

© Н.В. Зуєвська¹, Л.В. Шайдецька¹, В.Є. Губашова², М. Алталабані¹

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

² ТОВ СП «Основа-Солсиф», Київ, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ГЕОТЕХНІЧНИХ СПОРУД ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУЖЕНО ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МАСИВІВ

© N. Zuievskaya¹, L. Shaidetska¹, V. Gubashova², M. Altalabani¹

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

² LLC JV Osнова-Solsif, Kyiv, Ukraine

OPTIMIZATION OF GEOTECHNICAL BUILDING PARAMETERS FOR STABILIZATION OF STRESS-STRAIN STATE OF SOIL MASS

Мета. Встановлення ефективних параметрів огороджуючи конструкцій глибоких котлованів та методів додаткового кріплення цих конструкцій в умовах щільної міської забудови.

Методика дослідження полягає у вирішенні проблеми сумісної роботи системи «кріплення-оточуючий масив», проведено числове моделювання методом скінчених елементів (МСЕ), за результатами розрахунків визначені коефіцієнти стійкості ґрунтового масиву при зміні параметрів заглиблення конструкції огородження.

Результати дослідження. Встановлені коефіцієнти стійкості ґрунтового масиву з елементами кріплення котлованів від навантажень, які створює оточуючий масив при варіантах кріплення відкосів з застосуванням огородження, що виконано за допомогою спеціального способу «стіна в ґрунті», та закріплення їх стін додатковими елементами кріплення у вигляді ґрунтоцементних анкерів.

Наукова новизна. Скорочення витрат на спорудження «стіни в ґрунті» за рахунок зменшення заглибленої частини залізобетонної конструкції і застосування ґрунтових анкерів забезпечується шляхом використання двох сучасних геотехнічних прикладних пакетів комп'ютерного моделювання, які дозволяють мінімізувати витрати за рахунок оптимізації технологічних процесів. Необхідно відмітити, що програми Plaxis та Slide використовуються для моделювання та розрахунку різними методами. Plaxis оснований на методі кінцевих елементів, Slide використовує метод граничних рівноваг. Поєднання цих двох пакетів для аналізу зміни коефіцієнту стійкості зручно з метою підтвердження методом моделювання необхідної довжини конструкції огородження глибоких виїмок.

Практичне значення. Запропоновані варіанти розрахунку огородження котлованів чисельним методом скінчених елементів, що дозволяє отримати повну картину зміни напружено-деформованого стану конструкції «кріплення-масив» та їх сумісної роботи в найбільш короткі терміни та з максимальним відображенням реальних умов. Набули подальшого розвитку методики моделювання складних геотехнічних об'єктів з виконанням розширеного аналізу методом кінцевих елементів або граничної рівноваги деформації і стійкості ґрунту.

Ключові слова: напружено деформований стан, метод скінчених елементів, «стіна в ґрунті», ґрунтоцементні анкери.

Вступ. У практиці будівництва та експлуатації будівель і споруд відомі випадки втрати стійкості основ і масивів ґрунтів, що супроводжуються руйнуванням конструкцій, які взаємодіють із ними. Це є результатом виникнення і розвитком у ґрунті зон, у яких його міцність виявляється вичерпаною.

Для рішення цього завдання можна використати підхід «граничного аналізу», який розглядає напружений стану укосу в граничному стані.

Граничний аналіз проводиться методами теорії граничного напруженого стану (граничної рівноваги), розрізняючись лише відносно міри гіпотез або спрощень, що приймаються. Для реалізації граничного аналізу застосовують декілька методів, а саме методи, які засновані на спрощених розрахункових схемах із прийняттям плоских поверхонь (площин) ковзання; методи, що розглядають можливість руйнування укосів із зміщенням ґрунту по деяких криволінійних поверхнях ковзання (метод відсіків), (варіаційні методи); методи, засновані на розв'язанні системи рівнянь теорії граничної рівноваги з побудовою сітки ліній ковзання в масиві ґрунту, що утворює укіс.

Під час проектування котлованів в умовах щільної забудови слід передбачати заходи захисту існуючих споруд шляхом:

- улаштування огорожувальних конструкцій котловану як стін зі шпунту, бурових паль чи «стіни в ґрунті»;

- виконання захисного екрана із паль вдавлюваних або бурових малого діаметра – при влаштуванні котлованів у рівні закладання підосви існуючих фундаментів;

- зменшення впливу нового будівництва на існуючу забудову, вибір яких здійснюється за результатами розрахунків додаткових осідань і деформацій при влаштуванні котлованів, заглиблених нижче підосви існуючих фундаментів.

Для кріплення стінок котловану використовують наступні технології: забивні та бурові палі, «стіна в ґрунті», струменева цементация, армування ґрунту та інші. Доцільність застосування тієї або іншої технології залежить від містобудівних, інженерно-геологічних, технологічних та інших умов будівельного майданчику.

Актуальність дослідження. Проектування підпірних стін огороження котлованів є важливою складовою у комплексі робіт з науково-технічного супроводу будівництва у складних геотехнічних умовах.

Оптимізація параметрів огорожувальних геотехнічних споруд передбачає досягнення максимально стабільного напружено деформованого стану масиву (максимально стабільного) при мінімізації витрат. Критерій оптимальності - економічний, а саме, скорочення витрат на будівництва стабілізуючих геотехнічних споруд. Варіюючи параметрами геотехнічних споруд, а саме їх геометричними розмірами і рівнем технологічної складності, за умови забезпечення необхідної стабільності масиву, впливаємо на процес ресурсозбереження та економічної доцільності. Використання сучасного програмного забезпечення для геотехнічного аналізу PLAXIS з проведенням перевірочних розрахунків в програмному комплексі Slide суттєво дозволить скоротити витрати часу на проектування, можуть виконуватися розрахунки із застосуванням класичних методів з швидкою і надійною оптимізацією кругових

і полігональних поверхонь ковзання, з мінімізацією кількості анкерів та точним визначенням їх довжини.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Для вирішення поставленої задачі по мінімізації переміщень «стіни в ґрунті» був використаний розрахунковий геотехнічний комплекс Plaxis, а перевірочні розрахунки стійкості конструкції огороження були проведені з використанням програмного комплексу Slide.

Для обох програм при моделюванні ґрунтового середовища була обрана модель Мора-Кулона.

Модель Мора-Кулона (Mohr-Coulomb Model) – проста пружно-пластична модель. Пружно-пластичні моделі відрізняються своїм описом пружної та пластичної поведінки матеріалу. Розглядаючи одновимірний випадок, нехай f позначає напруження текучості, при якому поведінка переходить від пружної до пластичної (функція текучості): для $\sigma < f$ поведінки пружна; коли напруження стає рівним f і на матеріал далі діє навантаження, виникають пластичні деформації.

У просторі тривимірних напружень та деформацій функція текучості не може бути сформульована у вигляді простої одновимірної нерівності, оскільки задіяні тензори. У цьому випадку критерій руйнування можна сформулювати з точки зору інваріантів напруги та деформацій (або їх комбінації).

Отож, основний принцип пружно-пластичної теорії полягає в тому, що деформації і збільшення деформацій діляться на пружну і пластичну частини [1]:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (1)$$

де ε – загальна деформація, ε^e – пружна деформація, ε^p – пластична (незворотна) деформація.

Закон Гука використовується для визначення приросту пружної деформації, тобто $\Delta\varepsilon^e = \Delta\sigma/E$, де $\Delta\sigma$ - приріст напруження, E – модуль пружності.

Приріст пластичних деформацій описується залежністю:

$$d\varepsilon_{ij}^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2)$$

де λ – константа, g – пластичний потенціал, що залежить від умови міцності ґрунту. Для пружного середовища $\lambda = 0$.

Для ідеально пластичного середовища в просторі напружень є поверхня текучості f , що обмежує область пружних деформацій, для яких $f < 0$. Пластичній течії відповідають напруження, що знаходяться на поверхні текучості.

Якщо прийняти, що функція плинності і потенціал пластичності збігаються ($g = f$), то:

$$d\varepsilon^p = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma} \quad (3)$$

Це означає, що пластична течія розвивається по нормалі до поверхні текучості f .

При поданні функцій текучості у вигляді функцій головних напружень можна повністю визначити умова текучості Мора-Кулона.

Функції потенціалу пластичності за моделлю Мора–Кулона представляють у вигляді:

$$\begin{aligned} g_1 &= \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3)\sin\psi \\ g_2 &= \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1)\sin\psi \\ g_3 &= \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2)\sin\psi \end{aligned} \quad (4)$$

де ψ – кут ділатансії

Повертаючись до математичної моделі Мора-Кулона, що описує пружно-ідеальну пластичну поведінку і лінійний критерій міцності матеріалів, міцність яких на стиск істотно перевищує міцність на розтягнення. Цю модель можна називати універсальною, тому що вона лежить в основі багатьох модифікацій різних моделей, що описують поведінку і міцність цілого ряду матеріалів: ґрунтових і скельних порід, бетонів, композитних матеріалів і ін [2].

Модель відображає лінійний характер руйнування і складається з двох компонент міцності: c – питома зчеплення і φ – кут внутрішнього тертя і описує залежність дотичних напружень (міцності на зрушення) від діючих нормальних напружень. У загальному вигляді дана модель представлена у вигляді нахилу лінії руйнування до осі напружень (абсциси) σ під кутом φ :

$$\tau = \sigma \tan\varphi + c \quad (5)$$

Функція Мора-Кулона $\tau_m = f(\sigma_m)$, що враховує зростання середньої міцності зрушення $\tau_m = (\sigma_I - \sigma_{III})/2$ при збільшенні нормальних середніх напружень $\sigma_m = (\sigma_I + \sigma_{III})/2$, знаходить підтвердження при експериментальних випробуваннях скельних порід і дисперсних ґрунтів. Графічна інтерпретація критерію міцності Кулона-Мора в головних напружених дає наступну форму записи:

$$(\sigma_I - \sigma_{III}) = (\sigma_I + \sigma_{III})\sin\varphi + 2c \cdot \cos\varphi \quad (6)$$

Модель Мора-Кулона включає в себе п'ять вхідних параметрів: модуль Юнга (E), коефіцієнт Пуассона (ν), зчеплення (c), кут тертя (φ) і кут ділатансії (ψ).

Параметри E та ν контролюють пружну поведінку матеріалу згідно Мора-Кулона. Для розрахунків за методом кінцевих елементів загальною практикою стало зворотне обчислення ν з виразу коефіцієнта ґрунтового тиску в спокої:

$$K_0 = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (7)$$

Згідно формули Джеккі:

$$K_0 \approx 1 - \sin\varphi \quad (8)$$

ν може бути виражена чере кут внутрішнього тертя:

$$\nu \approx \frac{1 - \sin\varphi}{2 - \sin\varphi} \quad (9)$$

Згідно теорії пружності жорсткості E_{oed} та E зв'язані виразом:

$$E = \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} E_{oed} \quad (10)$$

Для визначення зусиль і переміщень в елементах «стіни у ґрунті» необхідно проводити розрахунки системи «підпірна стіна – споруда – ґрунт». Стіна моделюється як конструкція, що взаємодіє з пружнопластичною основою. Розрахунок проводиться числовими методами. Особливість розрахунку полягає у тому, що на першому етапі до початку розроблення котловану у стіні не змінюється напружено-деформований стан, у подальшому слід визначати найбільш несприятливі впливи на різних етапах зведення «стіни у ґрунті» і виймання ґрунту.

Основним вирішуючим фактором стійкості конструкції огороження глибоких виїмок є достатнє її заглиблення. Тобто забезпечення такої довжини, коли весь активний тиск буде повністю утримуватися пасивним тиском, щоб забезпечити достатню стійкість конструкції ($K > 1,25$). При неможливості виконати достатньо глибоку конструкцію виконують утримуючі елементи – розпірки, ґрунтові анкери та ін.

Аналізуючи прямі витрати при будівництві «стіни в ґрунті» на станції метрополітену «Либідська» (рис.1) можна визначити як вони поділяються серед основних технологічних етапів будівництва: спорудження піонерної траншеї, спорудження залізобетонної конструкції «стіни в ґрунті», улаштування обв'язувального поясу в опалубці.

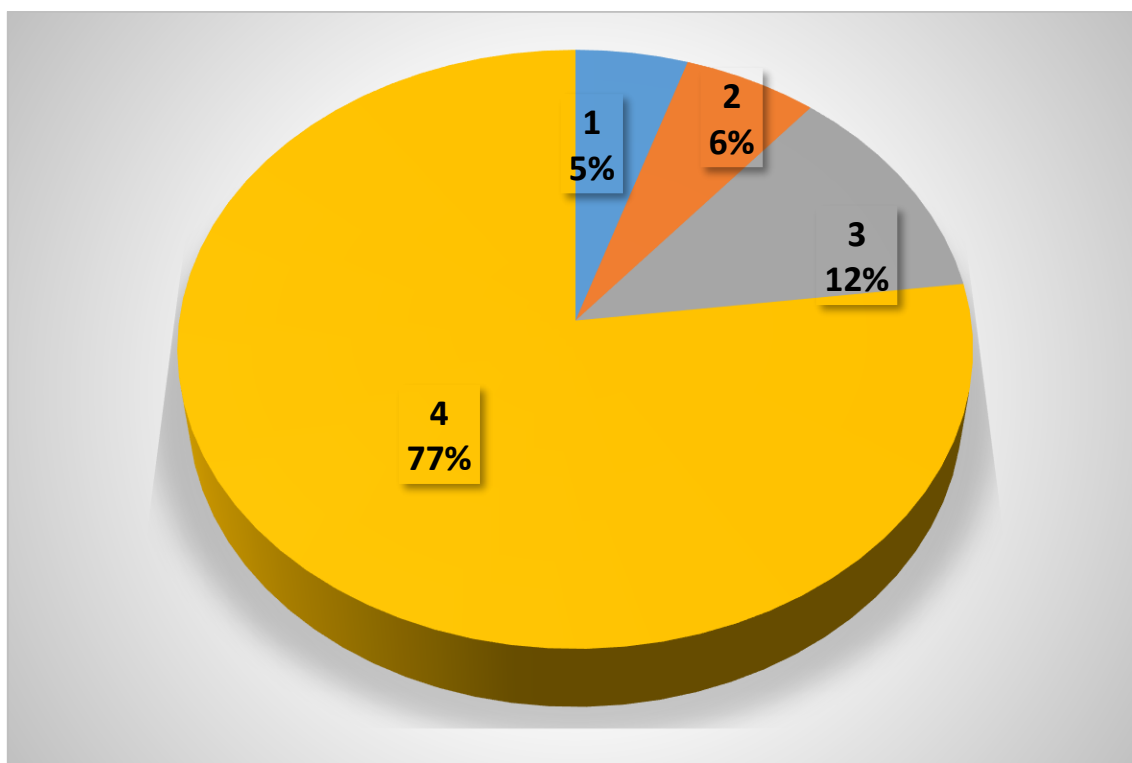


Рис. 1. Розподіл прямих витрат на основні технологічні етапи будівництва:
1 – спорудження піонерної траншеї, 2 – улаштування обв'язувального поясу в опалубці, 3 – встановлення ґрунтових анкерів, 4 – спорудження залізобетонної конструкції «стіна в ґрунті»

Виходячи з цього, найбільш доцільно мінімізувати розміри самої конструкції «стіни в ґрунті» за рахунок скорочення її заглибленої частини. Компенсувати збільшені зрушення можна за рахунок анкерного кріплення.

Можна також зауважити, що аналіз ефективності використання анкерного кріплення в порівнянні з розстрілами [3], проведений на основі даних спеціалізованих будівельних фірм США показав, що продуктивність праці збільшується при земляних роботах на 42,5%, зворотній засипці – 32,8%, при монтажу збірних конструкцій на 15%. У цілому при спорудженні одно склепінчастих станцій метрополітену анкерне кріплення котлованів сприяє збільшенню продуктивності праці на 11% та скорочує строки будівництва. Анкери на повинні перешкоджати подальшому міському будівництву, в тому числі і підземному [4].

Для моделювання зміни стійкості конструкції огороження глибокої виїмки в залежності від зміни її заглиблення нижче рівня виїмки була обрана наступна розрахункова схема: конструкція "стіни в ґрунті" товщиною 0,6 м, моделювання починається з проектною довжиною 12 м (заглиблення 6 м) з подальшим зменшенням заглиблення: 5, 4, 3, 2 та 1 м; один ярус ґрунтових анкерів на відмітці 2 м від поверхні ґрунту: вільна довжина 8 м, корінь 4 м; виїмка - 6 м від поверхні ґрунту.

ID	Name	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	k_x [m/day]	k_y [m/day]	ν [-]	E_{ref} [kN/m ²]	c_{re} [kN/m ²]
1	1-pesok	18.5	19.5	3.0000	3.0000	0.30	31000.0	1.8
2	2-supes	20.0	21.0	0.3000	0.3000	0.33	23000.0	12.0
3	3-pesok	18.0	19.5	3.0000	3.0000	0.30	49000.0	2.0

Рис. 2. Інженерно-геологічні характеристики ґрунтів в розрахунковій моделі Plaxis

Для порівняння результатів та підтвердження доцільності не тільки необхідної довжини заглиблення конструкції "стіни в ґрунті", але й необхідності виконання утримуючого кріплення з ґрунтових анкерів, виконаний розрахунок огороження без кріплення ґрунтовими анкерами. Після розрахунку переміщень і зусиль в конструкції огороження глибокої виїмки виконаний розрахунок стійкості. Даний алгоритм був використаний і в подальших варіантах конструкції огороження.

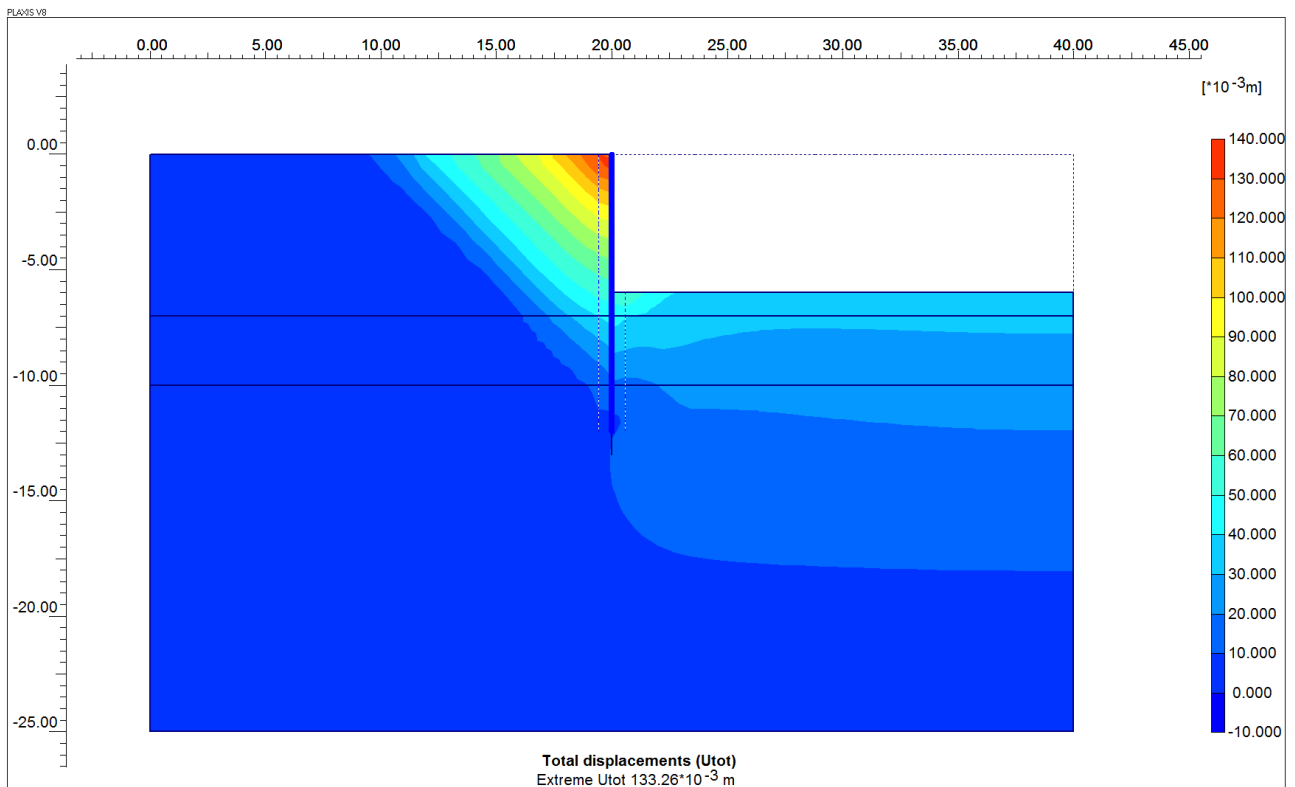


Рис. 3. Моделювання "стіни в ґрунті" (12м) без анкерного кріплення

В результаті моделювання "стіни в ґрунті" висотою – 12м без анкерного кріплення (див. рис. 3) горизонтальні переміщення становили $107,23 \cdot 10^{-2}$ м, а згинаючий момент 401,23 кН/м. При цьому стійкість конструкції огороження без анкерного кріплення складала – коефіцієнт стійкості $K=0,93$, тобто огороження котловану знаходиться не тільки в нестійкому стані, але і відбуваються значні переміщення.

Виконання одного ярусу тимчасових ґрунтових анкерів з канатною тягою (вільна довжина 8 м, корінь 4 м) з кроком 1,5 м значно змінюють результати моделювання та поведінку конструкції огороження (рис. 4). Переміщення "стіни в ґрунті" зменшуються до 1,3 см, коефіцієнт стійкості збільшується до $K=1,5$. Аналізуючи результати можна сказати, що обрана схема огороження глибокої виїмки знаходиться в стійкому стані, але і деформації конструкції огороження, що виникають при виїмці ґрунту не будуть мати значного впливу на існуючі будівлі, які знаходять в безпосередній близькості до котловану.

При зменшенні заглиблення конструкції до 3-х метрів розрахунок не дійшов до кінця – в ґрунтовій товщі почали формуватися пластичні (незворотні) деформації. Тобто відбувається руйнування ґрунту.

Формування пластичних точок відбуваються по майбутній кривій ковзання, після продовження скорочення заглиблення "стіни в ґрунті", зона пластичних точок буде повністю відповідати поверхні ковзання – тобто поверхні, по якій йде руйнування ґрунту та опрокидування стінки (втрата її стійкості).

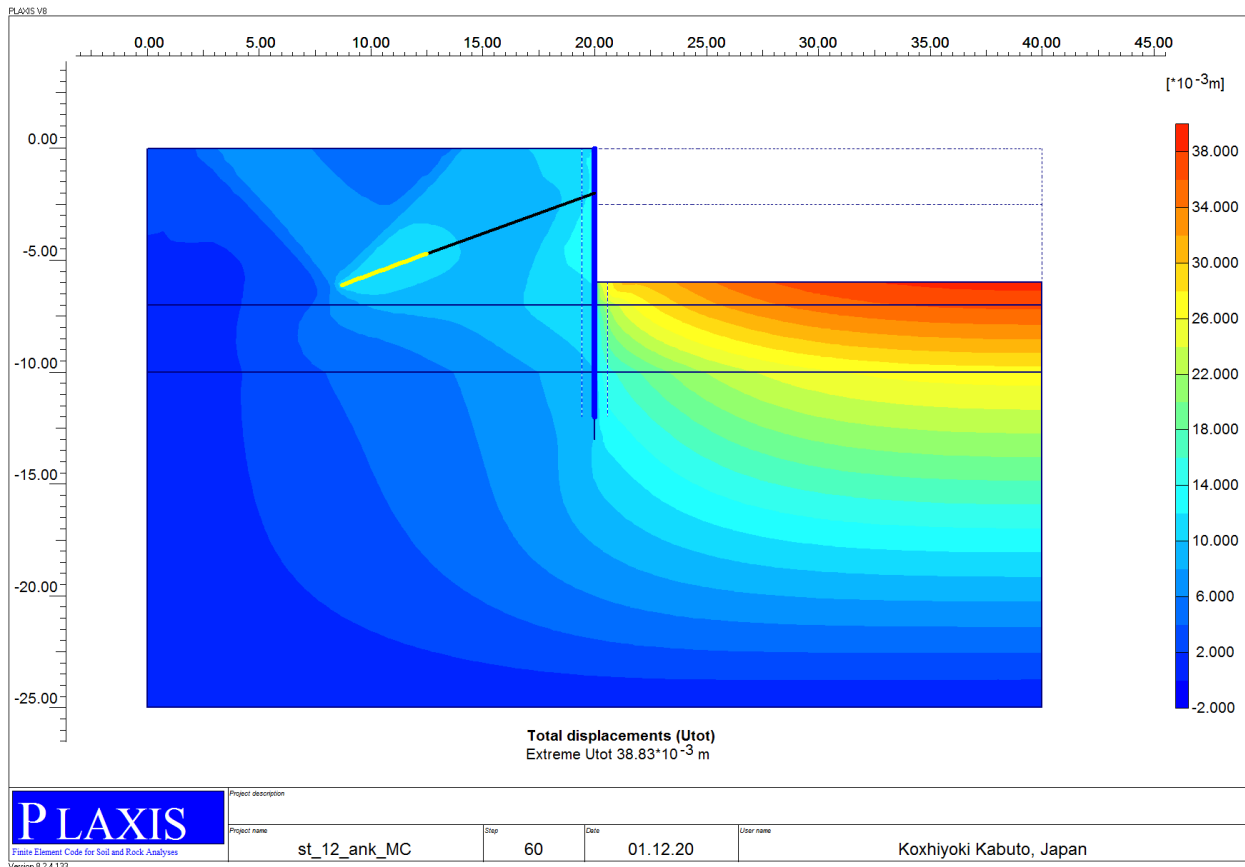


Рис. 4. Моделювання конструкції "стіни в ґрунті" (12м) з одним ярусом ґрунтових анкерів

Для подальшого дослідження зниження коефіцієнту стійкості огорожуючої конструкції проведемо порівнювальні розрахунки в програмі Slide RockScience . Дана програма не дозволить дослідити зміну зусиль, що виникають в конструкції "стіни в ґрунті", але дозволить в певному обсязі дослідити зміну коефіцієнта стійкості завдяки методам розрахунку, що закладені в програмі.

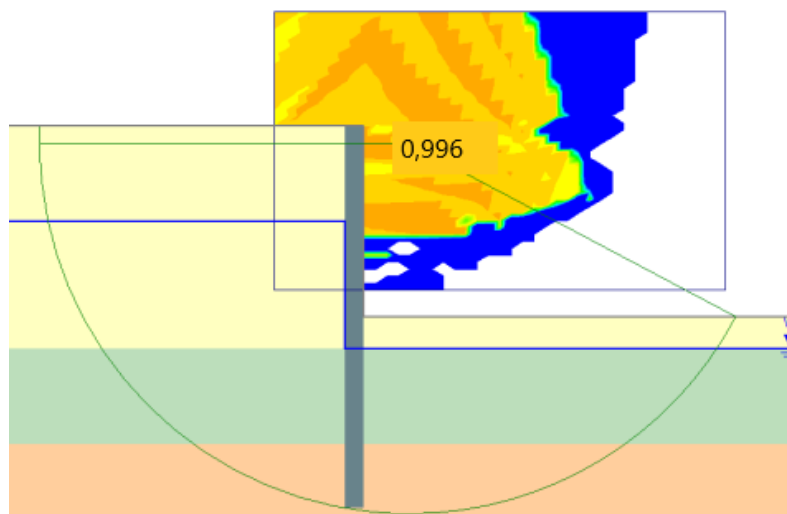


Рис. 5. Стійкість конструкції огороження без анкерного кріплення

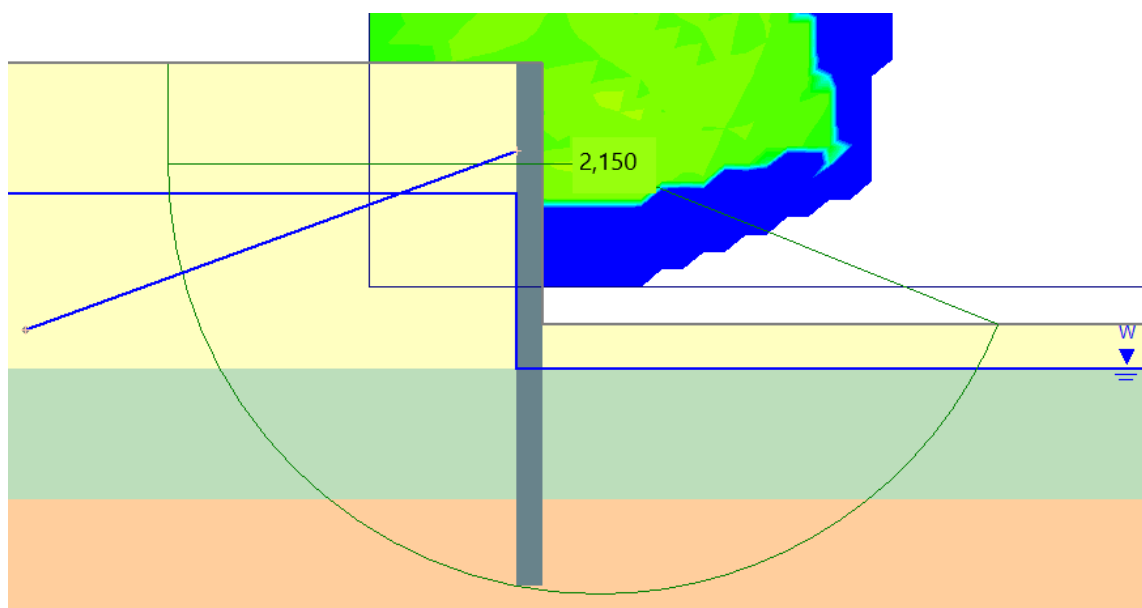


Рис. 6. Стійкість конструкції огородження (12 м) з одним ярусом анкерів

Моделювання за допомогою програми Slide дозволило не тільки дослідити зміну коефіцієнта стійкості конструкції огородження, але продовжити розрахунки після втрати конструкцією стійкості, тобто зменшення коефіцієнта нижче одиниці.

Таблиця

Результати моделювання

	Довжина "стіни в ґрунті"	Заглиблення, м	Переміщення "стіни в ґрунті"	Згинаючий момент, тм	Коефіцієнт стійкості	
					Plaxis	Slide
1	12м – без анкерного кріплення	6	107	40,1	0.93	0,99
2	12 м – анкерне кріплення	6	13	28,2	1.5	2.15
3	11 м – анкерне кріплення	5	13,5	26,2	1.42	1,97
4	10 м – анкерне кріплення	4	14,3	22,7	1.34	1,67
5	9 м – анкерне кріплення	3	-	-	-	1,45
6	8 м – анкерне кріплення	2	-	-	-	1,18
7	7 м – анкерне кріплення	1	-	-	-	0,87

Необхідно відмітити, що програми Plaxis та Slide використовуються для моделювання та розрахунку різними методами. Plaxis оснований на методі кінцевих елементів, Slide використовує метод граничних рівноваг. Результати в таблиці наведені для аналізу зміни коефіцієнту стійкості та підтвердження методом моделювання необхідної довжини конструкції огороження глибоких виїмок.

Згідно результатам стійкості конструкції огороження (див. табл.), отриманими за допомогою програми Slide, високому коефіцієнту стійкості сприяє виконанні утримуючі конструкції – ґрунтові анкери.

Якщо при заглибленні 3 м нижче рівня виїмки ґрунту конструкція огороження з одним ярусом ґрунтових анкерів знаходиться в стійкому стані ($K = 1,45$), при заглибленні тільки 2 м – коефіцієнт стійкості різко знижується до 1,18, тобто конструкція огороження знаходиться в нестійкому стані. Так само за результатами моделювання Plaxis анкерні елементи не дають значного збільшення переміщення "стіни в ґрунті" при зменшенні заглиблення до 2 м.

Висновки: Конструкція огороження без виконання кріплення ґрунтового анкерами за результатами розрахунку показала наднормативні переміщення (107 мм) та низький коефіцієнт стійкості по результат обох розрахункових комплексів.

1. Введення в розрахунок ярусу ґрунтових анкерів значно зменшило переміщення огороження (13 мм), а розрахунок стійкості показав, що коефіцієнт стійкості конструкції огороження котловану значно вище за значення в нормативних документах.

2. За результати моделювання можливе зменшення заглиблення конструкції "стіни в ґрунті" на 2 м (загальна довжина "стіни в ґрунті" 10 м). Коефіцієнт стійкості задовольняє вимоги будівельних норм ($K > 1,25$), переміщення конструкції збільшилися на незначний відсоток.

3. Зменшення заглиблення конструкції огороження більше ніж на 3 м веде до стрімкого зростання переміщень і руйнування ґрунтового масиву за конструкцією огороження (результати розрахунків Plaxis). Для розрахункової моделі в програмі Slide перехід з стійкого в нестійкий стан з подальшим зменшення коефіцієнта стійкості відбувається при зміні довжини заглиблення від 3 до 2 м, а при заглибленні менше 2-х відбувається не тільки руйнування стіни (або її опрокидування), але і повна втрата стійкості (значення коефіцієнту стійкості менше 1)

4. Програмний комплекс Plaxis дозволяє змоделювати поведінку будь-якої складності ґрунтових умови та дослідити зміну напружено деформованого стану масиву в залежності від виконання геотехнічних споруд. Але при досягненні теоретичного відсотку пластичних деформацій в ґрунті, розрахунок зупиниться і отримати значення стійкості після фази руйнування буде неможливо. Програма Slide не має функціональних можливостей для отримання зусиль, що виникають в конструкції огороження, але навіть при зменшенні коефіцієнту стійкості менше одиниці (тобто при переході конструкції в нестійкий стан та її руйнації) можна буде продовжити розрахунок і дослідити подальші зміни в розрахунковій моделі.

Перелік посилань

1. Тер-Мартirosян, А., Лузин, И., & Тер-Мартirosян, З. (2016). Напряженно-деформированное состояние оснований фундаментов глубокого заложения конечной ширины. *Геотехника*, 6, 26-33.
2. Фоменко, И. К., Кургузов, К. В., Зеркаль, О. В., & Сироткина, О. Н. (2018). О модели поведения грунтов Мора-Кулона. In *Современные полевые и лабораторные методы исследования грунтов-изыскания и проектирование* (pp. 130-139).
3. Малий, І., (2000). Сучасні методи кріплення котлованів. *Праці ювілейної науково-практичної конференції*.
4. Кунтше, К. (2010). Влаштування глибоких котлованів і відкосів в умовах міської забудови. *Розвиток міст і геотехнічне будівництво*, 2, 1-17.
5. Зуєвська, Н., & Губашова, В. (2020). Стабілізація ґрунтового масиву за допомогою ін'єкційних анкерів. Порівняльний аналіз особливостей проектування. *Національний гірничий університет. Збірник наукових праць*, 60, 58-68.
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/60.058>
6. *Plaxis 3D Foundation. Material models manual. Plaxis bv, AN Delft, The Netherland.* (n.d.)
www.plaxis.nl
7. *Report About the Testing of an Anchor Section Reinforced With a TITAN 30/11 Hollow Bar as Tension Element, Dr. Thomas Schmitz translated the report from German, Ischebeck Titan Injection Anchor System.* (2007).

АННОТАЦИЯ

Цель. Установление эффективных параметров ограждающих конструкций глубоких котлованов и методов дополнительного крепления этих конструкций в условиях плотной городской застройки.

Методика исследования заключается в решении проблемы совместной работы системы «крепь-ограждающий массив», проведено численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ), по результатам расчетов определены коэффициенты устойчивости грунтового массива при изменении параметров углубление конструкции ограждения.

Результаты исследования. Установлены коэффициенты устойчивости грунтового массива с элементами крепления котлованов от нагрузок, которые создает окружающий массив при вариантах крепления откосов с применением ограждения, выполнена с помощью специального способа «стена в грунте», и закрепление их стен дополнительными элементами крепления в виде грунтоцементных анкеров.

Научная новизна. Сокращение расходов на сооружение «стены в грунте» за счет уменьшения углубленной части железобетонной конструкции и применения грунтовых анкеров обеспечивается путем использования двух современных геотехнических прикладных пакетов компьютерного моделирования, которые позволяют минимизировать затраты за счет оптимизации технологических процессов. Необходимо отметить, что программы Plaxis и Slide используются для моделирования и расчета различные методы. Plaxis основан на методе конечных элементов, Slide использует метод предельных равновесий. Сочетание этих двух пакетов для анализа изменения коэффициента устойчивости удобно с целью подтверждения методом моделирования необходимой длины конструкции ограждения глубоких выемок.

Практическое значение. Предложенные варианты расчета ограждения котлованов численным методом конечных элементов, что позволяет получить полную картину изменения напряженно-деформированного состояния конструкции «крепления-массив» и их совместной работы в наиболее короткие сроки и с максимальным отражением реальных условий. Получили

дальнейшее развитие методики моделирования сложных геотехнических объектов с выполнением расширенного анализа методом конечных элементов или предельного равновесия деформации и устойчивости почвы.

Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, «стена в грунте», грунтоцементные анкеры.*

ABSTRACT

Purpose. Establishment of effective parameters of the enclosing structures of deep pits and methods of additional fastening of these structures in conditions of dense urban development.

The research methodology consists in solving the problem of joint operation of the "support-surrounding massif" system, numerical modeling by the finite element method (FEM). According to the results of calculations, the stability coefficients of the soil massif depending on the parameters of deep penetration of the enclosing structures were changed.

Research results. The coefficients of stability of a soil massif with elements of fastening of deep pits from loads created by the surrounding massif with options for fastening slopes with the use of an enclosing structures, made using a special method "wall in the ground", and fastening elements in the form of soil-cement anchors were additional.

Scientific novelty. Reduction of costs for the construction of a "wall in the soil" by reducing the deepened part of the reinforced concrete structure and the use of ground anchors is achieved through the use of two modern geotechnical applied computer modeling packages that minimize costs by optimizing technological processes. It should be noted that Plaxis and Slide are used for modeling and calculation of different methods. Plaxis is based on the finite element method, Slide used limit equilibrium methods. The combination of these two packages for the analysis of the change in the coefficient of stability is convenient in order to confirm by modeling the required length of the structure of the fence of deep recesses.

Practical value. The proposed options for calculating the fencing of pits by the numerical finite element method, which allows you to get a complete picture of the change in the stress-strain state of the structure "fastening-array" and their joint work in the shortest possible time and with the maximum reflection of real conditions. The methods of modeling complex geotechnical objects were further developed with the implementation of an extended analysis by the finite element method or the limiting equilibrium of soil deformation and stability.

Keywords: *stress-strain state, finite element method, "Wall in the ground", soil-cement anchors.*