

Ягольник А.М., к.т.н., доцент
Марченко В.І., к.т.н., ст. викладач

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

ОЦІНЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНИХ СХИЛІВ ПРИ ЗМІНІ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТІВ

Розглянуто питання моделювання стійкості схилів методом скінченних елементів та порівняння його результатів з результатами стандартних аналітичних методів. Указано на необхідність правильного застосування характеристик міцності для різних шарів ґрунтів на схилі. Установлено, що характеристики міцності, визначені за методикою «плашка по плашці», необхідно задавати тим ґрунтам, які втратили свою структурну міцність. Розрахунками показано, що коефіцієнти стійкості, визначені аналітичною методикою, відрізняються від відповідних значень, обчислених методом скінченних елементів, на 15%. З'ясовано, що для схилів зі складним нашаруванням ґрунтів важливо чітко визначати межі ґрунтів з порушеною структурою, а також характеристики міцності відповідно до стану ґрунтів та поточного напружено-деформованого стану.

Ключові слова: схил, зсув, міцність ґрунту, зчеплення, кут тертя, коефіцієнт стійкості, метод скінченних елементів, метод граничної рівноваги, одноплосинне зрушення, методика «плашка по плашці».

Ягольник А.Н., к.т.н., доцент
Марченко В.И., к.т.н., ст. преподаватель

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОПОЛЗНЕОПАСНЫХ СКЛОНОВ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СВОЙСТВ ГРУНТОВ

Рассмотрен вопрос моделирования устойчивости склонов методом конечных элементов и сравнение его результатов с результатами стандартных аналитических методов. Указано на необходимость правильного применения характеристик прочности для разных слоев ґрунтов в пределах склона. Установлено, что характеристики прочности, определенные по методике «плашка по плашке», необходимо задавать тем ґрунтам, которые потеряли структурную прочность. Расчетами показано, что коэффициенты устойчивости, определенные по аналитической методике, отличаются от соответствующих значений, вычисленных методом конечных элементов, на 15%. Выяснено, что для склонов со сложным напластованием важно четко определить границы ґрунтов с нарушенной структурой, а также характеристики прочности в соответствии с состоянием ґрунтов и текущим напряженно-деформированным состоянием.

Ключевые слова: склон, оползень, прочность ґрунта, сцепление, угол трения, коэффициент устойчивости, метод конечных элементов, метод предельного равновесия, одноплоскостной срез, методика «плашка по плашке».

Yagolnyk A., PhD, Assistant Professor
Marchenko V., PhD, senior lecturer
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

STIFFNESS ANALYSIS OF LANDSLIDE SLOPES AFTER SOIL PROPERTIES CHANGE

It is considered a problem of numerical simulation of slope stability by finite element method and compared its results with results of standard analytical methods. It is pointed to necessity of the proper usage of strength characteristics for different strata of slope soils. It is defined that strength characteristics determined by «plate by plate» method must be assigned for soils which lose structural strength.

For stability analysis of slopes in the case of disperse soils one used strength parameters – frictional angle φ and cohesion c . This parameters are determined by testing for each types and conditions of soils.

In the case of soils with undisturbed structure cohesion consist of structural cohesion c_{st} and water-colloidal ties Σ_w . Structural ties are elastic and they predetermine degree of strain and do not depend on density of soil. After soil structure disturbance rigid structural ties are failed and do not regenerate. The disturbance of this ties is due to static and dynamic loads, nonreversible shears, layering of loess soil strata under water level especially with pressure gradient.

For practical problems it is important to determine mechanical properties of soils and maximum possible value of load imposed to ground massive for which balance is kept and it is stable. For numerical analysis of slope mode of deformation the question remains of assignment of soil parameters for soils on slope and in limits of potential slip surfaces. It is very relevant for cohesive soils which strength is conditioned by structural cohesion c_{st} and water-colloidal ties Σ_w .

It is still unexplored problem of use of values of mechanical properties which determined by standard shearing test and shearing by «plate by plate» method.

The analytical model of slopes for numerical analysis should be performed taking into account geomorphological and geological features of slopes, groundwater conditions, existence of the slip surfaces etc. It is established that for slopes with complex layering of soils it is important to determine the soil boundaries clearly and to perform the tests for determination of strength parameters of soils according to soil conditions and current mode of deformation of slope.

Strength parameters of soils should be determined by methods which considered the structure and genesis of soils. For structural unstable soils (slide-rocks, colluvium, man-made grounds etc.) the soil parameters should be determined in most unfavorable conditions taking account of the lose of structural strength of soils and formation slip surface.

It is shown by analysis that factors of safety calculated by analytical method vary from values calculated by finite element method by 15%.

Keywords: *slope, landslide, soil strength, cohesion, friction angle, safety factor, finite element method, limit equilibrium state, shearing test, «plate by plate» method.*

Вступ. У зв'язку з підвищенням дефіциту земельних ділянок усе частіше почали освоюватися зсувонебезпечні схили, необгрунтована забудова яких призводить до втрати їх стійкості. Найчастіше поштовхом до появи зсувних процесів є комплексні дії природних і техногенних факторів.

Зсувні процеси у межах схилів річкових долин, пов'язані зі змінами властивостей ґрунтів, що складають схили, при зміні режиму підземних вод, викликаній інженерно-геологічними процесами, значно ускладнюють умови для використання таких територій під будівництво та становлять загрозу для прилеглих територій з існуючою забудовою. Такі умови потребують прогнозування зсувних процесів на схилах. Однак при таких дослідженнях існує необхідність прогнозування схилових процесів залежно від зміни напружено-деформованого стану ґрунтів на схилі чи зміни властивостей цих ґрунтів при зміні гідрогеологічного режиму, динамічних навантажень і т. ін. Тому постає питання адекватного визначення характеристик ґрунтів для прогнозування можливого стану схилу [1].

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Порушення стійкості схилу, як і будь-яка інша форма руйнування стійкості ґрунтового масиву, пов'язане з подоланням діючими на деяких площадках дотичними зсуваючими напруженнями сил опору ґрунту зрушенню. При розв'язанні практичних задач важливо правильно визначити механічні властивості ґрунтів і максимально можливе навантаження на масив ґрунту, при якому ще зберігається його рівновага й не втрачається стійкість.

Питання визначення характеристик міцності за стандартними методиками [1] досліджували Л.К. Гінзбург, М.Л. Зоценко, Ю.Й. Великодний, С.В. Біда, В.А. Титаренко, М.Г. Демчишин, А.В. Bichop, D.V. Griffiths, P.A. Lan, E. Van der Hoek [2]. Зокрема, в роботах Ю.Й. Великодного [1] наголошується на необхідності врахування порушеної структури ґрунту, особливо лесового, при його замоканні. Оскільки внаслідок такого порушення знижуються характеристики міцності ґрунту, то їх, на думку автора, слід визначати за методикою «плашка по плашці», яка детально описана в роботі [1].

Отримані за такою методикою характеристики мають менші значення порівняно зі звичайним одноплощинним зрушенням, оскільки враховується лише структурна міцність ґрунтів. Розраховані за цими даними коефіцієнти стійкості схилів показали, що використання таких характеристик дозволяє більш точно оцінювати стійкість схилу, що підтверджено натурними спостереженнями [1, 2].

Метод скінченних елементів (МСЕ) дозволяє виконувати такі розрахунки більш автоматизовано, враховувати більшу кількість факторів, більш дискретизувати розрахункову область, зменшити витрати часу на повторні розрахунки при врахуванні зміни інженерно-геологічних та гідрогеологічних умов. В багатьох програмних комплексах реалізована процедура зменшення характеристик міцності для знаходження таких критичних значень, при яких втрачається стійкість схилу, що допомагає встановити фактичний коефіцієнт стійкості досліджуваного схилу [3].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Проектування ефективних протизсувних споруд можливе за умови правильного вибору розрахункової схеми оцінювання стійкості схилу та методів визначення механічних характеристик ґрунтів, що найбільш точно відповідають стану ґрунтів схилів. Достовірність вибору розрахункової схеми методу оцінювання схилу значним чином залежить від якості інженерно-геологічних і геодезичних вишукувань, які повинні відображати достовірність реальної та потенційної небезпеки розвитку зсувних процесів [1, 2].

При моделюванні напружено-деформованого стану схилу залишається відкритим питання призначення характеристик міцності для ґрунтів на схилі та у межах потенційних ліній ковзання. Це особливо актуально для зв'язних ґрунтів, властивості міцності яких зумовлюються структурним зчепленням c_{st} та водноколоїдними зв'язками Σ_w .

Зокрема, не дослідженим залишається питання використання значень механічних властивостей, отриманих при лабораторних випробуваннях методом одноплощинного зрушення та зрушення за методикою «плашка по плашці».

Постановка завдання. У цій статті були поставлені завдання оцінювання стійкості реального схилу за аналітичними та чисельними методами з використанням характеристик міцності ґрунтів, отриманих за різними методиками. За результатами порівняння одержаних теоретичних даних з реальним станом схилу потрібно визначити характеристики ґрунтів, які необхідно використовувати при оцінюванні стійкості схилу.

Основний матеріал і результати. Для оцінювання стійкості було обрано схил у с. Великий Перевіз Полтавської області (рис. 1).



Рисунок 1 – Загальний вигляд схилу

Територія, що вивчається, розташована на лівому березі р. Псел з абсолютними позначками поверхні землі від 125,0 до 155,0 м. У геоморфологічному відношенні територія належить до схилу Полтавського лесового плато (рис. 2).

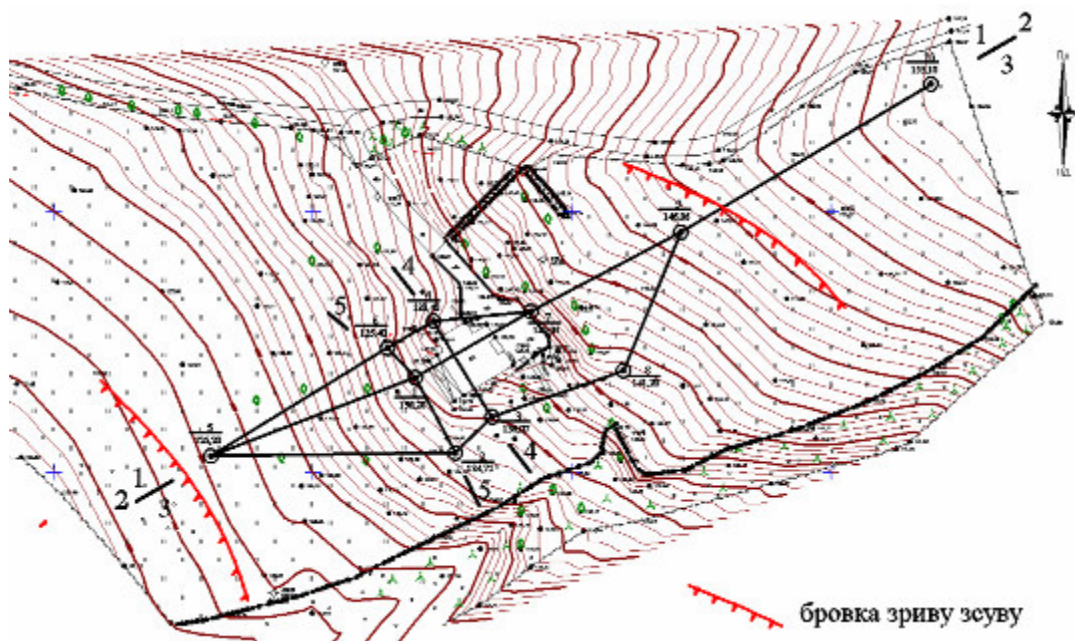


Рисунок 2 – Територія зсувного схилу

За результатами інженерно-геологічних вишукувань встановлено, що у будові схилу беруть участь суглинисті відклади четвертинної формації, представлені лесовими та лесоподібними (лесованими) суглинками. Схил з поверхні перекритий насипними й делювіальними відкладами потужністю близько 5 м. Рівень ґрунтових вод був зафіксований тільки у середній частині схилу. На плато і нижче по схилу ґрунтові води не були виявлені (рис. 3).

Характер поверхні ковзання часто визначається не стільки напруженим станом товщі, скільки природними умовами і геологічною будовою ґрунтової товщі. Для оцінювання стійкості цього схилу використано метод притуленого укосу. Його найчастіше використовують у таких випадках:

- в основі схилу залягають шари або прошарки слабких ґрунтів;
- форма поверхні нашарувань ґрунтів має нахил у бік схилу;
- стійкий шар ґрунту, по якому ковзає зсувна маса, має прямолінійні ділянки.

В умовах плоскої задачі ці поверхні ковзання з деякими наближеннями можуть бути замінені в площині креслення тією чи іншою кількістю прямих ліній – ліній ковзання (рис. 4).

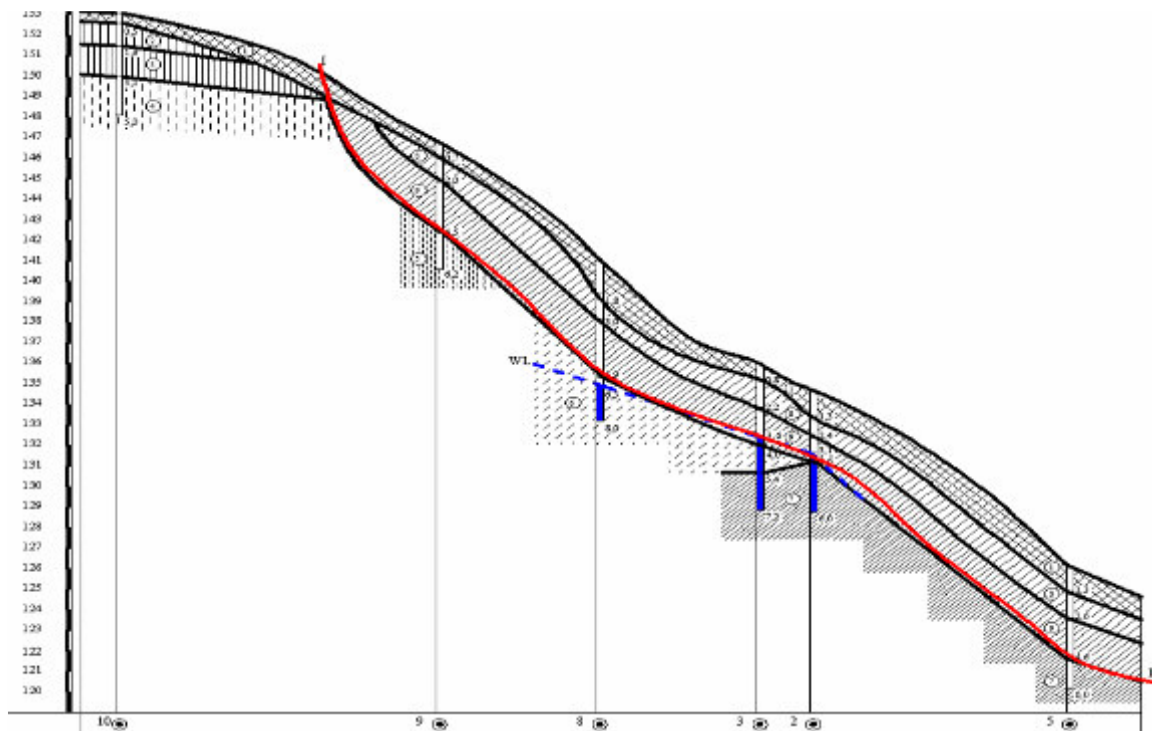


Рисунок 3 – Інженерно-геологічна будова схилу

У межах прямих ліній виділяються блоки ґрунту, обчислюється вага Q та кут їх нахилу α до горизонталі. Зсувна сила блока дорівнює $F=Q \cdot \sin \alpha$, а утримуюча $R=Q \cdot \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi + c_{st} \cdot l$. Різниця між цими значеннями буде відповідати зсувному тиску E . За наявності в ґрунтах схилу фільтраційного потоку створюється додатковий тиск F_w [1, 2].

Коефіцієнт стійкості k_{st} зсувного схилу в такому випадку при врахуванні фільтраційного тиску дорівнюватиме

$$K_{st} = \frac{\sum Q_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + c_{st} \cdot l_i}{\sum (Q_i \cdot \sin \alpha_i)} \quad (1)$$

При оцінюванні стійкості схилу методом притуленого укусу були отримані результати, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку схилу методом притуленого укусу

№ блока	№ ІГЕ	Вага блока, кН	α , град	Кут тертя φ , град	Зсувні зусилля від ґрунту, кН	Опір зрушенню, кН	Зсувний тиск, кН
1	9	225,50	27,38	13	103,65	46,21	57,44
2	9	532,84	14,18	13	130,46	124,15	6,31
3	9	2683,2	13,24	13	614,22	621,19	-6,96
4	9	2583,9	6,15	13	276,67	610,90	-334,22
5	9	653,6	5,21	13	59,32	156,21	-96,89
6	9	3384,96	11,25	13	660,04	795,44	-135,39

$\Sigma = -509,7$

Коефіцієнт стійкості схилу дорівнює $k_{st} = 1,276$. Це вказує на те, що на сьогодні схил знаходиться у стійкому стані. Але найменше довантаження, зміна властивостей ґрунту, додаткове водонасичення схилу, його підрізка тощо без комплексу протизсувних заходів можуть призвести до втрати стійкості схилу.

Для оцінювання напружено-деформованого стану (НДС) ґрунтів на схилі, відповідно до розділу 8 ДБН В.2.1-10-2009 «Основи та фундаменти будівель і споруд», було використано чисельне моделювання МСЕ [4, 5]. Моделювання ґрунтів схилу виконували з використанням пружно-пластичної моделі з критерієм міцності Мора – Кулона (скорочено МК). У постановці пружно-пластичної задачі прийняті такі передумови:

– враховані прояви нелінійності містять пластичну деформацію формозміни при складному напруженому стані, безперешкодне деформування при розтязі;

– при складному напруженому стані (стиску зі зсувом) загальні деформації містять лінійну (пружну) та пластичну частини, причому пластична складова деформацій виникає після досягнення напруженим станом границі міцності згідно з умовою Мора – Кулона для плоскої задачі

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \sin \varphi - c \cdot \cos \varphi = 0. \quad (2)$$

Дискретизація розрахункової області при розв'язанні нелінійної задачі виконується за допомогою методу скінченних елементів.

Розрахунок МСЕ виконувався за методикою зменшення міцності ґрунтів. Він полягає у зменшенні характеристик міцності до моменту настання граничної рівноваги. За такого підходу визначається коефіцієнт стійкості схилу як відношення заданих характеристик до їх граничних значень

$$k_{st} = \frac{c + \sigma \cdot \tan \varphi}{c_r + \sigma \cdot \tan \varphi_r}, \quad (3)$$

де c та φ – початкові характеристики міцності;

σ – нормальна складова напруження;

c_r та φ_r – граничні значення характеристик міцності.

Початкові напруження від ваги води генеруються на основі рівня ґрунтових вод, який уводиться при призначенні початкових умов.

Початкові напруження, викликані силою тяжіння, представляють рівноважний стан непорушеного ґрунту або скельної породи. Для їх генерації застосовано процедуру так званого гравітаційного навантаження.

При використанні цієї процедури початкові напруження дорівнюють нулю. Після цього виконується задавання напружень шляхом прикладання власної ваги ґрунту на першій фазі розрахунку. Після генерування початкових напружень викликані ними деформації обнуляються – цей етап НДС основи вважають початковим [4].

Прийняті у розрахунках фізико-механічні властивості інженерно-геологічних елементів та властивості конструкцій зведено до таблиці 2. При цьому використані розрахункові значення фізико-механічних характеристик ґрунтів для визначення стійкості схилів і проектування протизсувних споруд за ДБН Б.1.1-3-97 «Захист від небезпечних геологічних процесів. Інженерний захист територій, будинків і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення»: питома вага ґрунтів – розрахункові значення для розрахунків за першим граничним станом; кут внутрішнього тертя – розрахункові значення для розрахунків за першим граничним станом; питома зчеплення – розрахункове значення для розрахунків за першим граничним станом.

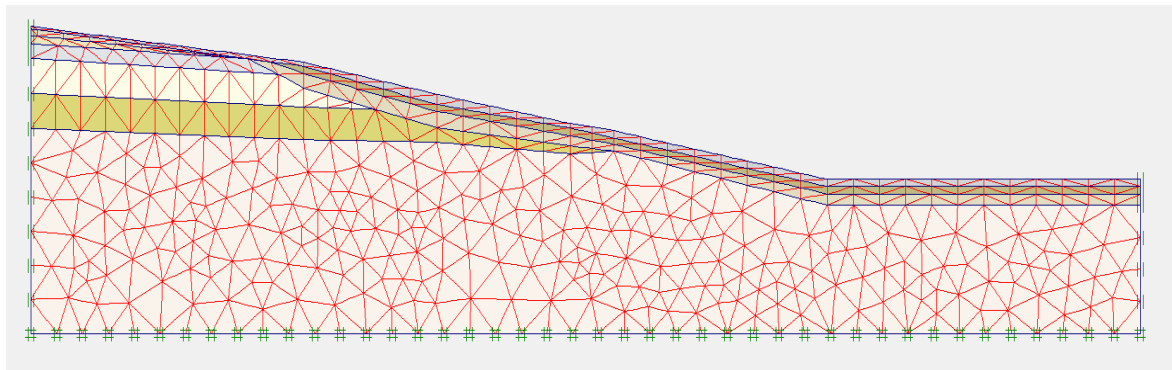
Таблиця 2 – Розрахункові значення фізико-механічних властивостей ґрунтів

№ ПЕ	Модель матеріалу	Питома вага ґрунту γ , кН/м ³	Питома вага водонасиченого ґрунту γ_s , кН/м ³	Зчеплення c , кПа		Кут внутрішнього тертя φ , °		Модуль деформації E , МПа	Коефіцієнт Пуассона ν
				Стандартна методика	Методика «плашка по плашці»	Стандартна методика	Методика «плашка по плашці»		
1	МС	16,5	17,0	5	5	10	10	8	0,35
2	МС	16,8	18,6	18,2	7,3	20	18	5	0,35
3	МС	17,2	18,5	14,6	6,2	21	18	4	0,35
4	МС	17,4	18,5	13,5	6,0	22	20	6	0,35
5	МС	17,7	18,8	12,8	4,5	21	19	5	0,35
6	МС	18,4	18,9	16,4	5,3	19	19	7	0,35
7	МС	19,2	19,2	32,3	10,4	17	11	18	0,35
8	МС	17,5	18,7	10,2	0,3	18	16	2	0,35
9	МС	18,2	18,9	12,4	0,6	16	13	4	0,35

При розрахунках використано характеристики міцності, визначені методом звичайного одноплосинного зрушення та методом «плашка по плашці». Виконано три розрахунки з характеристиками для трьох варіантів:

- 1) усіх ґрунтів у межах схилу з характеристиками, визначеними стандартним методом одноплосинного зрушення;
- 2) усіх ґрунтів у межах схилу з характеристиками, обчисленими методом «плашка по плашці»;
- 3) ґрунтів, що знаходяться вище від передбачуваної лінії ковзання (делювіальних), з характеристиками, визначеними методом «плашка по плашці», а всіх інших (корінних ґрунтів) – з характеристиками за звичайним методом одноплосинного зрушення.

Геометрична модель для розрахунку створена на основі інженерно-геологічного розрізу 1-1. На рисунку 5 наведено розрахункову схему із сіткою скінченних елементів.



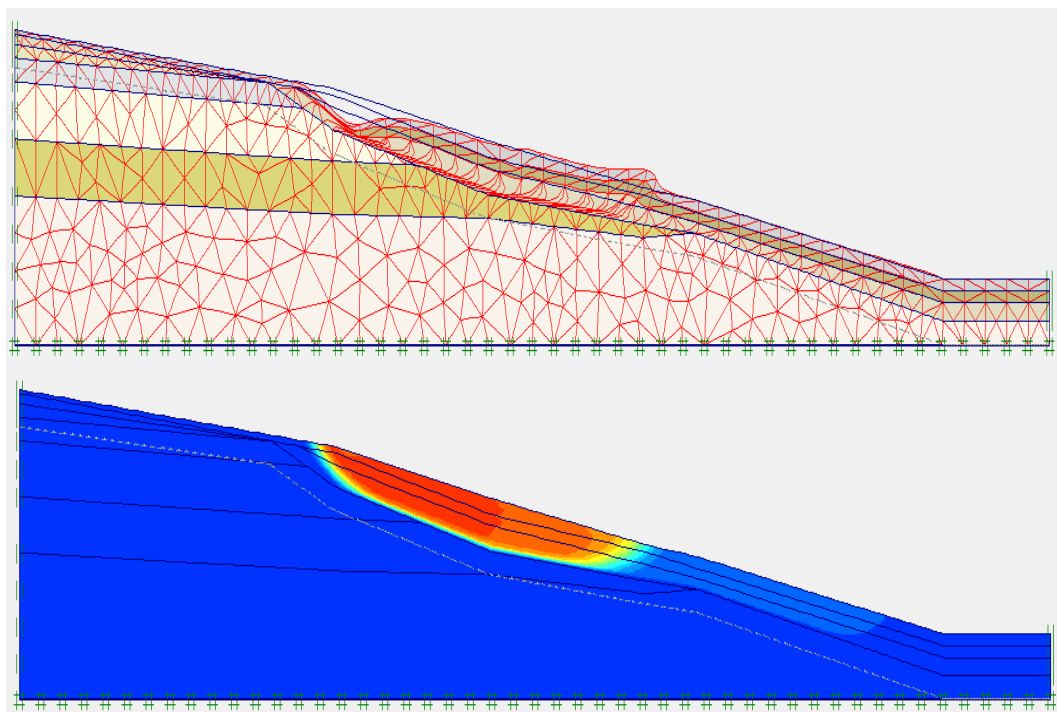
Рисунку 5 – Розрахункова схема схилу із сіткою скінченних елементів

Розрахунок виконано у дві фази:

- 1) генерування напружень від власної ваги ґрунту, при цьому використано процедуру гравітаційного навантаження *Gravity loading*;
- 2) розрахунок за схемою *Phi-c reduction* для отримання значення коефіцієнта безпеки ΣM_{sf} , за яким у цьому випадку (при розрахунку схилу) можна оцінити стійкість схилу (на початку цієї фази деформації, викликані власною вагою ґрунту, обнулялися) [4, 5].

Результати розрахунків трьох варіантів наведено на рис. 6 – 8.

Результати чисельного моделювання методом скінченних елементів та аналітичного розрахунку методом притуленого укусу наведені у таблиці 3.



Рисунку 6 – Деформована модель та ізополі деформацій для першого розрахункового варіанта (для всіх ґрунтів прийнято характеристики, визначені стандартним методом одноплосинного зрушення)

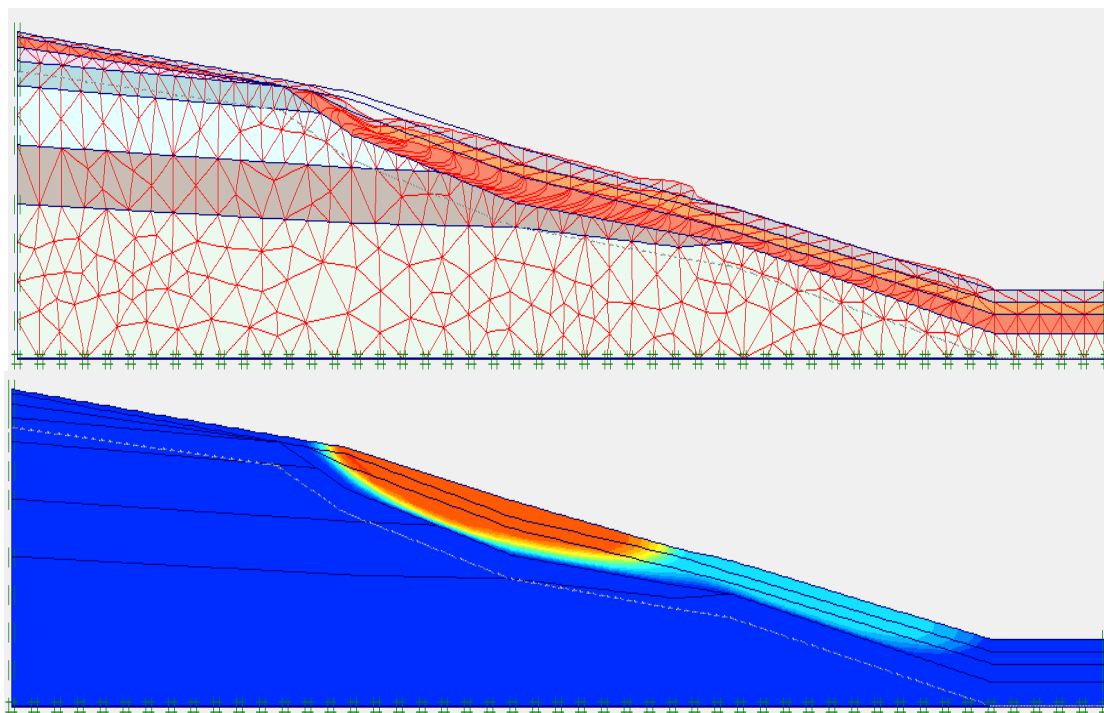


Рисунок 7 – Деформована модель та ізополя деформацій для другого розрахункового варіанта (для всіх ґрунтів прийнято характеристики, визначені методом одноплощинного зрушення «плашка по плашці»)

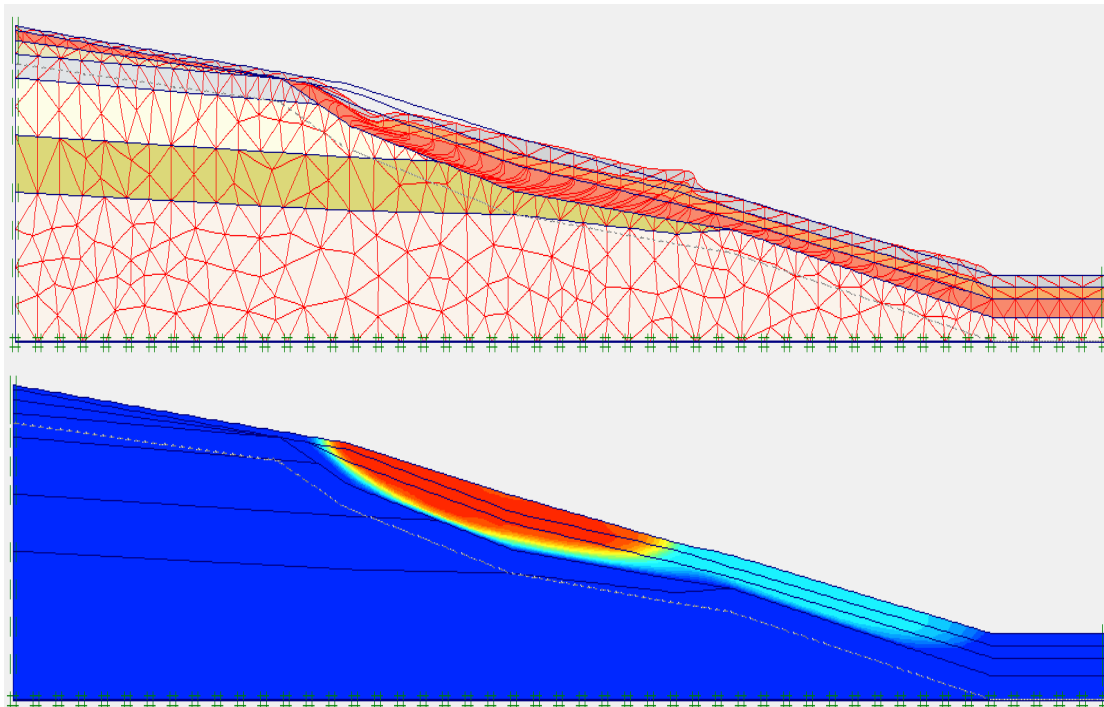


Рисунок 8 – Деформована модель та ізополя деформацій для третього розрахункового варіанта (для делювіальних ґрунтів прийнято характеристики, визначені методом «плашка по плашці», а для інших – за стандартним методом одноплощинного зрушення)

Таблиця 3 – Порівняння результатів розрахунків різними методами

Метод оцінювання стійкості схилу		Коефіцієнт стійкості k_{st}
Характеристики, визначені за стандартною методикою	Метод притуленого укосу	2,456
	Математичне моделювання (варіант 1)	2,697
Характеристики, визначені методом «плашка по плашці»	Метод притуленого укосу	1,276
	Математичне моделювання (варіант 2)	1,415
	Математичне моделювання (варіант 3)	1,414

Аналіз отриманих даних і порівняння їх з реальним станом схилу дають можливість стверджувати, що моделювання з використанням характеристик міцності ґрунтів, визначених методом «плашка по плашці», при призначенні їх для делювіальних ґрунтів дає результат, який збігається з реальними схиловими процесами. Інші методи дають завищений коефіцієнт стійкості або неадекватну схему руйнування схилу та визначення поверхні ковзання. Різниця між аналітичним методом і методом скінченних елементів дає коефіцієнт стійкості з відхиленням близько 10 – 11%.

Висновки:

1. При виконанні комплексу інженерно-геологічних вишукувань на зсувних або зсувонебезпечних схилах обов'язковим є вивчення характеристик міцності ґрунтів методами, які дають можливість визначити їх в умовах, максимально наближених до реального стану ґрунтового масиву. Одним з таких методів є метод «плашка по плашці».

2. При складанні розрахункової схеми для схилу необхідно враховувати особливості геоморфологічної та інженерно-геологічної будов, режиму ґрунтових вод, наявності потенційних поверхонь ковзання тощо.

3. При призначенні характеристик міцності для ґрунтів потрібно враховувати їх структуру й генезис. Для структурно нестійких ґрунтів (делювій, колювій, насипні ґрунти тощо) характеристики необхідно визначати у найбільш несприятливих умовах з урахуванням втрати ними структурної міцності та формування в них поверхні ковзання.

4. Для оцінювання стійкості схилу використання методу скінченних елементів дає достовірні дані напружено-деформованого стану ґрунтового масиву при правильній розрахунковій схемі та достовірних значеннях фізико-механічних властивостей ґрунтів з урахуванням прогнозу їх змін.

Література

1. Великодний Ю. Й. *Захист територій від зсувів: навчальний посібник* / Ю. Й. Великодний. – Полтава, ТОВ «Поліграфічний центр «Скайтек», 2006. – 116 с.
2. Гинзбург Л. К. *Противооползневые сооружения: монография* / Л. К. Гинзбург. – Днепропетровск, ЧП «Лица ЛТД», 2007. – 188 с.
3. Lim K. *Cassidy Slope stability analysis for fill slopes using finite element limit analysis* / K. Lim, A. Li, A. Lyamin // *Proc. of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. – Edinburgh, 201. – P. 1597 – 1602.
4. Tschuchnigg H. F. *Schweiger Performance of strength reduction finite element techniques for slope stability problems* / H. F. Tschuchnigg // *Proc. of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. – Edinburgh, 201. – P.1687 – 1692.
5. Сдвижкова Е. А. *Геомеханическая оценка устойчивости оползневого склона методом конечных элементов* / Е. А. Сдвижкова, А. С. Ковров, К. К. Курияк // *Науковий вісник НГУ. Серія: екологічна безпека, охорона праці*. – Дн-к: НГУ, 2014. – №2. – С. 86 – 92.

© Ягольник А.М., Марченко В.І.
Надійшла до редакції 3.12.2015