= K_{cm} \sum P_i \tan \alpha_i + K_{cm} \sum j_i \cos \beta_{\phi i} + K_{cm} \sum Q_{ci} - \sum P_i \tan \alpha_i + \sum P_i \tan(\alpha_i - \psi_{pi}) = \\ &= (K_{cm} - 1) \sum P_i \tan \alpha_i + K_{cm} \sum j_i \cos \beta_{\phi i} + K_{cm} \sum Q_{ci} + \sum P_i \tan(\alpha_i - \psi_{pi}); \\ E_{zc} &= \sum_{i=1}^{i=n} \left((K_{cm}^3 - 1) P_i \tan \alpha_i + K_{cm}^3 Q_{ci} + K_{cm}^3 \sum j_i \cos \beta_{\phi i} + P_i \tan(\alpha_i - \psi_{pi}) \right). \end{aligned} \quad (10)$$

При визначенні сумарного зсувного тиску E_{zc} зрушуючі сили множаться на коефіцієнт стійкості K_{cm} . Такий підхід дає змогу розрахувати утримуючу конструкцію на розрахункові зусилля, а не на фактичний тиск. У такому разі K_{cm} можна замінити на значення нормованого коефіцієнту стійкості, визначеного згідно ДБН В.1.1-46:2017 [33]. У формулах його позначено як K_{cm}^3 , а у ДБН прийнято позначення k_{sn} . Відмітимо, що визначаючи E_{zc} сумування по відсіках потрібно проводити починаючи з самого верхнього.

Методом горизонтальних сил можна визначати не лише коефіцієнт стійкості схилу, а і зсувний тиск, що дає змогу запроектувати утримуючі споруди. Ще однією перевагою є те, що його можна застосовувати у випадку, коли поверхню ковзання для схилу визначено не достатньо чітко, або не на всій протяжності схилу.

Методи дотичних сил. Представлені методи застосовуються тоді, коли поверхню ковзання чітко визначено протягом усього схилу, при цьому лінію ковзання представляють у вигляді ламаної лінії.

Більш детально розглянемо аналітичний метод Г.М. Шахунянца [1, 10, 11, 12], як такий, що загалом аналогічний методу дотичних сил. Зсувний масив ґрунту також

розбивається на відсіки, які приймаються такими, щоб отримати максимально однорідні умови в їх межах, а поверхню ковзання можна було звести до площини без значної втрати точності. Розглядаючи рівновагу i -го відсіку зовнішні сили зводяться до рівнодіючої P_i , у загальному випадку дана сила може бути відхиленою від вертикалі на певний кут, але у подальших формулах будемо приймати, що зовнішні сили прикладені вертикально. Силу P_i у точці її прикладання розкладають на нормальну N_i і тангенціальну Q_i до поверхні ковзання у даному відсіку.

$$N_i = P_i \cos \alpha_i; Q_i = P_i \sin \alpha_i. \quad (11)$$

Значення кута нахилу поверхні ковзання у межах відсіку до горизонту α_i приймається додатнім при співпадинні напрямку поверхні ковзання з напрямом зсуву і від'ємним у зворотньому випадку. Для врахування тиску від сусідніх відсіків до розрахункової схеми вводяться сили E_{i-1} , що враховують вплив вище розташованого блоку та E_i , що, у свою чергу, враховує вплив нижче розташованого блоку. У загальному випадку дані сили можуть бути спрямовані під певним кутом, цей аспект необхідно враховувати при умові, що майбутня грань контакту утримуючої конструкції і ґрунту не буде вертикальною. Припустимо, що ці сили є направленими горизонтально. Тоді опір зсуву i -го відсіку по поверхні ковзання, нахиленої під кутом α_i до горизонту, складатиметься з двох складових: сили зчеплення $c_i l_i$ та сили тертя $S_i^H \tan \varphi_i$, де S_i^H - нормальна реакція основи.

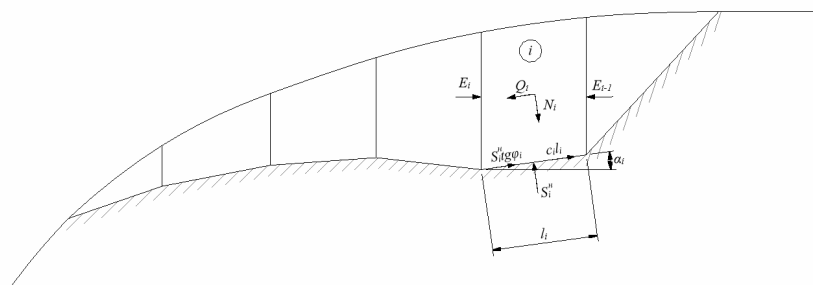


Рис. 3. Розрахункова схема до аналітичного методу Г. М. Шахунянца

Розрахунок проводять послідовно від верхнього відсіку, для якого E_{i-1} буде відсутнім, а для всіх наступних - відомим з попередніх відсіків. У такому разі невідомими залишаються лише S_i^H і E_i , їх можна визначити розглянувши їх проекції на нормаль до основи відсіку та на напрям самої основи. Отримуємо:

$$S_i^H = N_i + (E_i \sin \alpha_i - E_{i-1} \sin \alpha_i); Q_i = c_i l_i + S_i^H \tan \varphi_i + (E_i \cos \alpha_i - E_{i-1} \cos \alpha_i). \quad (12)$$

Підставивши значення S_i^H у вираз для Q_i можна отримати рівняння для визначення E_i . Також для забезпечення необхідного запасу стійкості схилу необхідно Q_i помножити на коефіцієнт запасу стійкості K_{cm}^3 , який, як і у минулому методі, можна прийняти згідно ДБН як нормований коефіцієнт стійкості. Отримаємо формулу:

$$K_{cm}^3 Q_i = N_i \tan \varphi_i + c_i l_i + (E_i (\cos \alpha_i + \tan \varphi_i \sin \alpha_i) - E_{i-1} (\cos \alpha_i + \tan \varphi_i \sin \alpha_i)). \quad (13)$$

Після математичних перетворень маємо формулу:

$$E_i = \frac{(K_{cm}^3 Q_i - N_i \tan \varphi_i - c_i l_i) \cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)} + E_{i-1}. \quad (14)$$

Слід зазначити, що у формулі (14) Q_i наведено для випадку, коли ця сила буде зрушуючою, але для випадку, коли Q_i буде перетворюватися в утримуючу силу необхідно приймати $K_{cm}^3 = 1$ і тоді її значення буде від'ємним. У загальному випадку сумарний зсувний тиск дорівнює:

$$E_{zc} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{(K_{cm}^3 Q_i - N_i \tan \varphi_i - c_i l_i) \cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)}. \quad (15)$$

Беручи до уваги, що для схилу без утримуючих конструкцій $E_{zc}=0$ можемо отримати значення коефіцієнта стійкості:

$$K_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (N_i \tan \varphi_i + c_i l_i) \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)}}{\sum_{i=1}^{i=n} Q_i \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)}}. \quad (16)$$

Замінивши складові N_i і Q_i згідно формул (11) рівнодійною силою P_i отримаємо остаточні формули для визначення K_{cm} і E_{zc} з урахуванням фільтраційної сили j за наявності гідродинамічного тиску, і величину сейсмічної сили Q_c при розташуванні схилу у сейсмічному районі. Формули за відсутності ґрунтових вод з урахуванням сейсмічних сил:

$$K_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i) \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)}}{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i \sin \alpha_i + Q_{ci}) \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)}},$$

$$E_{zc} = \sum_{i=1}^{i=n} K_{cm}^3 ((P_i \sin \alpha_i + Q_{ci}) - (P_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i)) \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)}. \quad (17)$$

При дії на схил фільтраційного потоку:

$$K_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (P_{ei} \cos \alpha_i \tan \varphi_{ei} + c_{ei} l_i) \frac{\cos \varphi_{ei}}{\cos(\alpha_i - \varphi_{ei})}}{\sum_{i=1}^{i=n} (P_{ei} \sin \alpha_i + Q_{ci} + j_i) \frac{\cos \varphi_{ei}}{\cos(\alpha_i - \varphi_{ei})}},$$

$$E_{zc} = \sum_{i=1}^{i=n} K_{cm}^3 ((P_{ei} \sin \alpha_i + Q_{ci} + j_i) - (P_{ei} \cos \alpha_i \tan \varphi_{ei} + c_{ei} l_i)) \frac{\cos \varphi_{ei}}{\cos(\alpha_i - \varphi_{ei})}. \quad (18)$$

Метод Шахунянца дозволяє отримати досить достовірні результати, як під час визначення коефіцієнта стійкості, так і під час визначення зсувного тиску. Головним його недоліком є необхідність чітко визначеної заздалегідь поверхні ковзання усього схилу.

Метод Л.П. Ясюнас. У цьому методі [13] передбачається, що усі зсувні маси рухаються єдиним масивом по поверхні ковзання. Для визначення зсувного тиску розглядаються умови рівноваги зсувного масиву у проєкціях усіх сил на напрямок руху. Як і раніше, схил розбивається на певну кількість відсіків, з використанням аналогічних до інших методів засад. Головною відмінністю методу є те, що автор пропонує визначити зсувний тиск, використовуючи одиничний зсувний тиск для спрощення розрахунків. Всі сили проєктуються на напрямок поверхні ковзання, отримується величина одиничного зсувного тиску від ґрунтового масиву довжиною, шириною і товщиною, рівними одиниці:

$$e_{zc,i} = \frac{\gamma_i}{\cos \varphi_i} \sin(\alpha_i - \varphi_i) - \frac{c_i}{h_{cp,i} \cos \alpha_i}. \quad (19)$$

Зсувний тиск для відсіку визначається за формулою:

$$E_i = K_{cm} (e_{zc,i} a_i h_{cp,i} + Q_{ci} + j_i). \quad (20)$$

У цьому методі повний зсувний тиск для i -го відсіку складається з тиску від даного відсіку плюс проєкції тиску на напрямок поверхні ковзання у ньому від вище розташованої частини зсуву:

$$E_{zc,i} = E_i + E_{zc,(i-1)} \cos|a_{i-1} - a_i|. \quad (21)$$

Таким чином, починаючи визначати послідовно з верхніх відсіків зсувний тиск $E_{zc,i}$, отримується $\sum E_{zc}$ і будується епюра зсувного тиску для усього схилу.

Л.П. Ясюнас пропонує визначати одиничний зсувний тиск за допомогою графіків залежностей кожного із членів його рівняння (19), через необхідність побудови яких цей метод складніше застосовувати у практичних розрахунках. Ще однією проблемою є те, що при винесенні за дужки коефіцієнта стійкості у (20) ми фактично помножаємо на нього і зрушуючі, і утримуючі сили, що заважає забезпечити необхідний запас стійкості під час розрахунку.

Визначення тиску від призми обвалення по теорії Кулона. Наведені вище методи горизонтальних сил і аналітичний метод Шахунянца дають змогу з достатньою для інженерних розрахунків точністю визначити зсувний тиск, а отже, у випадку необхідності, і запроектувати утримуючі споруди. Але іноді в інженерній практиці припускаються помилки, визначаючи зсувний тиск для розрахунку утримуючих споруд за призмою обвалення ґрунту по теорії Кулона. Даний метод розроблено для визначення тиску на підпірні стіни від ґрунту, що ними огорожується. При цьому ні активний тиск E_a , ні пасивний тиск E_p , що визначаються за даною методикою, не мають нічого спільного із зсувним тиском від нестійкого схилу. А отже і застосування даного методу для розрахунку утримуючих споруд є недопустимим.

Метод скінченних елементів. Це широко відомий і розповсюджений чисельний метод розрахунку у різних галузях техніки, у тому числі і у геотехніці. Він позбавлений одного із ключових недоліків методів граничної рівноваги, а саме неможливості визначення напружено-деформованого стану (НДС) ґрунтового масиву схилу і утримуючих конструкцій. Метод скінченних елементів (МСЕ) дає змогу проаналізувати НДС окремих складових або комплексно систему «будівля - ґрунтовий масив (основа) - утримуючі конструкції». Ще однією з переваг МСЕ є можливість розрахунку схилу будь-якої форми і розмірів з достатнім рівнем апроксимації для отримання точних результатів розрахунків. Також слід зазначити, що методи граничної рівноваги являються лінійними методами розрахунку схилів, у той час як МСЕ дає змогу розв'язувати задачу стійкості схилу в нелінійній постановці (врахування фізичної та геометричної нелінійності, історії навантажень та інше).

При розрахунку схилу МСЕ необхідно приділяти значну увагу побудові розрахункової схеми, а саме визначенню її меж. Цей фактор має значний вплив на точність отриманих результатів. Тому питання моделювання зсувного схилу є одним із ключових при розгляді даного методу [6].

Комбінація МСЕ з іншими методами може нівелювати його недоліки. Одним із таких методів є метод зниження міцності [15, 16, 20] (strength reduction method). Він дозволяє визначати коефіцієнт стійкості схилів шляхом поетапного зниження параметрів міцності ґрунтів. Коефіцієнт стійкості ж представляється співвідношенням максимально доступного опору зрушення S_{max} до необхідного S_n :

$$K_{cm} = \frac{S_{max}}{S_n}. \quad (22)$$

Використавши стандартну умову Кулона коефіцієнт стійкості набуває вигляду:

$$K_{cm} = \frac{c - \sigma_n \tan \varphi}{c_r - \sigma_n \tan \varphi_r}, \quad (23)$$

де c і φ - вхідні параметри міцності, а σ_n - компонент діючої нормальної напруги, c_r і φ_r - параметри міцності, достатні для забезпечення стану рівноваги. Даний принцип залишається незмінним і для моделей ґрунту, які не використовують критерій руйнування Кулона, але у такому випадку знижуються параметри міцності, що характерні для них.

Огляд реалізації наведених методів у програмних комплексах і порівняння результатів розрахунків. Значна трудомісткість розрахунків методами граничної рівноваги та орієнтованість МСЕ на застосування комп'ютерної техніки сприяла розвитку програмних комплексів, які дають можливість розрахунку стійкості схилів і визначення НДС ґрунтового масиву. Спеціалізовані геотехнічні розрахункові комплекси (GEO 5, GTSNX, Plaxis тощо) дають змогу розв'язувати широке коло геотехнічних задач, у тому числі і виконувати розрахунок стійкості схилів. Вітчизняні комплекси також пропонують інструменти для розрахунку стійкості схилів, але вони часто мають менший функціонал і не надають таких широких можливостей для вирішення складних задач.

Для порівняння результатів, отриманих за допомогою різних методів і ПК, було проведено розрахунок уявного схилу із ґрунтів, фізико-механічні характеристики яких наведені у таблиці 1. Для проведення розрахунків було обрано ПК «Plaxis 2D» та ПК «Укіс» (компонент програм SCAD-Office). При розрахунку у ПК «Plaxis» використовувалася модель ґрунту Кулона-Мора, що, враховуючи уявну природу схилу і умови задачі, є достатнім. Виконано 2 постановки задачі для схилу заданої геометрії: 1 – вільний схил, 2 – з додатковим рівномірно розподіленим навантаженням верхній частині схилу 50кН/м. Отримані результати розрахунків занесені до таблиці 2. Розрахункові схеми для ПК «Plaxis 2D» та «Укіс» наведені на рис. 4-6. Шари ґрунту відповідають табл.1 і розміщені відповідно до номерів від верхнього до нижнього, де верхній шар - №1, а найнижчий - №5. Слід зазначити, що в ПК «Plaxis» чітко не відображається поверхня ковзання, але положення поверхні ковзання і загальну деформацію схилу можна проаналізувати при розгляді приросту деформацій. Самі ж значення деформацій у цьому випадку не несуть фізичного сенсу і розглядати їх значення не доцільно. У ПК «Укіс» для порівняння виконано розрахунок методами Філеніуса, Бішопа, Янбу [14, 17, 18, 19].

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики ґрунтів

Номер шару	Ґрунт	Природня вологість	Щільність ґрунту	Питома вага ґрунту	Коефіцієнт пористості	Кут внутрішнього тертя	Питома зчеплення	Модуль деформації
		Дол. од.	г/см ³	кН/м ³	Дол. од.	Град.	кПа	МПа
		W	ρ	γ	e	ϕ	C	E
1	Насипний ґрунт	0,168	1,63	15,97	0,893	17	22	9,5
2	Супісок	0,138	1,69	16,56	0,735	21	15	12
3	Суглинок	0,132	1,75	16,95	0,763	20	26	14,5
4	Глина напівтверда	0,381	1,84	18,03	0,831	15	50	18,8
5	Глина тверда	0,226	1,89	18,52	0,793	14	64	21

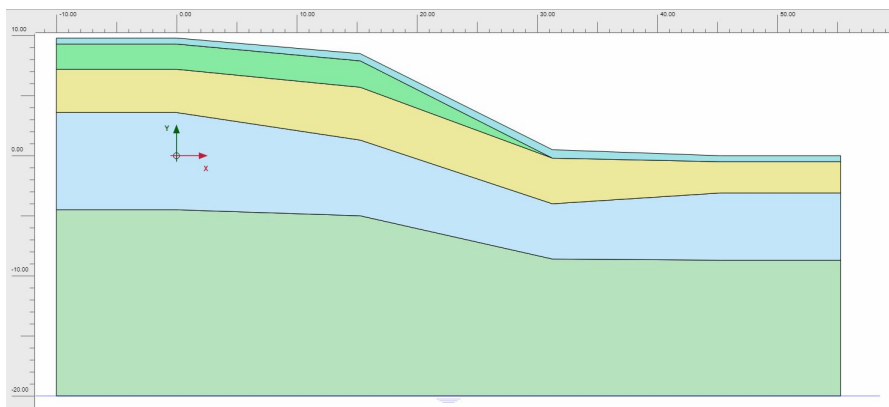


Рис.4. Розрахункова схема вільного схилу ПК Plaxis

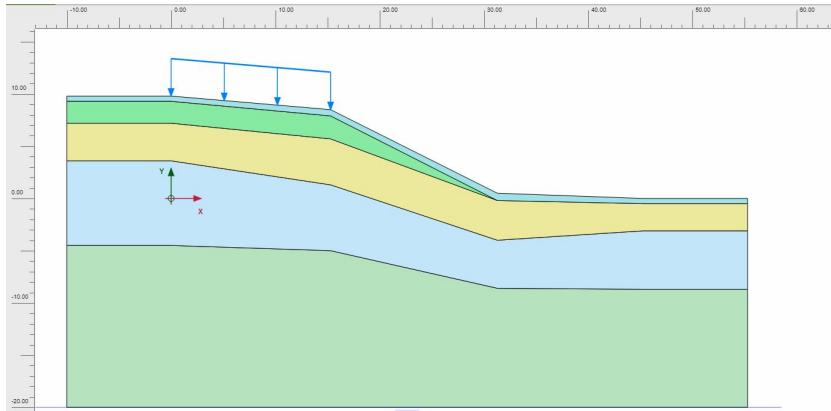


Рис. 5. Розрахункова схема вільного схилу ПК Plaxis3 додатковим навантаженням

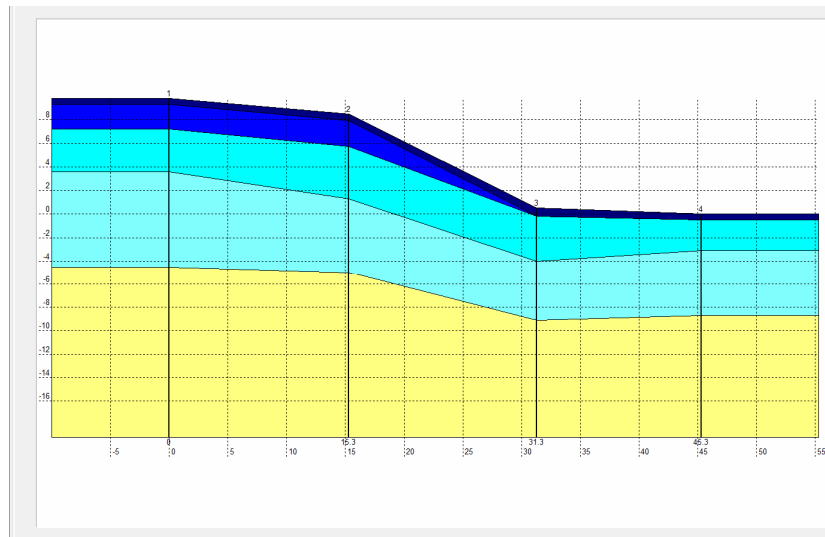


Рис. 6. Розрахункова схема схилу ПК «Укіє»

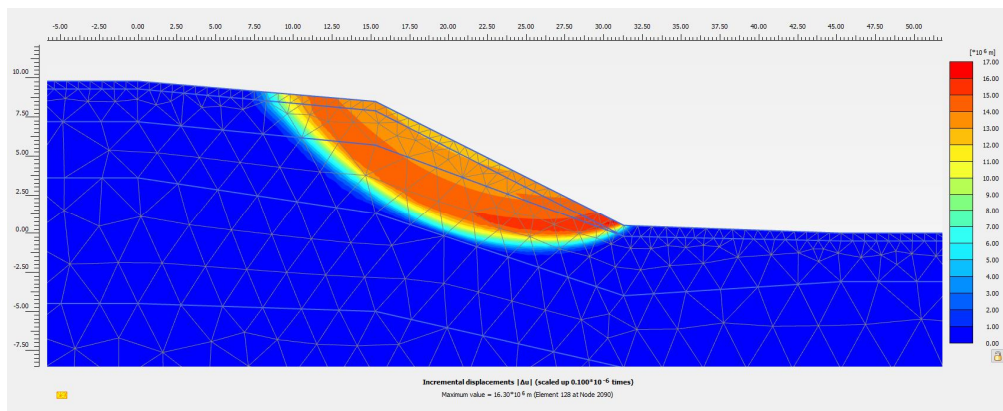


Рис. 7. Поверхня ковзання вільного схилу ПК Plaxis

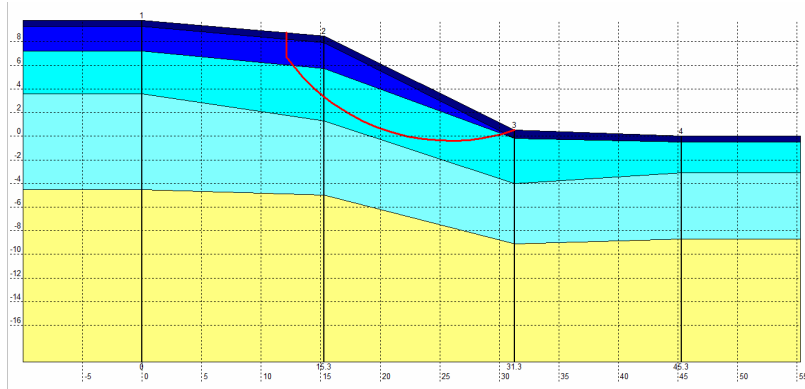


Рис. 8. Поверхня ковзання вільного схилу ПК «Укіс» за спрощеним методом Бішопа

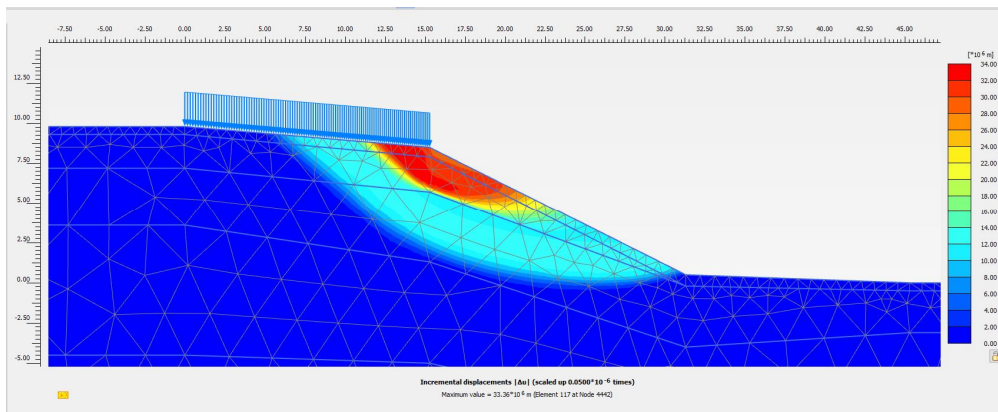


Рис. 9. Поверхня ковзання схилу з додатковим навантаженням ПК Plaxis

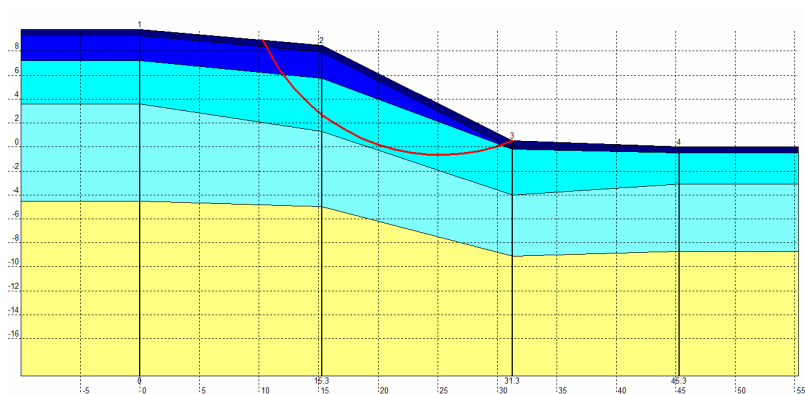


Рис. 10. Поверхня ковзання схилу з додатковим навантаженням ПК «Укіс» за спрощеним методом Бішопа

Як видно із табл. 2, значення коефіцієнту стійкості, що отримані за допомогою різних програмних комплексів, мають достатній рівень збіжності, не дивлячись на те, що базуються на різних підходах, при цьому він зберігається при внесенні змін у розрахункову схему. Поверхні ковзання, отримані різними методами, мають подібний характер розповсюдження і локалізацію. Схожі результати порівняння методів отримані в роботі [3].

Таблиця 2

Результати розрахунків

Програмний комплекс, використаний для розрахунку	Група методів, на якій заснований програмний комплекс	Використаний метод розрахунку стрійкості	Задача №1- Вільний схил	Задача №2- Схил з додатковим навантаженням
Plaxis	Метод скінченних елементів	Метод зниження міцності	2,370	1,793
«Укіс» (компонент SCAD-Office)	Методи граничної рівноваги	Феленіус	2,27	1,727
		Бішоп спрощений	2,413	1,857
		Янбу спрощений	2,117	1,614
		Янбу корегований	2,261	1,725

Висновки. Розглянуті групи методів мають найбільше розповсюдження в геотехнічній практиці, при цьому є переваги і недоліки. Підбір раціонального методу для конкретної практичної задачі буде залежати від великої кількості різних факторів. При цьому, головними перевагами методів граничної рівноваги є простота математичного апарату, широка апробація та можливість ручного розрахунку без залучення спеціалізованих програм. Головним недоліком є відсутність аналізу напружено-деформованого стану схилу на відміну від методу скінченних елементів, для якого розгляд НДС схилу є природнім. До переваг МСЕ можна також додати гнучкий апарат моделювання та можливість використання розвинених сучасних моделей ґрунтів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Маслов Н. Н.* Механика ґрунтов в практике строительства. – М.: Стройиздат, 1977. – 320 с.
2. *Маслов Н.Н.* Условия устойчивости склонов и откосов в гидро-энергетическом строительстве. – М.: Госэнергоиздат, 1955. – 467 с.
3. *Носенко В., Скочко Л., Маламан А.* Оцінка стійкості схилу з використанням різних розрахункових методів // Основи та фундаменти: наук.-тех. збірник – К.: КНУБА, 2021. – Вип. 43. – С.40-51.
4. *Перковський Л. Л.* Элементы расчета устойчивости оползневого массива // Оползни и борьба с ними: тр. Сев.-Кавказ. семинара – Ставрополь, 1964. – С.25-29.
5. *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>
6. *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, 2022. – Вип. 110. – С. 47-62. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.47-62>
7. *Тейлор Д.* Основы механики ґрунтов: Пер. с англ. инж. Г. Л. Игнатука. – М.: Госстройиздат, 1960. – 598с.
8. *Федоров И.В.* Методы расчета устойчивости склонов и откосов. – М.: Госстройиздат, 1962. – 204с.
9. *Чугаев Р.Р.* Земляные гидротехнические сооружения (теоретические основы расчета). – Л.: Энергия, 1967. – 460с.
10. *Шахунянц Г. М.* Железнодорожный путь. – М.: Транспорт, 1969. – 536с.
11. *Шахунянц Г. М.* К вопросу выбора рациональных методов расчета склонов // Оползни и борьба с ними: тр. Сев.-Кавказ. семинара – Ставрополь, 1964. – С.34-46.
12. *Шахунянц Г.М.* Расчет устойчивости склонов и откосов против скольжения пород // Материалы совещания по вопросам изучения оползней и мер борьбы с ними –К.:Изд-во Киевского университета, 1964. – С. 16-25.
13. *Ясюнас Л. П.* Вопросы борьбы с оползнями на железных дорогах. – М.: Трансжелдориздат, 1949. – 160с.
14. *Bishop, A. W.* The use of the slip circle in the stability analysis of slopes // Géotechnique, 1955. – vol.5. – pp. 7-17.
15. *Dawson, E., Motamed, F., Nesarajah, S. and Roth, M.* Geotechnical stability analysis by strength reduction // Slope Stability 2000: Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000 – ASCE Geotechnical Special Publication, 2000. – №101. – pp. 99-113.
16. *Dawson, E.M., Roth, W.H. and Drescher, A.*, Slope stability analysis by strength reduction // Geotechnique, 1999 – vol. 49. – №6. – pp. 835-840.
17. *Fellenius, W.* Calculation of the Stability of Earth Dams // 2nd Int. Congress on Large Dams, Int. Commission on Large Dams, – Washington, DC. 1936. – pp.445-459.
18. *Janbu, N.* (1954). Application of composite slip surface for stability analysis // Proc. Euro. conf. on stability of Earth slopes. – Stockholm, Sweden, 1954. –pp. 43-49.
19. *Janbu, N.* Slope Stability Computations // Embankment- Dam Engineering: Casagrande Volume. – John Wiley & Sons, Inc., New York, 1973. – pp. 47-86.

20. *Matsui, T. and San, K-C.*, Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique // *Soils and Foundations*.1992. vol. 32.– pp. 59-70.
21. *ДБН В.І.1-46:2017* Інженерний захист територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення. – К.: МінрегіонбудУкраїни, 2017. – 47 с.

REFERENCES

1. *Maslov N. N.* Mekhanika hruntov v praktike stroitelstva (Soil mechanics in construction practice). – M.: Stroizdat, 1977. – 320 s.
2. *Maslov N.N.* Usloviia ustoichivosti sklonov i otkosov v hidro-yenerheticheskom stroitelstve(Conditions for the stability of slopes in hydropower construction). – M.: Hosienerhoizdat, 1955. – 467 с.
3. *Nosenko V., Skochko L., Malaman A.* Otsinka stiikosti skhyly z vykorystanniam riznykh rozrakhunkovykh metodiv (Evaluation of slope stability using different calculation methods) // *Osnovy ta fundamenty: nauk.- tekhn. zbirnyk* – K.: KNUBA, 2021. - Vyp. 43. – S.40-51.
4. *Perkovskii L. L.* Yelementy rascheta ustoichivosti opolznevoho massiva (Elements of calculating the stability of a landslide mass) // *Opolzni i borba s nimi: tr. Sev.-Kavkaz. seminaru* – Stavropol, 1964. – S.25-29.
5. *Solodei I.I., Petrenko E.Yu., Pavlenko V.M.* Klasyfikatsiia i prychny vynyknennia zsvnykh protsesiv ta metody rozrakhunku skhylyv (Classification and causes of landslide processes and slope calculation methods) // *Опір матеріалів і теорія споруд: nauk.- tekhn. zbirnyk* – K.: KNUBA, 2022. – Vyp. 109.– S. 184-202. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2022.109.184-202>
6. *Solodei I.I., Petrenko E.Yu., Pavlenko V.M.* Postanovka zadachi modeliuвання zsvnykh protsesiv v plastychnykh gruntakh (Statement of the problem of simulation of shearprocesses in low-colusion plastics soils) // *Опір матеріалів і теорія споруд: nauk.- tekhn. zbirnyk* – K.: KNUBA, 2022. – Vyp. 110.– S. 47-62. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.47-62>
7. *Teilor D.* Osnovy mekhaniki hruntov (Fundamentals of soil mechanics): Per. s anhl. inzh. H. L. Ihnatiuka. –M.: Hosstroizdat, 1960. - 598s.
8. *Fedorov I. V.* Metody rascheta ustoichivosti sklonov i otkosov (Methods for calculating the stability of slopes). – M.:Hosstroizdat, 1962. – 204s.
9. *Chuhaev R R.* Zemlianye hidrotekhnicheskie sooruzheniia (teoreticheskie osnovy rascheta) (Earthen hydraulic structures (theoretical principles of calculation)). – L.: Yenerhiia, 1967.– 460s.
10. *Shakhuniants H. M.* Zheleznodorozhnyi put(Railroad track). – M.: Transport, 1969. - 536s.
11. *Shakhuniants H. M.* K voprosu vybora ratsionalnykh metodov rascheta sklonov (On the issue of choosing rational methods for calculating slopes) // *Opolzni i borba s nimi: tr. Sev.-Kavkaz. seminaru* – Stavropol, 1964. – S.34-46.
12. *Shakhuniants H.M.* Raschet ustoichivosti sklonov i otkosov protiv skolzheniia porod (Calculation of the stability of slopes against rock sliding) // *Materialy soveshchaniia po voprosam izucheniia opolznei i mer borby s nimi* – K.: Izd-vo Kievskoho universiteta, 1964. – S. 16-25.
13. *Yasiunas L. P.* Voprosy borby s opolzniami na zheleznykh dorohakh (Issues of combating landslides on railways). – M.: Transzheldorizdat, 1949. -160s.
14. *Bishop, A. W.* The use of the slip circle in the stability analysis of slopes // *Géotechnique*, 1955. –vol.5.– pp. 7-17.
15. *Dawson, E., Motamed, F., Nesarajah, S. and Roth, M.* Geotechnical stability analysis by strength reduction // *Slope Stability 2000: Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000* – ASCE Geotechnical Special Publication, 2000. – №101. – pp. 99-113.
16. *Dawson, E.M., Roth, W.H. and Drescher, A.*, Slope stability analysis by strength reduction // *Geotechnique*, 1999 — vol. 49. – №6. – pp. 835-840.
17. *Fellenius, W.* Calculation of the Stability of Earth Dams // 2nd Int. Congress on Large Darns, Int. Commission on Large Dams, –Washington, DC. 1936. – pp.445-459.
18. *Janbu, N.* (1954). Application of composite slip surface for stability analysis//*Proc. Euro. conf. on stability of Earth slopes*. – Stockholm, Sweden, 1954. – pp. 43-49.
19. *Janbu, N.* Slope Stability Computations // *Embankment- Dam Engineering: Casagrande Volume*. – John Wiley & Sons, Inc., New York, 1973. – pp. 47-86.
20. *Matsui, T. and San, K-C.*, Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique // *Soils and Foundations*. 1992. vol. 32. – pp. 59-70.
21. *ДБН В.І.1-46:2017* Інженерні захист територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення. – К.: МінрегіонбудУкраїни, 2017. – 47 с.

Стаття надійшла 09.10.2023

Солодей І.І., Петренко Е.Ю., Павленко В.М.

ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДІВ ОЦІНКИ СТІЙКОСТІ ЗСУВНИХ ТА ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНИХ СХИЛІВ

Розв'язання задач стійкості схилів і підбір оптимальних методів розрахунку для них залишається актуальною проблемою. Значна різноманітність інженерно-геологічних умов та велика кількість чинників і факторів, що можуть впливати на стійкість схилу, призводять до необхідності підбору методу розрахунку у кожному конкретному випадку.

У статті розглянуто особливості двох найбільш поширених в геотехнічній практиці методів розрахунку стійкості схилів і укосів. Перша група – методи граничної рівноваги, є широко апробованою та являється основою простих інженерних розрахунків стійкості схилів. У рамках статті розглянуто метод круглоциліндричної поверхні ковзання на основі методу моментів, метод горизонтальних сил, методи дотичних сил на основі аналітичного методу Г.М Шахунянця із наведенням розрахункових схем і математичного апарату даних методів. Відмічено також метод Л. П. Ясюнас через висвітлену ним ідею спрощення розрахунків з використанням одиничного зсувного тиску, що загалом є цікавою ідеєю, проте має певні складнощі у практичній реалізації. Наведено ключові переваги і недоліки методу скінченних елементів при розв'язанні задач стійкості схилів. Висвітлено питання комбінації МСЕ із методом зниження міцності для визначення коефіцієнту стійкості схилів.

Наведено кілька програмних комплексів що дають змогу автоматизовано визначати коефіцієнт стійкості схилів, базуючись на різних групах методів. Виконано порівняльний розрахунок уявного схилу з використанням ПК «Plaxis 2D» та «Укіс». Розглянуто дві постановки задачі: для вільного схилу та з додатковим навантаженням у верхній частині схилу. Проаналізовано отримані коефіцієнти стійкості і форми поверхні ковзання та сформовано узагальнену таблицю результатів. Відображені результати демонструють достатню збіжність, що підтверджує можливість застосування зазначених методів у інженерній практиці для визначення коефіцієнту стійкості схилів.

Ключові слова: зсуви, коефіцієнт стійкості, методи розрахунку схилів, моделювання схилів, МСЕ.

Solodei I.I., Petrenko E.Yu., Pavlenko V.M.

FEATURES OF THE METHODS OF THE SLOPE STABILITY EVALUATION

Solving slope stability problems and selecting optimal calculation methods remains an urgent problem. A significant variety of engineering and geological conditions, and a large number of factors that can affect the stability of the slope, lead to the need to select a calculation method in each specific case.

The article examines the features of the two most common methods of calculating the stability of slopes and slopes in geotechnical practice. The first group - limit equilibrium methods, has been widely tested and is the basis of simple engineering calculations of slope stability. Within the framework of the article, the circular cylindrical sliding surface method based on the method of moments, the method of horizontal forces, the methods of tangential forces based on the analytical method of H.M. Shakhunyanets, with the introduction of calculation schemes and the mathematical apparatus of these methods, are considered. The method of L. P. Yasyunas was also noted due to the idea he highlighted of simplifying calculations using unit shear pressure, which is generally an interesting idea but has certain difficulties in practical implementation. The key advantages and disadvantages of the finite element method for solving slope stability problems are given. The question of combining MSE with the method of reducing strength to determine the coefficient of stability of slopes is highlighted.

Several software complexes are presented that allow us to automatically determine the coefficient of stability of slopes based on different groups of methods. A comparative calculation of the imaginary slope of PC "Plaxis 2D" and "Ukis" was performed. Two formulations of the problem are considered: for a free slope and with an additional load in the upper part of the slope. The received coefficients of stability and the shape of the sliding surface were analyzed and a generalized table of results was formed. The displayed results demonstrate sufficient convergence, which confirms the possibility of using the specified methods in engineering practice to determine the stability coefficient of slopes.

Keywords: landslides, coefficient of stability, methods of calculating slopes, modelling of slopes, FEM.

УДК 624.131.7

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.

У роботі розглянуто дві групи методів оцінки стійкості схилу. Наведено основний математичний апарат деяких методів граничної рівноваги і основні особливості методу скінченних елементів для даного типу задачі. Виконано порівняльний розрахунок уявного схилу за допомогою методів різних груп.
Іл. 10. Табл. 2. Бібліогр. 21 назв.

UDC 624.131.7

Solodei I.I., Petrenko E.Yu., Pavlenko V.M. Features of the methods of the slope stability evaluation// *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles-* K.: KNUBA, 2023. – Issue 111. - P. 25-38.

The article considers 2 groups of methods for slope stability evaluation. The basic mathematical equation of some limit equilibrium methods and the main features of the finite elements method for this type of problem. A comparative calculation of the apparent slope was performed using the methods of different groups.

Fig. 10. Tab. 2. Ref. 21.

Автор: доктор технічних наук, професор, професор кафедри будівельної механіки СОЛОДЕЙ Іван Іванович
Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 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: кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геотехніки ПЕТРЕНКО Едуард Юрійович
Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури
Email: petrenko.ey@knuba.edu.ua
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9792-4757>

Автор: аспірант кафедри будівельної механіки ПАВЛЕНКО Василь Михайлович
Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 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>