

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій
ННІ Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту

«Будівництво, архітектура та інфраструктура»

«Транспортна інфраструктура»

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
ОС «магістр»
(ступінь вищої освіти)

на тему: Вплив технології спорудження колонної станції на напружено-деформований стан її конструкції та гірського масиву
за освітньою програмою «Мости і транспортні тунелі»
зі спеціальності: 192 Будівництво та цивільна інженерія

Виконав: студент групи: МІ2321

Керівник:

Нормоконтролер:

/ Сергій ГОНЧАР /

/ доцент Володимир КУПРІЙ /

/ зав. каф. Олександр ПЮТКІН /

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

Дніпро – 2025 рік

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies
Dnipro Institute of Infrastructure and Transport

Building, architecture and infrastructure

(faculty)

Transport infrastructure

(department)

Explanatory Note
to Master's Thesis

Master

(higher education degree)

on the topic:

according to educational curriculum Bridges and vehicular traffic tunnels

in the Specialization: 192 Building and civil engineering

(Specialization and its code)

Done by the student of the group: MT2321 / Sergey GONCHAR /

(name, surname)

Scientific Supervisor: / Associate Prof. Volodymyr KUPRII /

(position, name, surname)

Normative controller : / Head of Dept. Oleksii TIUTKIN /

(position, name, surname)

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій
ННІ Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту

Факультет: «Будівництво, архітектура та інфраструктура»

Кафедра: «Транспортна інфраструктура»

Рівень вищої освіти: «Магістр»

Освітня програма: «Мости і транспортні тунелі»

Спеціальність: 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«Транспортна інфраструктура»

Олексій ТЮТЬКІН

(підпис)

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата _____

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

ОС «магістр»

(ступінь вищої освіти)

студенту Гончару Сергію Володимировичу

(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: «Вплив технології спорудження колонної станції на напружено-деформований стан її конструкції та гірського масиву»

Керівник роботи: Купрій Володимир Павлович, к.т.н., доцент

(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від «16» лютого 2024 р. № 157ст

2. Строк подання студентом роботи: «22» січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Результати аналізу інженерно-геологічних умов, конструкцій колонних станцій та дані, що отримані під час пошуку в Internet.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

Вступ. Розділ 1. Побудова розрахункової моделі конструкції колонної станції в програмному комплексі ЛІРА САПР. Розділ 2. Стадії спорудження колонної станції і їх моделювання в програмному комплексі ЛІРА САПР. Розділ 3. Вплив технології спорудження станції на напружено-деформований стан її конструкції та гірського масиву. Розділ 4. Моделювання напружено-деформованого стану балки-перемички.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Презентація за матеріалами досліджень, викладених в магістерській роботі (PowerPoint, 10...12 слайдів).

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ. Глава 1. Побудова розрахункової моделі конструкції колонної станції в програмному комплексі ЛІРА САПР.	02.09.2024- 29.09.2024	
2	Глава 2. Стадії спорудження колонної станції і їх моделювання в програмному комплексі ЛІРА САПР.	30.09.2024- 03.11.2024	
3	Глава 3. Вплив технології спорудження станції на напружено-деформований стан її конструкції та гірського масиву.	04.11.2024- 05.12.2024	
4	Глава 4. Моделювання напружено-деформованого стану балки перемички. Висновки. Оформлення ВКР.	04.11.2024- 09.12.2024	
5	Перевірка роботи на наявність збігів текстових (літерних і цифрових) символів та графічних фрагментів. Отримання відгуку.	09.12.2024- 12.01.2025	
6	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	15.01.2025	
7	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	22.01.2025	

Студент

(підпис)

Сергій ГОНЧАР

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

(підпис)

Володимир КУПРІЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

59 стор., 55 рис., 0 табл., 11 літературних джерел.

Об’єкт розробки – колонна станція метрополітену.

Мета роботи: визначити вплив технології спорудження колонної станції на напружено-деформований стан її конструкції та гірського масиву

Метод дослідження – метод скінченних елементів.

В магістерській роботі виконано аналіз літературних джерел, присвячених науково-технічній задачі визначення параметрів напружено-деформованого стану колонної станції, а також зміна параметрів напружено-деформованого стану колонної станції і гірського масиву під час її спорудження.

Розроблена скінченно-елементна модель колонної станції на різних етапах її спорудження.

Проведений чисельний аналіз конструктивних елементів станційної конструкції методом скінченних елементів по етапам будівництва. Визначено максимальні параметри напружено-деформованого стану колонної станції в залежності від технології спорудження.

Ключові слова: МЕТРОПОЛІТЕН, КОЛОННА СТАНЦІЯ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН, МЕТОД СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ.

ЗМІСТ

Вступ	7
Глава 1	9
Побудова розрахункової моделі колонної станції в програмному комплексі ЛІРА САПР	9
1.1 Геологічні умови.....	10
1.2. Конструкція станції.	11
1.3. Метод скінчених елементів ЛІРА-САПР.	13
1.4. Побудова розрахункової моделі колонної станції.	15
Глава 2. Стадії спорудження колонної станції і їх моделювання в програмному комплексі ЛІРА-САПР.....	24
2.1. Технологія спорудження та інженерні особливості колонної станції	24
2.2. Стадії спорудження і їх моделювання.....	27
Глава 3. Вплив технології спорудження станції на напружено- деформований стан її конструкції та гірського масиву.	33
Глава 3.1. Зміна напружено-деформованого стану конструкції станції та гірського масиву на різних стадіях її спорудження.	33
Глава 4. Моделювання напружено-деформованого стану балки- перемички на різних стадіях спорудження станції.....	48
4.1. Напружено-деформований стан балки-перемички на різних стадіях спорудження станції.	48
Висновки.....	56

ВСТУП

Будівництво колонних станцій є одним із найскладніших і найвідповідальніших видів робіт у метробудуванні. Це зумовлено необхідністю створення комплексу взаємопов'язаних інженерних споруд і виконання значного обсягу робіт в умовах щільної міської забудови. Однією з головних особливостей таких проєктів є необхідність розкриття великих виробок з мінімальним впливом на поверхневі структури. Для цього критично важливо дотримуватися технологічної послідовності, що дозволяє уникнути осадів, які можуть загрожувати стабільності існуючих будівель та інфраструктури.

Колонні станції будуються в містах, де через особливості геологічних умов або наявність інших інфраструктурних об'єктів прокласти тунелі на малій глибині є складним завданням. Особливої уваги потребують станції глибокого закладення. Через велику глибину та конструктивні особливості таких станцій обов'язковим є встановлення ескалаторів, що забезпечують ефективне та комфортне переміщення пасажирів між платформою та поверхнею. Крім того, архітектурні та планувальні рішення для таких об'єктів зазвичай передбачають компактність, оскільки простір обмежений.

Колонна станція глибокого закладення є ключовим елементом метрополітену. Її будівництво включає кілька важливих етапів: створення шахтного ствола, прокладання ескалаторних і перегінних тунелів, а також монтаж опорних конструкцій та платформи. Кожен з цих етапів потребує точного дотримання технічних норм і стандартів безпеки.

Складність будівництва, колонні станції відіграють важливу роль у транспортній системі великих міст. Вони забезпечують швидке переміщення пасажирів, суттєво скорочуючи час подорожей і дозволяючи обійти затори, характерні для наземного транспорту. Серед основних переваг метрополітену ефективного використання міського простору, зокрема в історичних районах або в зонах з цінною архітектурною спадщиною.

Проєктування станцій колонного типу потребує комплексного підходу.

Лінії метрополітену зазвичай прокладаються вздовж основних міських магістралей, а станції розташовуються в місцях із високим пасажиропотоком — на перехрестях вулиць, поблизу вокзалів, стадіонів, а також промислових зон. Важливою складовою є інтеграція підземного транспорту з системою наземного громадського транспорту, що дозволяє створювати зручні пересадки для пасажирів.

Конструктивна схема колонної станції полягає в поєднанні шляхових тунелів і розподільчого залу в єдину структуру. Завдяки такому підходу, на відміну від пілонних станцій, конструкція колонних станцій дозволяє ефективно використовувати простір та матеріали завдяки розташуванню тунелів ближче один до одного. Колони мають оптимальні розміри та розташування, що забезпечує рівномірний розподіл навантаження.

Будівництво колонних станцій часто здійснюється за допомогою збірних залізобетонних елементів. Така технологія передбачає поетапну проходку тунелів із одночасним монтажем постійних конструкцій. Спочатку будуються бокові тунелі з оправами і колонами, а потім центральний тунель. Такий підхід дозволяє значно скоротити терміни будівництва і підвищити точність робіт. Використання сучасних геотехнічних методів і матеріалів допомагає зменшити ризики, забезпечуючи стабільність конструкцій і довговічність станцій.

Діючими державними будівельними нормами (ДБН В.2.3-7:2018 МЕТРОПОЛІТЕНИ) тунелі, що споруджуються закритим способом, слід проектувати з урахуванням їх спільної роботи з оточуючим гірським масивом. А конструкції колонних станцій метрополітену, що споруджуються закритим способом при послідовному будівництві окремих станційних тунелів, слід перевіряти за розрахунковими схемами, що передбачають різні стадії напружено-деформованого стану конструкції та окремих її частин у процесі спорудження та гірського масиву.

Глава 1

Побудова розрахункової моделі колонної станції в програмному комплексі ЛІРА САПР

Багато років для розрахунку тунельних конструкцій використовувався метод сил, у якому конструкція навантажувалась розрахунковим навантаженням, що заміняло дію гірського масиву і частіше усього конструкція розраховувалась вже на стадії експлуатації не враховуючі стадії спорудження на яких конструкції мали більші навантаження ніж на стадії експлуатації. Також розрахунки тунельних оправ методом сил мають багато припущень, які спрощують розрахунки, і, як вважається, зменшують їх точність, тому для роботи використовується програмний комплекс ЛІРА САПР.

Програмний комплекс ЛІРА САПР є інструментом для створення та аналізу розрахункових моделей різноманітних будівельних та інженерних конструкцій. Побудова розрахункової моделі колонної станції є одним завдань, яке дозволяє оцінити міцність та стійкість конструкції під дією різноманітних навантажень.

Завдання побудови розрахункової моделі містить кілька етапів. Насамперед, визначається геометрія та розміри конструкції, матеріальні властивості колон та їх сполучень. На основі заданих параметрів створюється розрахункова модель в середовищі ЛІРА САПР, що дозволяє симулювати поведінку системи при дії реальних навантажень.

Основними етапами роботи є моделювання геометрії, визначення узгруповань та навантажень, задання граничних умов та аналіз отриманих результатів. Зокрема, важливо оцінити напруження, деформації та потенційні точки руйнування, що дає змогу вдосконалити конструкцію ще на етапі проектування. Додатково, використання ЛІРА САПР дає змогу провести оптимізацію конструкції шляхом варіативного аналізу. Це означає, що можна швидко змінювати параметри моделі та спостерігати, як ці зміни впливають

на стійкість та надійність системи. Таким чином, інженери отримують можливість знаходити найбільш ефективні рішення. Побудова розрахункової моделі колонної станції з використанням ЛПРА САПР є ключовим етапом у забезпеченні безпеки та довговічності конструкції. Цей підхід дозволяє заздалегідь врахувати всі можливі сценарії навантаження та мінімізувати ризики, що особливо важливо у сучасному будівництві.

1.1 Геологічні умови

У результаті інженерно-геологічних вишукувань встановлена: геологічна будівля масиву у місці розташування станції, інженерно-геологічна характеристика ґрунтів осадових порід і скельного масиву, гідрогеологічні умови і ряд загальних.

Геологічна будова ділянки представлена комплексом осадових чверткових відкладень які залягають на архей-протерозойському кришталевому фундаменті Українському щиті.

Сучасні відкладення представлені насипними ґрунтами – асфальтовим покриттям з дерев'яно - щебенистою підсипкою, піски кварцові, темно-сірі, пілуваті, з включенням уламків червоної цегли, доменного шлаку, щебеню та іншого будівельного сміття до 10-20% потужністю 2.2-4.8м.

Піски кварцові, жовтувато-сірі, мілкі, однорідні, середньої щільності, насичені водою, з включенням невеликої кількості прошарків суглинків туго пластичних та пісків пілуватих.

Середньо-чверткові відкладення представлені неоднорідними гравійно-гальковими відкладеннями жовто-сірими, неоднорідними, щільними, насиченими водою, з піщаним заповнювачем до 30-40%, з валунами скельних порід та прошарками суглинків жовто-бурих, туго пластичних, потужністю 0.8-5,6м.

Четвертинні утворення залягають на протезой-мезозойській корі вивітрювання магматичних порід, представлені дисперсною і уламковою зонами.

Дисперсна зона кори вивітрювання скельних порід (під зона глинистих продуктів розкладання) - каоліни первинні, білі, сірувато-білі, тверді, з включенням зерен кварцу від 20-25% до 40-50%, з охристими п'ятнами гідроокисів заліза, потужністю 1,2-5,7м.

Уламкова зона кори вивітрювання скельних ґрунтів – древно–щебневі ґрунти, сірі, неоднорідні, з пісчано - глинистим заповнювачем змістом 30-40%, каолінізовані, водонасичені, потужністю 1,6-2,4м.

Фундаментом для більш молодших порід служать архей-протезойські породи, представлені плагіо-гранітами сірими, світло-сірими, іноді розувато-сірими, дрібно–середньозернистими, у кровлі крупнозернистими, масивної структури, від дуже сильно тріщинуватих до сильно тріщинуватих, слабо вивітрені, середньої міцності та міцні, обводнені, не разм'ягчені.

Колонна станція споруджується у скельному масиві, тому в роботі четвертинні відкладення верхньої зони замінюються середніми значеннями характеристик, гранітний масив має тріщинувату структуру.

1.2. Конструкція станції

Колонна станція із залізобетонних блоків складається зі збірних кілець оправи та залізобетонних колон, які в цілому визначають та забезпечують необхідну жорсткість і розподіл навантаження. Блоки збірної оправи мають спеціальні пази для чіткого позиціонування в просторі та з'єднуються між собою за допомогою бетонного розчину або спеціальних закладних деталей, які забезпечують їхню міцну та надійну фіксацію.

За оправу виконується нагнітання розчину для заповнення пустот між нею та ґрунтом для рівномірної передачі навантаження від ґрунтового масиву. Для герметизації стиків між блоками оправи застосовуються гідроізоляційні матеріали, що запобігають проникненню вологи.

Зазвичай кільця оправ метрополітену розбивають на блоки певних типорозмірів та мають унікальну форму (рис. 1):

- фігурний елемент («ф»), що забезпечує опору середнього тунелю та

зв'язок його з оправою.

- нормальні блоки («н»), називають елементи що мають однаковий центральний кут;
- замковий блок («з»), кут якого зазвичай приймають в межах 6-10°;
- суміжний блоки («с»), які виступають допомагають зв'язати нормальні та замкові блоки;
- лотковий блок («л»), що може прийматись рівним куту нормального елемента.

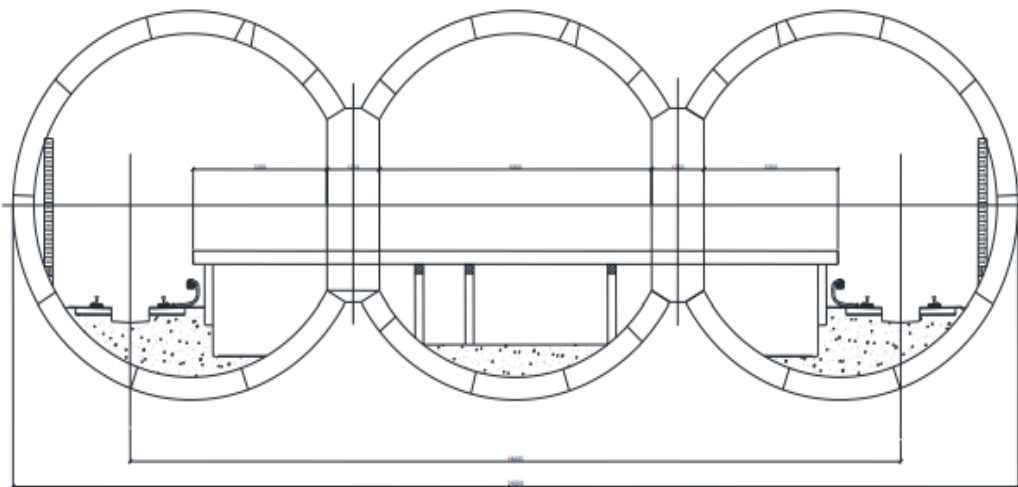


Рисунок 1.1 – Колонна станція із збірного залізобетону

Конструктивні особливості оправ із блоків суцільного перерізу залежать від типу з'єднань між кільцями, виду поздовжніх стиків і кількості типорозмірів блоків у кільці. Кільце оправи з болтовими з'єднаннями між кільцями може включати три типорозміри блоків («н», «з», «с») або чотири («н», «з», «с», «л»). Вибір цих параметрів визначається розмірами тунелю, геологічними умовами та методом будівництва.

Колони виконуються зі збірного залізобетону та розташовуються з визначеним кроком, який відповідає проектним розрахункам для рівномірного розподілу навантажень. Положення кінців колон виконується в місцях пересічення сусідніх кілець із попередньо підготовленими ділянками для їхнього об'єднання у спільний вузол. Для спирання колон в основі

виконується спеціальні залізобетонні стакани, які забезпечують більшу стійкість та краще запобігають просіданню.

Внутрішні поверхні стін та перекриттів додатково оброблені гідроізоляційними та оздоблювальними матеріалами, якщо це передбачено проектом. Інженерні комунікації прокладаються в спеціальних каналах або технічних нішах, передбачених у конструкції.

1.3. Метод скінчених елементів ЛІРА-САПР

Метод скінчених елементів (МСЕ) – числовий метод для розв'язання задач механіки, зокрема для аналізу конструкцій, що піддаються різноманітним навантаженням (деформації, напруги, температурні зміни тощо). Даний метод дозволяє наближено розв'язувати складні інженерні задачі, розбиваючи їх на більш прості елементи, що згодом обробляються за допомогою математичних моделей.

Реалізація МСЕ включає наступні основні кроки:

1. Дискретизація моделі. Розділення моделі конструкції на багато малих простих елементів, які можуть виглядати як стрижні, пластини або об'ємні 3D елементи. У свою чергу основні форми пластинчастих елементів є трикутник, квадрат та інші форми чотирикутників. Об'ємні скінчені елементи мають більше форм, базовими які виступають піраміда, куб та їм подібні.

2. Вибір математичної моделі. Для кожного елемента визначається відповідна математична модель, яка описує фізичні властивості матеріалу (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, густина тощо) та умови навантаження. Моделі можуть включати рівняння для розрахунку напружень, деформацій, температурних полів тощо.

3. Формулювання системи рівнянь. Після дискретизації всі елементи конструкції з'єднуються в одну систему рівнянь. Це система лінійних або нелінійних рівнянь, яка описує поведінку всієї конструкції в умовах заданих навантажень.

4. Рішення системи рівнянь. Після формулювання системи рівнянь її

розв'язують за допомогою чисельних методів, таких як метод Гауса, метод Крамера або методи ітераційного розв'язування для великих систем (наприклад, методи Гаусса-Зейделя або сполучених градієнтів).

5. Аналіз результатів. Після того як система рівнянь розв'язана, отримують результати для переміщень вузлів, деформацій, напружень тощо. Далі проводиться аналіз цих результатів для оцінки безпеки та ефективності конструкції. За необхідності можна виконати додаткові перевірки, такі як аналіз на тріщини або перевірка на втому матеріалу.

Метод скінчених елементів, що реалізований в програмі ЛІРА-САПР, не є виключенням та працює за тими ж основними принципами наведеними вище. Даний програмний комплекс є одним із найбільш потужних і популярних інструментів для розрахунку та аналізу будівельних конструкцій, із яких тунелі та метрополітени не є виключенням.

Як і в більшості подібних програм, які реалізують метод МСЕ, при моделюванні має враховуватись одне із головних умов – взаємодія кінцевих елементів між собою обов'язково виконується через їхнє об'єднання у спільних вузлах (рис. 2).

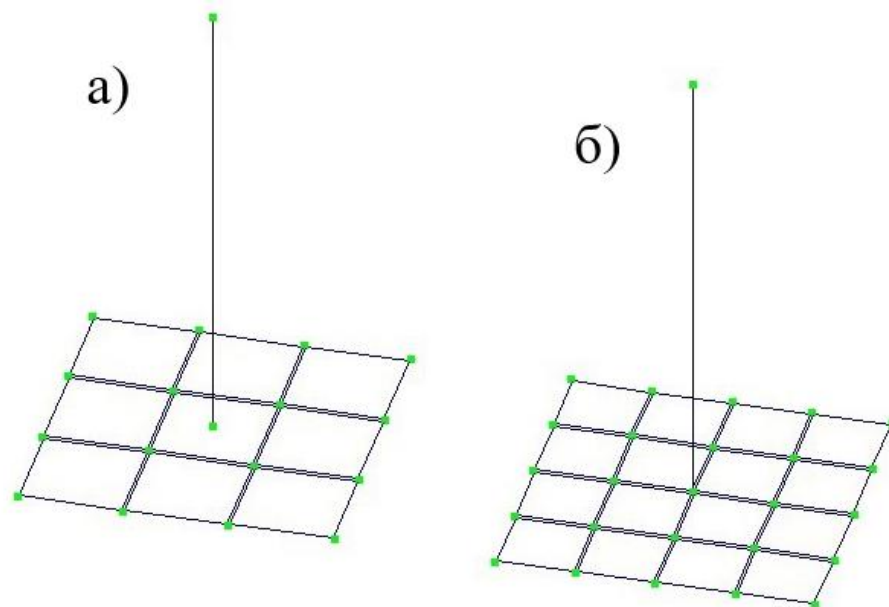


Рисунок 1.2 – Об'єднання елементів колони та плитного фундаменту:

- а) неправильне об'єднання елементів;
- б) найбільш правильне об'єднання елементів

Існує ще одне обмеження на роздрібнення елементів що стосується пластинчастих елементів. ЛІРА-САПР не обробляє, вважає «дефектними» пластинчасті КЕ, в яких радіус описаного кола більш ніж у 50 разів перевищує радіус вписаного кола. Це виключає можливість використання трикутних пластинчастих КЕ з дуже гострими кутами, або прямокутних у яких один розмір значно менший за інший, приблизно більш ніж у 50 разів.

Також кожна розрахункова модель має якимось чином спиратися на докільця, тому її переміщення потрібно обмежити. Ці обмеження називаються граничними умовами. У ЛІРА-САПР граничні умови, що застосовуються до вузлів, називають зв'язками. Кожен зв'язок забороняє переміщення вузла по одному з шести напрямків у глобальній системі координат: 3 лінійних переміщення, та 3 кутових переміщення.

Програмний комплекс ЛІРА-САПР має безліч інструментів для моделювання будівельних конструкцій, що забезпечує повну гнучкість у налаштуванні як геометричних параметрів так і властивостей матеріалів в різних ситуаціях. Однак, для досягнення коректних результатів необхідно ретельно перевіряти модель, оскільки некоректно задані параметри або обмеження можуть призвести до значних помилок у розрахунках або неможливості його виконання. Також програмне забезпечення ЛІРА-САПР схвалено в Україні для виконання розрахунків будівельних конструкцій та має всі необхідні інструменти для створення та обчислення задачі в рамках даної магістерської роботи.

1.4. Побудова розрахункової моделі колонної станції

Побудова моделі в програмному комплексі ЛІРА-САПР починається зі створення головних несучих елементів станції та оточуючого масиву ґрунтів за допомогою кінцевих елементів (КЕ) різного виду та типу. Даний метод розрахунку є однойменним та ґрунтується на уявному представленні суцільного тіла у вигляді сукупності окремих скінченних елементів, що взаємодіють між собою в скінченному числі точок, які називаються вузлами.

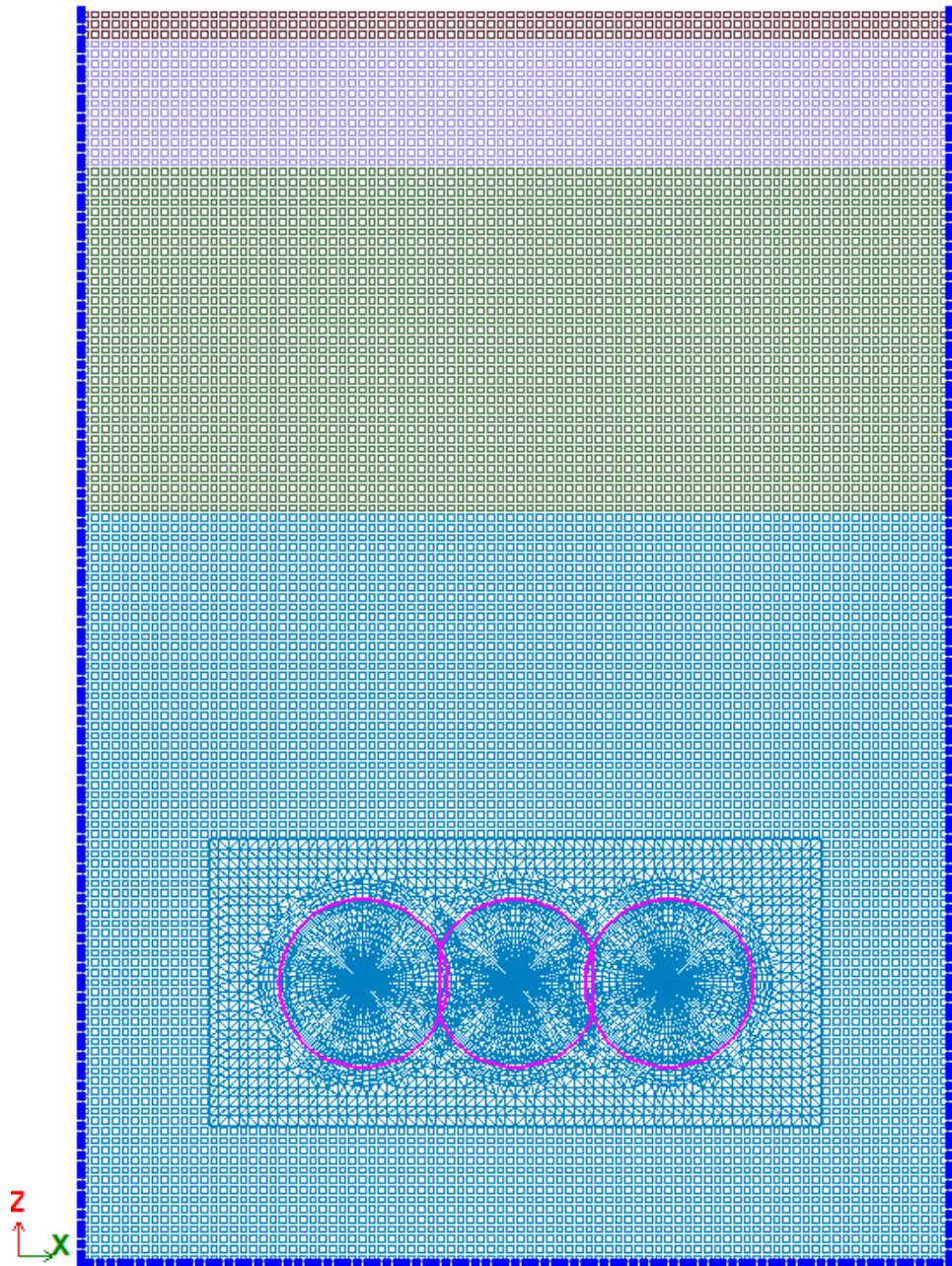


Рисунок 1.3 – Скінченно-елементна модель колонної станції: синій колір – масив ґрунту; рожевий колір – оправи та колони станції

Процес отримання побудови моделі та отримання результуючої інформації умовно можна розділити на чотири етапи:

1. Перехід від реальної конструкції до механічної або математичної її моделі.

2. Перехід від неперервної механіко-математичної моделі до дискретної моделі або розрахункової схеми, пристосованої до можливостей конкретного інструменту обчислень.

3. Опис розрахункової схеми доступними засобами вибраного програмного забезпечення, проведення самого розрахунку та отримання чисельних результатів розрахунку.

4. Інтерпретація та аналіз результатів розрахунку і отримання результуючої інформації.

На рисунку 1 показано повну підготовлену розрахункову схему станції, де ґрунтовий масив виконано пластинчастими КЕ прямокутної та трикутної форми, а елементи конструкції тунелю зі стрижневих КЕ.

Розрахункова схема включає одразу всі елементи тунелю та ґрунтового масиву, які мають бути змонтовані або демонтовані на стадіях будівництва станції тунелю що описано далі.

Оскільки ділянка ґрунту в реальності має продовження з боків та в глиб, було додано обмеження переміщення ґрунту з країв моделі: знизу закріплення по вісям X, Y, Z та з боків по вісям X, Y. Наступним кроком було створено та призначено перерізи елементів та їхні властивості матеріалів. Ділянка масиву складається з чотирьох шарів ґрунту – рослинний ґрунт, пісковик, пісок, граніт. Матеріал конструкції станції складається з бетону класу C20/25 (B25).

Для більш наближеного відображення поведінки ґрунту, було виконано заміну типів кінцевих елементів ґрунту на нелінійні, а саме на тип 281 та 282 для прямокутних та трикутних пластин відповідно. Призначені характеристики матеріалів показано на рисунках 1.4-1.9.

Опис заданих параметрів ґрунту за рисунком 1.4, де:

- $E = 5000$ кПа – модуль деформації ґрунту; визначає здатність ґрунту змінювати свою форму під дією навантаження; вимірюється у мегапаскалях і впливає на несучу здатність основи;

- $\nu = 0.2$ – коефіцієнт Пуассона; співвідношення поперечних і поздовжніх деформацій ґрунту змінюється в межах від 0 до 0,5.

- $H = 1000$ мм – товщина (в даному випадку погонний метр); глибина шару ґрунту

- $R_o = 18$ кПа – питома вага; маса ґрунту в одиниці об'єму.

- σ_p – граничне напруження стиску; максимальне напруження, яке ґрунт може витримати без руйнування.

- $C = 1$ кПа – зчеплення; здатність частинок ґрунту утримуватись разом (вимірюється у паскалях, Па).

- R_t – граничне напруження на розтяг; максимальна сила, яку ґрунт витримує при розтягуванні.

- $F_i = 22^\circ$ – кут внутрішнього тертя; опір зрушенню ґрунту, вимірюється у градусах.

- $K_e = 3$ – коефіцієнт переходу до модуля деформації ґрунту за гілкою вторинного навантаження. характеризує поведінку ґрунту під повторними навантаженнями.

Рисунок 1.4 – Задані параметри властивості поверхневий шар ґрунту

Опис заданих параметрів ґрунту за рисунком 1.5, де:

- $E = 15000$ кН/м² – модуль деформації ґрунту; жорсткість піску і його здатність деформуватись під навантаженням .

- $\nu = 0.2$ – коефіцієнт Пуассона; співвідношення поперечних і поздовжніх деформацій піску.

- $H = 1000$ мм – товщина (в даному випадку погонний метр); глибина шару піску

- $R_o = 18.8$ кН/м³ – питома вага; маса ґрунту в одиниці об'єму (вимірюється у кілоньютонах на кубічний метр, кН/м³).

- σ_p – граничне напруження стиску; максимальне напруження, яке ґрунт може витримати без руйнування.

- $C = 3$ кН/м² – зчеплення; здатність частинок ґрунту утримуватись разом (вимірюється у паскалях)

- R_t – граничне напруження на розтяг; максимальна сила, яку ґрунт витримує при розтягуванні.

- $F_i = 26^\circ$ – кут внутрішнього тертя; опір зрушенню ґрунту, вимірюється у градусах.

- $K_e = 3$ – коефіцієнт переходу до модуля деформації ґрунту за гілкою вторинного навантаження. характеризує поведінку ґрунту під повторними навантаженнями.

6. KE 281-284 чисельний (Soil. Шар 2. Пісок)

E	15000	кН/м ²	C	3	кН/м ²
V	0.2		Rt	0	кН/м ²
H	1000	мм	Fi	26	°
Ro	18.8	кН/м ³	Ke	3	
σ_p	0	кН/м ²			

Врахування попереднього n

Коментар: Soil. Шар 2. Пісок

Колір:

OK ?

Рисунок 1.5 – Задані параметри властивості піску

Опис заданих параметрів ґрунту за рисунком 1.6, де:

- $E = 7000$ кН/м² – модуль деформації ґрунту; жорсткість пісковика

- $\nu = 0.2$ – коефіцієнт Пуассона; співвідношення поперечних і поздовжніх деформацій пісковику.

- $H = 1000$ мм – товщина (в даному випадку погонний метр); глибина шару пісковику

- $R_o = 18.8$ кН/м³ – питома вага; вага пісковику на одиницю об'єму (кН/м³).

- σ_p – граничне напруження стиску; максимальне навантаження, яке пісковику може витримати.

- $C = 25$ кН/м² – зчеплення; властивість пісковику утримувати частинки разом

- R_t – граничне напруження на розтяг; максимальна сила, яку пісковику витримує при розтягуванні.

- $F_i = 18^\circ$ – кут внутрішнього тертя; опір пісковику зрушенню (градуси).

- $K_e = 3$ – коефіцієнт переходу до модуля деформації ґрунту за гілкою вторинного навантаження. Характеризує поведінку пісковику під повторними навантаженнями.

4. KE 281-284 чисельний (Soil. Шар 3. Пісков... X

E	7000	кН/м ²	C	25	кН/м ²
V	0.2		Rt	0	кН/м ²
H	1000	мм	Fi	18	°
Ro	18.8	кН/м ³	Ke	3	
σ_p	0	кН/м ²			

Врахування попереднього n

Коментар: Soil. Шар 3. Пісковику

Колір: ■

OK ?

Рисунок 1.6 – Задані параметри властивості пісковику

Опис заданих параметрів ґрунту за рисунком 1.7, де:

- $E = 41e + 006 \text{ кН/м}^2$ – модуль деформації ґрунту; жорсткість граніту
- $\nu = 0.2$ – коефіцієнт Пуассона; співвідношення поперечних і поздовжніх деформацій граніту.
- $H = 1000 \text{ мм}$ – товщина (в даному випадку погонний метр); глибина шару граніту
- $R_o = 18.8 \text{ кПа}$ – питома вага; вага граніту на одиницю об'єму.
- σ_p – граничне напруження стиску; максимальне навантаження, яке граніт витримує.
- $C = 339.2 \text{ кН/м}^2$ – зчеплення; здатність граніту утримуватись разом
- R_t – граничне напруження на розтяг; максимальна сила, яку граніт витримує при розтягуванні.
- $F_i = 57^\circ$ – кут внутрішнього тертя; опір граніту зрушенню (градуси).
- $K_e = 5$ – коефіцієнт переходу до модуля деформації ґрунту за гілкою вторинного навантаження. Зміна властивостей граніту під повторними навантаженнями.

5. КЕ 281-284 чисельний (Soil. Шар 4. Граніт) ✕

E <input type="text" value="41e+006"/> <small>кН/м²</small>	C <input type="text" value="339.2"/> <small>кН/м²</small>
V <input type="text" value="0.2"/>	Rt <input type="text" value="0"/> <small>кН/м²</small>
H <input type="text" value="1000"/> <small>мм</small>	Fi <input type="text" value="57"/> <small>°</small>
Ro <input type="text" value="26"/> <small>кН/м³</small>	Ke <input type="text" value="5"/>
σ_p <input type="text" value="0"/> <small>кН/м²</small>	

Врахування попереднього н

Коментар
Soil. Шар 4. Граніт

Колір

Рисунок 1.7 – Характеристики граніту

Опис заданих параметрів елементів станції за рисунком 1.8, де:

- $E = 3e + 007 \text{ кН/м}^2$ – модуль пружності матеріалу; датність матеріалу відновлювати форму після навантаження

- $B = 1000 \text{ мм}$ та $H = 500 \text{ мм}$ геометричні розміри елемента; форма та розміри конструктивного елемента у мм.

- $R_0 = 24.5 \text{ кН/м}^3$ – питома вага матеріалу. Маса матеріалу на одиницю об'єму (кН/м^3).

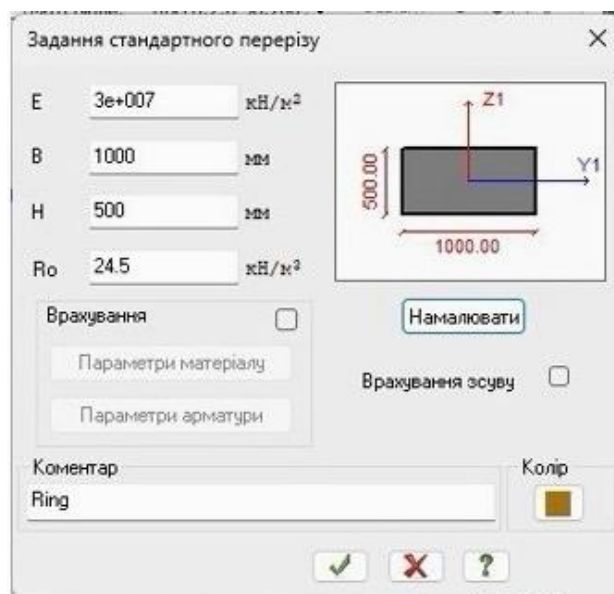


Рисунок 1.8 – Задані параметри перерізу та властивостей матеріалу оправи

Опис заданих параметрів елементів станції за рисунком 1.9, де:

- $E = 3e + 007 \text{ кН/м}^2$ – модуль пружності матеріалу; стійкість матеріалу до деформації

- $B = 1000 \text{ мм}$ та $H = 1000 \text{ мм}$ геометричні розміри елемента. Форма та розміри конструктивного елемента у мм.

- $R_0 = 24.5 \text{ кН/м}^3$ – питома вага матеріалу. Вага матеріалу на одиницю об'єму (кН/м^3).

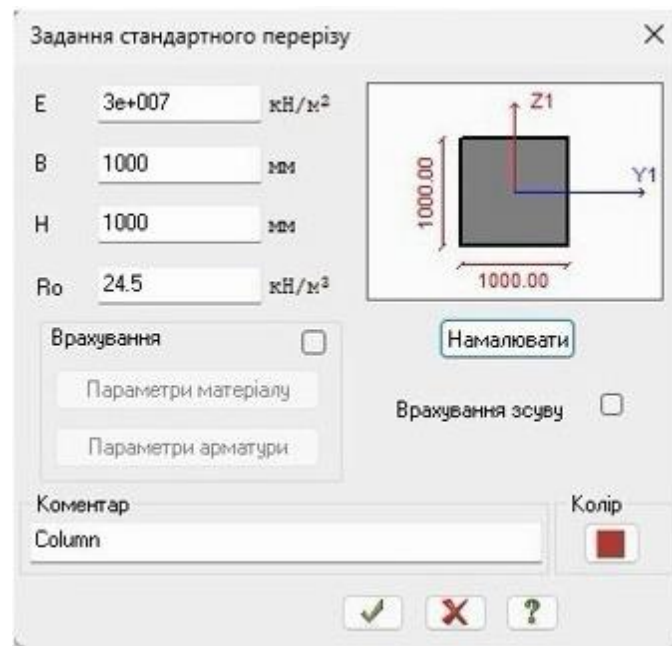


Рисунок 1.9 – Задані параметри перерізу та властивостей матеріалу колон

Побудову основної розрахункової моделі на даному етапі вважається закінчено. Наступним кроком її налаштування є врахування стадій спорудження станції тунелю, що описується у главі 2.

Глава 2. Стадії спорудження колонної станції і їх моделювання в програмному комплексі ЛІРА-САПР

Будівництво колонної станції є складним і багатоступінчастим процесом, що вимагає високої точності та уваги до деталей на кожному етапі. Починаючи з ретельного проектування та розрахунків, закінчуючи процесами введення станції в експлуатацію. На етапах будівництва особливу увагу слід приділяти точності та якості установки оправи та колон, що може критично вплинути на подальші етапи спорудження та обрані рішення для зведення станції.

2.1. Технологія спорудження та інженерні особливості колонної станції

Будівництво станцій підземним способом належить до найбільш складних завдань у метробудуванні, оскільки воно передбачає створення комплексу взаємопов'язаних споруд і розкриття виробки великого перерізу. Роботи виконують у такій послідовності, щоб уникнути просідання поверхні землі та пошкодження підземних комунікацій і будівель, розташованих над станцією. Зсуви ґрунту та просідання покрівлі виробки повинні бути мінімальними, що значно легше досягти в стійких, зокрема скельних, ґрунтах.

Колонна станція є єдиною просторовою конструкцією, що складається з численних елементів різної форми й матеріалами. Технологічна послідовність будівництва має забезпечувати спільну роботу всіх частин конструкції як у поперечному, так і в поздовжньому напрямках. Особливу увагу приділяють одночасному включенню в роботу колон одного поперечного перерізу. Також необхідно мінімізувати зміщення опорних вузлів у зонах сполучення середнього та бокового тунелів. Будь-яке відхилення від заданої технології може призвести до деформації конструкції та зміщення ґрунту.

Для всіх станцій глибокого закладення діє єдине правило – розкриття

виробок здійснюється в певній послідовності. Спочатку проходять бокові тунелі станції, встановлюють тимчасове кріплення, а потім монтують постійні оправи. Проходка бокових тунелів виконується буро-вибуховим способом із розробкою породи на повний переріз. Тимчасове кріплення здійснюють за допомогою анкерних систем, сітки та набризкбетону, залежно від тріщинуватості та стійкості ґрунту.

Після цього починається проходка центрального тунелю з подальшим облаштуванням його оправи. Будівництво середнього тунелю розпочинають після завершення монтажу конструкцій бокових тунелів на довжину щонайменше 30 метрів. Проходку центрального тунелю виконують уступним способом, розробляючи колотну частину зустрічними забоями з двох торців станції. Ґрунт транспортують по жолобах через отвори між колонами й завантажують у состави, розташовані в бокових тунелях. Склепіння монтують секціями довжиною 2-4 метри, спираючись на рандбалки бокових тунелів. Залізобетонні блоки доставляють по бокових тунелях і за допомогою кранів подають до блокоукладальника.

Монтаж зворотного склепіння в середньому тунелі виконують із певним відставанням, яке визначається залежно від інженерно-геологічних умов.

На рисунку 1 представлено послідовність виконання робіт із проходки станційних тунелів, поділену на етапи:

- етап 1. Виконання проходки лівого бокового тунелю. Породу розробляють буро-вибуховим способом, одночасно встановлюючи тимчасове кріплення, яке складається з анкерів і шару набризкбетону. За потреби використовують сітку або арки. Після невеликого відставання від основних робіт монтують постійну оправу із залізобетонних блоків і встановлюють колони;

- етап 2. Проходка правого бокового тунелю. Технологія аналогічна першому етапу: буро-вибуховий спосіб для розробки породи, тимчасове кріплення у вигляді анкерів і набризкбетону, а також додаткове посилення сіткою або арками за потреби. Далі монтують постійну залізобетонну оправу

з установкою колон;

- етап 3. Розробка верхньої калотної частини центрального тунелю. Використовується буро-вибуховий метод із встановленням тимчасового кріплення (анкерів і набризкбетону). У разі підвищеної тріщинуватості порід додають сітку та арки, Виконується монтаж склепінчастої частини постійної оправи з опором на фігурні елементи бокових станційних тунелів;

- етап 4. Проходка середньої частини центрального тунелю. Розробка породи буро-вибуховим способом проводиться на безпечній відстані, що забезпечує можливість виконання буро-вибухових робіт і демонтаж частини оправи бокових станційних тунелів;

- етап 5. Виконання проходки нижньої частини центрального тунелю. Породу розробляють буро-вибуховим способом, а також монтують зворотне склепіння;

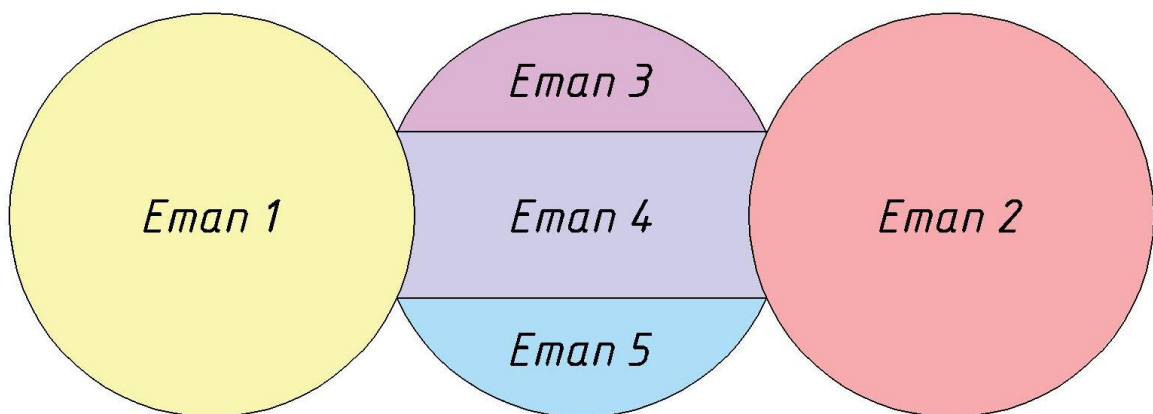



Рисунок 2.1 – Етапи розробки ґрунтового масиву при спорудженні станційних тунелів

Фінішні роботи, такі як нанесення гідроізоляції, оздоблення і тестування конструкцій, забезпечують не лише естетичний вигляд, а й гарантують відповідність всім технічним вимогам. Успішне завершення будівництва залежить від високої кваліфікації спеціалістів і ретельного контролю на всіх етапах, що дозволяє створити надійну та безпечну інфраструктуру для подальшої експлуатації станції.

2.2. Стадії спорудження і їх моделювання

Кожна стадія будівництва тунелю викликає певні зміни у напружено-деформованому стані в головних несучих елементах станції та оточуючому масиві ґрунту. Такі зміни можуть викликати в них накопичення додаткових напружень, що в свою чергу провокує обвалення ґрунту під час монтажу оправи або руйнування станції. Для врахування подібних ефектів виконано відповідне розділення обчислення моделі за головними стадіями будівництва станції.

Для створення стадій будівництва попередньо визначено які саме елементи моделі та на яких етапах мають бути видалені (демонтовані) або додані (змонтовані) до моделі під час обчислень. Після чого, на стадіях було призначено навантаження власної ваги до елементів що монтуються.

Процес створення стадій у ПК «ЛІРА» відбувається на вкладці «Аналіз» та функцію «Стадії» . У відкритому вікні, як показано на рисунку 2.2, за позицією 1 виконується додавання нової стадії монтажу та за позицією 2, на вкладці «Стадії», додається список елементів що монтуються та демонтуються.

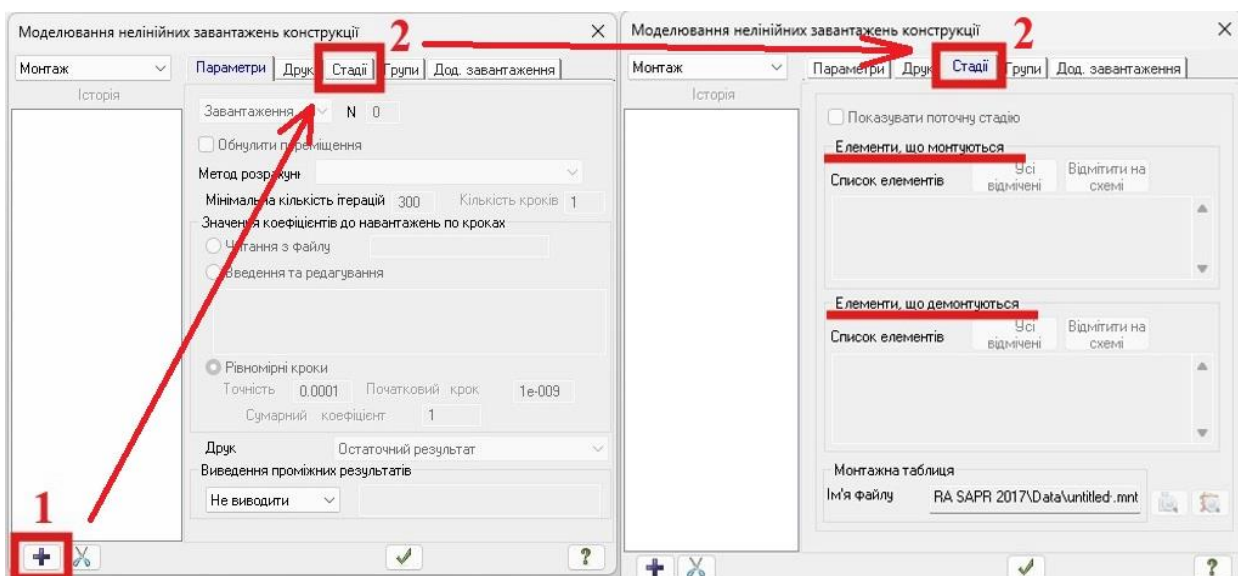


Рисунок 2.2 – Кроки створення стадій монтажу конструкції у ПК Ліра

Отже, у підсумку було створено наступні шість стадій:

Стадія 1. Виконується обчислення початкового стану ґрунту без будь-якого будівельного втручання. Додатково, перед наступною стадією (стадією будівництва) застосоване обнуління результатів переміщення задля отримання відносних значень переміщень саме від впливу будівництва станції. (рис.2.3)

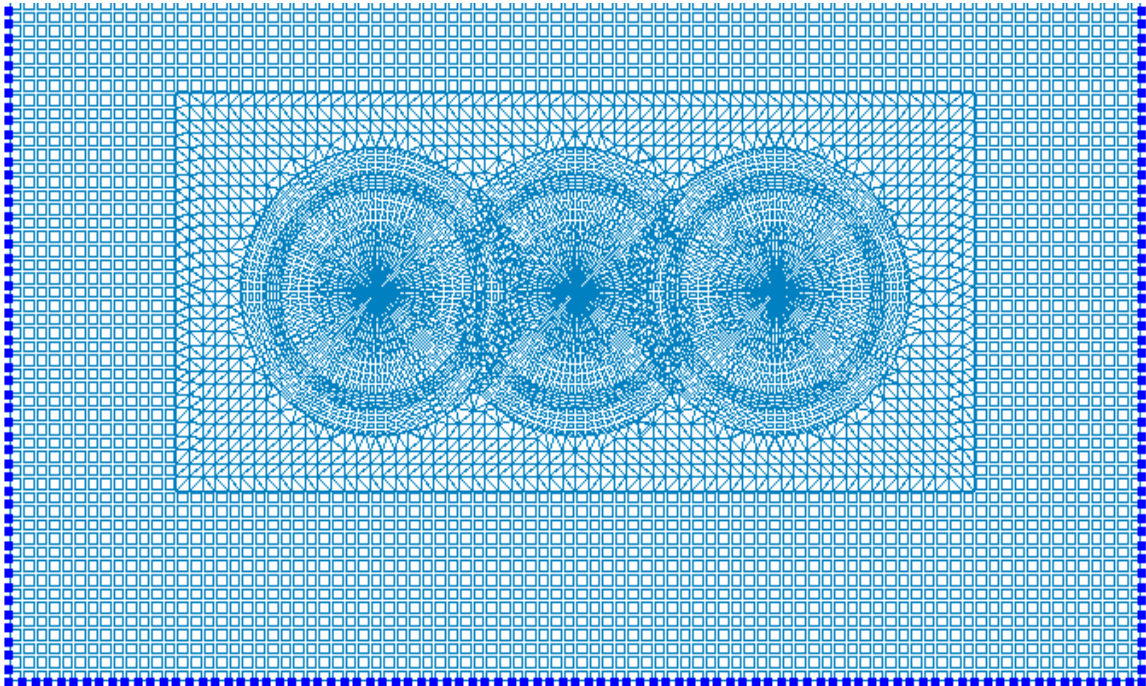


Рисунок 2.3 – Скінченно-елементна модель на першій стадії обчислення моделі

Стадія 2 – Повністю розробляється і прибирається ґрунт в зоні першого крайнього станційного тунелю та виконується монтаж всього кільця оправи (рис 2.4).

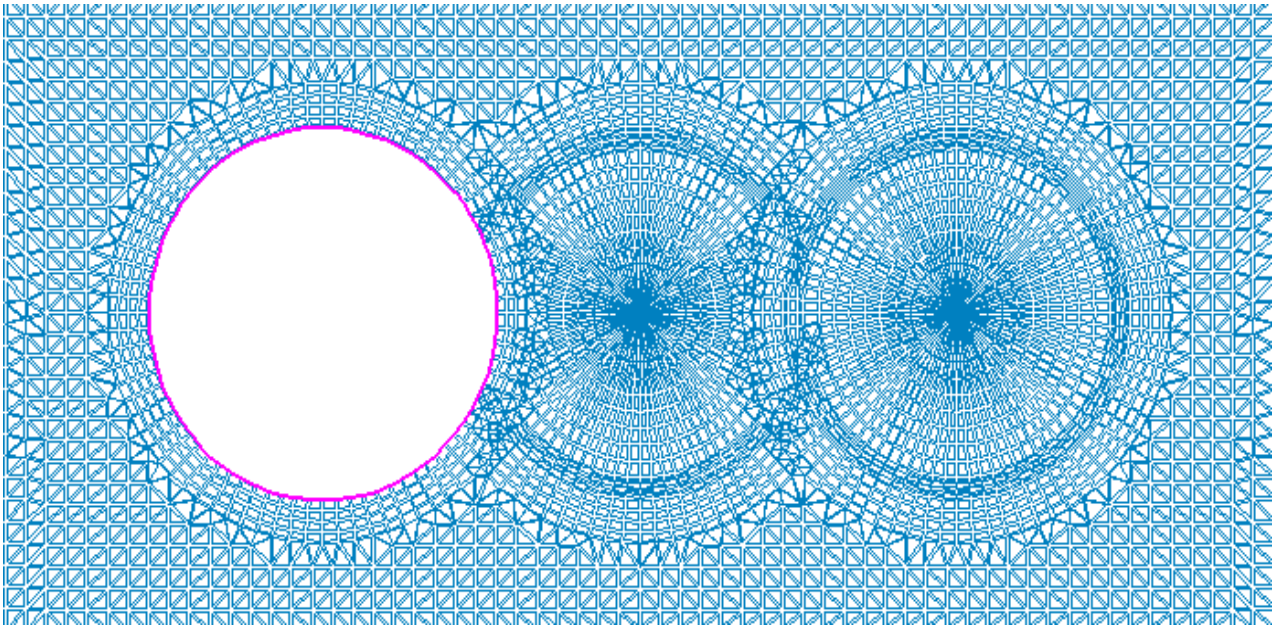


Рисунок 2.4 – Скінченно-елементна модель другої стадії обчислення моделі

Стадія 3 – Виконується монтаж колон до кільця оправи першого крайнього станційного тунелю (рис. 2.5).

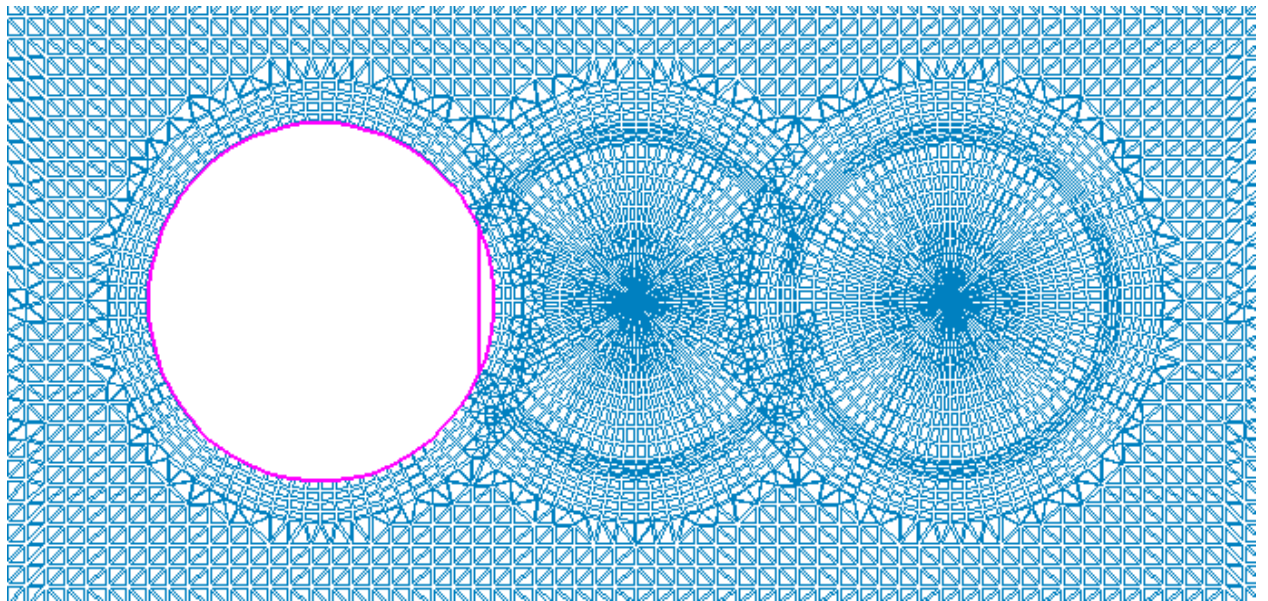


Рисунок 2.5 – Скінченно-елементна модель третьої стадії обчислення моделі

Стадія 4 – Повністю прибирається ґрунт в зоні другого крайнього станційного тунелю та виконується монтаж усієї оправи (рис. 2.6).

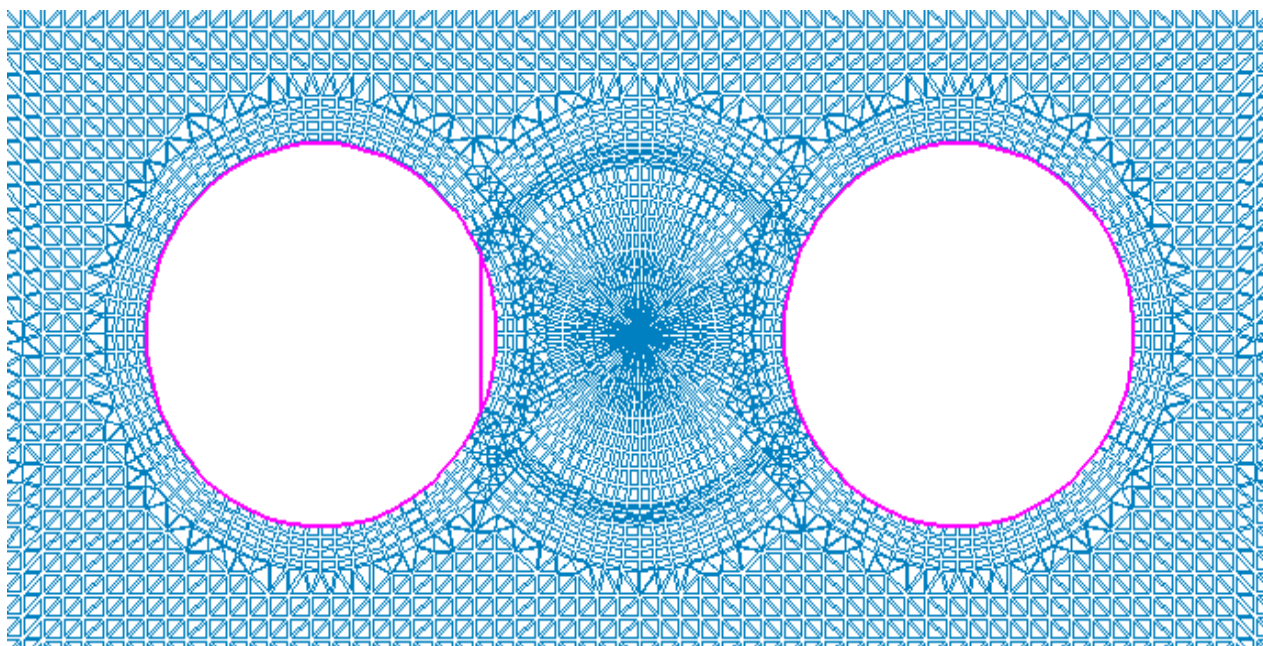


Рисунок 2.6 – Скінченно-елементна модель четвертої стадії обчислення моделі

Стадія 5 – Виконується монтаж колони до кільця оправи другого крайнього станційного тунелю (рис. 2.7).

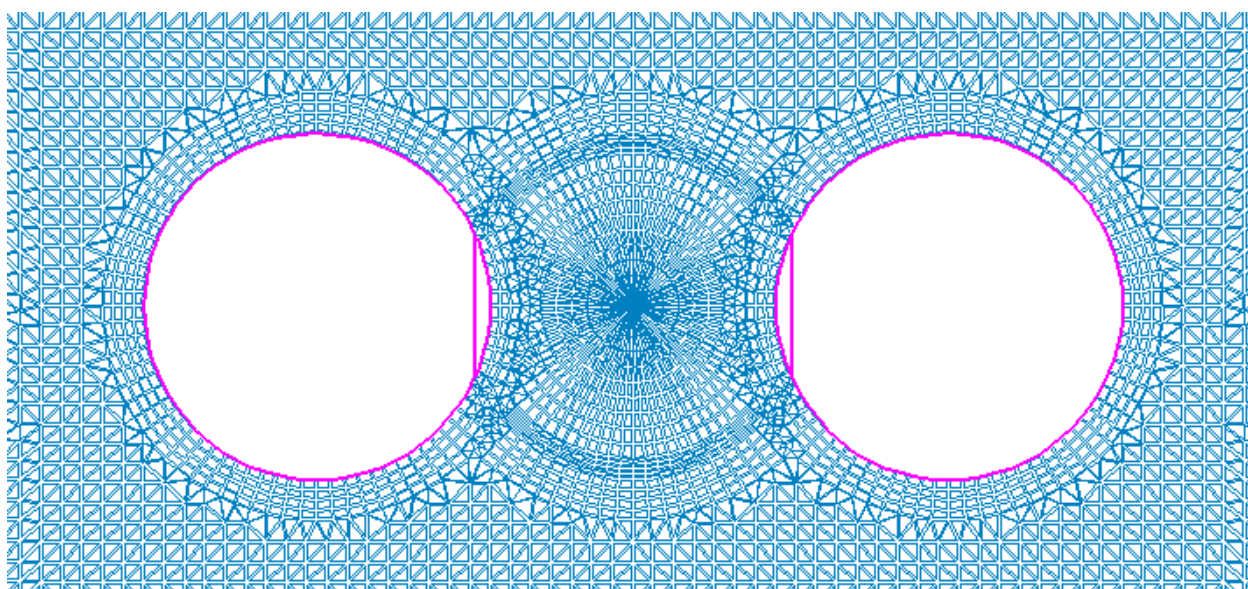


Рисунок 2.7 – Скінченно-елементна модель п'ятої стадії обчислення моделі

Стадія 6 – Прибирається ґрунт верхнього уступу на місці центрального тунелю. Виконується монтаж оправи верхнього склепіння (рис. 2.8).

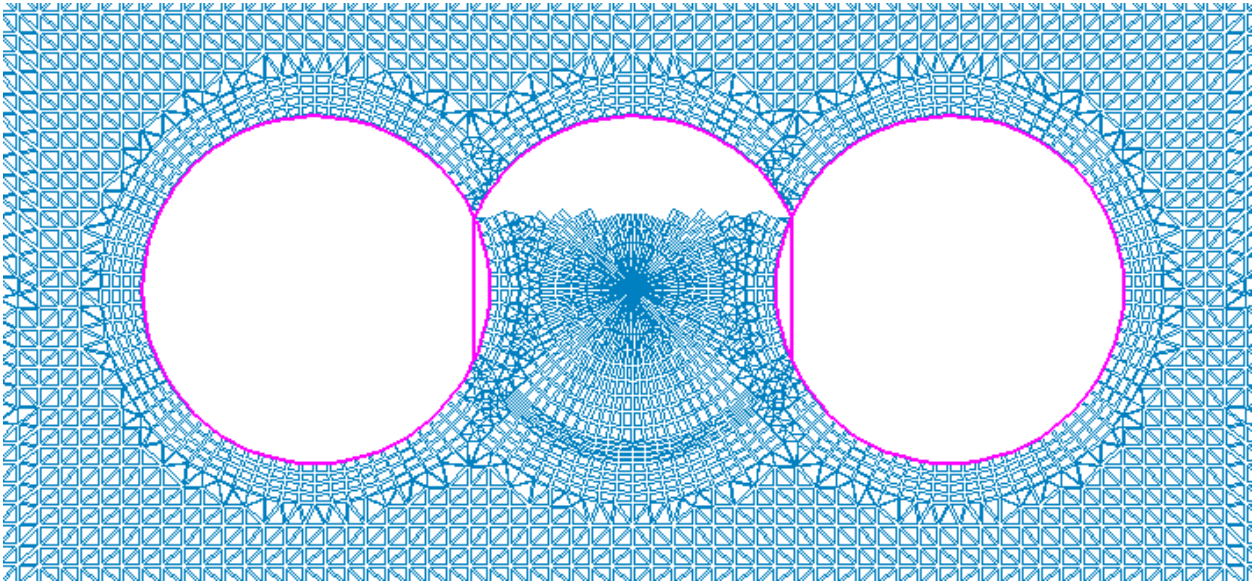


Рисунок 2.8 – Скінченно-елементна модель шостої стадії обчислення моделі

Стадія 7 – Прибирається ґрунт середнього уступу на місці центрального тунелю. З крайніх тунелів прибираються частини кілець опор які заходять за колони в центральний тунель (рис. 2.9).

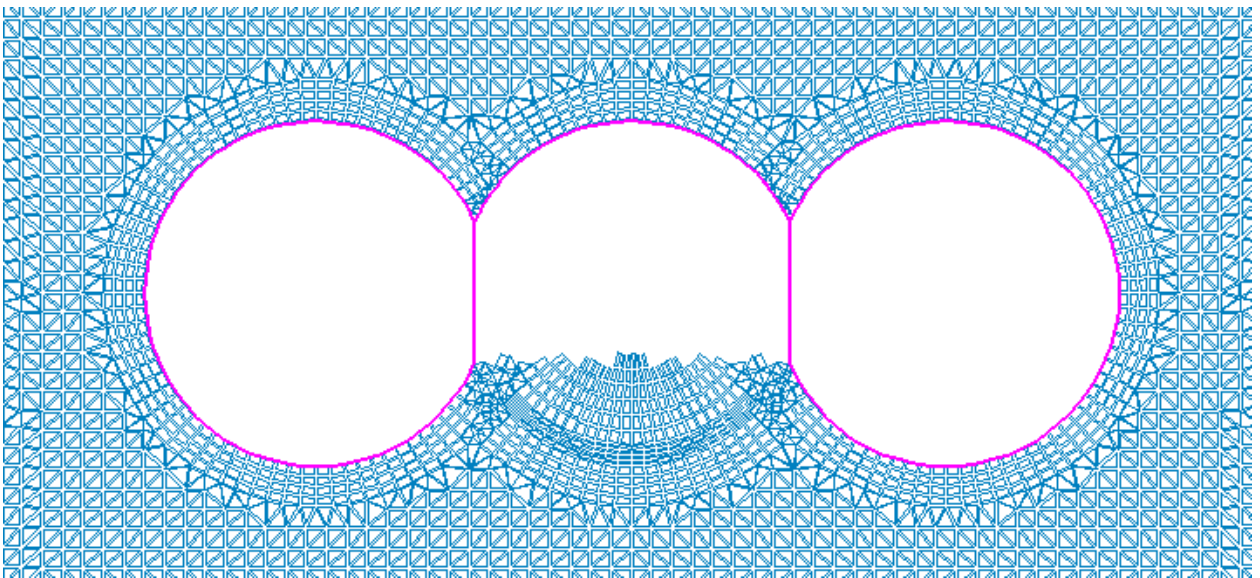


Рисунок 2.9 – Скінченно-елементна модель сьомої стадії обчислення моделі

Стадія 8 – Прибирається ґрунт нижнього уступу на місці центрального тунелю. Виконується монтаж оправи зворотного склепіння (рис. 2.10).

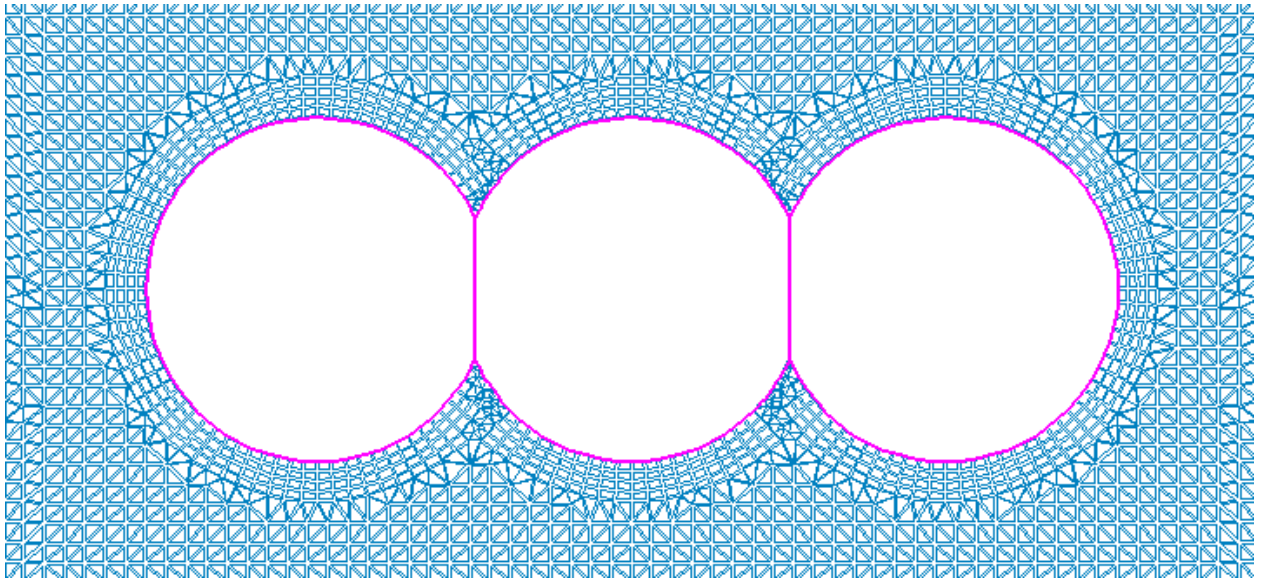


Рисунок 2.10 – Скінченно-елементна модель восьмої стадії обчислення моделі

Після заданих умов, наведених вище, можна виконати розрахунок за допомогою функції «Виконати повний розрахунок». Також, до розрахунку, важливо виконати просту операцію «Упаковка схеми» за для вирішення можливих допущених недосконалостей схеми, наприклад: висячі вузли, незшиті елементи у вузлах, виправляти елементи з некоректною геометрією.

Глава 3. Вплив технології спорудження станції на напружено-деформований стан її конструкції та гірського масиву

Кожна окрема технологія та її кроки для спорудження однієї і тієї ж станції після виконання останньої стадії закладення головних несучих елементів можуть показувати суттєво різний НДС конструкції. Також будь-яка проміжна стадія зведення станції може бути критичнішою за останню, тому важливо виконувати розрахунок несучих елементів аналізуючи кожний крок технології спорудження.

Аналіз НДС ґрунтового масиву над та під станцією можуть попереджувати раптові переміщення масивів ґрунту при втраті природної стійкості. Порівнюючи отримані дані результатів із гранично допустимими значеннями для конкретного шару ґрунту визначаються цілі та необхідність певних заходів для стримування гірських мас.

3.1. Зміна напружено-деформованого стану конструкції станції та гірського масиву на різних стадіях її спорудження

За виконаним розрахунком моделі станції видно як взаємодія ґрунту та станції має типову поведінку для подібних розрахункових випадків, що є одним із аспектів перевірки узгодженості. Нижче наведено результати переважаючих переміщень, а саме вертикальних (рис. 3.1-3.2). Спостерігається, що найбільші просідання відбуваються кожний раз при розробці ґрунту всіх трьох тунелів. Максимальне підсумкове значення переміщення ґрунту знаходиться в склепінні тунелів. Такий результат має право стверджувати відмінну та ефективну взаємодію між ґрунтом та конструкцією станції.

Стадія 1. Ґрунт без будь-якого будівельного втручання. На цьому етапі спостерігається природний стан масиву ґрунту, без впливу будівельних робіт. Це забезпечує початкову базу для подальшого аналізу (рис. 3.1).

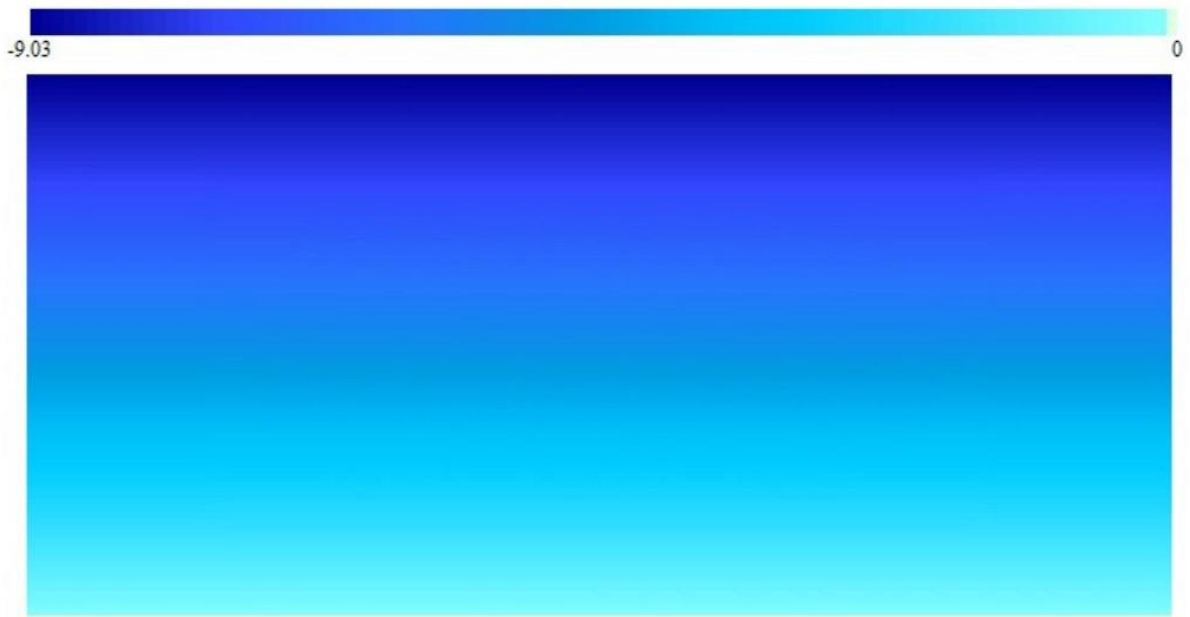


Рисунок 3.1 – Ізополя переміщень по осі Z в масиві

Стадія 2. Розробка ґрунту лівого станційного тунелю та монтаж оправи. На цій стадії здійснюється виїмка ґрунту для створення простору лівого тунелю станції. Цей етап є критично важливим, оскільки забезпечує підготовку до подальшого монтажу оправи. Використання сучасних методів виїмки та стабілізації ґрунту сприяє забезпеченню безпеки будівництва. (рис. 3.2)

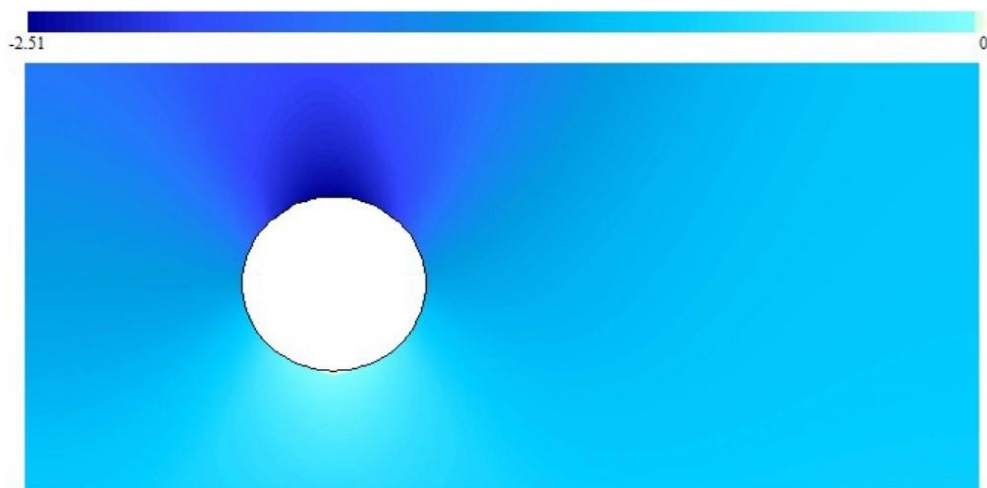


Рисунок 3.2 – Ізополя переміщень по осі Z в масиві в районі верхньої частини виробок станційних тунелів Розробка ґрунту лівого станційного тунелю та монтаж оправи

Стадія 3. Після завершення розробки ґрунту в лівому тунелі встановлюються колони, що є основними несучими елементами конструкції. Важливо зазначити, що правильний розрахунок навантажень дозволяє гарантувати довговічність і стійкість споруди. (рис. 3.3)

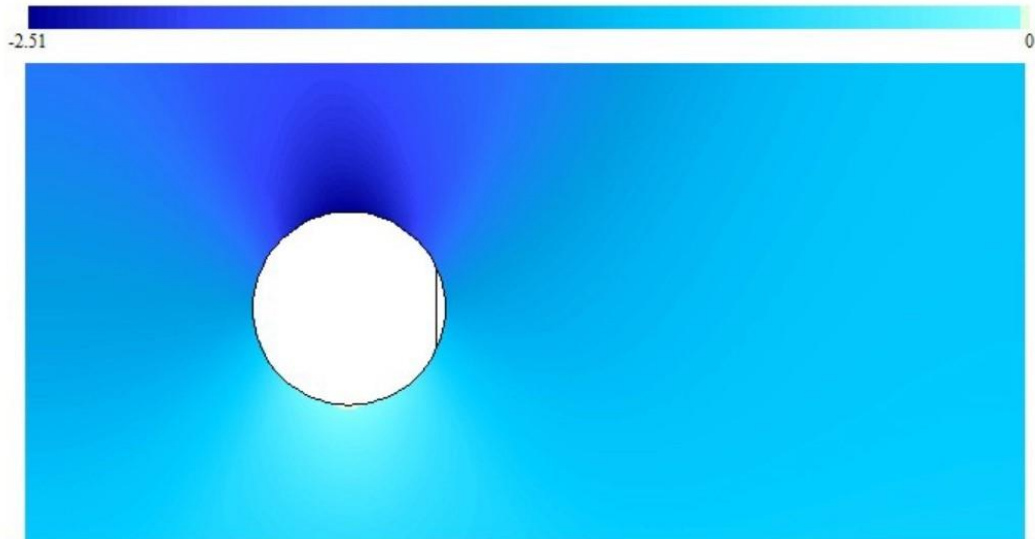


Рисунок 3.3 – Ізополя переміщень по осі Z в масиві в районі верхньої частини виробок станційних тунелів Монтаж колон лівого станційного тунелю

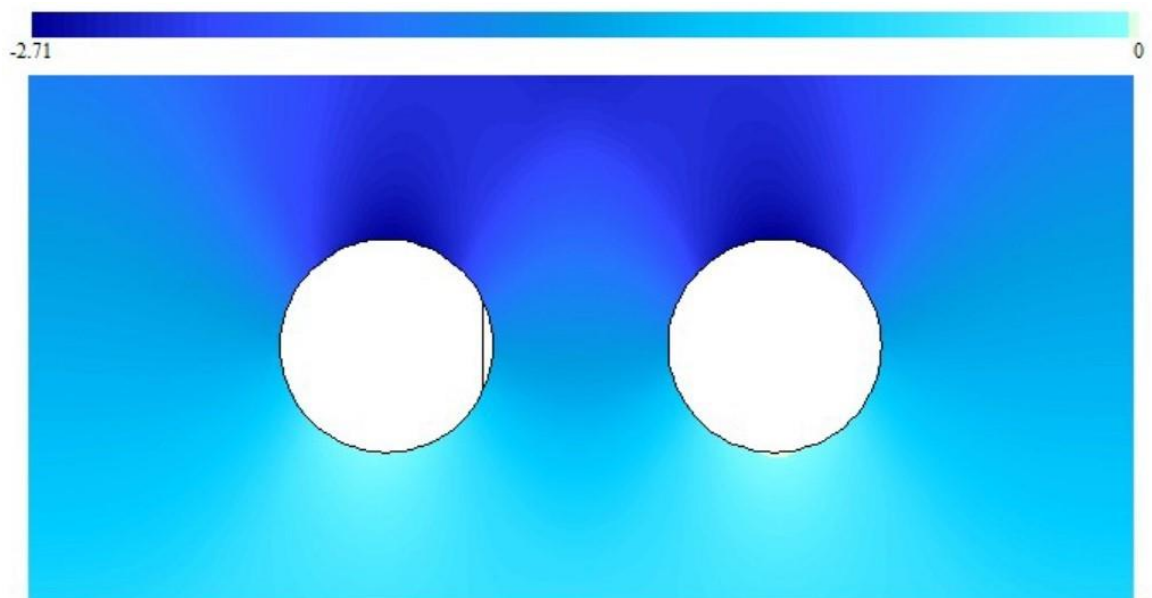


Рисунок 3.4 – Ізополя переміщень по осі Z в масиві в районі верхньої частини виробок станційних тунелів Розробка ґрунту правого станційного тунелю та монтаж оправи

Стадія 4. Розробка ґрунту правого станційного тунелю та монтаж оправи. Основна увага приділяється точності робіт та забезпеченню рівномірного розподілу навантаження між лівим і правим тунелями. (рис. 3.4)

Стадія 5. Монтаж колон правого станційного тунелю. Цей етап є критичним для забезпечення рівноваги конструкції, оскільки обидві сторони тепер мають основні підтримуючі елементи. (рис. 3.5)

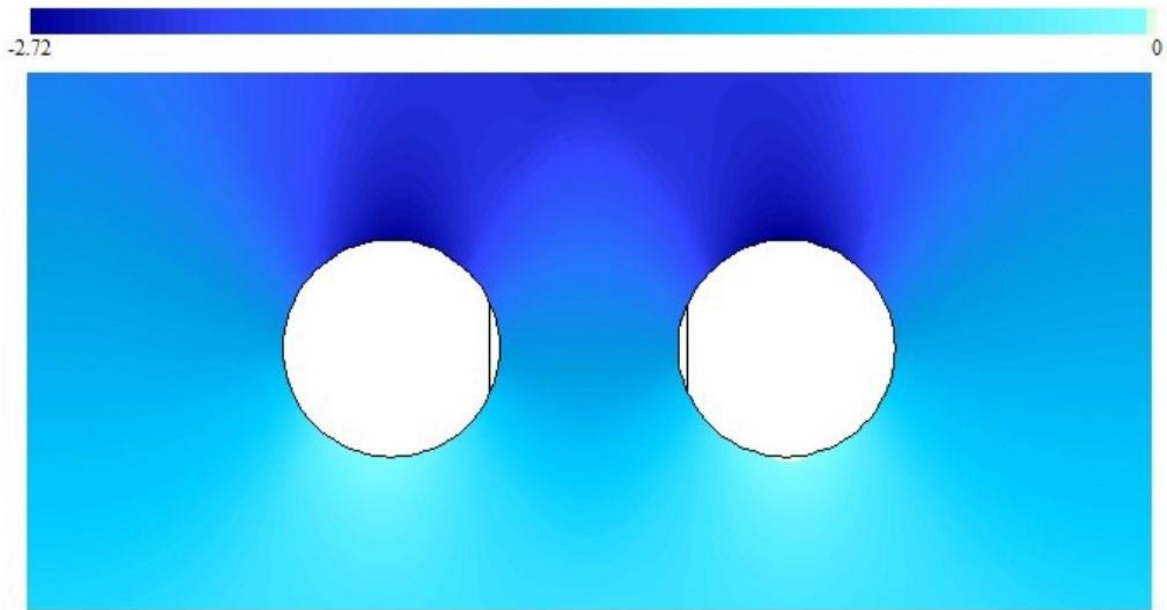


Рисунок 3.5 – Ізополя переміщень по осі Z в масиві в районі верхньої частини виробок станційних тунелів Монтаж колон правого станційного тунелю

Стадія 6. Розробка ґрунту верхнього уступу центрального тунелю та монтаж склепіння оправи. Склепіння оправи забезпечує цілісність конструкції центрального тунелю, створюючи міцну основу для подальших етапів. (рис. 3.6).

Стадія 7. Розробка ґрунту середнього уступу центрального тунелю та демонтаж частини оправи бокових тунелів. На цьому етапі важливо враховувати вплив на бокові тунелі, оскільки демонтаж оправи може призвести до перерозподілу зусиль у масиві ґрунту. (рис 3.7)

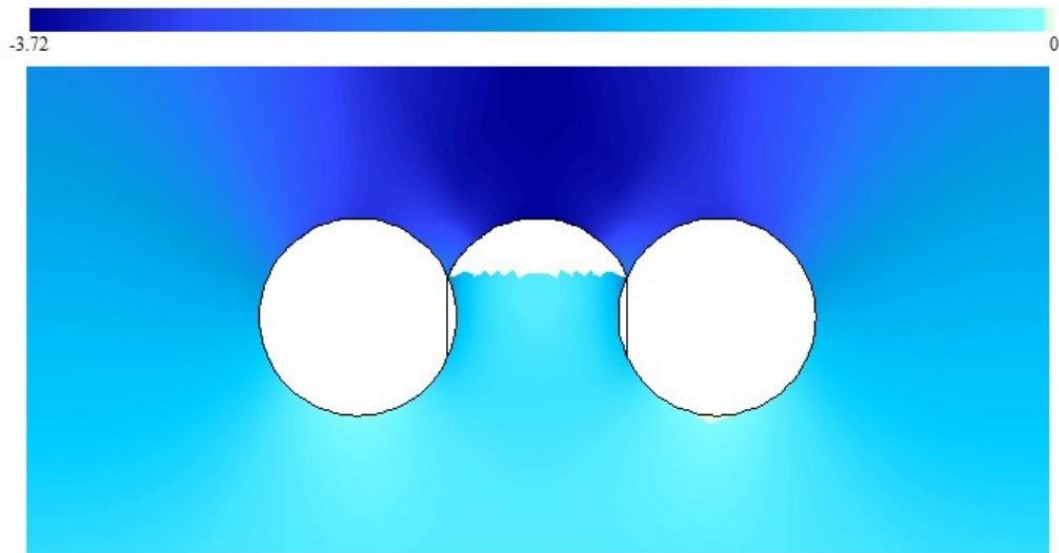


Рисунок 3.6 – Ізополя переміщень по осі Z в масиві в районі верхньої частини виробок станційних тунелів Розробка ґрунту верхнього уступу центрального тунелю та монтаж склепіння оправи

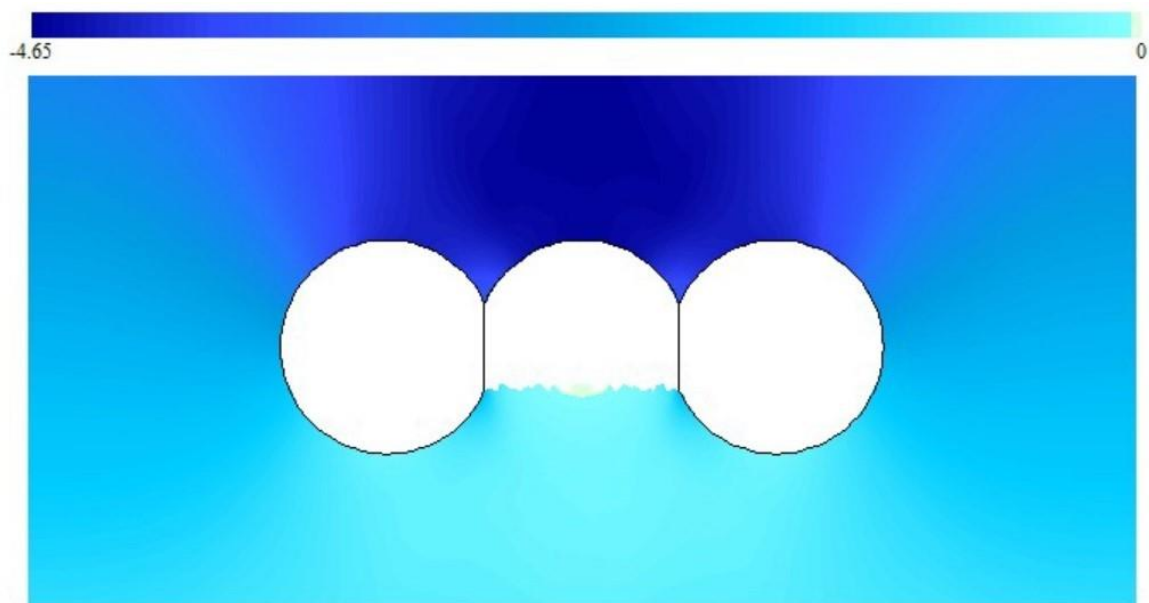


Рисунок 3.7 – Ізополя переміщень по осі Z в масиві в районі верхньої частини виробок станційних тунелів Розробка ґрунту середнього уступу центрального тунелю та демонтаж частини оправи бокових тунелів

Стадія 8. Розробка ґрунту нижнього уступу центрального тунелю та монтаж зворотнього склепіння оправи. Завершальний етап центрального тунелю, що забезпечує його повну стабільність та інтеграцію з рештою конструкції. (рис. 3.8)

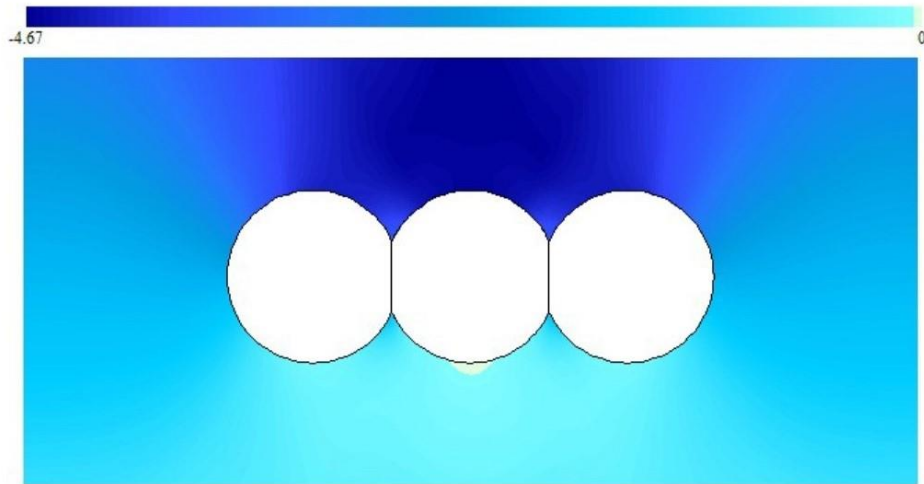


Рисунок 3.8. – Ізополя зрушень по осі Z в масиві в районі верхньої частини виробок станційних тунелів Розробка ґрунту нижнього уступу центрального тунелю та монтаж зворотнього склепіння оправи

Стадія 1. ґрунту без будь-якого будівельного втручання. На рисунку видно природний стан масиву ґрунту до початку робіт, що дозволяє оцінити потенційні зміни. (рис. 3.9)

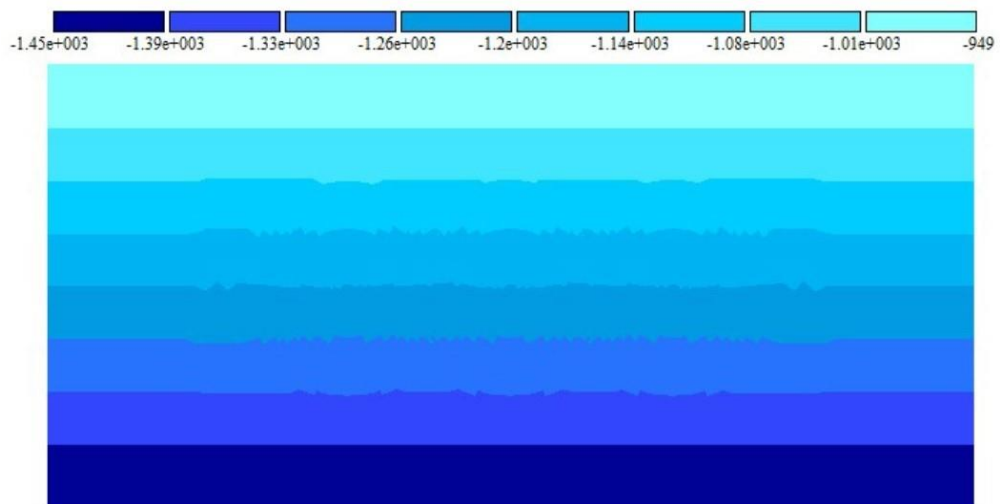


Рисунок 3.9 – Ізополя результатів вертикальних відносних переміщень масиву ґрунту на першій стадії спорудження

Стадія 2. Розробка ґрунту лівого станційного тунелю та монтаж оправи. Результати показують перші зміни в масиві ґрунту під впливом будівництва.

(рис. 3.10)

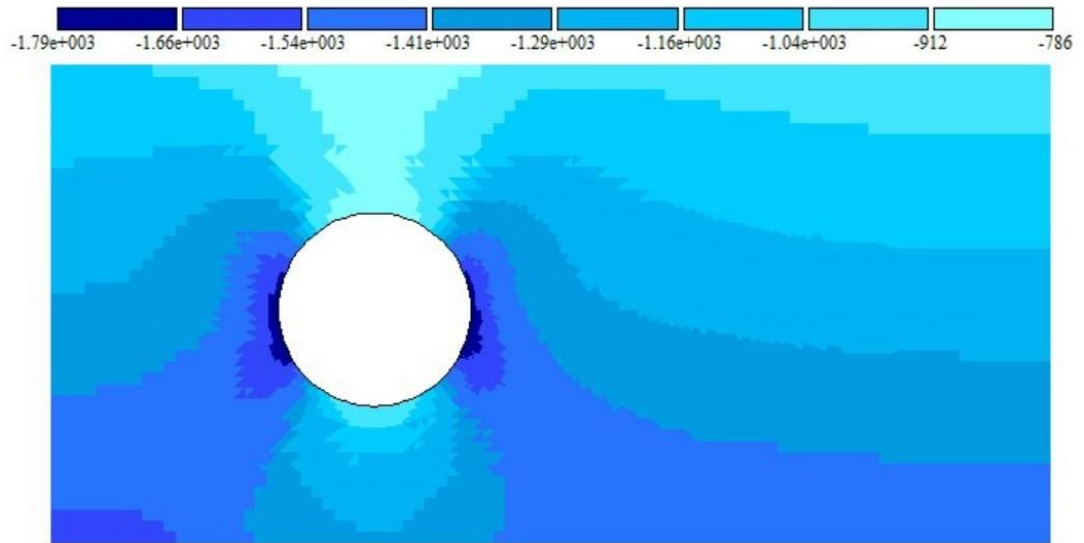


Рисунок 3.10 – Ізополя результатів горизонтальних відносних переміщень масиву ґрунту на другій стадії спорудження

Стадія 3. Монтаж колон лівого станційного тунелю. Колони забезпечують жорсткість конструкції та допомагають уникнути деформацій під час подальших етапів. (рис. 3.11)

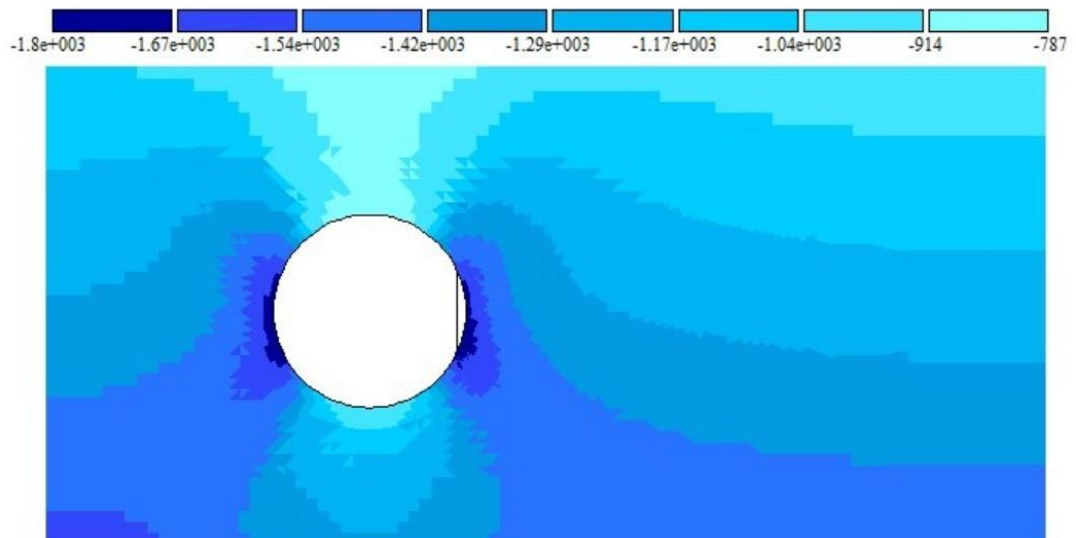


Рисунок 3.11 – Ізополя результатів горизонтальних відносних переміщень масиву ґрунту на третій стадії спорудження

Стадія 4. Розробка ґрунту правого станційного тунелю та монтаж оправи. Збільшення напружень у правій частині конструкції вимагає додаткової уваги

до стабільності. (рис. 3.12)

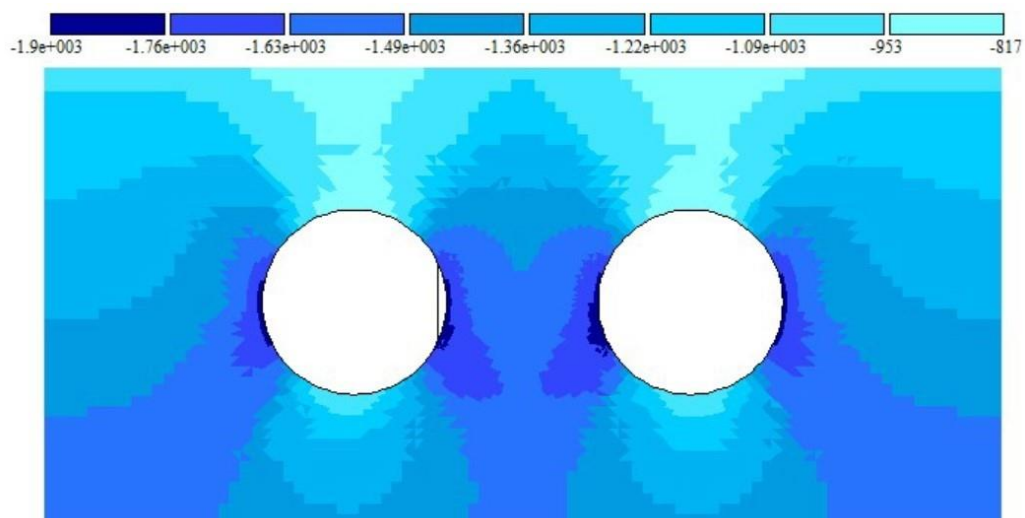


Рисунок 3.12 – Ізополя результатів горизонтальних відносних переміщень масиву ґрунту на четвертій стадії спорудження

Стадія 5. Монтаж колон правого станційного тунелю. Цей етап завершує створення основної підтримуючої структури тунелів. (рис. 3.13)

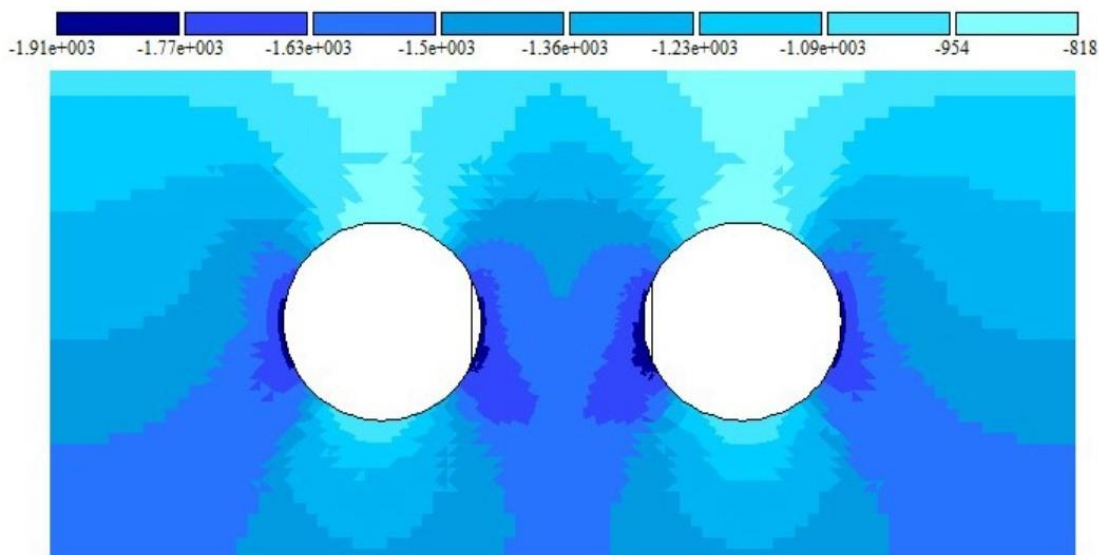


Рисунок 3.13 – Ізополя результатів горизонтальних відносних переміщень масиву ґрунту на п'ятій стадії спорудження

Стадія 6. Розробка ґрунту верхнього уступу центрального тунелю та монтаж склепіння оправи. На цьому етапі видно стабілізацію центрального

тунелю завдяки склепінню оправи. (рис. 3.14)

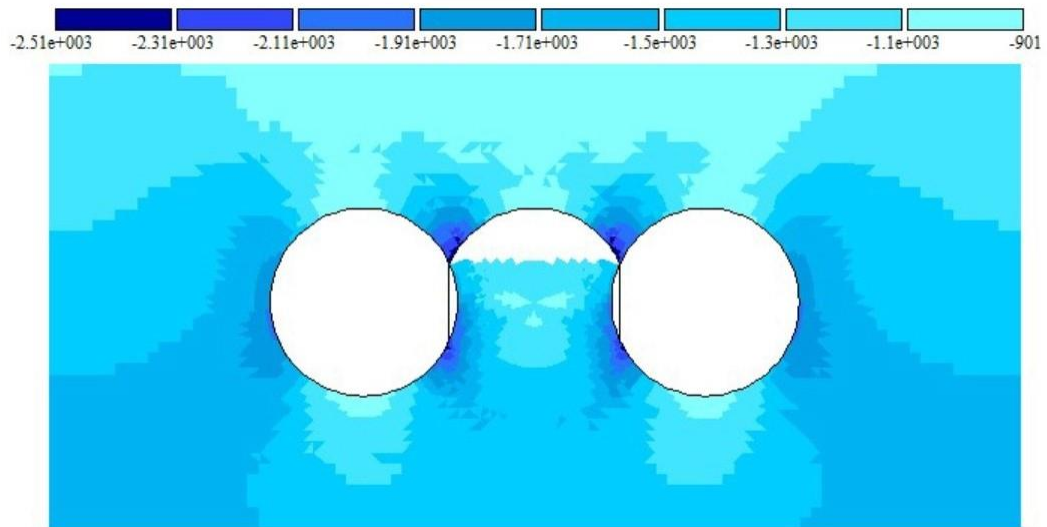


Рисунок 3.14 – Ізополя результатів горизонтальних відносних переміщень масиву ґрунту на шостій стадії спорудження

Стадія 7. Розробка ґрунту середнього уступу центрального тунелю та демонтаж частини оправи бокових тунелів. Це створює новий розподіл напружень, що впливає на стійкість усїєї конструкції. (рис. 3.15)

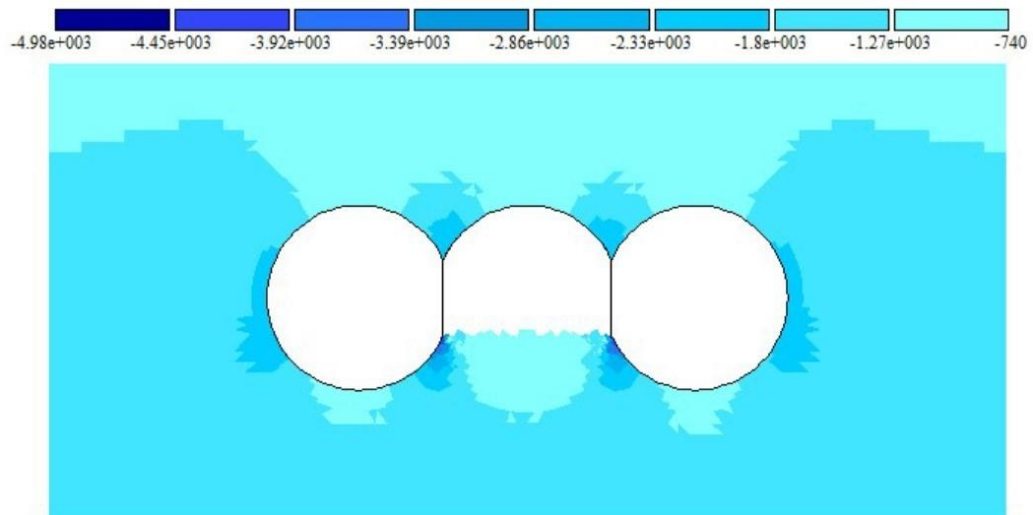


Рисунок 3.15 – Ізополя результатів горизонтальних відносних переміщень масиву ґрунту на сьомій стадії спорудження

Стадія 8. Розробка ґрунту нижнього уступу центрального тунелю та

монтаж зворотнього склепіння оправи. Завершальний етап демонструє оптимальне розподілення напружень у системі. (рис. 3.16)

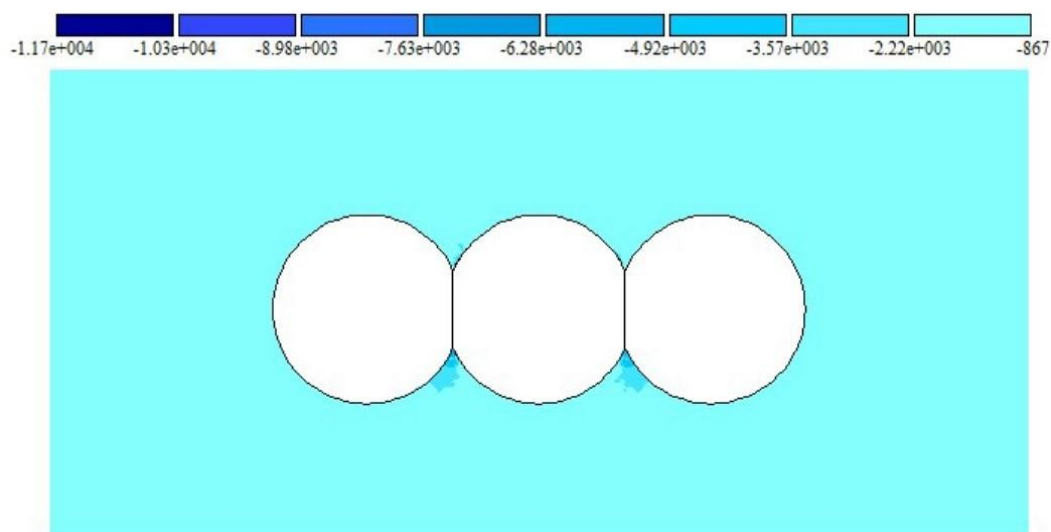


Рисунок 3.16 – Ізополя результатів горизонтальних відносних переміщень масиву ґрунту на восьмій стадії спорудження

Стадія 2. Розробка ґрунту лівого станційного тунелю та монтаж оправи. (рис 3.17)

На рисунках наведено результати найбільш переважних зусиль в елементах станції, а саме нормальних, де найбільше значення в оправі складає 5420 кН на 8 стадії зведення станції, а в колонах становить 6500 кН.

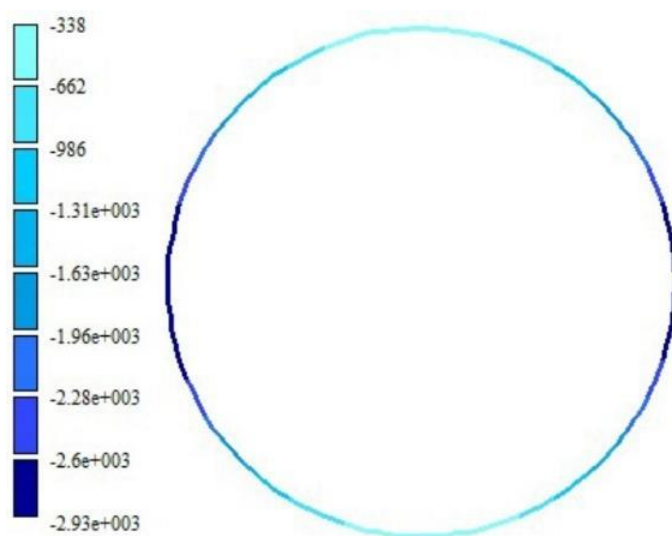


Рисунок 3.17 – Ізополя зусиль в оправі станційних тунелів. Розробка ґрунту лівого станційного тунелю та монтаж оправи

Стадія 3. Монтаж колон лівого станційного тунелю. (рис 3.18)

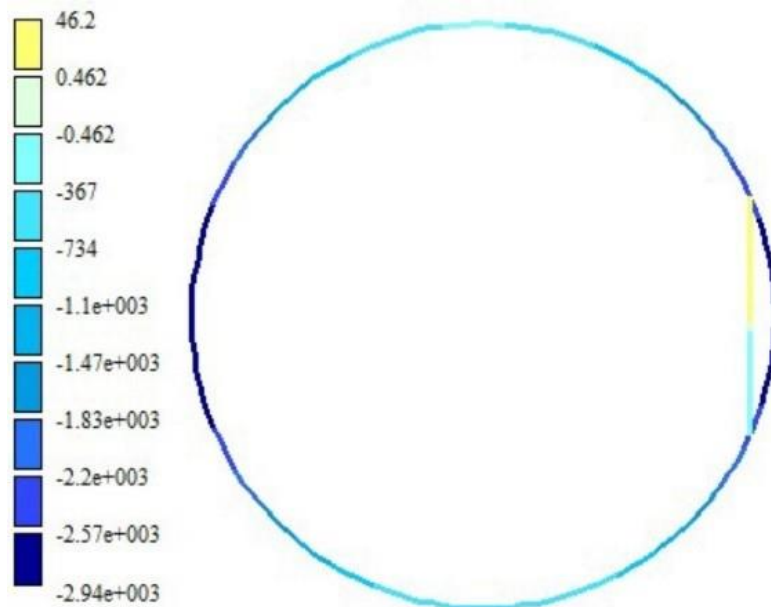


Рисунок 3.18 – Ізополя зусиль в оправі. Монтаж колон лівого станційного тунелю

Стадія 4. Розробка ґрунту правого станційного тунелю та монтаж оправи. (рис 3.19)

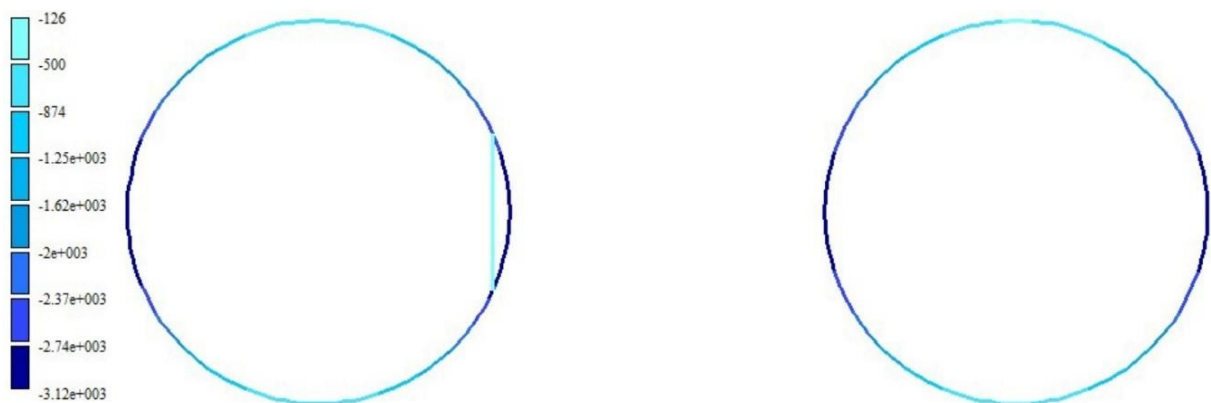


Рисунок 3.19 – Ізополя зусиль в оправі. Розробка ґрунту правого станційного тунелю та монтаж оправи

Стадія 5. Монтаж колон правого станційного тунелю. (рис 3.20)

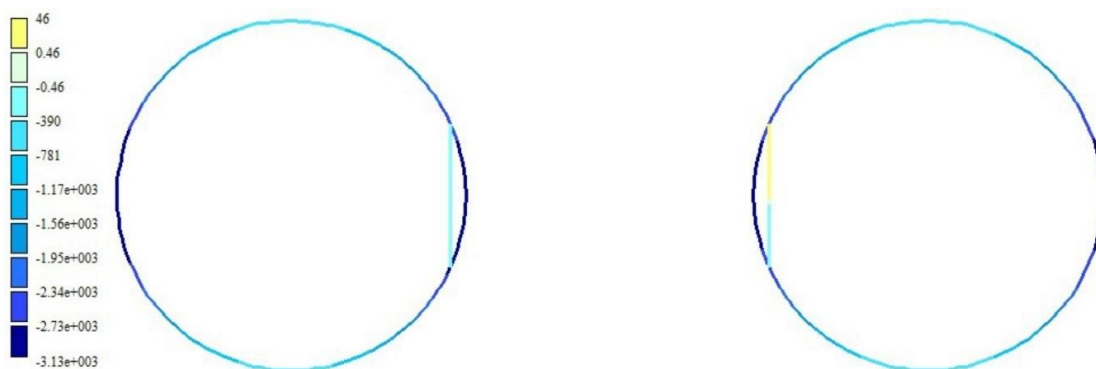


Рисунок 3.20. – Ізополя зусиль в оправі. Монтаж колон правого станційного тунелю

Стадія 6. Розробка ґрунту верхнього уступу центрального тунелю та монтаж склепіння оправ. Мозаїка результатів нормальної сили в оправах та колонах станції на стадіях спорудження. Нормальні сили демонструють, як кожен елемент конструкції бере участь у загальному розподілі навантажень. (рис. 3.21)

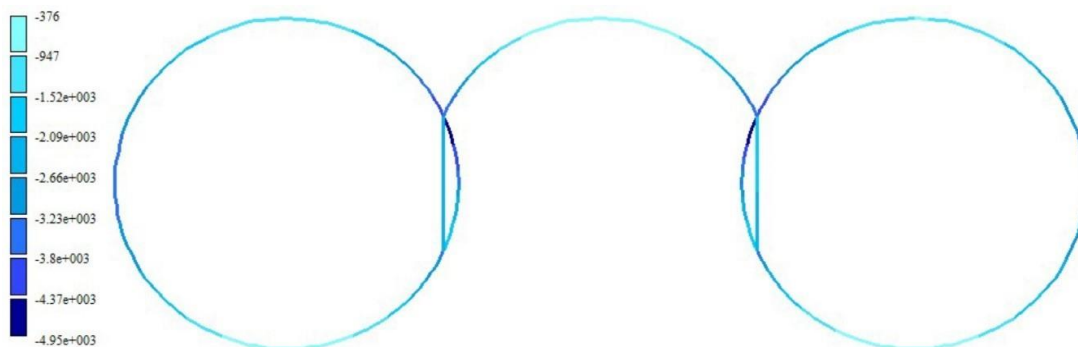


Рисунок 3.21. – Ізополя зусиль в оправі. Розробка ґрунту верхнього уступу центрального тунелю та монтаж склепіння оправ

Стадія 7. Розробка ґрунту середнього уступу центрального тунелю та демонтаж частини оправ бокових тунелів. (рис. 3.22)

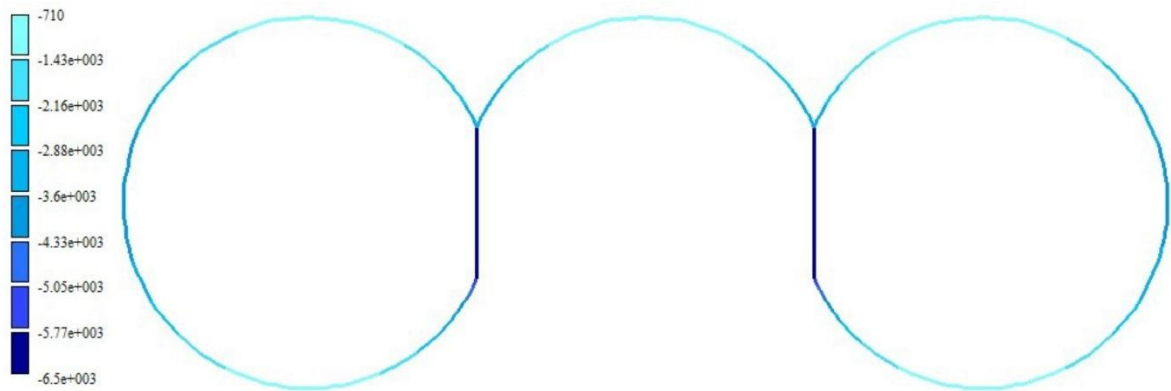


Рисунок 3.22. – Ізополя зусиль в оправі. Розробка ґрунту середнього уступу центрального тунелю та демонтаж частини оправ бокових тунелів

Стадія 8. Розробка ґрунту нижнього уступу центрального тунелю та монтаж зворотнього склепіння оправ. (рис. 3.23)

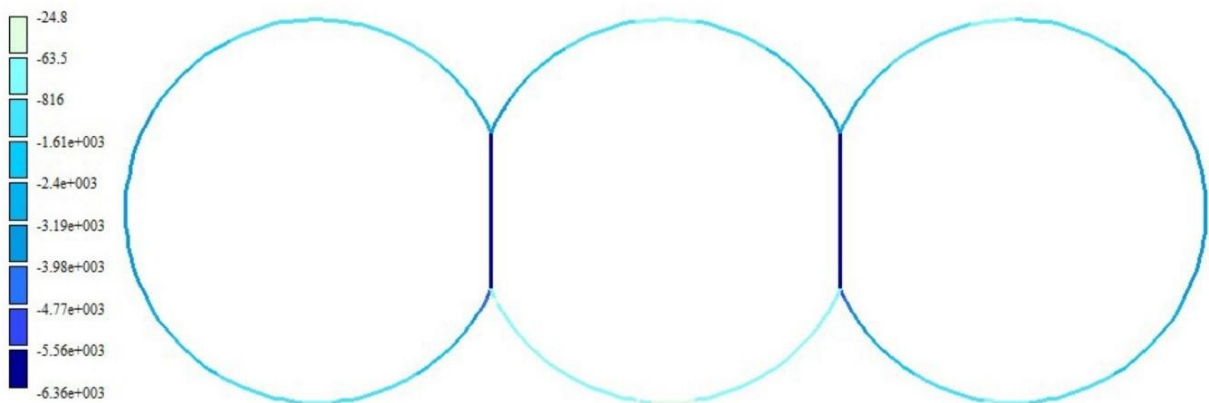


Рисунок 3.23. – Ізополя напружень по осі Z в оправі Розробка ґрунту нижнього уступу центрального тунелю та монтаж зворотнього склепіння оправ.

З часом видно, як повне розкриття центрального тунелю утворює концентрації зусиль в зонах об'єднання колон із оправами, що пояснюється демонтажем частини оправ бокових тунелів, які перетинають центральний тунель (рис. 3.24).

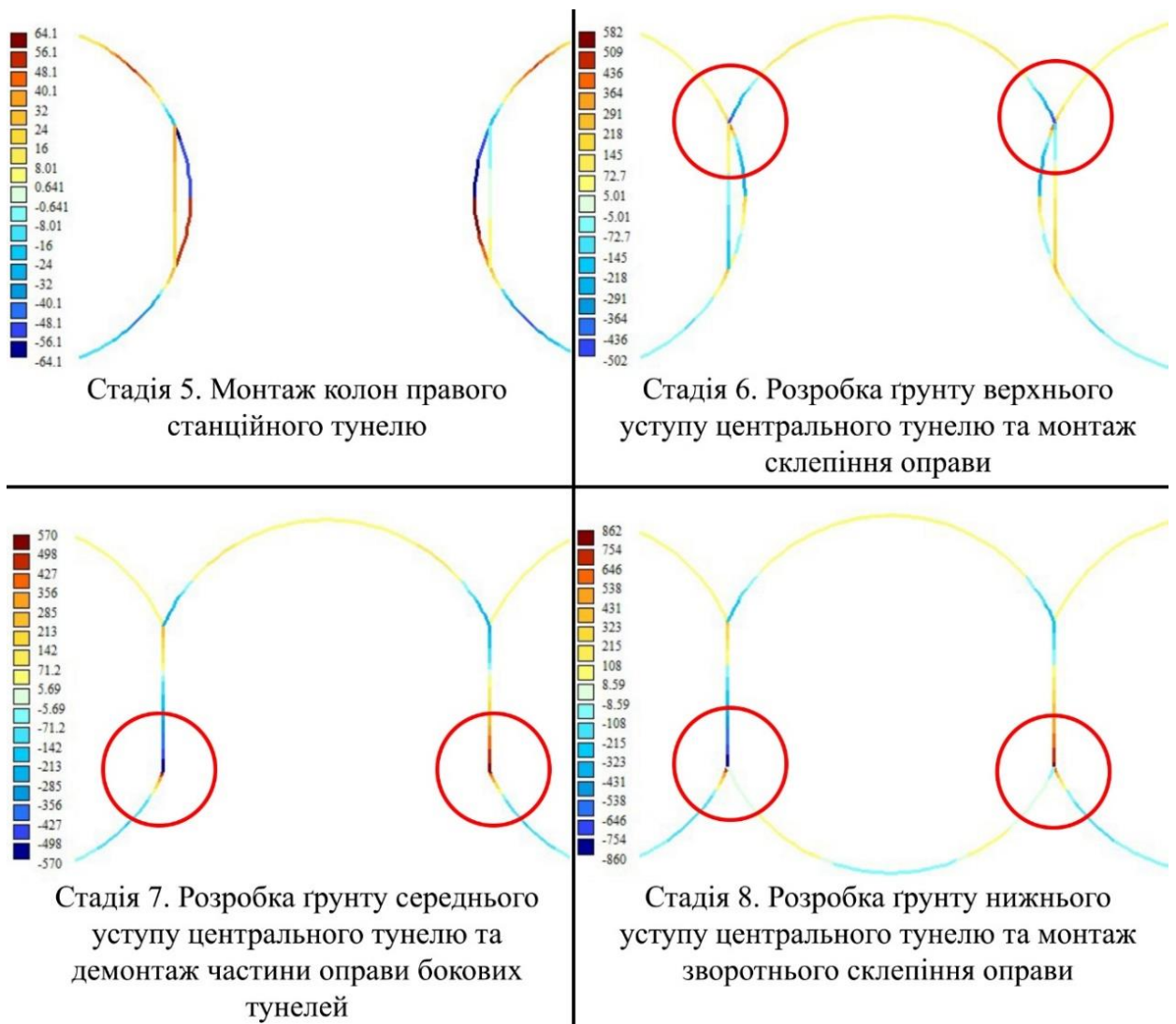


Рисунок 3.24 – Мозаїка результатів нормальної сили в оправах та колонах станції на стадіях спорудження. Видно ключові зони концентрації напружень, які вимагають особливої уваги

За отриманими результатами розрахунку всіх стадій можна проаналізувати історію зміни зусиль в кожній оправі тунелю та кожній колоні. На графіках рисунків 3.25-3.26 наведено зміну нормальних та згинальних моментів відповідно, за допомогою чого можна проаналізувати збільшення напружено-деформованого стану у конструкціях станції та наочно побачити «перетікання» зусиль з оправ станції на колони під час розробки останнього, тобто центрального тунелю.

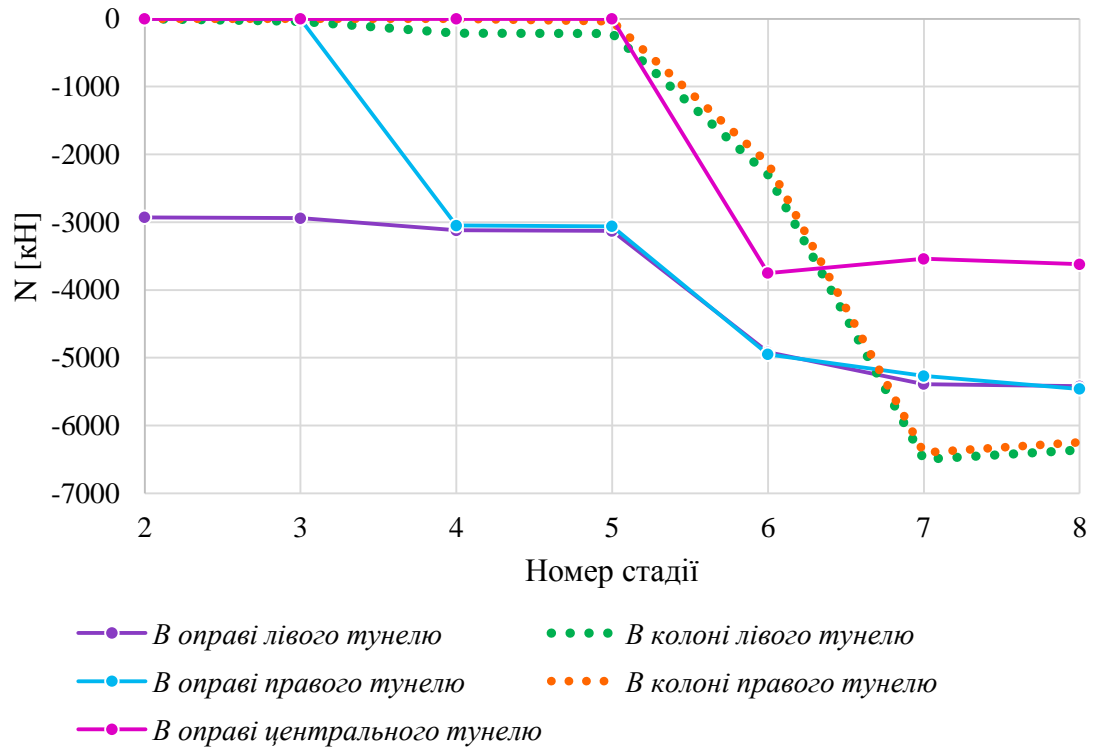


Рисунок 3.25 – Графік змін найбільших нормальних сил в оправах та колонах на кожній стадії зведення станції

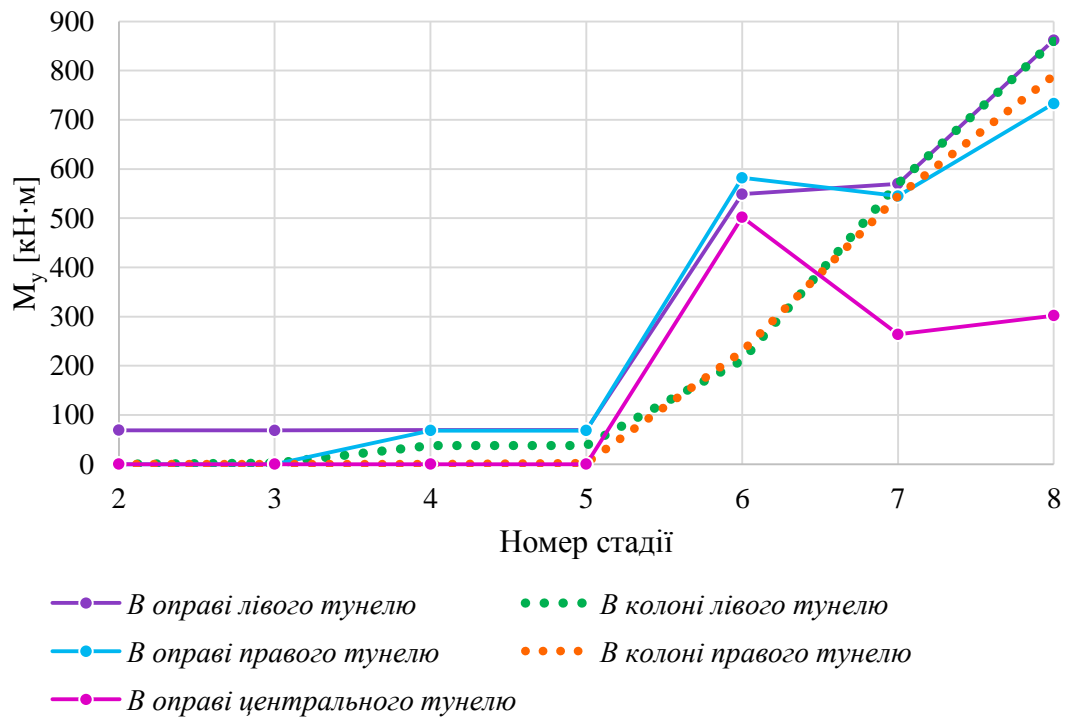


Рисунок 3.26 – Графік змін найбільших згинальних моментів в оправах та колонах на кожній стадії спорудження станції. Значення наведені за модулем

Глава 4. Моделювання напружено-деформованого стану балки-перемички на різних стадіях спорудження станції

4.1. Напружено-деформований стан балки-перемички на різних стадіях спорудження станції

Відповідно до технології спорудження колонної станції, під час монтажу кожного кільця оправи в кільце встановлюються два опорних фігурних елемента рис. 4.1. Ці елементи розміщуються, як у площині майбутнього ряду колон, утворюючи опорні вузли для передачі на колони зусиль через балку-перемичку від розімкнених склепінь бокових і середнього станційних тунелів.

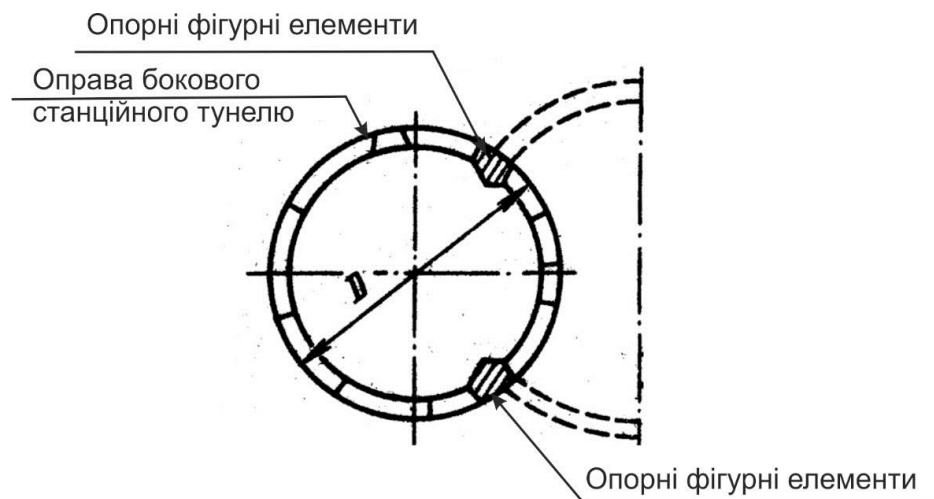


Рисунок 4.1 – Оправа бокового станційного тунелю з опорними фігурними елементами

По мірі проходки бокових станційних тунелів, на відстань від забою, яка дозволяє робити монтаж колон і балки-перемички, яка опираються на колони.

На рис. 4.2. показано етап і послідовність робочих операцій по їх спорудженню залежать від конструктивного рішення опорних вузлів. За наявності в нижньому опорному вузлі фігурного тюбінгу спочатку встановлюється нижня балка-перемичка. Потім встановлюють колони і верхню балку перемичку.



Рисунок 4.2 – Схема колонної станції з балкою-перемичкою

На рис. 4.3. зображений етап розробки центрального станційного тунелю. Під час проходки центрального станційного розбирають елементи тимчасового заповнення бокових станційних тунелів у містах проходку, але тільки після установки верхнього склепіння і все навантаження від оправ передається на опорні фігурні елементи, а через них на балку-перемичку і колон

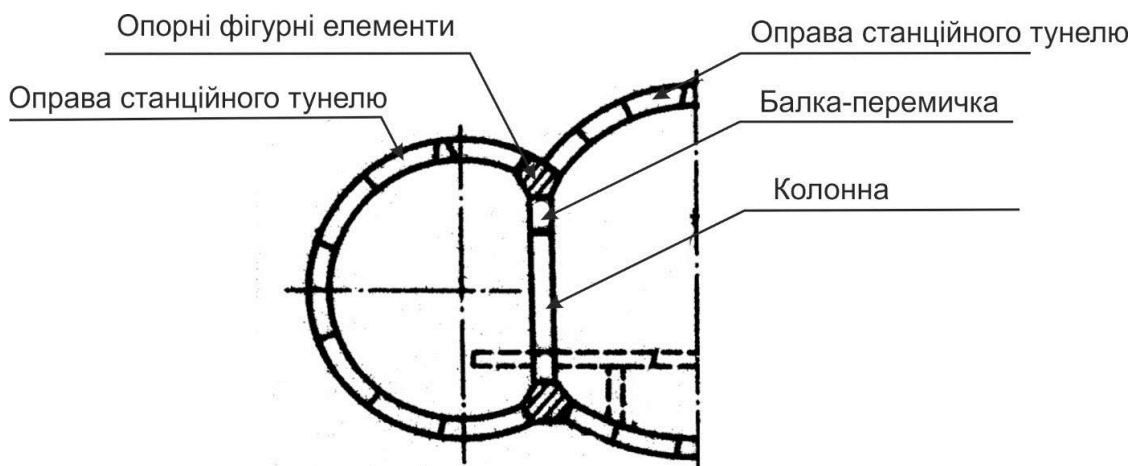


Рисунок 4.3 – Схема колонної станції з балкою перемичкою

На цьому етапі виникають найбільші зусилля у колоні і такі ж зусилля передаються на балку перемичку від кожного розімкнутого кільця бокового і

центрального тунелів. Важливою умовою є також одночасне включення в роботу колон, розташованих в одному поперечному перетині станції.

На рис. 4.4. показано схему дії навантажень на балки-перемички у місті проходу та напружений стан у ній на стадії розробки центрального станційного тунелю. Зусилля N , які передаються на балку-перемичку від фігурних опорних елементів, які є частиною примикаючих склепінь станційних оправ.

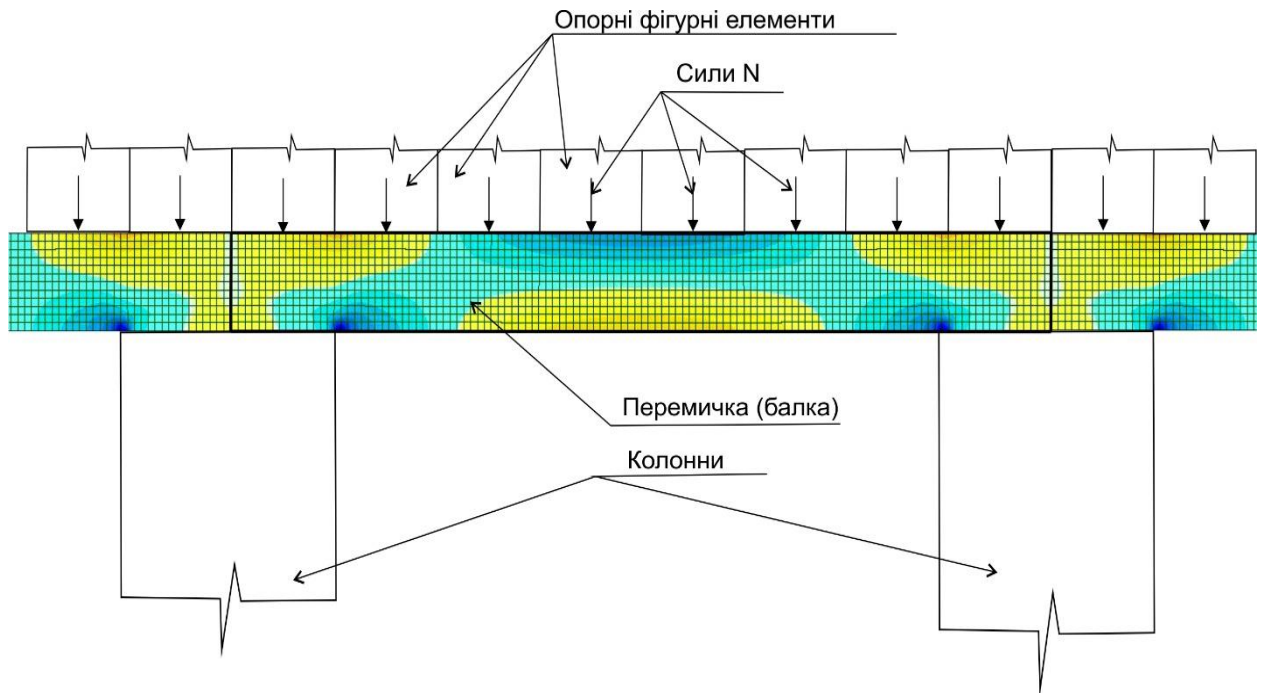


Рисунок 4.4 – Схема колонної станції в містах проходу з балкою-перемичкою

Після монтажу колон і балок-перемичок у бокових станційних тунелях починаються роботи по проходці центрального станційного тунелю з розробки породи у верхній частині і монтажу оправи у зоні склепіння. На цьому етапі на опорні фігурні елементи, які є частиною оправи бокових тунелів, починає передаватись навантаження від склепіння оправи центрального тунелю яке передається на балку перемичку, але максимальні навантаження на балку-перемичку передаються після демонтажу блоків заповнення оправ бокових тунелів у місцях проходу.

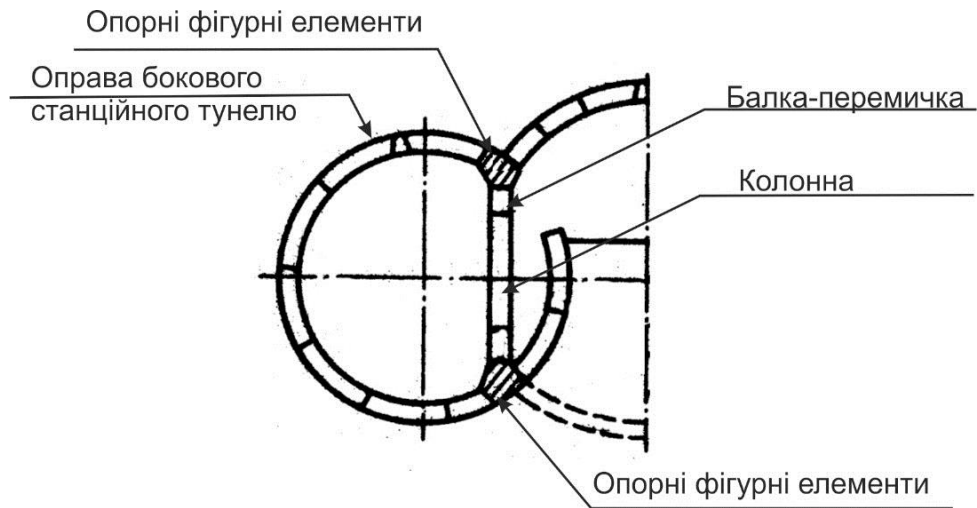


Рисунок 4.5 – Схема колонної станції після монтажу склепіння центрального тунелю

На рис. 4.6. показано епюрами нормальних сил N в елементах конструкції станції на стадії розробки центрального станційного тунелю. Максимальні зусилля виникають у колонах на які передається навантаження від примикаючих склепінь станційних оправ через опорні фігурні елементи.

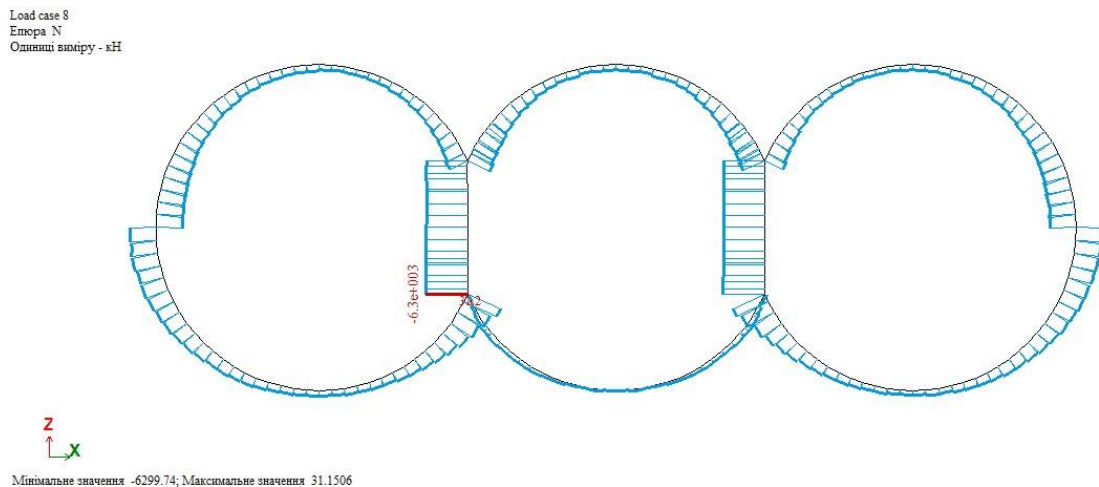


Рисунок 4.6 - Схема колонної станції з епюрами нормальних сил N в елементах конструкції

На рис. 4.7. показано скінченно-елементна модель балки-перемички на стадії розробки центрального станційного тунелю та розподіл нормальних напружень в ній. Зусилля N , які передаються на балку-перемичку від фігурних елементів при розрахунку замінялися еквівалентними силами по

площі контакту фігурних елементів і балки-перемички.

Напружений стан балки-перемички у місті проходу на стадії розробки центрального станційного тунелю показано ізополями напружень.

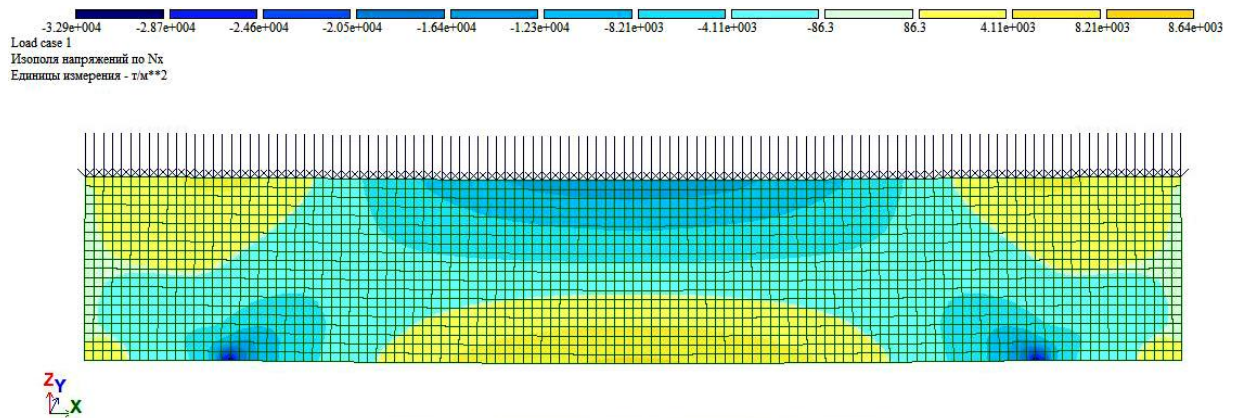


Рисунок 4.7 - Скінченно-елементна модель балки-перемички та розподіл нормальних напружень в ній у вигляді ізополів напружень по осі X

4.2. Розрахунок на міцність балки-перемички колонної станції

Розрахунок на міцність балки-перемички проводиться відповідно до ДБН В.2.3-14:2006 розрахунок залізобетонних згинаних елементів, перевіряються два перерізи з максимальними напруженнями розтягу рис. 4.8. Переріз I по середині з низу прогону $\sigma_p = 8640$ кПа, переріз II зверху прогону у місці обпирання на колонну $\sigma_p = 5021,9$ кПа.

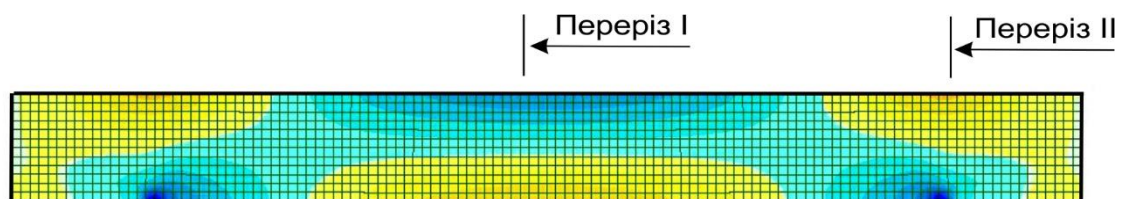


Рисунок 4.8 – Перерізи для перевірки на міцність

Розрахунок прямокутних перерізів на міцність [] виконується за умови:

$$M \leq R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_s A_s^1 (h_0 - a_s) \quad (4.1)$$

При цьому висота стиснутої зони x визначається за формулою:

$$R_s A_s - R_s A_s^1 = R_b b x \quad (4.2)$$

Для розрахунку міцності балки-перемички використовуються такі

властивості матеріалу.

Бетон клас міцності: C35/45

Розрахунковий опір стисканню $R_b = 25,0$ МПа (2500 т/м²)

Арматура: класу А400С

Типова межа плинності – 40000 т/м²

Розрахункова межа плинності – $R_s = 36364$ т/м²

Захисний шар бетону – 4 см

Відповідно до п. 7.6.4 табл. 5 у ДБН В.1.2-14:2018 для капітальних споруд з класом відповідальності СС3 та категорією відповідальності А приймаємо коефіцієнт надійності для відповідальності (коефіцієнт відповідальності) $\gamma_n = 1,25$. При цьому всі прийняті сили М і N збільшуються в 1,25 рази.

На рис. 4.8 показано поперечний переріз I з розташуванням арматури, у зоні розтягу приймаємо 9 стержнів арматури діаметром 36 мм класу А400С, у зоні стиску 5 стержнів арматури діаметром 36 мм класу А400С.

Перевірка на міцність проводиться в перерізі де максимальне зусилля розтягу, при цьому момент $M = 6806$ кНм.

Площа арматури у перерізі I, $A_s = 0,009162$ м², $A_s^1 = 0,00509$ м²

A_b – площа перерізу бетонна, 0,5 м²

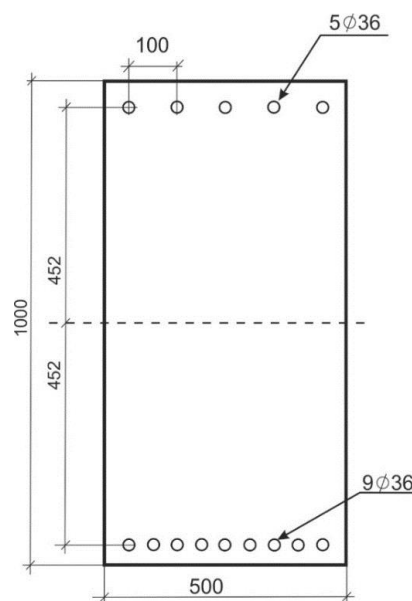


Рисунок 4.8 - Арматування перерізу I балки-перемички

Переріз І.

Момент у І перерізі: $M = 717,2 \times 1,25 = 896,5 \text{ кН}\cdot\text{м}$

З рівняння (4.2) знаходимо стиснуту зону бетону у перерізі І

$$363640 \times 0,009162 - 363640 \times 0,005090 = 25000 \times 0,5 \times X$$

$$X = 1480,74 / 12500 = 0,118 \text{ м.}$$

З рівняння (4.1) визначаємо несучу здатність перерізу

$$896,5 \leq 25000 \times 0,05 \times 0,118(0,952 - 0,059) + 363640 \times 0,00509(0,952 - 0,048)$$

$$896,5 \text{ кН}\cdot\text{м} \leq 131,71 + 1673,24 = 1804,94 \text{ кН}\cdot\text{м}$$

Умова міцності виконана.

Переріз ІІ.

На рис. 4.9 показано поперечний переріз ІІ з розташуванням арматури, у зоні розтягу приймаємо 9 стержнів арматури діаметром 36 мм А400С, у зоні стиску 5 стержнів арматури діаметром 36 мм А400С.

Момент у ІІ перерізі: $M = 508,8 \times 1,25 = 636,0 \text{ кН}\cdot\text{м}$

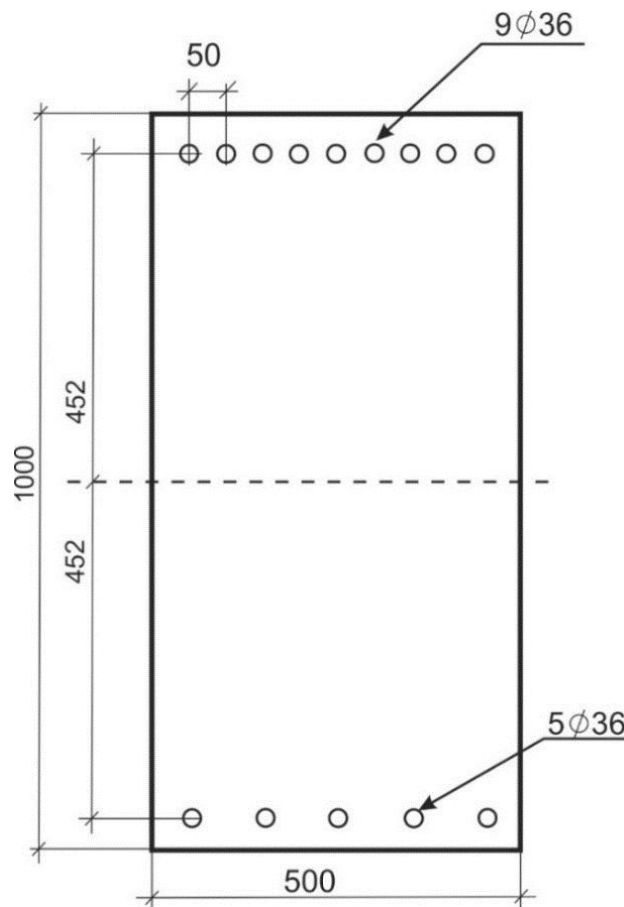


Рисунок 4.9 - Армуння перерізу ІІ балки-перемички

З рівняння (4.2) знаходимо стиснуту зону бетону у перерізі I

$$363640 \times 0,009162 - 363640 \times 0,005090 = 25000 \times 0,5 \times X$$

$$X = 1480,74 / 12500 = 0,118 \text{ м.}$$

З рівняння (4.1) визначаємо несучу здатність перерізу

$$636,0 \leq 25000 \times 0,05 \times 0,118 (0,952 - 0,059) + 363640 \times 0,00509 (0,952 - 0,048)$$

$$636,0 \text{ кН} \cdot \text{м} \leq 131,71 + 1673,24 = 1804,94 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Умова міцності виконується.

ВИСНОВКИ

Дипломна робота під назвою "Вплив технології спорудження колонної станції на напружено-деформований стан її конструкції та гірського масиву" досліджує важливу та актуальну проблему сучасного метробудування. У ході роботи було детально проаналізовано процес будівництва колонної станції з урахуванням геологічних умов, конструктивних особливостей станції та впливу технології будівництва на напружено-деформований стан (НДС) конструкції та прилеглого ґрунтового масиву.

Основні результати роботи демонструють, що правильно обрана технологія спорудження є критично важливою для забезпечення стійкості конструкцій станції та мінімізації ризиків деформацій у ґрунті. У роботі розглянуто моделювання стадій будівництва станції за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР. Завдяки цьому було отримано точні дані про НДС конструкції на різних етапах спорудження. Аналіз результатів показав, що найбільші напруження виникають у зонах сполучення центрального та бокових тунелів, що вимагає особливої уваги до проектування та монтажу колон і оправ станції. Розроблені рекомендації щодо посилення цих зон дозволяють суттєво підвищити безпеку експлуатації.

Одним із ключових досягнень роботи є розробка розрахункової моделі, яка враховує взаємодію конструкції станції з навколишнім масивом ґрунту. Використання методу скінченних елементів дозволило виявити критичні зони напружень та запропонувати оптимальні рішення для їх зниження. Наприклад, оптимізація розташування колон та використання спеціальних конструктивних елементів у місцях найбільших напружень дозволила досягти рівномірного розподілу навантажень.

Також проведено розрахунок на міцність балки-перемички, яка забезпечує передачу навантажень між основними несучими елементами станції. Цей елемент виявився ключовим для забезпечення загальної стабільності конструкції.

Аналіз напружено-деформованого стану показав, що правильно обрана технологія проходки тунелів і монтажу конструкцій дозволяє суттєво знизити рівень просідань ґрунту. У роботі було детально описано, як на різних етапах будівництва змінюється НДС конструкції. Зокрема, особливу увагу приділено етапу монтажу центрального тунелю, коли конструкція зазнає найбільших змін у напруженнях. Завдяки впровадженим заходам вдалося уникнути надмірних деформацій, що підтверджується результатами моделювання.

Використання сучасних програмних комплексів для моделювання та оптимізації процесу будівництва дозволяє не лише підвищити надійність конструкцій, а й суттєво знизити витрати на реалізацію проектів. Наприклад, завдяки оптимізації геометрії оправи та вибору матеріалів вдалося зменшити обсяги використання бетону та арматури без втрати міцності.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що запропонована технологія будівництва забезпечує високу надійність і довговічність колонної станції, а також мінімізує негативний вплив на гірський масив. Це підтверджується низькими значеннями просідання та рівномірним розподілом напружень у конструкції. Крім того, запропоновані заходи безпеки та рекомендації щодо моніторингу стану конструкцій можуть бути використані для підвищення ефективності експлуатації станцій у майбутньому.

Загалом, дана дипломна робота робить вагомий внесок у розвиток науково-практичних підходів до проектування та будівництва метрополітенів. Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації технологій будівництва, підвищення безпеки експлуатації підземних споруд та зменшення витрат на реалізацію подібних проектів у складних інженерно-геологічних умовах. Крім того, напрацювання цієї роботи можуть слугувати основою для подальших наукових досліджень у сфері метробудування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Петренко, В. І. Станції метрополітену: конструкції та спорудження [Текст]: навчальний посібник / В. І. Петренко, В. Д. Петренко, О. Л. Тютюкін. – Д.: Вид-во «Нова ідеологія», 2012. – 164 с.
2. Айвазов, Ю. М. Проектування метрополітенів (у 3-х частинах). Начальний посібник. Частина 1 [Текст] / Ю. М. Айвазов. – Київ: НТУ, 2006. – 166 с.
3. Петренко, В. Д. Методичні вказівки до курсового й дипломного проектування «Станція метрополітену глибокого закладення (конструкції та спорудження)» [Текст] / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, О. Л. Тютюкін, Д. В. Тютюкін. – Д.: Нова ідеологія, 2015. – 30 с.
4. Гайко, Г. І. Конструкції кріплення підземних споруд: Навчальний посібник [Текст] / Г. І. Гайко. – Алчевськ: Дон ДНУ, 2006 – 133с.
5. Тютюкін, О. Л. Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій [Текст] / О. Л. Тютюкін. – Дніпро : Журфонд, 2020. – 260 с.
6. ДБН В.2.3-7-2018. Метрополітени. Основні положення. – На заміну ДБН В.2.3-7-2010; надано чинності 2019-09-01. – Київ: Мінрегіонбуд України 2019. – 69 с.
7. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. – На заміну ДБН В.1.2-14:2009; надано чинності 2019-01-01. – Київ: Мінрегіон України, 2018. – 29 с.
8. Петренко, В. І. Розрахунок трисклепінчастих станцій метрополітену глибокого закладення [Текст] / В. І. Петренко, В. Д. Петренко, О. Л. Тютюкін. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2004. – 176 с.
9. Петренко, В. Д. Методичні вказівки для курсового та дипломного проектування «Математичне моделювання підземних споруд на основі методу скінченних елементів. Ч. 1. Structure CAD for Windows (SCAD)» [Текст] / В. Д. Петренко, В. Т. Гузченко, О. Л. Тютюкін, В. П. Купрій. –

Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2010. – 56 с.

10. Тютюкін, О. Л. Тунелі і метрополітени. Щитовий спосіб спорудження тунелів: навч. посіб. / О. Л. Тютюкін, В. П. Купрій, В. А. Мірошник; за ред. д-ра техн. наук, проф. О. Л. Тютюкіна; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро: УДУНТ, 2024. – 177 с.

11. Програмне забезпечення інженерних розрахунків: конспект лекцій для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» всіх форм навчання / Укладач: Сорочак А.П. – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. – 128 с.