

Про моделювання заглиблених споруд поблизу існуючих будівель з використанням методу скінченних елементів

Максим Хоронжевський, аспірант¹ (ORCID: 0000-0001-5797-7304)

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, 03037, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Україна

АНОТАЦІЯ

В роботі розглянуто поширені питання що виникають при числовому моделюванні системи «заглиблена споруда-існуюча будівля». Досліджено вплив розмірів розрахункової області на напружено-деформований стан конструкцій огороження котловану та суміжного будинку. Звертається увага на важливість правильного визначення та моделювання контактної взаємодії заглиблених конструкцій та оточуючого ґрунтового середовища, досліджено вплив зміни коефіцієнту R_{inter} на горизонтальні переміщення підпірної стіни та додаткові осідання існуючої будівлі.

Ключові слова: метод скінченних елементів, ґрунтова модель, існуюча будівля, заглиблена споруда, інтерфейс, числове моделювання, розрахункова область.

1. ВСТУП

Стрімкий розвиток автоматизованого проектування засвідчив, що в сьогоденні майже неможливо обійтись без спеціальних розрахункових комплексів, якщо мова йде про складні геотехнічні задачі, які включають в себе велику кількість змінних параметрів. Одним з найпоширеніших методів розрахунку є метод скінченних елементів, в основі якого лежить розв'язок диференціальних рівнянь, що описують фізичні явища, шляхом дискретизації неперервної розв'язуваної області на прості скінченні елементи, в межах яких шукані функції апроксимуються за допомогою простих поліномів. Застосування даного методу в числовому моделюванні дало можливість інженерам вирішувати різного роду задачі, для яких воно вже стало повсякденним інструментом, однак поряд з його використанням виникає ряд питань, неправильні відповіді на які, можуть призвести до отримання некоректних результатів.

2. МЕТА РОБОТИ

В роботі обговорено та виконано аналіз деяких з найбільш поширених проблем, що виникають при моделюванні заглиблених споруд і їх котлованів поряд з існуючими будівлями та розрахунку напружено-деформованого стану.

3. ОСНОВНА ЧАСТИНА

Визначення розмірів розрахункової області. На сьогоднішній день, для розрахунків деформацій основи поряд з аналітичними методами все частіше застосовують числове моделювання з використанням методу скінченних елементів. При цьому, найбільш популярною моделлю ґрунтового середовища серед інженерів-проектувальників і досі залишається пружно-пластична модель Мора-Кулона (Mohr-Coulomb), завдяки свої простоті та невеликій кількості вхідних параметрів, що завжди можна знайти в звітах про інженерно-геологічні вишукування. Проте її недоліком є те що вона дає змогу описати тільки пружну або лінійно-деформовану поведінку та не враховує зміну жорсткості від рівня напружень, тому при використанні даної моделі для розрахунку осідань постає необхідність у

штучному обмеженні нижньої межі розрахункової області глибиною стисливої зони, аналогічно інженерним розрахункам (метод пошарового підсумування) [1, 2].

Однак, якщо постає задача розрахунку НДС системи «заглиблена споруда - існуюча будівля», то такий підхід є неможливим, оскільки нерідко котлован та його конструкції огороження знаходяться значно глибше за межу стисливої зони будівлі, крім того виникає необхідність у використанні більш складних моделей ґрунтового середовища для опису коректної поведінки ґрунту при екскавації. Великої популярності набула удосконалена пружнопластична модель зі зміцненням ґрунту (Hardening Soil Model) що враховує зміну деформаційних характеристик в залежності від рівня напружень в ґрунтовому масиві та дозволяє описати відмінну поведінку ґрунту при завантаженні і розвантаженні, використовуючи три різні модулі деформації: E_{50} , E_{ur} , E_{oed} та показник ступеня жорсткості ґрунту – m . Слід зауважити, що визначення вхідних параметрів для даної моделі є нетривіальною задачею та потребує не тільки компресійних та тривісних випробувань, а й компетентності інженера-геотехніка.

Що стосується розмірів в плані, то з загальноприйнятої практики бічні грані моделі розташовують на відстані, на якій вплив граничних умов буде відсутній, або настільки незначний, що ним можна знехтувати, при цьому слід враховувати, що зі збільшенням кількості скінченних елементів, час розрахунку може збільшуватись кратно.

Для аналізу впливу розмірів розрахункової області на НДС існуючої будівлі та конструкції огороження котловану виконано розрахунки тестових задач в Plaxis 3D при варіюванні глибини нижньої межі моделі. Існуюча будівля розташована на відстані 2м від котловану на фундаментах неглибокого закладання: глибина закладання, $d=1.5$ м, тиск під подошвою – 200кПа, глибина стисливої зони – 5.6м. Котлован глибиною 6м огорожений підпірною стіною з паль діаметром $\varnothing 620$ мм, довжиною 17м. Основа є однорідною, складена дрібними пісками з відповідними фізико-механічними характеристиками: $\gamma=19,2$ кН/м³; $c=0,7$ кПа; $\varphi=30$ град; $E=27$ МПа; $\nu=0,3$. Для порівняння виконано розрахунки з використанням двох ґрунтових моделей MC та HSM з однаковими параметрами ґрунтів та з урахуванням рекомендацій Plaxis. Розташування нижньої межі СЕМ прийнято у співвідношенні до глибини підпірної стіни $H_{FEM}/H_{RW} = [1.5; 2; 2,5; 3 \text{ } 3,5]$. З наведеного графіка (рис.1) видно, що при використанні моделі Кулона-Мора

отримано досить значне підняття дна котловану до 80 мм, спричинене екскавацією ґрунту та, власне, недоліком даної моделі, яка використовує єдиний модуль деформацій як при навантаженні так і при розвантаженні, при чому при збільшенні розмірів моделі по глибині, переміщення зростають. Що стосується додаткових деформацій існуючої будівлі, то такий же ефект спостерігається і для фундаменту на ділянці яка розташована поблизу котловану, при цьому для моделі HSM різниця у вертикальних переміщеннях фундаменту при різних розмірах СЕМ не перевищує 4%.

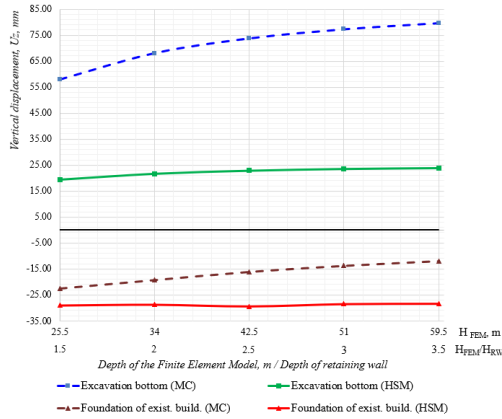


Рисунок 1. Залежність додаткових осідань фундаменту існуючої будівлі та вертикальних переміщень дна котловану від глибини СЕМ

Контактна взаємодія конструкцій підпірної стіни з ґрунтом (Інтерфейси, R_{inter}). Взаємодію різних матеріалів таких як ґрунт та конструкції моделюють за допомогою інтерфейсних елементів «нульової товщини» між ґрунтом та структурними компонентами, що враховують зменшення сил тертя та зчеплення за допомогою коефіцієнта зменшення міцності/жорсткості R_{inter} , який встановлює залежність між міцністю інтерфейса та міцністю оточуючого ґрунту наступним чином:

$$c_{inter} = R_{inter} c_{soil} \quad (1)$$

$$\varphi_{inter} = \tan^{-1}(R_{inter} \tan \varphi_{soil}) \quad (2)$$

Значення R_{inter} залежить від технології влаштування конструкцій, наприклад, при виконанні підпірних стін з бурин'єкційних палів без використання обсадних труб поверхня ґрунту буде нерівною, за рахунок цього дотичні напруження будуть передаватися з ґрунту на палі в більшій мірі ніж, наприклад, у випадку використання тиксотропних розчинів. Brinkgreve і Shen пропонують наступні величини коефіцієнтів R_{inter} :

Таблиця 1: R_{inter} на контактні ґрунт-матеріал

глина - метал	пісок - метал	глина - бетон	пісок - бетон	ґрунт - геотекстиль	ґрунт - георешітка
≈ 0.5	≈ 0.6 - 0.7	≈ 0.7 - 1.0	≈ 0.8 - 1.0	≈ 0.5-0.9	≈ 1.0

Так, на основі лабораторних дослідів взаємодії різних матеріалів з ґрунтом Potyondy J.G., залежно від вологості ґрунту запропонував значення в таких діапазонах [3]:

- контакт пісок/бетон $\varphi_{inter} = 0,76 - 0,9$;
- контакт глина/бетон $\varphi_{inter} = 0,68 - 0,95$; $c_{inter} = 0,4 - 0,6$;

- контакт зв'язний ґрунт (50% пісок + 50% глина)/бетон $\varphi_{inter} = 0,84 - 0,95$; $c_{inter} = 0,42 - 0,8$;
- контакт мул/бетон $\varphi_{inter} = 0,5 - 1,0$.

Дослідження оцінки впливу значень інтерфейсів R_{inter} на НДС підпірної стіни та існуючої будівлі виконано також і для глинистого ґрунту, що має набір ідентичних піщаному фізико-механічних характеристик, за винятком $c=38$ кПа, $\varphi=16$ град, $\nu=0,37$. З графіка (рис. 2) бачимо, що зі зменшенням зчеплення між поверхню стіни та ґрунтом спостерігається переважно лінійне зростання горизонтальних переміщень підпірної стіни та додаткових осідань існуючої споруди на ділянці $R_{inter}=1.0 \rightarrow 0.7$, однак для глинистих ґрунтів, на ділянці $R_{inter}=0.7 \rightarrow 0.6$ відбувається експоненційний приріст переміщень до 24%.

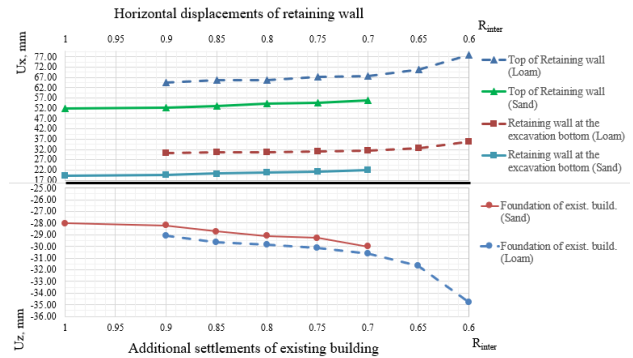


Рисунок 2. Залежність додаткових осідань фундаменту існуючої будівлі та горизонтальних переміщень підпірної стіни від R_{inter}

4. ВИСНОВКИ

Визначено, що зі збільшенням розмірів числової моделі по осі Z, у випадку моделі MC спостерігається пропорційний приріст значень вертикальних переміщень дна котловану до 38% та фундаменту існуючої будівлі до 81%, абсолютні значення яких, суттєво різняться з моделлю HSM. При використанні моделі зміцнюваного ґрунту вплив даного фактору теж присутній, але є менш визначальним.

Показано, що використання неправильних значень R_{inter} для опису контактної взаємодії у моделюванні може призвести до хибної оцінки НДС основи та конструкцій.

Список літератури

[1] Городецький А.С., Євзеров І.Д. Комп'ютерні моделі конструкцій - К: видавництво «Факт», 2005. – 344с.
 [2] Солодей І.І., Петренко Е.Ю., Затилук Г.А. Особливості створення розрахункових моделей при дослідженні напружено-деформованого стану підземних споруд // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2019. – Вип. 102. – С. 139 – 149.
 [3] Potyondy, J. G., (1961). Skin Friction between Various Soils and Construction Materials. Geotechnique, Vol. 11, No. 4, pp. 339-353.

Робота виконана під керівництвом к.т.н., доц. Л.Бондаревої