

Характеристика карпатського флішу: будова та сучасні підходи до оцінки інженерно-геологічних властивостей

Людмила Бондарева., доц., канд.техн.наук.¹ (ORCID: 0000-0001-7392-814X),
Василь Беган, магістр¹ (ORCID: 0009-0008-0357-5762)

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

АНОТАЦІЯ

Показано результати дослідження особливостей геотехнічної оцінки карпатського флішу, який характеризується високою неоднорідністю та складною структурою. Для визначення параметрів міцності використано поєднання бурових даних, геофізичних досліджень та методу зворотного аналізу. Оцінку стійкості схилів виконано методом редукції ϕ - c у середовищі скінченно-елементного моделювання (Plaxis 2D) з додатковою перевіркою за аналітичним методом. Виконано порівняння сценаріїв поверхневого та глибинного зсуву. Класифікацію гірських порід здійснено за результатами кореляції геофізичних параметрів та буріння. Отримані розрахункові параметри можуть бути використані для подальших інженерних розрахунків та проектування схилів у зонах залягання флішу.

Ключові слова: Карпатський фліш, схил, стійкість схилу, Plaxis, Bishop, геофізичні дослідження, числове моделювання.

1. ВСТУП

Флішові відклади Карпат є складним інженерно-геологічним середовищем, що відзначається високою неоднорідністю, наявністю тектонічних порушень та різким чергуванням шарів пісковика, алеволіту і глинистих порід. Такі умови істотно ускладнюють визначення достовірних геотехнічних параметрів, необхідних для оцінки стійкості схилів і проектування протизсувних споруд. Традиційні лабораторні методи дослідження часто не дають надійних результатів через пошкодження зразків, масштабний ефект та неоднорідність середовища.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває застосування сучасних методів числового моделювання та геофізичних досліджень у поєднанні з підходами зворотного аналізу. Такий комплексний підхід дозволяє відтворити реальні механізми руйнування та уточнити параметри міцності гірських порід.

Дана робота присвячена оцінці стійкості схилів, складених карпатським флішем, із використанням методу редукції ϕ - c у середовищі скінченно-елементного моделювання (Plaxis 2D). Результати числових розрахунків були перевірені спрощеним методом Бішопа, що дало змогу провести порівняння різних сценаріїв зсувів та підтвердити достовірність отриманих параметрів. Особлива увага зосереджена на можливостях інтеграції геофізичних даних у побудову геотехнічної моделі та практичному застосуванні отриманих результатів для інженерної практики в умовах Карпат

2. МЕТА

Метою даного дослідження є визначення та калібрування параметрів міцності карпатського флішу шляхом поєднання числового моделювання та геофізичних даних. Особливу увагу приділено застосуванню методу редукції ϕ - c у середовищі скінченно-елементного аналізу (Plaxis 2D) з подальшою перевіркою результатів за спрощеним методом Бішопа. Це дозволяє оцінити можливі

сценарії розвитку поверхневих і глибинних зсувів, виявити відмінності у прогнозованих механізмах руйнування та сформулювати практичні рекомендації для інженерної практики в умовах складної геологічної будови флішових товщ.

3. ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

У даній роботі виконано комплексний аналіз стійкості схилів, складених карпатським флішем, із використанням сучасних числових методів. Основна увага зосереджена на визначенні параметрів міцності порід за допомогою зворотного аналізу, що дозволяє узгодити модельні розрахунки з фактично спостережуваним станом рівноваги. Для дослідження застосовано метод редукції ϕ - c у середовищі скінченно-елементного аналізу (Plaxis 2D) та проведено перевірку результатів за допомогою спрощеного методу Бішопа.

3.1. Розрахунок в ПК «Plaxis 2D»

У програмному комплексі Plaxis 2D використано метод редукції ϕ - c , який полягає у поступовому зменшенні значень кута внутрішнього тертя та зчеплення до моменту втрати стійкості. Для моделювання застосовувалися трикутні скінченні елементи типу 6-node, що забезпечують ефективне відтворення напружено-деформованого стану ґрунтового масиву. Було розглянуто два сценарії можливих зсувних поверхонь: поверхневий у зоні вивітрілого флішу та глибинний — по слабкому структурному контакту між шарами більш міцних порід.

3.2. Розрахунок аналітичним методом (Бішопа)

Для незалежної перевірки отриманих результатів застосовано класичний метод граничної рівноваги — спрощений метод Бішопа. Розрахунки виконувалися для тих самих сценаріїв поверхневого та глибинного зсувів. Даний підхід дозволив оцінити фактор стійкості на основі силової рівноваги окремих елементів масиву та порівняти його з результатами скінченно-елементного аналізу.

3.3. Геофізична класифікація та параметризація

Для уточнення розрахункової моделі виконано класифікацію гірських порід за категоріями міцності (III, IV, V), визначеними на основі кореляції геофізичних даних (швидкість поздовжньої хвилі та електричний опір) з результатами буріння. Такий підхід дозволив сформувати спрощену, але репрезентативну геотехнічну модель, де верхня зона вивітрілого флішу була розглянута як єдиний ослаблений шар, а глибші породи поділені за міцнісними характеристиками.

3.4. Порівняння та аналіз результатів

Порівняння результатів показало задовільну узгодженість між FEM-розрахунками у Plaxis та аналітичними оцінками за методом Бішопа. У випадку поверхневого зсуву було підтверджено низькі параметри міцності в зоні вивітрілого флішу, тоді як для глибинних механізмів руйнування вирішальним чинником виявилися слабкі тектонічні контакти. Розбіжності у результатах пояснюються особливостями моделей: FEM-методика враховує напружено-деформований стан масиву більш детально, тоді як метод Бішопа ґрунтується на спрощеній схемі рівноваги.

Виконаний аналіз дозволив виділити ключові фактори, що впливають на точність оцінки стійкості флішових схилів: вибір геотехнічної моделі, рівень урахування структурної неоднорідності та методика визначення параметрів міцності. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування протизсувних заходів і подальшого розвитку підходів до оцінки складних геологічних товщ.

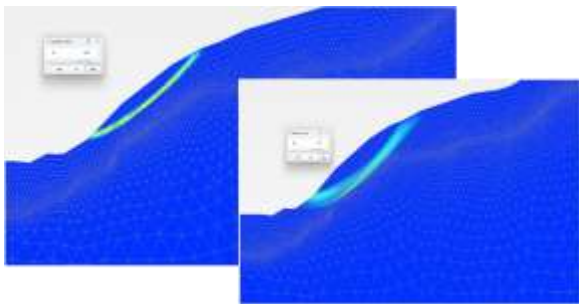


Рисунок 1. Поверхнева та глибинна поверхні ковзання схилу в ПК «Plaxis 2D»

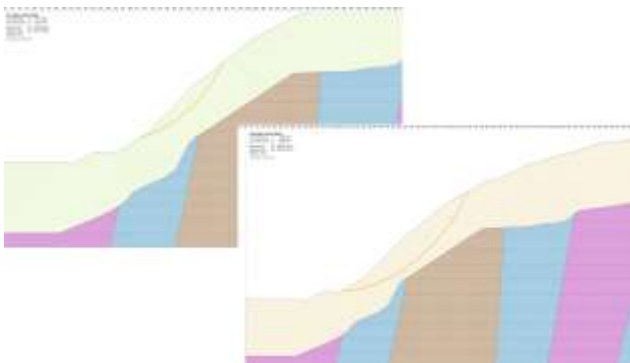


Рисунок 2. Поверхнева та глибинна поверхні ковзання схилу визначені аналітичним методом

4. ВИСНОВКИ

Результати дослідження підтверджують, що флішові відклади Карпат є складним і неоднорідним геотехнічним середовищем, для якого традиційні лабораторні методи визначення параметрів міцності не завжди дають надійні результати. Застосування методу редукції ϕ -с у середовищі скінченно-елементного моделювання (Plaxis 2D) дозволило виконати калібрування параметрів міцності до стану граничної рівноваги ($FoS \approx 1.0$).

Перевірка результатів за спрощеним методом Бішопа показала задовільну узгодженість із FEM-розрахунками, що підтверджує достовірність отриманих параметрів для оцінки як поверхневих, так і глибинних механізмів зсувів.

Аналіз показав, що вирішальними чинниками стійкості є:

- наявність ослабленої зони вивітрілого флішу у верхній частині схилу;
- слабкі тектонічні контакти на глибині, які формують потенційні площини зсуву;
- неоднорідність масиву, що зумовлює відмінності у прогнозованих механізмах руйнування.

Отримані результати свідчать про ефективність поєднання числового моделювання, геофізичних досліджень та зворотного аналізу для оцінки стійкості схилів у межах флішових товщ. Запропонований підхід може бути використаний для інженерного обґрунтування протизсувних заходів та уточнення параметрів при проектуванні у складних геологічних умовах Карпат.

Список літератури

- [1] Bestyński, Z. (2018). Geophysical investigation and geotechnical classifications for stability assessment of Carpathian flysch slopes.
- [2] Duncan, J. M., Wright, S. G., Brandon, T. L. (2014). *Soil Strength and Slope Stability*. Wiley.
- [3] Marinos, V., Marinos, P., & Hoek, E. (2005). The Geological Strength Index: Applications and limitations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(1), 55–65.
- [4] Bishop, A. W. (1955). *The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes*. *Géotechnique*, 5(1), pp. 7–17.
- [5] Grozic, J. L. H. (2009). *The Geotechnical Behaviour of Flysch: Slope Stability and Engineering Challenges*.