

Використання цифрових двійників для влаштування глибоких котлованів при трансформації об'єктів культурної спадщини

Володимир ТИТАРЕНКО¹, Антон ДВОРНИК²

Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»

5/2, вул. Преображенська, Київ, Україна, 03037

¹0679199507@ukr.net, orcid.org/ 0000-0001-9746-2399

²dvornyka@gmail.com, orcid.org/0000-0003-0266-8429

DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.286-295

Анотація. Досліджено роботу конструкцій огородження котловану в складних інженерно-геологічних умовах, ущільненої забудови, встановлено раціональну конструктивну схему на прикладі реставрації з пристосуванням - трансформації - об'єкту культурної спадщини.

Для цього в процесі науково-технічного супроводу створено цифрову модель (цифровий двійник) глибокого котловану, визначено напружено-деформований стан (НДС) споруди відповідно до проектних рішень та розроблено рекомендації щодо їх оптимізації. На етапі влаштування котловану на підставі аналізу спостережень за деформаціями огороження та оточуючої забудови скорегована цифрова модель та розроблені проектні рішення розпірної системи.

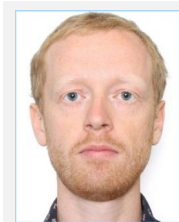
Глибокі котловани в складних ґрунтових умовах є невід'ємною частиною сучасного міського будівництва. В умовах щільної забудови та складних ґрунтових умов виникає ряд завдань, пов'язаних з забезпеченням стійкості котловану та безпеки сусідніх будівель. У статті розглянуто питання, пов'язані з моделюванням взаємодії системи "ґрунт – споруда котловану - сусідні будівлі" при влаштуванні котлованів. Дослідження проведено за допомогою чисельного моделювання з використанням нелінійних законів деформування ґрунту та геодезичних методів контролю за деформаціями.

Досліджено вплив різних параметрів кріплення котловану (тип, глибина, розташування) на напружено-деформований стан ґрунтового масиву та сусідніх будівель. На основі отриманих результатів запропоновано рекомендації щодо вибору оптимальних параметрів кріплення котловану для забезпечення його стійкості



Володимир ТИТАРЕНКО

к.т.н., с.н.с. завідувач відділення досліджень технічного стану будівель і споруд при небезпечних геологічних процесах ДП НДІБК



Антон ДВОРНИК

к.т.н., завідувач лабораторії досліджень будівель і споруд при небезпечних геологічних процесах ДП НДІБК

та мінімізації впливу на сусідні будівлі.

Перспективним напрямком проектування конструкцій котлованів є підвищення економічності та надійності проектних рішень за рахунок використання раціональних конструктивних схем з урахуванням особливостей ділянки. В котлованах складної конфігурації НДС необхідно моделювати за просторовими моделями. Урахування просторових ефектів конструктивної схеми дає можливість вирішити дві основні задачі:

- максимальне використання потенціалу несучої здатності споруди, зниження запасів до прийнятних значень;

- виключення помилок проектування, що спричинені невідповідністю напружено-деформованого стану конструкцій, визначеного на підставі розрахунків 2D моделей, їх реальному стану.

Ключові слова. Глибокий котлован, цифровий двійник, складні ґрунтові умови, кріплення котловану, чисельне моделювання, стійкість котловану, оточуюча забудова.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Будівництво глибоких котлованів у сучасних умовах досить часто супроводжується зведенням підземних споруд (паркінги, сховища) або влаштуванням фундаментів для висотних будівель, щоб забезпечити комфортні умови проживання та функціонування міської інфраструктури. Досить часто такі котловани влаштовуються в щільній міській забудові в складних ґрунтових умовах, де необхідно враховувати багато чинників при визначенні напружено-деформованого стану (НДС) ґрунтового масиву, на якому будуть зведені будівлі та споруди.

Важливу роль в даних умовах відіграють:

- нерівномірне нашарування ґрунтів основи з особливими властивостями;
- високий рівень ґрунтових вод;
- технічний стан та напружено-деформований стан основи оточуючої забудови;
- якість виконаних інженерно-геологічних вишукувань.

Перелічені параметри є одними з початково-крайових умов для розрахунку утримуючих споруд. Від якості вихідних даних та їх верифікації в польових умовах залежить достовірність проведених розрахунків. Першочерговою задачею є збереження об'єктів оточуючої забудови та інфраструктури або самого об'єкту трансформації.

Врахування впливу цих чинників на НДС ґрунтового масиву є складним завданням, що вимагає застосування сучасних методів розрахунку та чисельного моделювання, створення математичних моделей огороження глибоких котлованів (цифрових двійників (Digital Twins)) для прогнозу технічного стану та особливостей в подальшій експлуатації пам'ятки при її відновленні та трансформації (приспособлення до сучасних вимог).

Недостатнє врахування цих чинників може призвести до аварійних ситуацій, таких як обвали котловану, понаднормативних деформацій будівель, що матиме значні

економічні та соціальні наслідки.

Тому, дослідження роботи конструкцій огороження котловану в складних інженерно-геологічних умовах, в умовах ущільненої забудови для підтвердження надійності споруди є актуальною задачею.

АНАЛІЗ ПОПЕРДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Тема трансформації об'єктів культурної спадщини під об'єкти різного функціонального призначення із влаштуванням підземних поверхів під будівлею та глибоких котлованів поруч з ними, а також влаштування глибоких котлованів в умовах ущільненої забудови, складних інженерно-геологічних умовах та на територіях з небезпечними геологічними процесами є досить актуальною на даний час, що відображено в численних публікаціях (Блащук та ін., 2022; Носенко, Маламан, 2023; Слюсаренко та ін. 2022, Винников та ін., 2023). Переважно висвітлюються особливості технологічних та конструктивних рішень для огорожень глибоких котлованів на прикладі реальних об'єктів будівництва.

Достовірність отриманих результатів в процесі математичного моделювання суттєво залежить від якості геологічних вишукувань та лабораторних досліджень (Червинський та ін., 2014).

Невід'ємною складовою влаштування глибоких котлованів став геотехнічний моніторинг (Винников та ін., 2022).

Створення цифрових двійників огороження котлованів та оточуючої забудови на початковому етапі проектування об'єкту дозволяє в процесі будівництва та отримання даних моніторингу оперативно прогнозувати зміну напружено-деформованого стану ґрунтової основи об'єктів та своєчасно корегувати хід будівельно-монтажних робіт для мінімізації впливу на об'єкт трансформації чи оточуючої забудови (Слюсаренко та ін., 2021).

Аналіз сучасних публікацій вказує на те, що кожен конкретний об'єкт має свої індивідуальні особливості за ґрунтовими умовами, параметрами оточуючої забудови та об'ємно-планувальними рішеннями. Особ-

ливості взаємодії споруди огороження котловану і ґрунтової основи є різноманітними і кожен випадок заслуговує окремого розгляду.

МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є дослідження напружено-деформованого стану конструкцій огороження глибокого котловану із використанням сучасних методів розрахунку та чисельного моделювання.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Опис об'єкта

Ділянка будівництва знаходиться між вулицею М. Грушевського та І. Мазепи у Печерському районі м. Києва.

Межі ділянки будівництва показані на ситуативній схемі на Рис. 1. В безпосередній близькості до меж ділянки забудови знаходяться існуючі будівлі:

- підземний паркінг багатоповерхового будинку по вул. Грушевського;
- нежитлова будівля по вул. Івана Мазепи пам'ятка містобудування національного значення;
- фрагменти історичної забудови - пам'ятка містобудування національного значення між блоками В та С.

Конструктивні рішення огороження

Огороження котловану запроектовано із бурових паль Ø820 мм з кроком 1200 мм. Відмітка низу паль коливається в межах від 166,750 м до 169,750 м, довжина паль в межах від 18,0 м до 21,0 м.

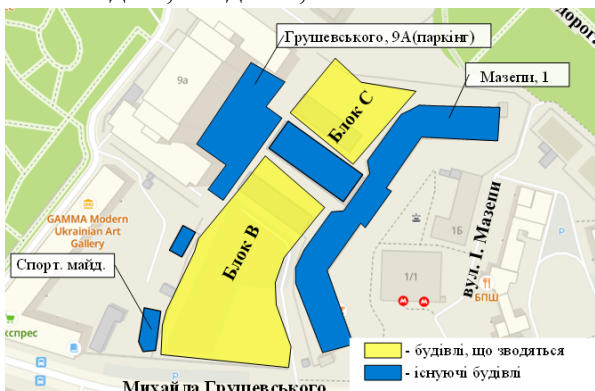


Рис.1. Ситуаційна схема ділянки
Fig.1. Site plan of the construction area

Проектна відмітка дна котловану 179,0 м та 178,65 м (між осями І-П), відмітки поверхні землі за межами котловану – 186,95÷191,8 м.

Голови паль об'єднані монолітним ростверком. Переріз — 850×1070 (h) мм. Тимчасові конструкції огороження складаються зі шпунта (металевий прокат) та розпірних конструкцій. Шпунт влаштовується з двотаврів №35(40)Б2 з кроком 900...1200 мм, довжиною 12,0. Верх шпунта на відмітці 189,90 м, відмітка низу – 177,90 м. Тимчасова металева конструкція по верху скріплюється обв'язувальним поясом – двотавром №30Б1. При влаштуванні плити пандусу вздовж осі 1 шпунтове огороження демонтується.

Розпірні конструкції виконуються з профільної труби Ø820×10 мм. Після влаштування каркасу будівлі до відм. –8,350 м розпірні конструкції підлягають демонтажу.

По контуру паль огороження влаштовуються ґрунто-цементні палі за технологією jet (діаметр – 500 мм, відмітка низу – 176,00 м).

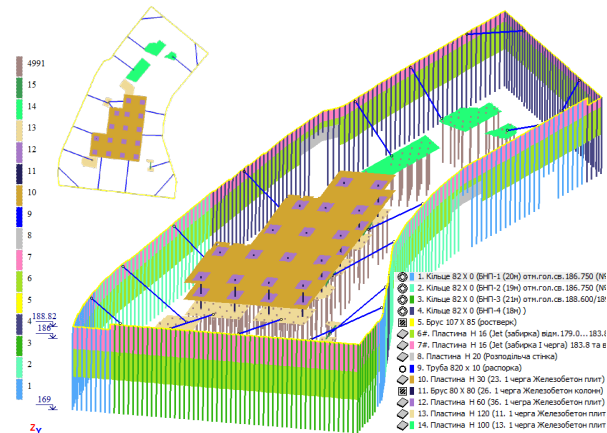


Рис.2. Конструктивні рішення огороження котловану
Fig.2. Excavation retaining structure design

Інженерно-геологічні умови

Ділянка належить до III-ї (складної) категорії інженерно-геологічних умов.

В розрізі виявлено прошарки органічно-мінеральних ґрунтів ІГЕ-20 та просідних лесовидних ґрунтів ІГЕ-1а.

На території ділянки будівництва за геофізичними даними визначені дві зони зволоження верхнього шару ґрунтів. Зони пе-

ретиноють ділянку будівництва з півдня на північ. Вздовж зон зволоження фіксуються невеликі фільтраційні потоки ґрунтової води, джерелом яких є витіки з підземних водонесучих мереж, що розташовані вздовж вулиці Івана Мазепи.

На ділянці виявлено дві лінійні розуцільнені ділянки (підземні ходи) шириною 1,0...1,2 м. Глибина залягання: підземний хід №1 – 8,0...9,8 м, хід №2 – 15,2...16,9 м. Висота розуцільнених зон становить 1,7...1,8 м.

Методологія розрахунків

З метою перевірки проектних рішень споруди огороження котловану виконано

комплекс розрахунків в три етапи:

1. Аналітичні розрахунки з визначення активного тиску ґрунту, жорсткості та міцності ґрунтової основи паль;
2. Визначення НДС масиву ґрунту в системі «основа–споруда». Уточнення тиску ґрунту, на стіну огороження, та деформацій основ, прилеглих будівель, при розробці котловану;
3. Визначення НДС конструктивних елементів огороження в складі системи «основа–споруда» (ПК Ліра Спр). Перевірка конструкцій за двома групами граничних станів – 1ГГС та 2ГГС.

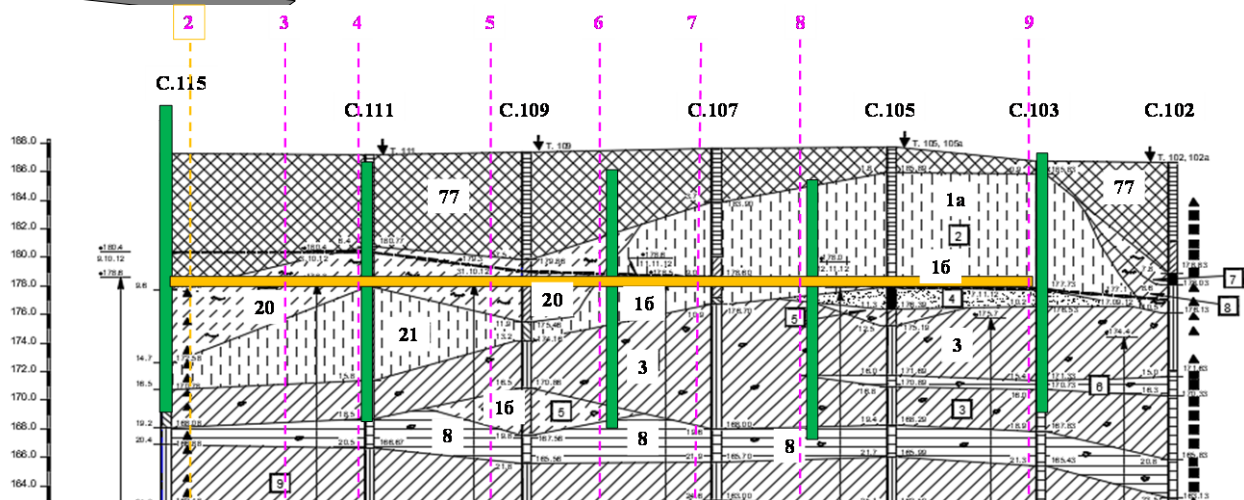
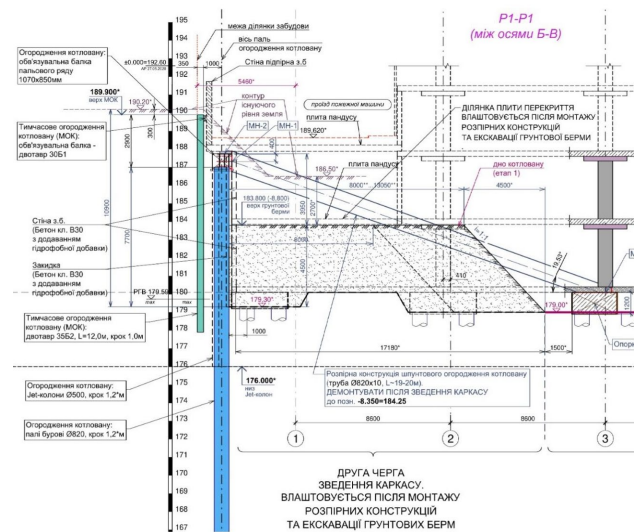
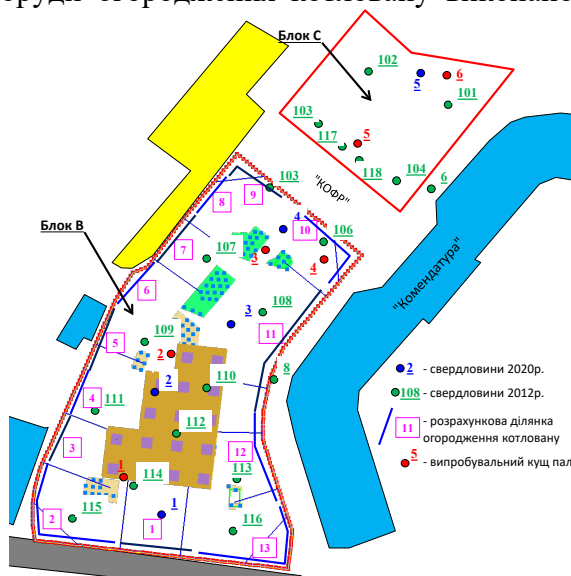


Рис.3. Схема огороження котловану на інженерно-геологічному розрізі
Fig.3. Excavation shoring structure scheme on the engineering-geological section.

Розрахунки виконані з урахуванням стадійності зведення споруди.

Для врахування мінливості інженерно–

геологічних умов ділянку будівництва умовно розділено на 13 розрахункових ділянок. Для кожної з ділянок визначено горизонتا-

льний тиск ґрунту, початкові коефіцієнти жорсткості основи та несучу здатність ґрунту по бічній поверхні паль.

Спільна робота основи та споруди враховується використанням чисельної контактної моделі з використанням методу скінченних елементів і моделі суцільного середовища. Основною є контактна модель, що враховує взаємодію конструкцій споруди з основою на контактній поверхні «споруда–ґрунт» (Ліра-Сапр), проте напружено-деформований стан масиву ґрунту не розглядається. Модель суцільного середовища (Plaxis 2d) є допоміжною, розглядається споруда та навколишній масив ґрунту у межах області розрахунку та виконується аналіз їх спільного напружено-деформованого стану. Використовується для визначення розрахункової залежності «тиск–переміщення» при різних деформаціях стіни в конкретних ґрунтових умовах. У чисельній моделі суцільного середовища використовується пружно-пластична модель ґрунту, що зміцнюється. У контактній чисельній моделі використовується метод змінного коефіцієнта жорсткості ґрунтової основи. Розподіл напружень в ґрунті описується з використанням моделі Фусса–Вінклера. Залежність «напруження–деформація» описується з використанням ідеально пружно-пластичної моделі з граничною поверхнею, що визначається критерієм Мора–Кулона.

Для визначення напружено-деформованого стану конструктивних елементів огороження котловану використано програмний комплекс «ЛІРА», що реалізує метод скінченних елементів.

Розрахункова модель основи представлена приведеною жорсткістю у вертикальному та горизонтальному напрямках для одновузлових елементів, що моделюють палюву основу. Розрахункові параметри основи прийнято відповідно до інженерно–геологічних умов на відповідних ділянках.

Розрахунок системи «основа–споруда» виконано ітераційним способом з урахуванням спільної просторової роботи конструктивних елементів підпірних стін та

ґрунтової основи на відповідних етапах розробки котловану (використано модуль «Монтаж»). На кожному кроці ітераційного процесу виконується перевірка несучої здатності ґрунту і тиску по боковій поверхні палі та відповідне коригування коефіцієнтів жорсткості основи окремо в кожному СЕ типу 56. Ітераційний процес виконується до тих пір, поки не досягається умова забезпечення стійкості ґрунту в горизонтальному напрямі по всій довжині палі. Після досягнення сходимості ітераційного процесу виконується розрахунок з визначення зусиль в конструктивних елементах огороження котловану.

Розрахунок за стійкістю ґрунтової основи виконано з урахуванням вимог і рекомендацій (ДСТУ-Н Б В.2.1-31:2014 Настанова з проектування підпірних стін, 2015) та посібника з проектування та розрахунку підпірних стін з буронабивних паль (Методические рекомендации по проектированию и расчету подпорных стен из буронабивных свай, 1984).

Результати розрахунків

За результатами розрахунків 1-го етапу визначено епюри розрахункових значень тиску ґрунту, його жорсткості та несучої здатності залежно від місця розташування розрахункового перерізу в плані. Виконано оцінку мінливості геологічних умов та їх можливого впливу змiну НДС на різних ділянках огороження.

За результатами розрахунків 2-го етапу встановлено наступне:

1. Розрахункові додаткові осідання основи будівлі «Комендатури» по вул. Мазепи, 1 становлять $1,0 \div 3,0$ мм при горизонтальних деформаціях огороження 30–40 мм, максимальна відносна різниця осідань 0,0001.

2. Розрахункові додаткові осідання основи будівлі Кофру між блоками В і С досягають 65 мм при горизонтальних деформаціях огороження 85 мм. При горизонтальних деформаціях огороження 20–30 мм додаткові осідання будівлі не перевищують 13 мм, максимальна відносна різниця осідань 0,00053.

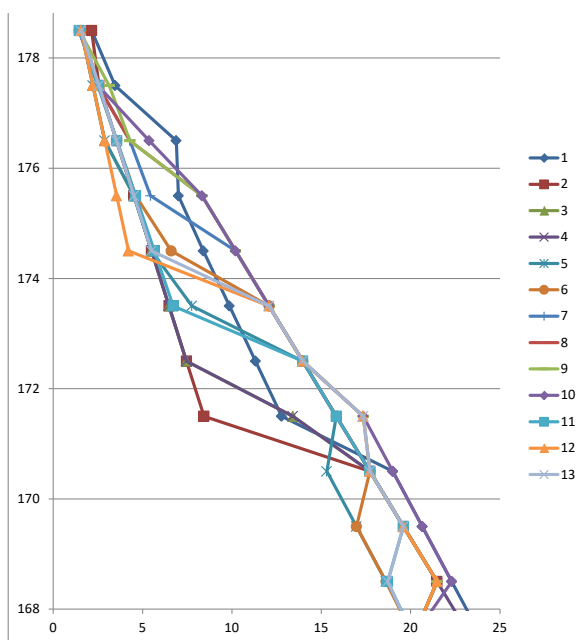


Рис.4.Епюри несучої здатності ґрунту по бічній поверхні палі, т. На етапі розробки ґрунту до дна котловану. Значення наведені для палі при кроці 1,2 м.

Fig.4. Diagrams of soil bearing capacity along the pile side surface, tons. The values are given for a pile with a 1.2 m step, at the stage of soil excavation to the bottom of the pit.

Крім того, на даному етапі виконано моделювання впливу жорсткості розпірної системи на значення тиску ґрунту на стіну огороження.

Отримані значення тиску ґрунту в активному стані σ_a та стані спокою σ_0 використані в процесі розрахунку просторової моделі огороження (3-й етап) згідно з рекомендаціями п.7.21 (ДСТУ-Н Б В.2.1-31:2014, 2015).

За результатами розрахунків 3-го етапу в конструкції огороження котловану виявлено недоліки, що можна узагальнити наступним чином:

- надмірні деформації паль на окремих ділянках, що можуть спровокувати додаткові осідання розташованих поряд будівель;
- перевищення несучої здатності за міцністю стовбура окремих паль;

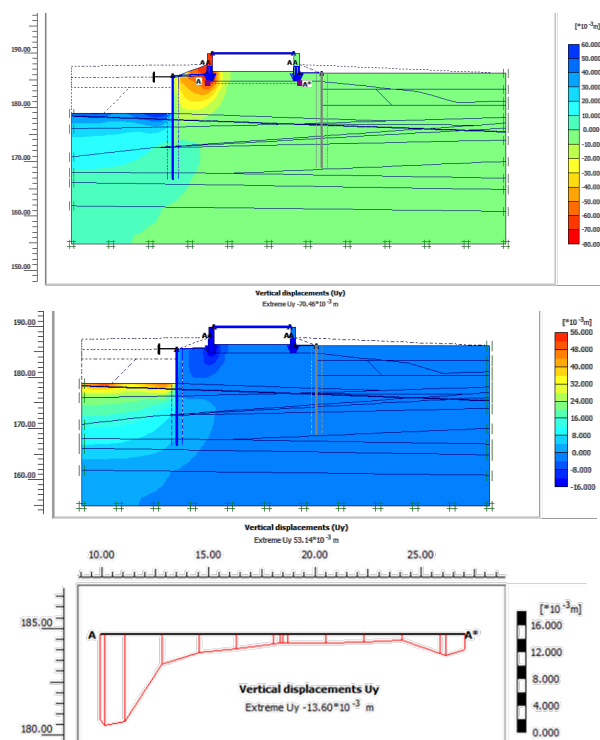


Рис.5.Вертикальні деформації, мм при горизонтальних деформаціях огороження 9 см та 3 см. Епюра осідань при горизонтальних деформаціях огороження 3 см

Fig.5. Vertical deformations, mm at horizontal deformations of the wall 9 cm and 3 cm. Settlement diagram of the building at horizontal deformations of the wall 3 cm.

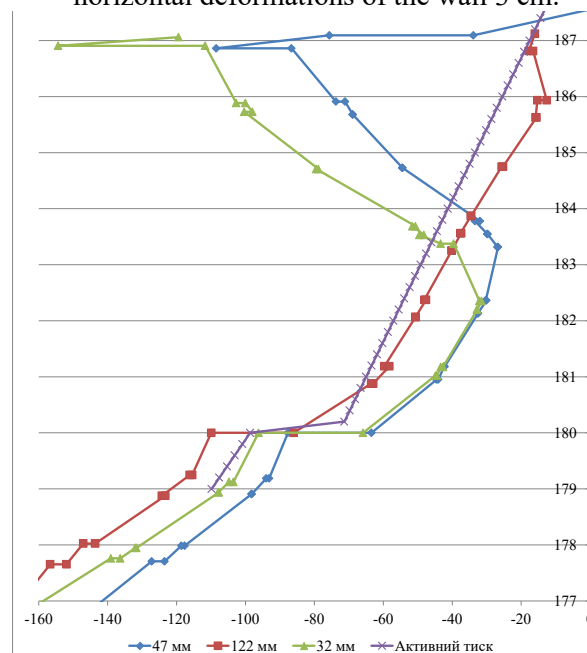


Рис.6. Епюра тиску ґрунту по Розрізу 1 залежно від горизонтального переміщення стіни, (кН/м²)/м.п.

Fig.6. Pressure diagram on the wall along Section 1 depending on the horizontal wall displacement, (kN/m²)/lm.

- в окремих опорних ростверках фундаментів, що сприймають навантаження від розпірок, недостатньо палів для забезпечення несучої здатності ґрунту;
- не забезпечена несуча здатність окремих розпірних труб;
- на ділянці розміщення підземних тунелів палі огороження відсутні (короткі). На цій ділянці є ризик випору ґрунту.

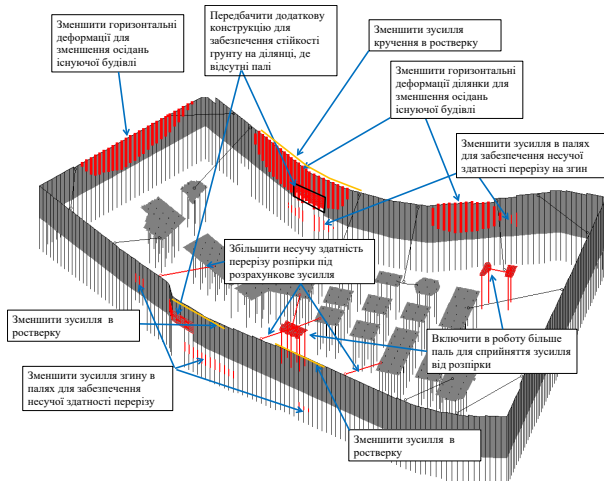


Рис.7. Схема з позначенням проблемних ділянок огороження котловану, виявлених за результатами розрахунків
Fig.7. Schematic representation of problematic zones in the excavation shoring, determined by calculation outcomes

Рекомендації

Розроблено технічні рішення для підвищення ефективності конструктивної системи огороження котловану і збереження експлуатаційних якостей будівель оточуючої забудови:

1. Об'єднання ростверків фундаменту будівлі силовою плитою, для сприйняття горизонтальних навантажень від розпірних конструкцій.
2. Зміщення розпірок та влаштування додаткової розпірної труби для перерозподілу зусиль в палях, ростверку і зменшення деформацій стіни.
3. Влаштування додаткової розпірної

конструкції та розподільчої балки на рівні 183,5 м (ділянка в осях 7/А).

4. Влаштування додаткових конструкцій, (посиленої залізобетонної стіни забірки), в зоні влаштування коротких палів над існуючими підземними ходами.

5. Коригування проектного армування ростверку з урахуванням результатів розрахунків.

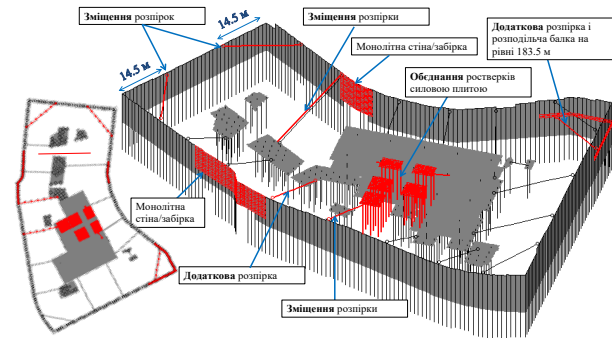


Рис.8. Схема огороження котловану з позначенням заходів, що рекомендовані до виконання
Fig.8. Excavation retaining structure layout with designated measures for implementation.

Надані рекомендації були впроваджені в проектні рішення. В процесі влаштування котловану виконувався геодезичний моніторинг деформацій палів огороження.

Геодезичний моніторинг

Порівняння розрахункових деформацій з фактичними показує хорошу збіжність (+/-5%) на більшості ділянок огороження. Більш суттєва різниця (фактичні деформації менші за розрахункові на 15-20 мм), спостерігається на ділянках розміщення підземних тунелів та вздовж тимчасової будівельної дороги між котлованом та будівлею «Комендатури». На основі цих даних можна зробити висновок, що розрахункова модель споруди огороження відповідає реальному об'єкту.

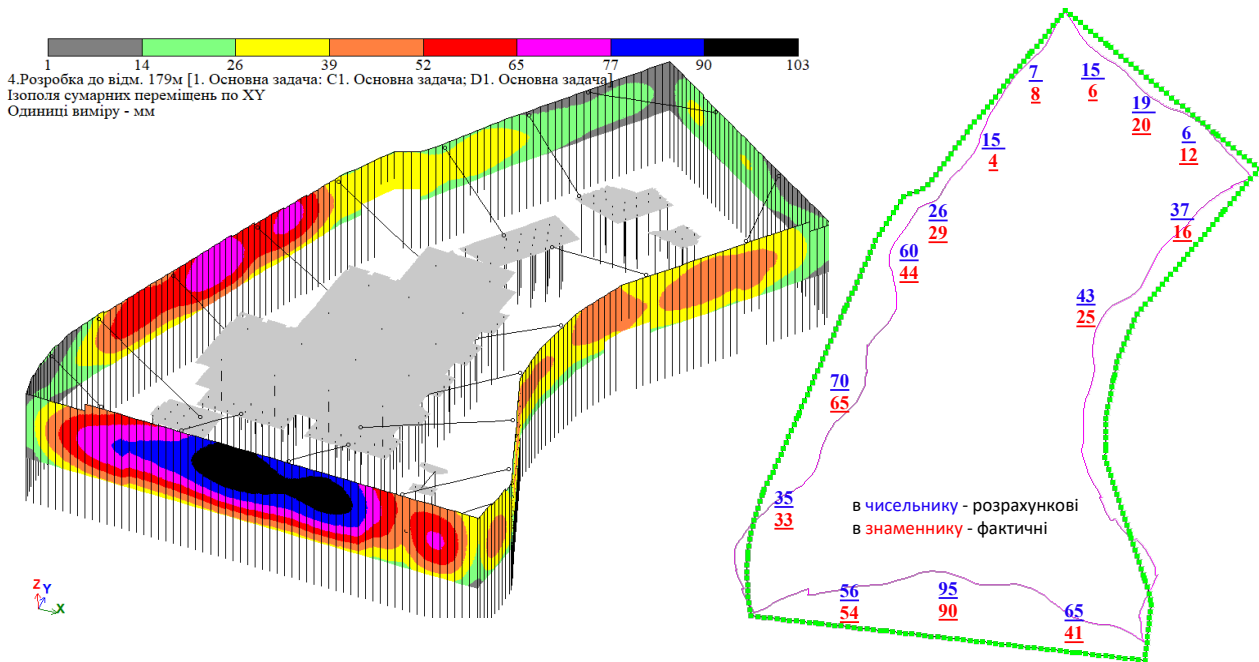


Рис.9. Порівняння розрахункових деформацій з результатами геодезичного моніторингу
Fig.9. Correlation of calculated displacements and geodetic monitoring outcomes

ВИСНОВКИ

Розроблена методологія комп'ютерного інтелекту (створення Digital Twin) для уточнюючих розрахунків глибокого котловану, що наряду із геодезичним моніторингом забезпечило ефективне збереження відреставрованої пам'ятки, що почала експлуатуватися на будівельний період її подальшої трансформації в багатофункціональний комплекс.

Порівняння розрахункових та фактичних деформацій підтвердило адекватність використаної розрахункової моделі, що дозволяє використовувати її для проектування подібних об'єктів у складних ґрунтових умовах.

Результати дослідження підтверджують необхідність детального аналізу роботи конструкцій огороження котлованів в складних ґрунтових умовах з використанням сучасних методів розрахунку просторових моделей та якісних інженерно-геологічних вишукувань.

ЛІТЕРАТУРА

1. Маєвська, І. В., Блащук, Н. В., & Губашова, В. Є. (2022). Моделювання впливу влаштування глибокого котловану складної форми на поряд розташовані будинки. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*, 33(2), 132-141.
2. Nosenko, V., & Malaman, A. (2023). Вибір оптимальних параметрів підпірної стіни огороження котловану в умовах щільної забудови з врахуванням її просторової жорсткості. *Основи та фундаменти*, 46, 141-152.
3. Слюсаренко, Ю., Дворник, А., & Калюх, Ю. (2021). Гібридна концепція iot, dss та dw в геотехніці та її застосування в умовах ущільненої міської забудови. *Наука та будівництво*, 28(2), 11-27.
4. Slyusarenko, Y., Tytarenko, V., Shuminskiy, V., Dvornyk, A., & Dombrovskiy, Y. (2022). Protection of St. Andrew's Church located within landslide hazardous sites and ground constraints. In *Protection of Historical Constructions: Proceedings of PROHITECH 2021* 4. 1144-1157. Springer International Publishing.
5. Винников, Ю. Л., Харченко, М. О., Єрмоленко, Д., & Акопян, М. К. (2022). Геотехнічний моніторинг улаштування котловану новобудови поруч з існуючими будівлями. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, 22, 12-26.

6. Vynnykov, Y., & Akopian, M. (2023). Практика влаштування більш глибокого котловану за рівень підшови фундаментів навколишніх будівель. *Основи та фундаменти*, 46, 28-37.
7. Червінський, Я. Й., Петраков, О. О., Зоценко, М. Л., Винников, Ю. Л., Титаренко, В. А., Шумінський, В. Д., & Домбровський, Я. І. (2014). Дослідження технічного стану будівель та споруд при небезпечних геологічних процесах.
8. Настанова з проектування підпірних стін: ДСТУ-Н Б В.2.1-31:2014 (2015). К.: Мінрегіонбуд України.
9. Настанова з проектування котлованів для влаштування фундаментів і заглиблених споруд. ДСТУ-Н Б В.2.1-32:2014 (2015).– К.: Мінрегіонбуд України.
10. Методические рекомендации по проектированию и расчету подпорных стен из буронабивных свай (1984). К: ВНИИГС.
6. Vynnykov Yu.L Akopian M.K. (2023) Praktyka vlachtuvannya bilch glybokogo kotlovany za riven pidoshvy fundamentiv navkolyshnich budivel. *Bases and Foundations*, 46, 28-37. (in Ukrainian)
7. Chervynskiy &at (2014) Research on the technical condition of buildings and structures in case of unsecured geological processes (in Ukrainian)
8. DSTU-N B V.2.1-31:2014. (2015) Nastanova z proektuvannya pidpirnych stin. Kyiv: Minrehionbud (in Ukrainian).
9. DSTU-N B V.2.1-32:2014. (2015). Nastanova z proektuvannya kotlovaniv dlya ulashtuvannya fundamentiv i zahlyblyenykh sporud. Kyiv: Minrehionbud (in Ukrainian).
10. Metodicheskie rekomendazii po proektirovaniyu I raschetu podpornykh sten iz byronabivnykh svay Kyiv, 1984 (in Russian)

REFERENCES

1. Blashchuk N.V., Maievska I.V., Hubashova V.I. (2022). Modeliuvannya vplyvu vlashtuvannya hlybokoho kotlovanu skladnoi formy na poriad roztashovani budynky. [Simulation of the influence of the device of a deep pit of complex shapes on nearby located houses]. *Naukovotekhnichnyy zbirnik «Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruktsii v budivnytstvi»*. 33(2), 132-141 (in Ukrainian).
2. Nosenko, V., & Malaman, A. (2023). The choice of optimal parameters of the retaining wall of the pit enclosure in conditions of dense construction, taking into account its spatial rigidity. *Bases and Foundations*, 46, 141–152.
3. Slyusarenko, Y., Dvornyk A., Kaliukh, Y. (2021). Hybrid concept of iot, dss and dw in geotechnics and its application in the restrained urban conditions. *Science and Construction*, 28(2), 11-27 (in Ukrainian)
4. Slyusarenko, Y., Tytarenko, V., Shuminskiy, V., Dvornyk, A., & Dombrovskiy, Y. (2022). Protection of St. Andrew's Church located within landslide hazardous sites and ground constraints. In *Protection of Historical Constructions: Proceedings of PROHITECH 2021* 4. 1144-1157. Springer International Publishing. (in Ukrainian)
5. Vynnykov Yu.L., Kharchenko M.O., Yermolenko D.A., Akopian M.K. (2022). Heotekhnichnyy monitorynh ulashtuvannya

Application of Digital Twins for Deep Pit Construction during the Transformation of Cultural Heritage Objects

Volodymyr TYTARENKO
Anton DVORNYK

Summary. The behavior of excavation support structures in complex geotechnical conditions and dense urban development was investigated. A rational structural scheme was established using the example of restoration with adaptation – transformation – of a cultural heritage site.

For this purpose, during the scientific and technical support, a digital model (digital twin) of the deep excavation was created, and the stress-strain state (SSS) of the structure was determined in accordance with the design solutions, and recommendations for their optimization were developed. At the excavation stage, based on the analysis of observations of the support deformations and surrounding buildings, the digital model was adjusted, and design solutions for the strutting system were developed.

Deep excavations in complex soil conditions

are an integral part of modern urban construction. In densely built-up areas and complex soil conditions, a number of tasks arise related to ensuring the stability of the excavation and the safety of adjacent buildings. The article discusses issues related to modeling the interaction of the "soil - excavation structure - adjacent buildings" system during excavation. The study is conducted using numerical modeling with nonlinear soil deformation laws.

The influence of various excavation support parameters (type, depth, location) on the stress-strain state of the soil mass and adjacent buildings is studied. Based on the results obtained, recommendations are proposed for selecting the optimal excavation support parameters to ensure its stability and minimize the impact on adjacent buildings.

A promising direction in the design of excavation structures is to increase the economic efficiency and reliability of design solutions by using rational structural schemes that take into account the site's characteristics. In complex configuration excavations, the SSS must be modeled using spatial models. Taking into account the spatial effects of the structural scheme make it possible to solve two main tasks: 1) maximum utilization of the structure's bearing capacity potential, reducing margins to acceptable values; 2) elimination of design errors caused by the discrepancy between the stress-strain state of structures, determined based on 2D model calculations, and their actual state.

Keywords. deep excavation, digital twin, complex soil conditions, excavation support, numerical modeling, excavation stability, adjacent buildings.