

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ФАКУЛЬТЕТ КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ



ЗБІРНИК ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ
міжнародної науково-практичної онлайн конференції
«Сучасні проблеми та перспективи розвитку
машинобудування України»,
присвяченої 20-й річниці з дня створення
факультету конструювання та дизайну
Національного університету біоресурсів і
природокористування України

23-24 вересня 2021 року

м. Київ

УДК 624.15(075.8)

**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО
СТАНУ ГРУНТОВОГО МАСИВУ ТА ОЦІНКА ЙОГО СТІЙКОСТІ**

Бакуліна В.М., ст. викл.

Петренк Ю.В., студ.

Національний університет біоресурсів і

природокористування України, м. Київ

E-mail: bakulina88@ukr.net

Моделювання напружено-деформованого стану (НДС) за допомогою методу скінчених елементів (МСЕ) має наступні обмеження:

1) не дозволяє провести розрахунок ґрунтового масиву з коефіцієнтом меншим за одиницю;

2) урахування значних переміщень вимагає застосування відповідного розрахункового апарату (зокрема, геометрично та фізично нелінійних моделей) в поєднанні з розрахунком за змінною сіткою скінчених елементів;

3) межі розрахункової схеми можуть впливати на внутрішній напружений стан ґрунтового масиву.

МСЕ можливо оцінити НДС ґрунтових масивів та стійкість майже усіх схилів. В постановці пружно-пластичної задачі прийняті наступні передумови:

- враховані прояви нелінійності, пластичні деформації формозміни при складному напруженому стані, безперешкодне деформування при розтязі;
- при складному напруженому стані (стиску зі зсувом) загальні деформації включають в себе лінійну (пружну) та пластичну частини, причому пластична складова деформацій виникає після досягнення напруженим станом границі міцності у відповідності з умовою Мора – Кулона (скорочено МС) для плоскої задачі:

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

Дискретизація розрахункової області при розв'язанні нелінійної задачі виконується за допомогою МСЕ.

Компоненти напружень визначаються тільки в центрах континуальних скінчених елементів, що моделюють ґрунт, переміщення – в вузлах сітки.

Інформація що вводиться складається із наступних масивів вихідних даних:

- 1) координати вузлів;
- 2) зв'язки (вузли із нульовими переміщеннями та вузли з рівними переміщеннями);
- 3) опис навантажень (величина, напрямок та точки (вузли) до яких прикладається);
- 4) опис скінчених елементів (номери вузлів, площі перерізів та моменти інерції стержнів; механічні характеристики ґрунтів: модуль деформації, коефіцієнт Пуассона, кут внутрішнього тертя, питоме зчеплення, швидкість дилатації; показники опору зрушенню та кут нахилу поверхні сковзання, природний та вихідний напружений стан);
- 5) максимальна кількість циклів ітерацій.

У результаті розрахунку отримуємо переміщення вузлів, компоненти напружень в центрах скінчених елементів, поздовжні, поперечні сили та моменти на кінцях стержневих елементів. При цьому розрахунки за граничними станами обох груп виконуються на одній розрахунковій схемі при одній моделі ґрунту.

Практично це реалізується шляхом поетапного навантаження, тобто діючим навантаженням надається величина, яка відповідає розрахунку за граничними станами другої групи, потім сили збільшуються до розмірів розрахункових найбільш не вигідних величин. При розрахунках за граничними станами першої групи основною задачею є оцінка можливості втрати міцності та стійкості внаслідок розвитку значних зрушень та допустимості пластичних деформацій ґрунту. Збіжність ітераційного процесу – вирішення, яке задовольняє всі встановлені вимоги (по допустимій нев'язці), свідчить про отримання напруженого стану, що виключає втрату міцності та стійкості.

Властивості ґрунтового середовища описані реально визначеними характеристиками при вишукуваннях. При підготовці вихідних даних пружно-пластичного розрахунку необхідні шість основних параметрів кожного шару: питома вага γ , модуль деформації E , коефіцієнт Пуассона ν , кут внутрішнього тертя φ , питома зчеплення c , ψ параметр дилатації. Для забезпечення необхідної довірчої вірогідності результатів розрахунку використовувалися відповідні коефіцієнти надійності по ґрунту.

Розрахунок схилу проводився за схемою, що передбачає зміну характеристик міцності ґрунту до тих пір, поки схил не перейде в стан граничної рівноваги (тип розрахунку *Phi-c reduction*). При такому підході коефіцієнт стійкості схилу визначається як відношення вихідних характеристик міцності до їх граничних значень:

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

де c та φ – вихідні параметри міцності; σ – компонент нормального фактичного напруження; c_r та φ_r – параметри приведеної міцності, що необхідні для підтримки рівноваги.

За цих передумов зчеплення і тангенс кута природного тертя приводяться в такій пропорції:

$$\frac{c}{c_r} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_r} = \sum M_{sf}$$

Приведення параметрів міцності контролюється загальним множником ΣM_{sf} . Цей параметр змінюється при поетапному методі до тих пір, доки не відбудеться руйнування. Далі коефіцієнт безпеки визначається як ΣM_{sf} при руйнуванні, за умови, що при руйнуванні отримуємо більш-менш його постійне значення для числа послідовних етапів завантаження.

Генерація початкових напружень

Початкові гідростатичні напруження генеруються на основі рівня ґрунтових вод, який вводиться при задаванні початкових умов.

Початкові напруження, викликані власною вагою ґрунтів, представляють рівноважний стан непорушеного ґрунту або скельної породи. Генерація початкових напружень можлива двома способами:

- 1) за допомогою *процедури K_0 (K_0 -procedure)*;
- 2) гравітаційним навантаженням (*Gravity loading*).

Як правило, *K_0 -procedure* повинна використовуватись лише в задачах з горизонтальною поверхнею та паралельними їй шарами ґрунту та рівнями ґрунтових вод. В усіх інших випадках повинна використовуватись процедура гравітаційного навантаження (*Gravity loading*). Зважаючи на це в даному розрахунку використано саме цю процедуру.

Гравітаційне навантаження

При використанні процедури гравітаційного навантаження початкові напруження (тобто напруження, що відповідають «Початковій фазі») дорівнюють нулю.

Після цього виконується задавання напружень шляхом прикладання власної ваги ґрунту на першій фазі розрахунку.

В цьому випадку, при використанні пружної ідеально-пластичної моделі ґрунту (наприклад, моделі з критерієм міцності Мора – Кулона), кінцеве значення K_0 значною мірою залежить від прийнятих значень коефіцієнта Пуассона. Важливо обрати такі значення коефіцієнта Пуассона, які дають реалістичні значення K_0 .

Якщо потрібно, можна використовувати замість коефіцієнта Пуассона окремі набори даних за матеріалами, підібрані так, щоб забезпечити потрібні значення K_0 під час «гравітаційного навантаження». В ході наступних розрахунків ці набори даних можуть бути замінені іншими. Пружний розрахунок для одномірного (лінійного) стиску дасть

$$\nu = K_0 / (1 + K_0)$$

Часто пластичні точки генеруються під час процедури гравітаційного навантаження. Наприклад, для незв'язних ґрунтів генерація пластичних точок матиме місце при невиконанні умови:

$$\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} < \frac{\nu}{1 - \nu}$$

Генерація невеликої кількості пластичних точок під час процедури гравітаційного навантаження цілком допустима.

Після остаточної генерації початкових напружень переміщення повинні бути обнулені на початку наступної фази розрахунку. Це дозволить уникнути впливу «гравітаційного навантаження» на переміщення, які будуть отримані в ході наступних розрахунків.

МСЕ зсувний тиск на утримуючі споруди визначають як різницю напружень у ґрунті в площинах по контакту із спорудою зі сторони верхового і низового схилу. Для цього використовують горизонтальні складові напружень в ґрунті у вертикальній площині. При цьому як і аналітично враховується необхідний нормативний коефіцієнт запасу стійкості.

У випадку визначення тиску на конструкцію, яка не перешкоджає фільтрації підземних вод, розрахунок виконується із використанням ефективних напружень. В протилежному випадку необхідно враховувати гідростатичний тиск води.

Вихідні дані до розрахунків

Прийняті у розрахунках фізико-механічні властивості інженерно-геологічних елементів наведено в таблиці 1. При цьому використані значення фізико-механічних характеристик ґрунтів для розрахунків за першим групою граничних станів (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»).

Геометрична модель для розрахунку створена на основі інженерно-геологічних розрізів I-I...VI-VI за даними інженерно-геологічних вишукувань в м. Київ по вул Кайсарова.

При виконанні розрахунку виконано 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 запасу стійкості (безпеки) ΣM_{sf} , за яким в даному випадку (при розрахунку схилу) можна оцінити стійкість схилу (на початку цієї фази деформації, що викликані власною вагою ґрунту за результатами першої фази (історія напружено-деформованого стану), обнулялися).

Таблиця 1 – Фізико-механічні характеристики ґрунтів

| № ПГЕ | Модель матеріалу | Питома вага ґрунту γ , кН/м ³ | Питома вага водонасиченого ґрунту γ , кН/м ³ | Зчеплення с, кПа | Кут внутрішнього тертя φ , ° | Модуль деформації Е, МПа | Коеф. Пуассона, ν |
|------------|------------------|---|--|------------------|--------------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Н | МС | 16,5 | 16,5 | 2 | 15 | 5/10 | 0,25 |
| Р | МС | 16,0 | 16,0 | 2 | 15 | 5 | 0,25 |
| 1 | МС | 17,1 | 19,1 | 1 | 22 | 11 | 0,3 |
| 1а | МС | 20,1 | 20,1 | 2 | 26 | 25 | 0,3 |
| 1б | МС | 16,0 | 18,4 | 0 | 17 | 6 | 0,3 |
| 2 | МС | 17,1 | 19,5 | 0 | 25 | 24 | 0,3 |
| 2а | МС | 20,0 | 20,0 | 1 | 29 | 30 | 0,3 |
| 2б | МС | 16,5 | 19,1 | 0 | 22 | 16 | 0,3 |
| 2в | МС | 16,2 | 18,8 | 0 | 20 | 11 | 0,3 |
| 3 | МС | 17,6 | 19,2 | 6 | 17 | 8 | 0,32 |
| 3а | МС | 18,2 | 18,2 | 4 | 13 | 5 | 0,32 |
| 3б | МС | 16,8 | 16,8 | 4 | 12 | 3 | 0,32 |
| 4 | МС | 20,0 | 20,0 | 0 | 30 | 29 | 0,3 |
| 4а | МС | 20,3 | 20,3 | 1 | 32 | 35 | 0,3 |
| 4б | МС | 19,1 | 19,1 | 0 | 24 | 12 | 0,3 |
| 5 | МС | 16,8 | 19,5 | 6 | 17 | 10 | 0,32 |
| 6 | МС | 19,2 | 19,2 | 12 | 15 | 12 | 0,35 |
| 7 | МС | 19,4 | 19,4 | 26 | 11 | 16 | 0,37 |
| 8 | МС | 16,5 | 19,6 | 0 | 25 | 24 | 0,3 |
| 8а | МС | 20,0 | 20,0 | 1 | 29 | 30 | 0,3 |
| 8б | МС | 16,5 | 19,8 | 0 | 29 | 28 | 0,3 |
| 8в | МС | 18,9 | 18,9 | 0 | 20 | 12 | 0,3 |
| 8г | МС | 16,2 | 19,3 | 1 | 22 | 12 | 0,3 |
| 9 | МС | 19,4 | 19,4 | 1 | 23 | 15 | 0,3 |
| 9а | МС | 19,5 | 19,5 | 0 | 25 | 18 | 0,3 |
| 9б | МС | 19,0 | 19,0 | 7 | 18 | 10 | 0,32 |
| 10 | МС | 19,3 | 19,3 | 33 | 16 | 12 | 0,35 |
| 10а | МС | 19,2 | 19,2 | 53 | 12 | 19 | 0,37 |
| 11 | МС | 19,5 | 19,5 | 73 | 13 | 20 | 0,37 |
| 12 | МС | 19,4 | 19,4 | 43 | 14 | 18 | 0,37 |
| 12а | МС | 19,7 | 19,7 | 40 | 14 | 16 | 0,35 |
| 13 | МС | 16,9 | 19,6 | 0 | 27 | 25 | 0,3 |
| 14 | МС | 18,1 | 19,7 | 7 | 19 | 12 | 0,32 |
| 15 | МС | 20,5 | 20,5 | 13 | 16 | 17 | 0,35 |
| 16 | МС | 19,0 | 19,0 | 36 | 14 | 19 | 0,37 |
| 16а | МС | 19,9 | 19,9 | 12 | 16 | 10 | 0,35 |
| 17 | МС | 19,4 | 19,4 | 40 | 13 | 20 | 0,37 |
| 18 | МС | 18,4 | 20,3 | 8 | 20 | 13 | 0,32 |
| 19 | МС | 18,9 | 18,9 | 6 | 18 | 9 | 0,32 |
| 21 | МС | 19,9 | 19,9 | 46 | 15 | 20 | 0,37 |
| 21а | МС | 19,4 | 19,4 | 23 | 12 | 12 | 0,37 |
| 22 | МС | 17,9 | 20,4 | 1 | 28 | 30 | 0,3 |
| 22а | МС | 19,6 | 19,6 | 0 | 25 | 20 | 0,3 |
| 22б | МС | 19,4 | 19,4 | 0 | 22 | 17 | 0,3 |
| 23 | МС | 20,4 | 20,4 | 2 | 27 | 23 | 0,3 |
| 24 | МС | 19,5 | 19,5 | 1 | 21 | 12 | 0,3 |

Схема розміщення розвідувальних свердловин та розрахункових перерізів на топографічній зйомці наведено на рис. 1.

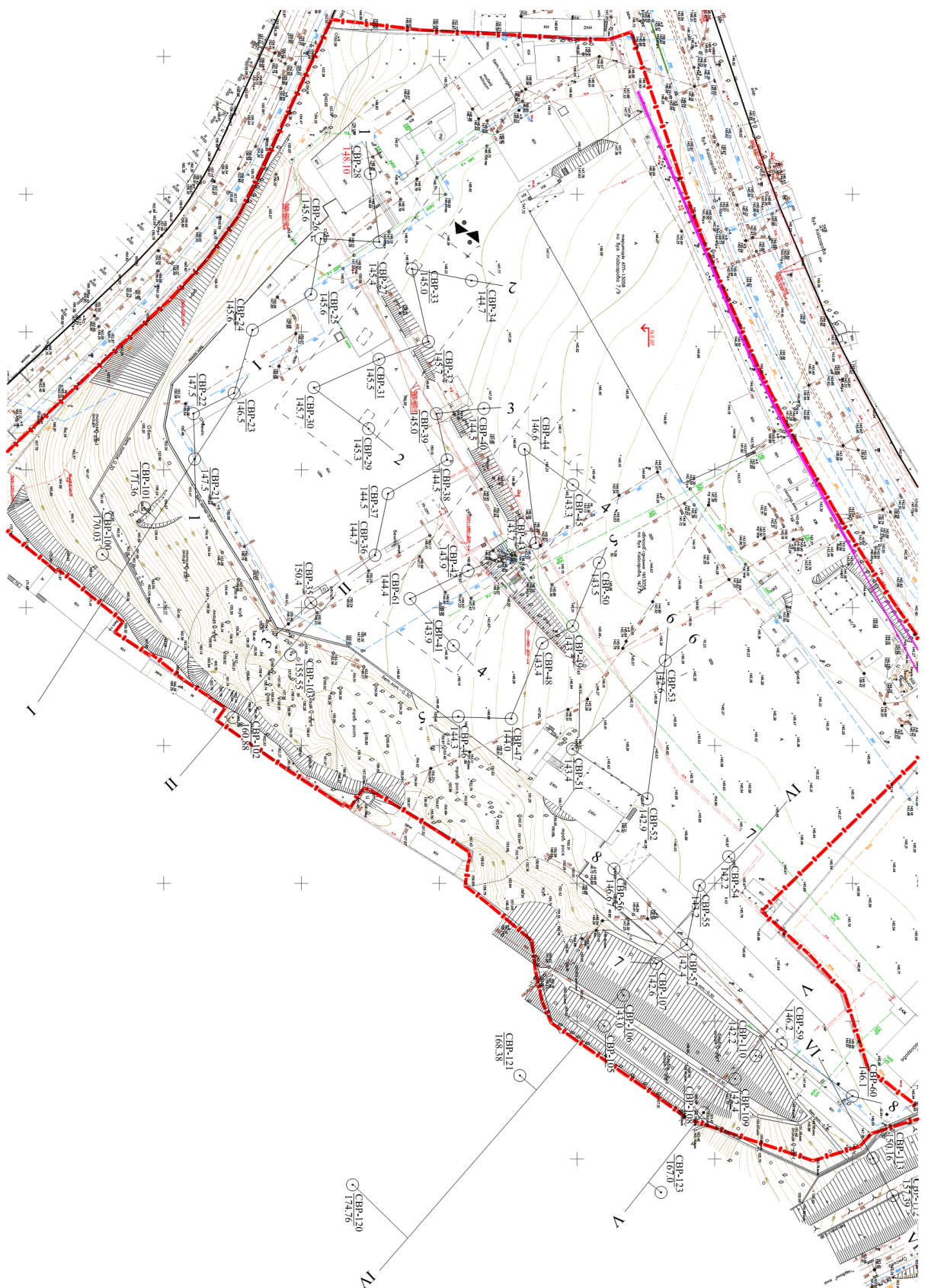


Рис. 1. Схема розміщення розвідувальних свердловин та розрахункових розрізів

Як видно з рис. 1 виділено 5 розрахункових створів чи розрізів (I-I, II-II, IV-IV, V-V, VI-VI).

Із аналізу інженерно-геологічних вишукувань встановлено, що найбільш імовірними грунтами, що можуть зсуватися є:

1) насипні ґрунти (прийнято $\varphi_{st}=10^0$, $c_{st}=0$ кПа, прогнозовані $\varphi_{st,пр}=8^0$, $c_{st,пр}=0$ кПа);

2) ІГЕ-5 – супісок з прошарками і гніздами піску (фактичні $\varphi_{st}=17^0$, $c_{st}=6$ кПа; прогнозовані $\varphi_{st,пр}=17^0$, $c_{st,пр}=5$ кПа);

3) ІГЕ-6 – суглинок з прошарками і гніздами супіску та піску, місцями з домішками органічних речовин (фактичні $\varphi_{st}=15^0$, $c_{st}=12$ кПа; прогнозовані $\varphi_{st,пр}=12^0$, $c_{st,пр}=7$ кПа);

4) ІГЕ-8 – пісок дрібний, середньої щільності (фактичні $\varphi_{st}=25^0$, $c_{st}=0$ кПа; прогнозовані $\varphi_{st,пр}=20^0$, $c_{st,пр}=0$ кПа).