

Оцінка стійкості схилу в Карпатському регіоні з використанням різних розрахункових методів

Віктор НОСЕНКО¹, Артур МАЛАМАН²

^{1,2}Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітряних Сил, Київ, Україна, 03037,

¹v.s.nosenko@gmail.com, orcid.org/ 0000-0002-8261-1846

²armalaman97@gmail.com, orcid.org/0000-0002-0715-3291

DOI: 10.32347/0475-1132.51.2025.67-74

Анотація. Приведено порівняння результатів оцінки стійкості зсувонебезпечного схилу з використанням різних методів розрахунку.

В якості об'єкту дослідження було обрано територію будівництва готельного комплексу у Карпатському регіоні.

Особливістю інженерно-геологічних умов на даній ділянці є наявність напівскельних ґрунтів з високими міцнісними характеристиками (пісковики) та вивітрилих напівскельних ґрунтів (аргіліт, алевровіт) чиї параметри наближені до пілувато-глинистих ґрунтів. Дані інженерно-геологічні елементи перешаровуються між собою, за рахунок цього можливе формування потенційної поверхні ковзання між шарами цих ґрунтів. Під час інженерно-геологічних вишукувань також був виконаний комплекс геофізичних досліджень - зондування становлення електромагнітного поля у ближній зоні та природного імпульсного електромагнітного поля Землі. Ці геофізичні дослідження підтвердили складність геологічної будови масиву та наявність локальних обводнених зон із аномально низьким електричним опором. Такі зони є потенційно небезпечними з точки зору формування поверхонь ковзання.

Для комплексної оцінки стійкості схилу розрахунки були проведені з використанням двох різних розрахункових методів і з використанням сучасного програмного забезпечення.

Числове моделювання напружено-деформованого стану зсувонебезпечного схилу виконано з використанням методу скінчених елементів в програмному комплексі Plaxis 2D, розрахунок стійкості якого базується на методиці програмного зниження параметрів міцності ґрунтів (ϕ/c reduction).



Віктор НОСЕНКО
завідувач кафедри геотехніки
к.т.н., доц.



Артур МАЛАМАН
аспірант кафедри геотехніки

Оцінка стійкості схилу методом граничної рівноваги, за методикою Шахунянца, з використанням полігональної поверхні ковзання виконано в модулі «Стійкість схилу» програмного комплексу GEO5.

Розрахунки були виконані для різних етапів будівництва: 1-й етап – оцінка стійкості схилу в природному стані (до початку будівельних робіт); 2-й етап – оцінка стійкості схилу на етапі розробки котловану до проектної відмітки; 3-й етап – оцінка стійкості схилу на етапі експлуатації (з врахуванням експлуатаційних навантажень нової будівлі).

Показано, що використання двох різних методів оцінки стійкості надає змогу комплексно оцінити стійкість схилу. Це особливо важливо для проектування і будівництва об'єктів у межах зсувонебезпечних територій, де як природні, так і техногенні фактори можуть суттєво впливати на поведінку ґрунтового масиву.

Ключові слова. Стійкість схилу, числове моделювання, метод скінчених елементів, метод граничної рівноваги.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В сучасному будівництві все частіше постає питання будівництва на ділянках з складними інженерно-геологічними умовами. До цієї категорії відноситься будівництво на зсувонебезпечних територіях. Для оцінки можливості будівництва необхідно виконати оцінку стійкості схилу.

Класифікацію і причини виникнення зсувних процесів та методи розрахунку схилів наведено у роботах багатьох вчених, серед них (Дранников, 1956). Питання оцінки стійкості схилів висвітлено у роботах (Білеуша, 2009, Носенко та ін, 2022; Черкеза, 1994).

Нормативні вимоги до мінімальних значень коефіцієнтів стійкості наведені у ДБН В.1.1-46:2017 Інженерний захист територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів (ДБН В.1.1-46:2017, 2017).

МЕТА РОБОТИ

Виконання комплексної оцінки стійкості схилу з використанням двох різних методів: числового моделювання зсувонебезпечного схилу з використанням методу скінчених елементів і оцінка стійкості з використанням методу граничної рівноваги (метод

Шахунянц) та порівняння результатів оцінки стійкості схилу.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

В геоструктурному відношенні ділянка досліджень відноситься до Бітлянської підзони складчастої області зовнішніх Карпат.

За результатами інженерно-геологічних вишукувань на ділянці виділено наступні інженерно-геологічні елементи:

ІГЕ – 1 – супісок твердий;

ІГЕ – 2 – суглинок тугопластичний;

ІГЕ – 3 – алевроліт вивітрілий до стану суглинку напівтвердого;

ІГЕ – 4 – аргіліт вивітрілий до стану суглинку напівтвердого;

ІГЕ – 5 – аргіліт тріщинуватий, низької міцності;

ІГЕ – 6 – пісковик тріщинуватий, слабко-вивітрілий, зниженої міцності;

ІГЕ – 7 – пісковик слаботріщинуватий, маломіцний.

Для будівлі готельного комплексу планується влаштування котловану глибиною близько орієнтовно 25м.

Основні фізико-механічні показники ґрунтів наведені у таблиці 1. Фото керну відібраного з однієї із свердловин наведено на рисунку 1.

Табл. 1. Показники фізико-механічних властивостей ґрунтів
Table 1. Indicators of physical and mechanical properties of the soils

№ ІГЕ	Найменування ґрунтів	Характеристики ґрунтів				
		Питома вага ґрунту γ	Природна вологість w	Питоме зчеплення C	Кут внутрішнього тертя φ	Модуль загальної деформації E
		кН/м ³	од.	кПа	град	МПа
1	Супісок твердий	18,40	0,18	14	25	15
2	Суглинок тугопластичний	19,40	0,24	26	21	17
3	Алевроліт вивітрілий	19,40	0,22	30	23	22
4	Аргіліт вивітрілий	19,80	0,20	34	24	25
5	Аргіліт тріщинуватий	24,00	-	Межа міцності на одноосьовий стиск $R_{ст} = 2,69$ МПа		
6	Пісковик тріщинуватий	24,10	-	Межа міцності на одноосьовий стиск $R_{ст} = 4,13$ МПа		
7	Пісковик слаботріщинуватий	25,10	-	Межа міцності на одноосьовий стиск $R_{ст} = 12,48$ МПа		



Рис.1. Фото кернів відібраних з однієї з свердловин.

Fig.1. Photo of the core taken from one of the boreholes.

На досліджуваній ділянці додатково було виконано комплекс геофізичних досліджень, що включав електророзвідувальні методи: зондування становлення електромагнітного поля у ближній зоні та природного імпульсного електромагнітного поля Землі. Дослідження ділянки проводились методом зондувань становлення електромагнітного поля у ближній зоні. За даними методу ЗСБ на границі алевролітових відкладів та пісковиків виділяється зона аномального пониження опору, яка складає менше 1-го омметра. Дана зона вказує на наявність у корінних породах підземних вод які мають локальне поширення. Обводнені локальні зони підвищеної тріщинуватості, гідравлічний зв'язок між якими відсутній або ускладнений. Положення статичного рівня

підземних вод у корінних породах не встановлено. В межах зрізів на площадках виділяється витік вод у вигляді тимчасових струмків на глибині 11 м. В межах профілю ґрунтові води поширені в межах глибин 7,4-12,7 м.

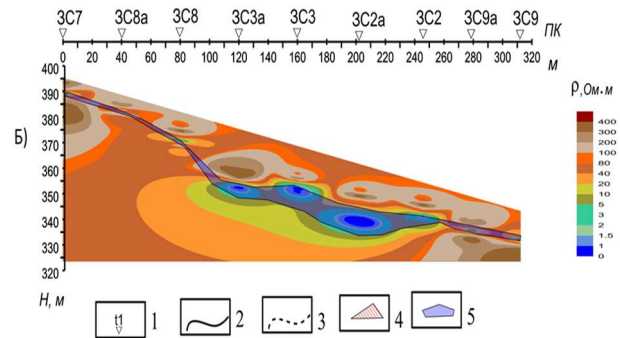


Рис.2. Результати геофізичних досліджень.
Fig.2. Results of geophysical investigations.

Числове моделювання напружено-деформованого стану зсувонебезпечного схилу виконано з використанням методу скінчених елементів в програмному комплексі Plaxis 2D, розрахунок стійкості якого базується на методиці програмного зниження параметрів міцності ґрунтів (ϕ / c reduction). Характеристики міцності ґрунту та ґрунту послідовно зменшуються доти, доки не відбувається руйнування. Коефіцієнт безпеки ΣM_{sf} отриманий в результаті моделювання поступового зниження показників міцності до моменту втрати стійкості системою, є інтерпретацією (непрямим аналогом) коефіцієнту стійкості схилу K_{st} :

$$\Sigma M_{sf} = \frac{\tan \varphi_{input}}{\tan \varphi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} = \frac{S_{u,input}}{S_{u,reduced}}, \quad (1)$$

де параметри міцності з індексом input відносяться до властивостей ґрунтів, заданих у природному стані, а параметри з індексом reduced - це знижені значення параметрів, що використовуються в розрахунках в момент втрати стійкості. На початку розрахунку коефіцієнт ΣM_{sf} задається рівним 1,0 для того, щоб задати вхідні (ще не зменшені) значення міцності всіх матеріалів (Bentley Systems 2022). В якості моделі ґрунтового середовища було використано модель

Мора-Кулона, що є простою лінійною ідеально пружно-пластичною моделлю.

Ідеально-пластична частина ґрунтується на критерії руйнування Мора-Кулона, сформульованому у формі неасоційованої пластичності.

На рисунку 3 показано скінчено елементну модель схилу на етапі експлуатації нового будинку. На рисунку 4 показано результати оцінки стійкості схилу з використанням методу скінчених елементів.

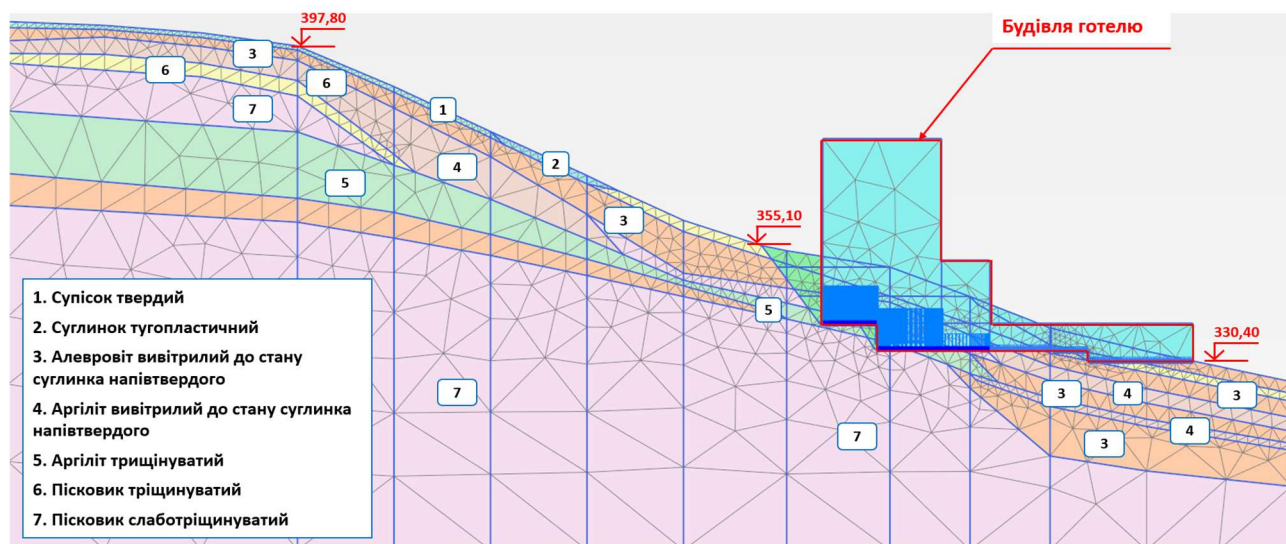


Рис. 3. Скінчено елементна модель схилу на етапі експлуатації нового будинку.

Fig. 3. Finite element model of the slope at the operation stage of a new building.

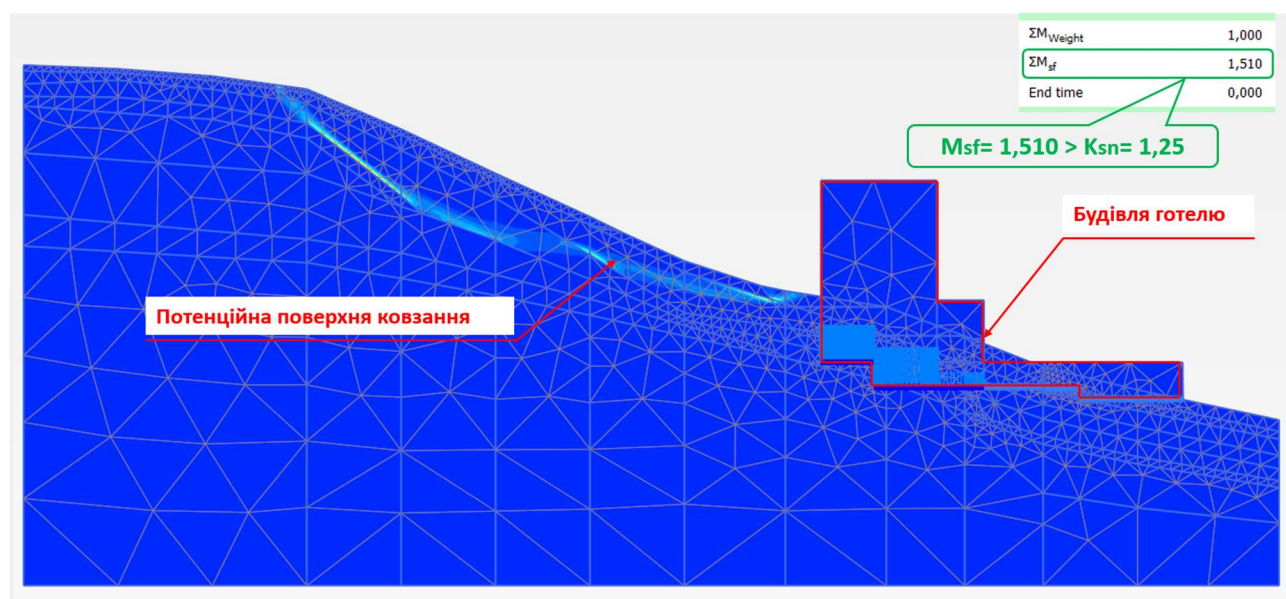


Рис. 4. Результати оцінки стійкості схилу з використанням методу скінчених елементів.

Fig. 4. Results of slope stability assessment using the finite element method.

Оцінка стійкості схилу методом граничної рівноваги виконується з використанням полігональної поверхні ковзання, що дозволяє отримати більш точніші результати ніж при використанні круглоциліндричної поверхні. Для розрахунку обрано метод

Шахунянца, що заснований на виконанні умови рівноваги сил на окремих блоках, що утворюються шляхом розбиття області над поверхнею ковзання площинами перетину.

Особливістю даного методу є не тільки врахування зсувних і утримуючих зусиль, а

й врахування взаємодії між блоками у вертикальній площині (врахування сил тертя між блоками). Принципова схема блоків і сил відображена на рисунку 5.

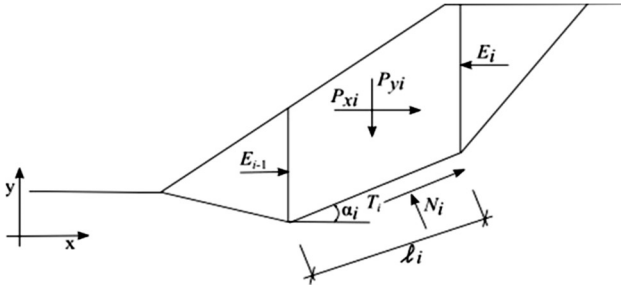


Рис.5. Схема дії сил на блок.

Fig.5. Scheme of forces action on the block.

де P_{yi} - вертикальна рівнодіюча сил на блоці (вага блоку, привантаження від зовнішнього навантаження в межах блоку, сейсміка); P_{xi} - горизонтальна рівнодіюча сил на блоці (вага блоку, привантаження від зовнішнього

навантаження в межах блоку, сейсміка); E_{i+1} , E_i - сили між блоками; N_i - реакція під блоком в перпендикулярному напрямку до відсіку поверхні ковзання; T_i - сила тертя на відсіку поверхні ковзання; α_i - кут нахилу відсіку поверхні ковзання; l_i - довжина відсіку поверхні ковзання; φ_i - кут внутрішнього тертя ґрунту на відсіку поверхні ковзання; c_i - питоме зчеплення ґрунту на відсіку поверхні ковзання.

Для розрахунку граничної рівноваги сил на блоках метод Шахунянца вводить такі передумови:

- поверхні розділяють блоки завжди вертикальні,
- нахил міжблочних сил E_i дорівнює нулю,
- сили діють в горизонтальному напрямку (Fine Civil Engineering Software 2018).

Коефіцієнт стійкості визначається за формулою:

$$K_u = \frac{\sum_{i=1}^n [(P_{Ni} - U_i) \tan \varphi_i + c_i l_i + |P_{Qi,ud}|] \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)}}{\sum_{i=1}^n P_{Qi,sd} \frac{\cos \varphi_i}{\cos(\alpha_i - \varphi_i)}}, \quad (2)$$

З урахуванням того факту, що для оцінки стійкості схилу необхідно виконати значну кількість рутинних математичних розрахунків для розв'язку даної задачі використано програмний комплекс GEO5, а саме його модуль "Стійкість схилу".

На рисунку 6 показано розрахункову схему схилу в програмному комплексі GEO 5 на етапі експлуатації нового будинку. На рисунку 7 наведено результати оцінки стійкості методом граничної рівноваги.

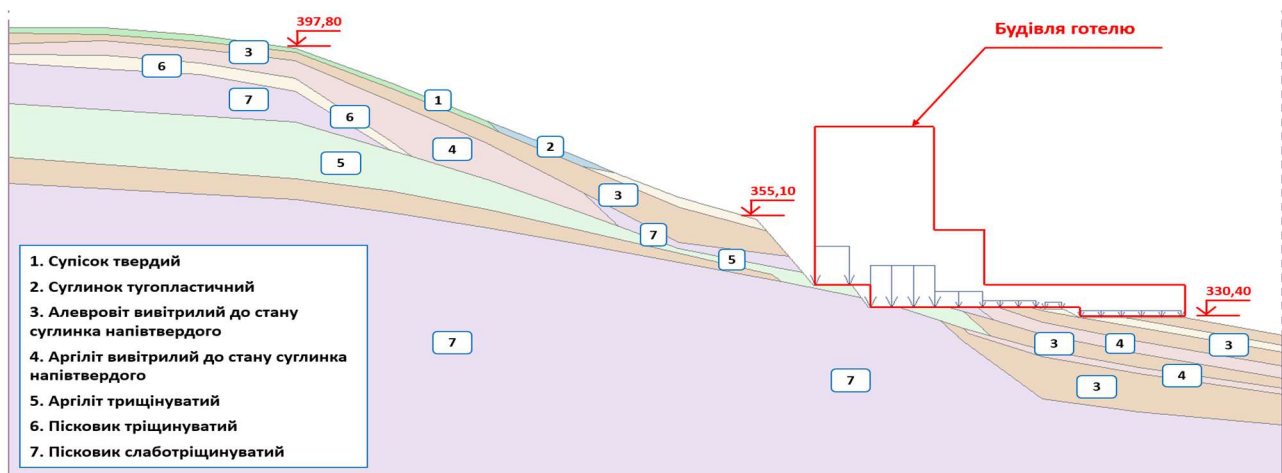


Рис. 6. Розрахункова схема схилу в ПК GEO 5 на етапі експлуатації нового будинку.

Fig. 6. Calculation scheme of the slope in the GEO 5 PC at the operation stage of a new building.

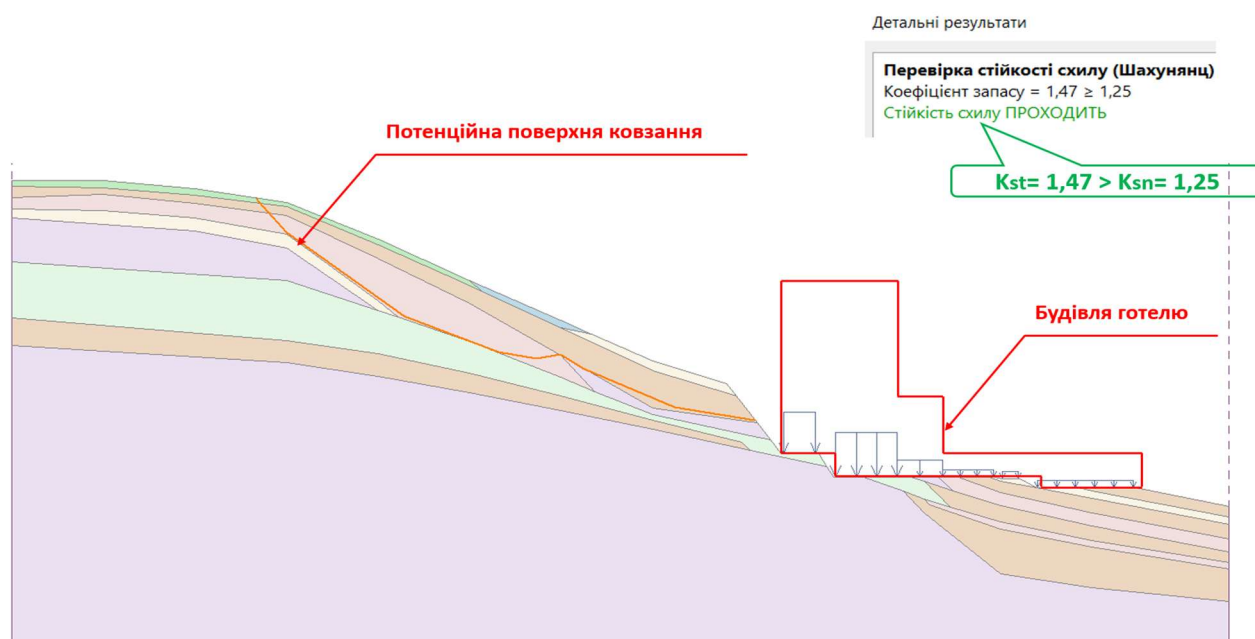


Рис. 7. Результати оцінки стійкості схилу методом граничної рівноваги
Fig. 7. Results of slope stability assessment using the limit equilibrium method

Порівняння коефіцієнтів стійкості (безпеки) для основного сполучення навантажень на трьох етапах: в природньому стані схилу (до початку будівництва), на етапі розробки котловану до проектно́ї відмітки, та

на етапі експлуатації нового будинку наведено на рисунку 8. Порівняння коефіцієнтів стійкості (безпеки) для аварійного сполучення навантажень наведено на рисунку 9.

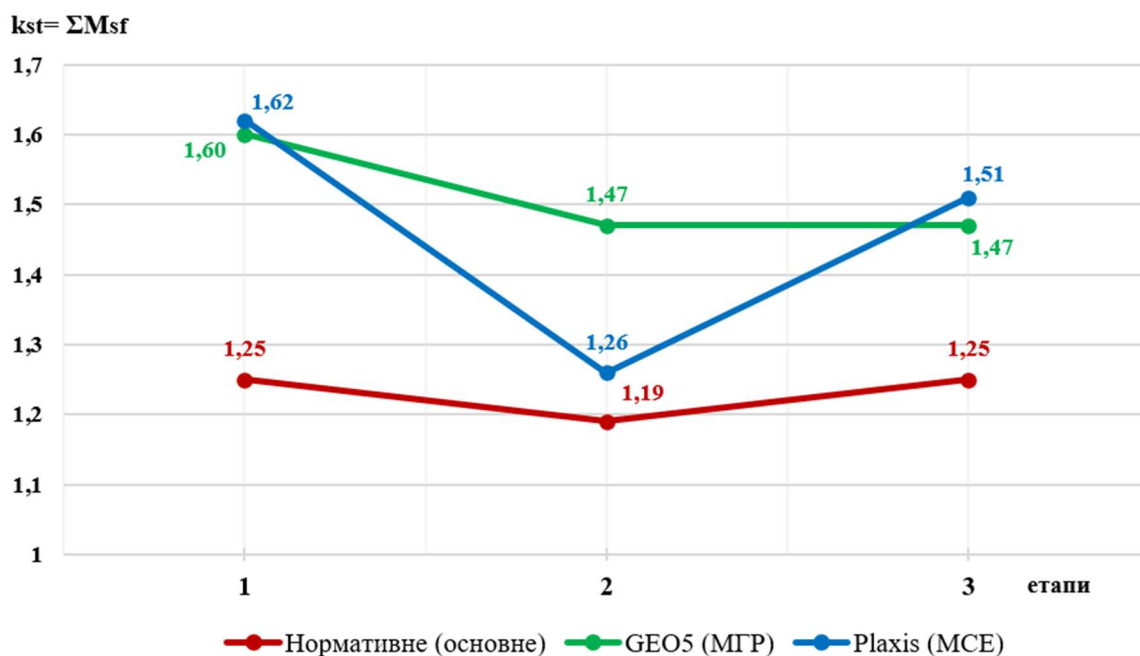


Рис. 8. Порівняння коефіцієнтів безпеки (стійкості) при основному сполученні навантажень.
Fig. 8. Comparison of safety (stability) coefficients for the main combination of loads.

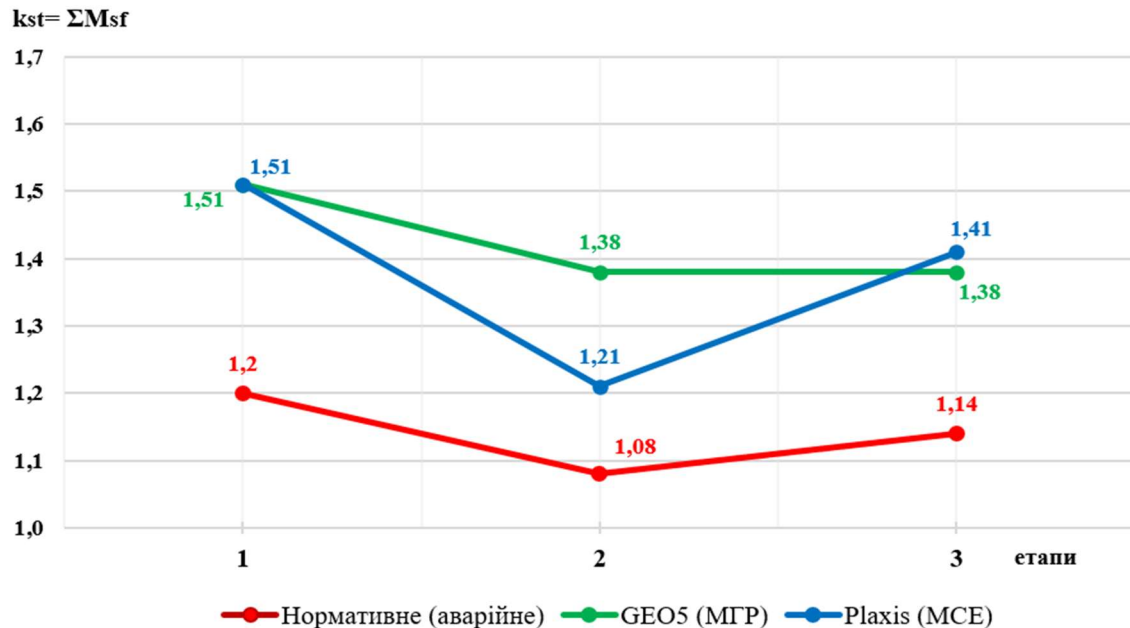


Рис. 9. Порівняння коефіцієнтів безпеки (стійкості) при аварійному сполученні навантажень.
Fig. 9. Comparison of stability coefficients for emergency combination of loads.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Встановлено що значення коефіцієнта стійкості, отримані за різними розрахунками: з використанням методу скінченних елементів та методу граничної рівноваги як для основного так і для аварійного сполучення навантажень, добре корелюють між собою. А саме, різниця між коефіцієнтами стійкості (безпеки), що отримані для 1 етапу (в природному стані до початку будівництва) та 3 етапу (етап експлуатації нової будівлі) складає менше 2 %. На 2 етапі різниця складає менше 15%, що може пояснюватися особливістю використаного методу оцінки стійкості. Числове моделювання оцінки стійкості схилу на найбільш відповідальному етапі максимальної розробки котловану дає більш консервативні (менші значення) коефіцієнтів безпеки.

Показано, використання різних методів оцінки стійкості схилу дає можливість провести комплексну оцінку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Інженерний захист територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення:

- ДБН В.1.1-46:2017 (2017) [Чинний від 01.11.2017]. К.: Мінрегіонбуд України.
2. Билеуш А.И. (2009). *Оползни и противооползневые мероприятия* [Зсуви і протизсувні заходи]. Наукова думка.
3. Дранников А.М. (1956). *Оползни. Типы, причины образования меры борьбы* [Зсуви. Типи, причини виникнення, заходи боротьби]. Укр-гипросельстрой.
4. Носенко, В.С., Скочко, Л.О., & Маламан, А.Р. (2021). Оцінка стійкості схилу з використанням різних розрахункових методів. *Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник*, 43, 40-51.
DOI: 10.32347/0475-1132.43.2021.40-51
5. Черкез, С. А. (1994). *Оползни северо-западного побережья Черного моря (моделирование, прогноз устойчивости склонов и оценка эффективности противооползневых мероприятий)* [Зсуви північно-західного узбережжя Чорного моря (моделювання, прогноз стійкості схилів та оцінка ефективності протизсувних заходів)] (Кандидатська дисертація). Інститут геологічних наук НАН України.
<https://uacademic.info/ua/document/0594U000228>
6. Bentley Systems. (2022). *PLAXIS Material Models Manual: CONNECT Edition V22.01*.
7. Fine Civil Engineering Software. (2018). *GEO 5 V18. Reference manual*.

REFERENCES

1. Inzhenernyi zakhyt terytorii, budivel i sporud vid zsuviv ta obvaliv. Osnovni polozhennia: DBN V.1.1-46:2017 (2017) [Chynnyi vid 01.11.2017]. K.: Minrehionbud Ukrainy. (in Ukrainian).
2. Bileush A.I. (2009). *Opolzny i protivopolznevy meropriyatiya* [Landslides and landslide prevention measures]. Naukova dumka. [In Russian].
3. Drannikov A.M. (1956). *Opolzny. Typy, prichiny obrazovaniya mery bor'by* [Landslides. Types, causes, control measures]. Ukrhiproselstroy. [In Russian].
4. Nosenko, V.S., Skochko, L.O., & Malaman, A.R. (2021). Otsinka stiikosti skhylyu z vykorystanniam riznykh rozrakhunkovykh metodiv [Comparative assessment of the slope stability using different calculation methods]. *Osnovy ta fundamenti: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, 43, 40-51. (In Ukrainian). DOI: 10.32347/0475-1132.43.2021.40-51
5. Cherkez, Ye. A. (1994). *Opolzny severo-zapadnogo poberezh'ya Chernogo morya (modelirovaniye, prognoz ustoychivosti sklonov i otsenka effektivnosti protivopolznevykh meropriyatiy)* [Landslides on the north-western coast of the Black Sea (modelling, slope stability prediction and assessment of the effectiveness of anti-landslide measures)] (Candidate's dissertation, Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Ukraine). <https://uacademic.info/ua/document/0594U000228>
6. Bentley Systems. (2022). *PLAXIS Material Models Manual: CONNECT Edition V22.01*.
7. Fine Civil Engineering Software. (2018). *GEO 5 V18. Reference manual*.

Assessment of slope stability in the Carpathian region using various calculation methods

Viktor NOSENKO
Artur MALAMAN

Summary: A comparison of the results of assessing the stability of a landslide-prone slope using different calculation methods is presented.

The area of a hotel complex under construction in the Carpathian region was selected as the object of study.

A distinctive feature of the engineering-geological conditions in this area is the presence of semi-rocky soils with high strength characteristics (sandstones) and weathered semi-rocky soils (argillite, siltstone) whose parameters are close to those of silty-clay soils. These engineering-geological elements are interlayered, which makes it possible to form a potential slip surface between the layers of these soils. A complex of geophysical studies (carried out within the framework of engineering-geological surveys) — sounding by establishing an electromagnetic field in the near zone and the natural pulsed electromagnetic field of the Earth — confirmed the complexity of the geological structure of the massif and the presence of local waterlogged areas with abnormally low electrical resistance ($< 1 \text{ Om} \cdot \text{m}$). Such areas are potentially dangerous in terms of the formation of slip surfaces.

For a comprehensive assessment of slope stability, calculations were performed using two different calculation methods and modern software.

Numerical modelling of the stress-strain state of the landslide-prone slope was performed using the finite element method in the Plaxis 2D software package, the stability calculation of which is based on the method of software reduction of soil strength parameters (ϕ/c reduction).

The slope stability assessment using the limit equilibrium method, according to the Shakhunyants method, using a polygonal slip surface was performed in the 'Slope Stability' module of the GEO5 software package.

The calculations were performed for different stages of construction: Stage 1 – assessment of slope stability in its natural state (before the start of construction work); Stage 2 – assessment of slope stability at the stage of excavation to the design level; Stage 3 – assessment of slope stability during operation (taking into account the operational loads of the new building).

It has been shown that the use of two different methods of stability assessment allows for a comprehensive assessment of slope stability. This is especially important for the design and construction of facilities within landslide-prone areas, where both natural and man-made factors can significantly affect the behaviour of the soil mass.

Key words. Slope stability, numerical modelling, finite element method, limit equilibrium method.