

**МЕТОДИКА СПІЛЬНОГО СТАТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ
СИСТЕМИ «СПОРУДА – ГРУНТОВИЙ МАСИВ»
ДЛЯ БУДІВЕЛЬ, РОЗТАШОВАНИХ НА СХИЛАХ**

Гуслиста Г.Е., к.т.н.

Придніпровська державна академія будівництва та архітектури

Необхідність розрахунку напружено-деформованого стану конструкцій, які взаємодіють з ґрунтом, як єдиної системи «споруда – ґрунтовий масив» визначається тим, що такий підхід на відміну від традиційного (що ґрунтується на застосуванні певних контактних моделей ґрунту) дозволяє отримати змістовніші та точніші результати, оскільки враховує більшу кількість факторів (зокрема, фізико-механічні властивості ґрунту, в тому числі нелінійні, врахування роботи ґрунту поза межами конструкції, вплив розташованих поблизу будівель і т. ін.)

Всі існуючі методи розрахунку споруд, що взаємодіють з ґрунтовим масивом, можна розділити на дві принципово різні групи: 1) методи роздільного розрахунку; 2) методи спільного розрахунку, тобто розрахунку системи «споруда – ґрунтовий масив».

Метод роздільного розрахунку, затверджений нормативною літературою [1], передбачає таку послідовність: визначення напружено-деформованого стану надфундаментної споруди і навантажень на фундаменти та ґрунтовий масив, а потім розрахунок ґрунтового масиву та фундаментів на задані навантаження. Цей метод не дозволяє враховувати спільну роботу конструкцій споруди та ґрунтового масиву.

Методи спільного розрахунку системи «споруда – ґрунтовий масив» за хронологією їх розвитку та сутністю можна умовно розбити на дві групи: 1) методи, що ґрунтуються на визначенні контактних напружень, які виникають на поверхні контакту конструкції та ґрунту (широко застосовувались в так званій «докомп'ютерний» період); 2) методи, що ґрунтуються на визначенні напружено-деформованого стану системи «споруда – ґрунтовий масив» (набули розповсюдження з розвитком ЕОМ та числових методів). Метод визначення напружено-деформованого стану системи «споруда – ґрунтовий масив» за допомогою ЕОМ та методу скінченних елементів (МСЕ) є найбільш перспективним. Він дозволяє отримати змістовніші та точніші результати, оскільки враховує більшу кількість факторів (зокрема, фізико-механічні властивості ґрунту, в тому числі нелінійні, врахування роботи ґрунту поза межами конструкції, вплив розташованих поблизу будівель і т. ін.)

В літературі немає жодних рекомендацій щодо вибору необхідних розмірів, форми та конфігурації скінченних елементів, застосовуваних при моделюванні системи «споруда – ґрунтовий масив». Також немає чітких вказівок щодо вибору розмірів розрахункової області ґрунтового масиву, яку слід приймати при розрахунках, та умов закріплення ґрунтового масиву (граничних умов).

На основі проведених автором статті досліджень було розроблено методичку комп'ютерного моделювання системи «споруда – ґрунтовий масив».

Методика спільного статичного розрахунку напружено-деформованого стану системи «споруда – ґрунтовий масив»

1. Основні положення.

- 1.1. Розрахунок напружено-деформованого стану системи «споруда – ґрунтовий масив» доцільно виконувати методом скінченних елементів за допомогою будь-якого програмного комплексу, призначеного для розрахунку конструкцій.
- 1.2. Розрахункова модель системи «споруда – ґрунтовий масив» повинна обиратись з урахуванням найбільш суттєвих чинників, що визначатимуть напружений стан і деформації ґрунтової основи і конструкції споруди (статичної схеми споруди, особливостей її зведення, властивостей ґрунтів основи і т. ін.).
- 1.3. В залежності від рівня розв'язуваної задачі, поставленої при цьому мети та необхідності отримати результати з більшою точністю при розробці розрахункової моделі рекомендується враховувати просторову роботу конструкції, фізичну нелінійність залізобетону і ґрунту і т. ін.
- 1.4. Розрахунки системи «споруда – ґрунтовий масив» повинні виконуватись за I та II групами граничних станів на весь період будівництва та експлуатації об'єктів [2, 3].

2. Навантаження та впливи

- 2.1. Навантаження і впливи, що мають бути враховані при розрахунку конструкцій, що взаємодіють з ґрунтом, коефіцієнти надійності, а також можливі сполучення навантажень слід призначати згідно з вказівками ДБН В.1.2-2:2006 [4] (окрім пунктів, що стосуються визначення тиску ґрунтів).
- 2.2. Розрахунок системи «споруда – ґрунтовий масив» за I групою граничних станів слід виконувати на дію основних сполучень навантажень, що включають в себе граничні розрахункові значення навантажень.
- 2.3. Розрахунок системи «споруда – ґрунтовий масив» за II групою граничних станів слід виконувати на дію основних сполучень навантажень, що включають в себе експлуатаційні розрахункові значення навантажень.

3. Характеристики матеріалів

- 3.1. При розрахунку системи «споруда – ґрунтовий масив» за I групою граничних станів слід використовувати характеристики конструкційних матеріалів і ґрунтів для I групи граничних станів.
- 3.2. При розрахунку системи «споруда – ґрунтовий масив» за II групою граничних станів слід використовувати характеристики конструкційних матеріалів і ґрунтів для II групи граничних станів.
- 3.3. Основними параметрами фізико-механічних властивостей ґрунтів є:

- ρ - питома вага;
 φ - кут внутрішнього тертя;
 c - питоме зчеплення;
 E - модуль деформації;
 ν - коефіцієнт Пуассона.
- 3.4. Характеристики ґрунтів повинні визначатись або на основі даних випробувань, або за табл. 1-3 СНиП 2.02.01-83 (додаток 1) [1] з урахуванням вимог п. 2.16 СНиП 2.02.01-83 [1].
 - 3.5. Характеристики конструкційних матеріалів слід визначати згідно з вимогами відповідних нормативних документів. Так, характеристики бетону для бетонних і залізобетонних конструкцій слід визначати за СНиП 2.03.01-84* [5]. Характеристики арматури для залізобетонних конструкцій слід визначати згідно з ДСТУ 3760:2006 [4].
 - 3.6. Значення коефіцієнта Пуассона ν слід приймати для бетону – 0,2; для ґрунту: крупноуламкового – 0,27; піщаного та супіщаного – 0,30; суглинку – 0,35; глини – 0,42.
 - 3.7. При розрахунку повинні враховуватись можливі погіршення характеристик матеріалів під час будівництва та в період експлуатації.

4. Статичний розрахунок системи «споруда – ґрунтовий масив»

- 4.1. Розрахунок системи «споруда – ґрунтовий масив» має виконуватись за двома групами граничних станів:
 - за граничним станом I групи (за міцністю і стійкістю);
 - за граничним станом II групи (за моментом появи та ширини розкриття тріщин в бетонних та залізобетонних конструкціях, а також за деформаціями).
- 4.2. При розрахунку системи «споруда – ґрунтовий масив» за граничними станами I групи визначаються:
 - внутрішні зусилля та напруження в конструкціях споруди та в ґрунтовому масиві;
 - стійкість окремих елементів і всієї споруди в цілому;
 - достатність прийнятих перерізів елементів за міцністю.
- 4.3. При розрахунку системи «споруда – ґрунтовий масив» за граничними станами II групи визначаються:
 - деформації окремих елементів і всієї споруди;
 - достатність прийнятих перерізів елементів за тріщиностійкістю.
- 4.4. Статичний розрахунок системи «споруда – ґрунтовий масив» рекомендується виконувати методом скінченних елементів. При цьому слід враховувати історію навантаження.
- 4.5. Для будівель, розташованих на зсувонебезпечних територіях, обов'язково слід виконувати перевірку стійкості ґрунтового масиву. Для цього в залежності від типу ґрунтових умов слід застосовувати такі відомі методики: метод відсіків, розроблений шведським вченим В. Фелленіусом; метод «круглоциліндричних поверхонь сковзання», який представляє собою шведський метод відсіків в інтерпретації

К. Терцагі; метод «рівномічного укусу F_p » Н.Н. Маслова; метод «притулених укосів» Г.М. Шахунянца; метод «горизонтальних сил» Маслова-Берера; метод «похилих сил» Чугуєва; метод «визначення зсувного тиску» Петрової-Ясюнас та інші [6, 7, 8, 9]. При застосуванні цих методик в якості навантажень слід прийняти взяті з протилежним знаком реактивні зусилля на контакті «споруда – ґрунтовий масив», встановлені під час виконання розрахунку напружено-деформованого стану надфундаментної конструкції.

5. Створення скінченноелементної моделі системи «споруда – ґрунтовий масив»

- 5.1. При створенні розрахункової моделі системи «споруда – ґрунтовий масив» необхідно призначити такі ознаки розрахункових схем:
- при розв’язанні плоскої задачі – схема, розташована в площині XOZ; кожен вузол має 3 степеня вільності – лінійні переміщення вздовж осей X, Z і поворот відносно осі Y;
 - при розв’язанні просторової задачі – просторова схема загального типу з 6 степенями вільності у вузлі.

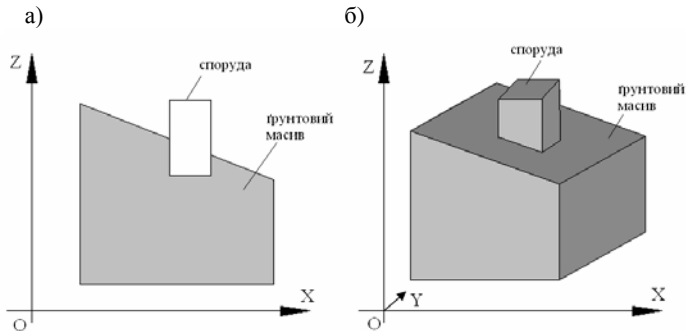


Рис. 1. Розміщення розрахункової моделі в системі координат:

а) плоска задача; б) просторова задача

- 5.2. Моделювання системи «споруда – ґрунтовий масив» полягає у моделюванні ґрунтового масиву, розташованого на ньому споруди та умов контакту між конструкціями споруди та ґрунтовым масивом.
- 5.3. Розміри розрахункової області ґрунтового масиву в плані та по глибині повинні призначатись за таким принципом:
- на першому етапі розрахунку слід призначити розмір області основи в плані та по глибині таким, що дорівнює розміру споруди, обчислити напруження та переміщення;

- на другому етапі розрахунку призначити розмір області основи в плані та по глибині вдвічі більшим, ніж на попередньому етапі; обчислити напруження та переміщення;
- порівняти результати з отриманими на попередньому етапі;
- якщо різниця складатиме більше 5%, призначити розмір області основи ще вдвічі більшим;
- на кожному етапі збільшувати вдвічі розміри розрахункової області доти, доки різниця в результатах не буде перевищувати 5%.

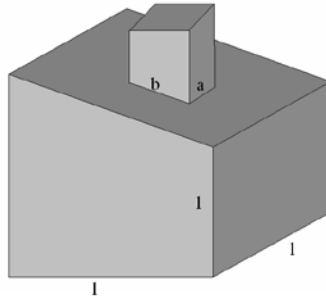


Рис. 2. Призначення розмірів розрахункової області

- 5.4. Для моделювання ґрунтового масиву при розв'язанні плоскої задачі слід використовувати пластинчасті трикутні та прямокутні скінченні елементи балки-стілки (рис. 3). Кожен з вузлів цих скінченних елементів має 2 степеня вільності – переміщення вздовж осей X , Z .

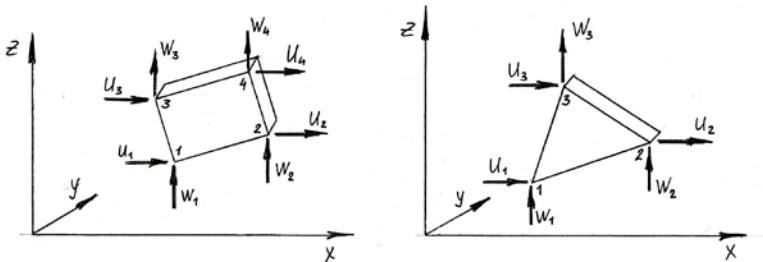


Рис. 3. Пластинчасті прямокутні та трикутні скінченні елементи балки-стілки

- 5.5. Для моделювання ґрунтового масиву при розв'язанні просторової задачі слід застосовувати скінченні елементи у формі тетраедра, паралелепіпеда або прямої трикутної призми, які мають по 3 степеня вільності в кожному вузлі – лінійні переміщення вздовж осей X , Y , Z (рис. 4).

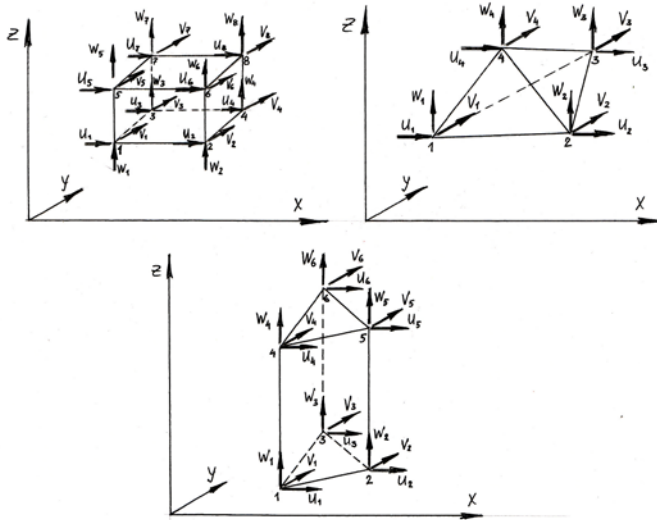


Рис. 4. Просторові скінченні елементи

5.6. Для моделювання конструкцій споруди, що взаємодіє з ґрунтовим масивом, в умовах плоскої задачі слід використовувати стрижневі скінченні елементи плоскої рами (рис. 5), які розташовані в площині XOZ і мають по 3 степеня вільності в кожному вузлі – лінійні переміщення вздовж осей X, Z і поворот відносно осі Y.

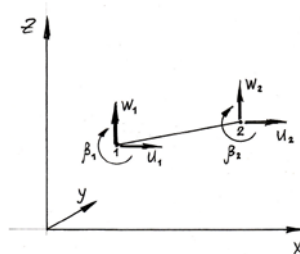


Рис. 5. Стрижневий елемент плоскої рами

5.7. Для моделювання конструкцій споруди, що взаємодіє з ґрунтовим масивом, в умовах просторової задачі слід використовувати:

- універсальні стрижневі скінченні елементи (рис. 6), які розташовані довільно відносно системи координат і мають по 6 степенів вільності у кожному вузлі – лінійні переміщення вздовж осей X, Y, Z і повороти відносно осей X, Y, Z;

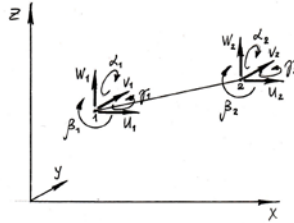


Рис. 6. Універсальний стрижневий скінченний елемент

- універсальні прямокутні та трикутні скінченні елементи оболонки (рис. 7), які розташовані довільно відносно системи координат і мають по 6 степенів вільності у кожному вузлі – лінійні переміщення вздовж осей X, Y, Z і повороти відносно осей X, Y, Z.

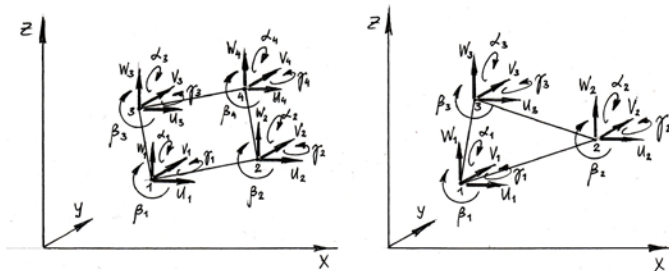
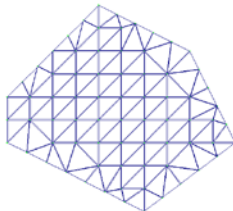


Рис. 7. Універсальні прямокутні та трикутні скінченні елементи

- 5.8. При моделюванні залізобетонних конструкцій можуть застосовуватись фізично нелінійні скінченні елементи стрижнів та оболонок, які враховують нелінійну залежність $\sigma - \varepsilon$ для бетону, його тріщиноутворення, характер та процент армування, властивості арматурної сталі. Розрахунок в нелінійній постановці дозволяє отримати більш точні результати, ніж лінійний розрахунок.
- 5.9. Побудова сітки зі скінченних елементів може бути виконана двома методами: побудова довільної сітки та побудова впорядкованої сітки (рис. 8).

а)



б)

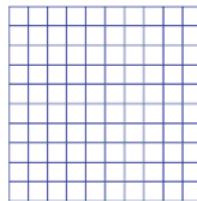


Рис. 8. Сітки скінченних елементів: а) довільна; б) впорядкована

- 5.10. Впорядкована сітка будується шляхом завдання кроку та розміру скінченних елементів у двох (при плоскій задачі), або у трьох (при просторовій задачі) напрямках.
- 5.11. Довільна сітка створюється автоматично. Для цього будь-який програмний комплекс має режим автоматичної триангуляції двовимірних або тривимірних масивів конструкцій з інтенсивним розрідженням у напрямку до меж ґрунтового масиву.
- 5.12. Розмір скінченних елементів слід призначати за таким принципом:
- призначити на першому етапі розрахунку певний розмір скінченних елементів; обчислити напруження та переміщення;
 - призначити на другому етапі розрахунку розмір скінченних елементів вдвічі меншим, ніж на попередньому етапі; обчислити напруження та переміщення;
 - порівняти результати з отриманими на попередньому етапі;
 - якщо різниця складатиме більше 5%, призначити розмір скінченних елементів ще вдвічі меншим;
 - на кожному етапі зменшувати вдвічі розміри скінченних елементів доки різниця в результатах не буде перевищувати 5%.
- 5.13. При застосуванні прямокутних скінченних елементів дозволяється співвідношення сторін 1:20, 1:10, 1:5, 1:2, 1:1. Розходження результатів у порівнянні з точним розв'язком при цьому не перевищуватиме 10 %, якщо розмір більшої сторони прямокутних скінченних елементів змінюється в діапазоні $\left(\frac{1}{20} \dots \frac{1}{40}\right)l$, l - розмір розрахункової області.
- 5.14. При застосуванні скінченних елементів у формі неправильних чотирикутників слід уникати таких, гострі кути яких дорівнюють 0 - 30°, а тупі відповідно 150 - 180°.
- 5.15. Трикутні скінченні елементи краще взагалі не застосовувати, а при застосуванні також слід уникати таких, в яких розміри кутів 150 - 180°.
- 5.16. Розбиття стрижневого елемента на окремі скінченні елементи виконується згідно з вимогами посібників з моделювання в певному програмному комплексі.
- 5.17. Граничні умови при моделюванні системи «споруда – ґрунтовий масив» задаються безпосередньо на вузлах.
- 5.18. При розв'язанні плоскої задачі необхідно призначити такі граничні умови:
- вузли вертикальних граней фрагменту ґрунтового масиву, паралельні осі Z – закріплені від лінійних переміщень вздовж осі X;
 - вузли горизонтальної нижньої грані фрагмента ґрунтового масиву, паралельні осі X – закріплені від лінійних переміщень вздовж осей X, Z (див. рис. 1).
- 5.19. При розв'язанні просторової задачі необхідно призначити такі граничні умови:
- вузли вертикальних граней фрагменту ґрунтового масиву, паралельні площині XOZ – закріплені від лінійних переміщень вздовж осі Y;

- вузли вертикальних граней фрагменту ґрунтового масиву, паралельні площині YOZ – закріплені від лінійних переміщень вздовж осі X;
 - вузли горизонтальної нижньої грані фрагмента ґрунтового масиву, паралельні площині XOY – закріплені від лінійних переміщень вздовж осей X, Y, Z (див. рис. 1).
- 5.20. Статичні навантаження та впливи на елементи конструкції призначаються у вигляді зосереджених та розподілених сил та моментів як у вузлі схеми (вузлове навантаження), так і на елементи (місцеве навантаження).
- 5.21. Дія одного навантаження або групи навантажень може бути проголошена як окреме завантаження.

Висновки

1. На основі проведених автором статті досліджень розроблена методика спільного статичного розрахунку системи «споруда – ґрунтовий масив» для будівель, розташованих на схилах. Основними відмінностями запропонованої методики є чітка регламентація геометрії та розмірів скінченних елементів, розмірів розрахункової області в плані та по глибині, граничних умов.
2. Згідно з методикою при розбитті конструкції або ґрунтового масиву на пластинчасті скінченні елементи краще застосовувати квадратні та прямокутні скінченні елементи, слід уникати застосування чотирикутних та трикутних скінченних елементів з розмірами кутів 150 - 180° («голчасті» форми), при цьому трикутні елементи краще взагалі не застосовувати. В залежності від необхідної точності розрахунку розмір сторони пластинчастого скінченного елемента повинен дорівнювати $\left(\frac{1}{20} \dots \frac{1}{40}\right)l$, де l - розмір розрахункової області, що розбивається на скінченні елементи.
3. Розміри розрахункової області ґрунтового масиву в плані та по глибині рекомендується призначати рівними 8 найбільшим розмірам зони контакту конструкції та ґрунту.
4. При правильно обраних розмірах розрахункової області основи умови закріплення ґрунтового масиву значно не впливають на результати розрахунку.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. СНиП 2.02.01-83. Основания зданий и сооружений / Госстрой СССР. – М., 1985. – 41 с.
2. ДБН В.1.1-3-97. Захист від небезпечних геологічних процесів. Інженерний захист територій, будинків і споруд від зсувів та обвалів.

- Основні положення. – Вводяться вперше; Введ. 01.07.97. – К.: Держбуд України, 1998. – 40 с.
3. СНиП 2.01.15-90. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения проектирования / Госстрой СССР. – М.: Арендное производственное предприятие ЦИТП, 1991. – 32 с.
 4. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. – На заміну СНиП 2.01.07-85, крім розділу 10; Введ. з 1.01.2007. – К.: Мінбуд України, 2006. – 59 с.
 5. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
 6. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов. – М.: Недра, 1972. – 312 с
 7. Федоров И.В. Методы расчета устойчивости склонов и откосов. – М.: Госстройиздат, 1962. – 204 с.
 8. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними). Учеб. пособие для вузов. – М.: Стройиздат, 1977. – 320 с.
 9. Костомаров В.М. Противооползневые мероприятия в городах. – М.:Стройиздат, 1967. – 112 с.

УДК [624.04:624.131.5]:004.94

Методика спільного статичного розрахунку системи «споруда – ґрунтовий масив» для будівель, розташованих на схилах / Гуслиста Г.Е. // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. Вып. № . – Дн-вск, ПГАСА, 2010. – С. табл. – рис. – Библиогр.: (9 назв.)

Викладені основні положення методики спільного статичного розрахунку напружено-деформованого стану системи «споруда – ґрунтовий масив» будівель та споруд, розташованих на схилах. Перевагою даної методики є те, що вона дозволяє отримати змістовніші та точніші результати, оскільки враховує більшу кількість факторів (зокрема, фізико-механічні властивості ґрунту, в тому числі нелінійні, врахування роботи ґрунту поза межами конструкції, вплив розташованих поблизу будівель і т. ін.).