

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 624.19-044.923:[004.9:517.96]

В. П. КУПРІЙ^{1*}, О. Л. ТЮТЬКІН², П. Є. ЗАХАРЧЕНКО³

^{1*} Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (099) 616 77 46, ел. пошта kypriy@i.ua, ORCID 0000-0002-6517-2554

² Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта alexeyutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

³ Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 354 34 96, ел. пошта paul902tv@gmail.com

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРИКЛАДНОЇ ПРОГРАМИ «ЛІРА» ПРИ РОЗРАХУНКАХ ОПРАВ ТУНЕЛІВ НЕКОЛОВОГО ОКРЕСЛЕННЯ

Мета. В статті досліджено вплив на напружено-деформований стан параметрів скінченно-елементної моделі, побудованої в програмному комплексі «Ліра», в чисельному аналізі тунелів неколового окреслення. **Методика.** Для досягнення поставленої мети, авторами в програмному комплексі «Ліра» були розроблені скінченно-елементні моделі калотної частини виробки при будівництві двоколісного залізничного тунелю. В кожній з моделей в програмному комплексі «Ліра» була конкретним способом дискретизована зона взаємодії із тимчасовим кріпленням. Після створення моделей, проводився їх чисельний аналіз із детальним дослідженням його результатів. **Результати.** В скінченно-елементних моделях отримані значення деформацій і напружень по горизонтальній і вертикальній осям, а також максимальні значення моментів і поздовжніх сил в тимчасовому кріпленні. Виконаний порівняльний аналіз компонент напруженого і деформованого станів при зміні параметрів скінченно-елементної моделі. Побудовані графіки закономірностей вказаних результатів від особливостей дискретизації двох моделей. Досліджено третю скінченно-елементну модель з радіальною розбивкою вузлів у зоні взаємодії тимчасового кріплення з оточуючим ґрунтовим масивом. **Наукова новизна.** Встановлено, що при чисельному аналізі НДС тунельної оправи неколового окреслення його результати суттєво залежать від форми, розмірів та конфігурації застосовуваних скінченних елементів, від розмірів розрахункової області ґрунтового масиву, а також від умов урахування дійсної (пружної чи пластичної) роботи ґрунтового масиву. **Практична значимість.** Визначено особливості дискретизації та необхідні розміри розрахункової області ґрунтового масиву при моделюванні системи «оправа – ґрунтовий масив», що забезпечують достатню точність розрахунку параметрів напружено-деформованого стану оправи.

Ключові слова: метод скінченних елементів; тунель; неколове окреслення; дискретизація; напружено-деформований стан

Вступ

При розрахунках тунелів та інших підземних споруд в даний час використовується чисельні методи, наприклад, метод скінченних елементів (МСЕ), реалізований в сучасних програмних комплексах (ПК) [1-4]. Використання таких ПК обумовлене і настановами діючого ДБН [5], в п. 5.28 якого зазначено: «В загальному випадку оправа підземної споруди і ґрунтовий масив, який її вміщує, слід розглядати як єдину систему "оправа – масив", яка працює в режимі спільної деформації».

Розгляд єдиної системи «оправа – масив» неможливо зробити при розрахунках методом сил, оскільки в цьому методі, як і в інших точ-

них або наближених методах, існує обмеженість моделювання масиву. Частіш усього, і оправа, і масив замінюються простими елементами типу стержнів або взагалі функціями, що описують форму та положення елементів. Режим спільної деформації, особливо у наближених методах, наприклад, Зурабова-Бугаєвої, замінюється режимом місцевої деформації, що реалізується у вигляді епюр пружного відпорю або основи Фуса-Вінклера [6, 7].

Для розрахунку та моделювання роботи підземних споруд широко використовується програмний комплекс «Ліра», в якому для моделювання роботи ґрунту використовуються фізично нелінійний скінченний елемент (СЕ 281-284). Але при моделюванні роботи підземних спо-

© В. П. Купрій, О. Л. Тютюкін, П. Є. Захарченко, 2017

руд, що споруджені або споруджуються в скельних та напівскельних породах, більш схильних до лінійного деформування під навантаженням, використання цього скінченного елемента не є правильним. Тому для моделювання скельного ґрунту частіше використовують скінченні елементи плоскої задачі (типу «пластина») із заданими параметрами жорсткості, тобто при моделюванні роботи системи «оправа – масив» виникають деякі протиріччя, які потрібно врахувати.

Також слід відмітити, що використання результатів розрахунків МСЕ при проектуванні тунельних оправ привели до того, що форма та геометричні розміри оправ стали досить сильно відрізнятися від класичних, що розраховувались методами сил, Метропроекту, Метродіпротрансу, Давидова, Орлова тощо [6-8].

На рис. 1 наведена оправа для скельних ґрунтів з класичного підручника [6], в якій зворотне склепіння відсутнє, а на рис. 2 наведена оправа нещодавно побудованого тунелю, в конструкції якого зворотне склепіння наявне, причому його товщина перевищує товщину верхнього склепіння тунелю в замку.

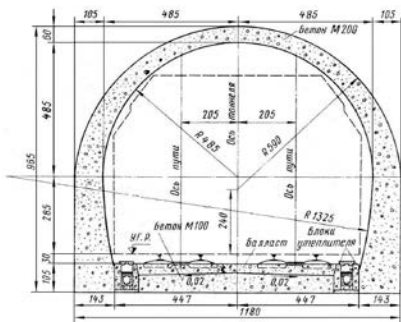


Рис. 1. Оправа двоколіійного залізничного тунелю

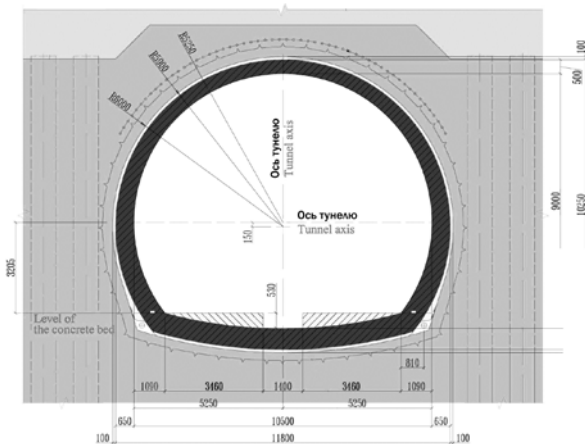


Рис. 2. Оправа двоколіійного залізничного тунелю

© В. П. Купрій, О. Л. Тютюкін, П. Є. Захарченко, 2017

Слід підкреслити, що існуючі раніше нормативні документи не рекомендували використовувати зворотне склепіння в скельних ґрунтах або його товщина приймалася в межах 60...80 % товщини склепіння в замку.

На рис. 3 приведено оправу автодорожнього тунелю в скельних ґрунтах з класичного підручника [7], де наявне зворотне склепіння, проте його товщина значно менша за товщину склепіння в замку та стінах. Для порівняння на рис. 4 приведено оправу нещодавно побудованого автодорожнього тунелю, в якому товщина зворотного склепіння перевищує товщину верхнього склепіння тунелю.

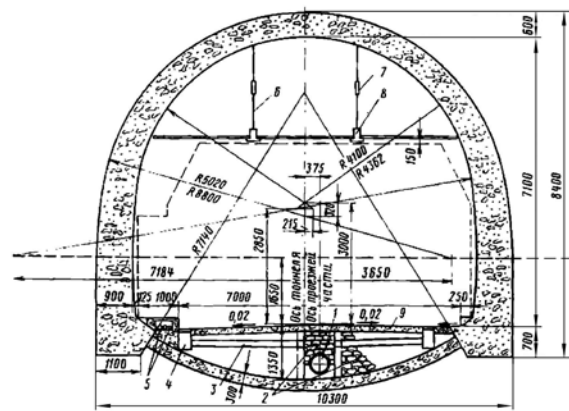


Рис. 3. Оправа автодорожнього тунелю (із джерела [7])

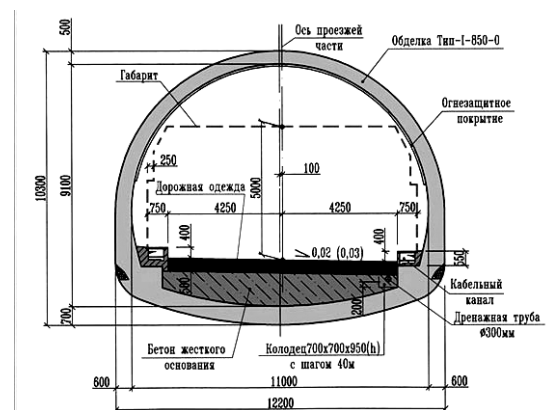


Рис. 4. Оправа автодорожнього тунелю

Аналіз вказаних ситуацій свідчить про те, що застосування різних підходів до проектування тунелів значно впливає на їх форму та геометричні параметри. Причому в якості наукової гіпотези можна висунути припущення, що застосування ПК, що реалізують МСЕ, на-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

дає таких результатів, що спотворюють розуміння взаємодії в системі «оправа – масив» і дозволяють проектувати конструкції із необґрунтованими розмірами.

Мета

Враховуючи аналіз ситуації в розрахунках тунелів, метою наданої роботи є з'ясування впливу на напружено-деформований стан (НДС) особливостей застосування прикладних програм на основі МСЕ та подальше врахування параметрів скінченно-елементної моделі в чисельному аналізі тунелів неколового окреслення, що споруджуються в скельних породах.

Методика

Моделювання взаємодії з оточуючим ґрунтовим масивом тимчасового кріплення при будівництві двокільного залізничного тунелю проводилося з застосуванням ПК «Ліра» [1, 9] лише для калотної частини виробки. Ґрунтовий масив дискретизовано за допомогою універсальних чотирикутних та трикутних скінченних елементів (в СЕ-бібліотеці ПК «Ліра» – № 281, 284, 282).

Загальний вигляд моделі представлений на рис. 5, ґрунтовий масив змодельований за допомогою скінченних елементів № 281 розміром 0,5×0,5 м. Модель мала розміри: ширина – 81,2 м, висота – 81 м. Виробка має наступні параметри: ширина – 11,6 м, висота – 5,8 м.

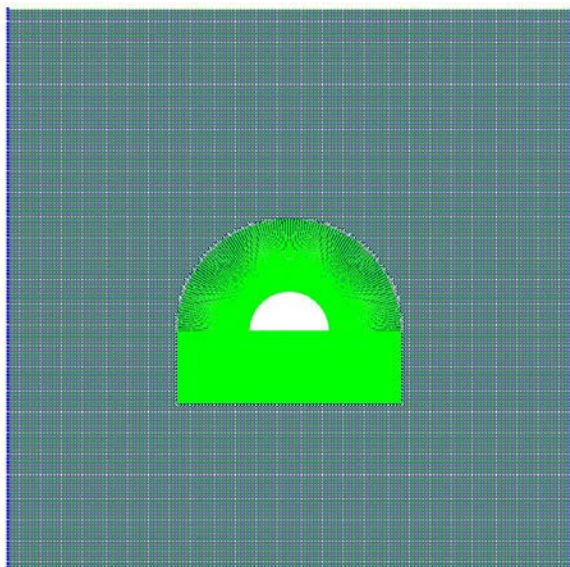


Рис. 5. Загальний вигляд моделі

Тимчасове кріплення змодельоване як аркове безшарнірне з двотавру № 20 за допомогою стержневих СЕ № 10 (рис. 6).

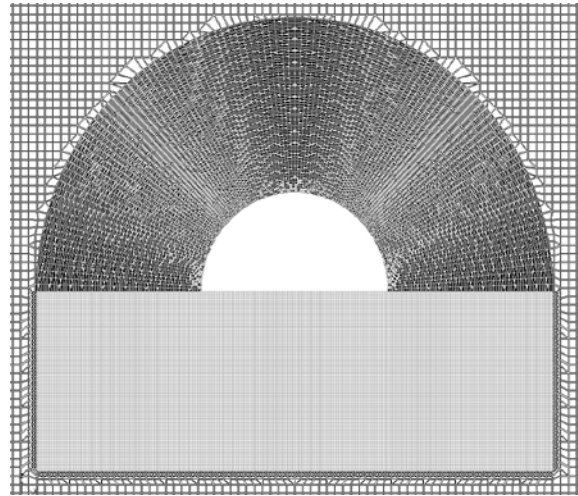


Рис. 6. Вигляд моделі навколо виробки

Оскільки склепіння виробки має неколове окреслення, то дискретизувати ґрунтовий масив за допомогою тільки прямокутних скінченних елементів неможливо [10-16]. У ПК «Ліра» дискретизація ґрунтового масиву з трикутних або чотирикутних скінченних елементів в зоні взаємодії з тимчасовим кріпленням проводиться за допомогою інструменту «Створення та триангуляція контуру» (див. рис. 6) [9, 12].

Результати

Результати розрахунків представлені на рис. 7-8. На рисунку 7 наведено ізополі переміщень у ґрунтовому масиві по осі Z.

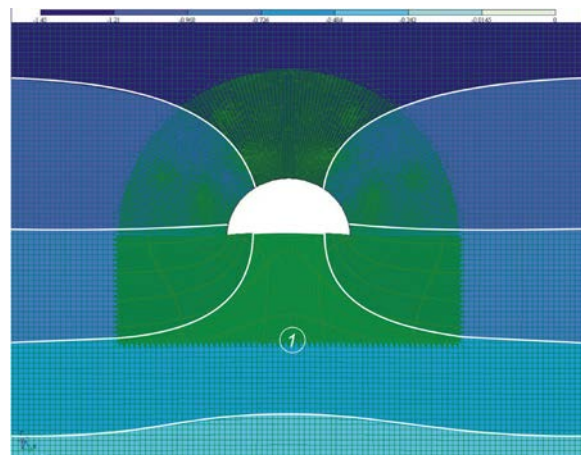


Рис. 7. Ізополі переміщень у ґрунтовому масиві по осі Z

В зоні взаємодії тимчасового кріплення з ґрунтовим масивом відмічається деформування ґрунту в склепінні виробки сумісно з тимчасовим кріпленням, що прогнозовано, але і підшва виробки деформується з товщою у три рази більшою за висоту виробки (1), що у скельних ґрунтах не спостерігається.

Ізополя напружень у ґрунтовому масиві по осі X показані на рис. 8. Максимальні стискаючі напруження у ґрунтовому масиві по осі X у зоні взаємодії тимчасового кріплення з ґрунтовим масивом збільшуються біля підшви виробки, а розтягнута зона напружень виникає у підшві виробки.

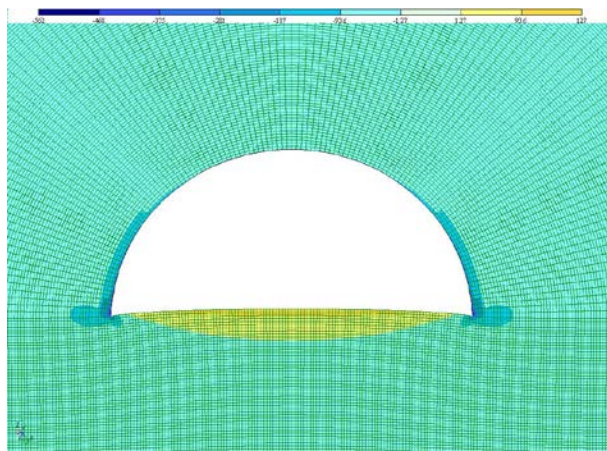


Рис. 8. Ізополя напружень у ґрунтовому масиві по осі X

На перший погляд, підшва виробки найбільше деформується та має більші напруження, що і призводить до посилення зворотного склепіння в тунельних оправах.

Перед тим, як перейти до з'ясування впливу привантаження підшви, слід виконати дослідження впливу коефіцієнта k_e на моделювання впливу характеристик ґрунту. Відповідно до [4, 6] коефіцієнт переходу до модуля деформації ґрунту по ланці вторинного навантаження виражається за формулою:

$$E_e = k_e E,$$

де E_e – модуль деформації ґрунту по ланці вторинного навантаження, kH/m^2 ; k_e – коефіцієнт переходу до модуля деформації ґрунту по ланці вторинного навантаження; E – модуль деформації ґрунту по ланці первинного навантаження, kH/m^2 .

Отже коефіцієнт переходу до модуля деформації ґрунту по ланці вторинного навантаження дорівнює $k_e = E_e/E$. Після створення обох моделей, проводився їх чисельний аналіз із детальним дослідженням його результатів.

В результаті розрахунку двох моделей отримані результати НДС. На рис. 9 наведено ізополя напружень у ґрунтовому масиві по осі X в зоні взаємодії тимчасового кріплення з ґрунтовим масивом, модель $k_e=3$. Напруження у ґрунтовому масиві по осі X змінюються у діапазоні від -562 до 126 т/м^2 . Напруження у ґрунтовому масиві по осі X у зоні взаємодії тимчасового кріплення з ґрунтовим масивом змінюються у такому ж діапазоні.

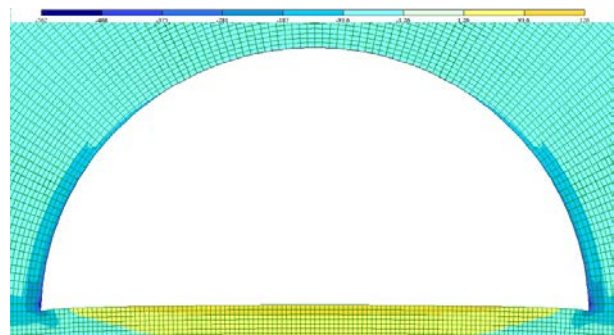


Рис. 9. Ізополя напружень ($k_e=3$)

На рисунку 10 наведено ізополя напружень у ґрунтовому масиві по осі X в зоні взаємодії тимчасового кріплення з ґрунтовим масивом, модель $k_e=6$.

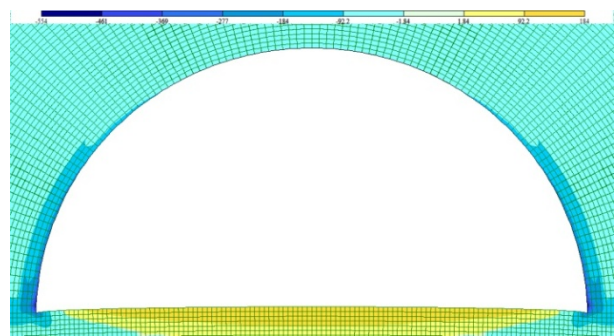


Рис. 10. Ізополя напружень ($k_e=6$)

Напруження у ґрунтовому масиві по осі X змінюються у діапазоні від -554 до 184 т/м^2 . Напруження у ґрунтовому масиві по осі X у зоні взаємодії тимчасового кріплення з ґрунтовим масивом змінюються у такому ж діапазоні, тоб-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

то зміна коефіцієнту k_e не має значного впливу на розподіл напружень в підшві виробки.

При розрахунку системи «оправа – масив» в ПК «ЛІРА» під дією власної ваги деформується весь ґрунтовий масив, а в зоні виробки на підшві навантаження відсутнє, тому масив нижче підшви деформується тільки під вагою ґрунту, який знаходиться нижче виробки в реальних умовах на нього діє весь масив ґрунту.

Щоб урівноважити переміщення та напруження у підшві виробки, додамо навантаження на підшву, що дорівнює вазі ґрунту, який знаходиться над підшвою, враховуючи площину виробки. Тобто навантаження на підшву розраховуємо від власної ваги ґрунту, який знаходиться від поверхні масиву до підшви виробки, таким чином враховуючи висоту виробки; оскільки на елементи, які знаходяться з боків виробки, навантаження від масиву ґрунту такою висотою, діє. Схему розрахунку навантаження наведено на рис. 11.

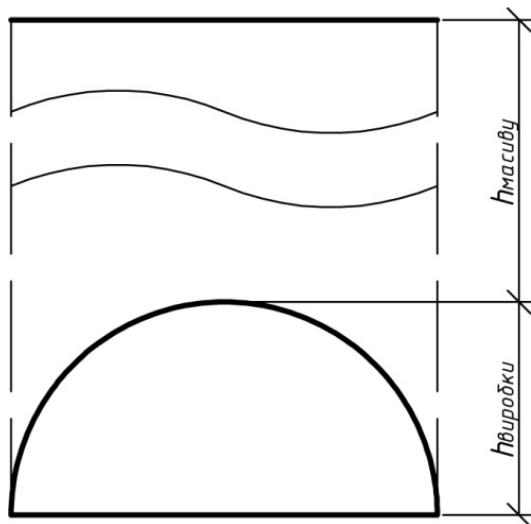


Рис. 11. Схема розрахунку навантаження на підшву виробки

На рисунку 12 зображено схему розрахунку вузлового навантаження на підшву. Рівномірно розподілене навантаження $q_{p.p.}$ розраховується за формулою:

$$q_{p.p.} = \gamma_{\text{ґрунту}} (h_{\text{виробки}} + h_{\text{масиву}}),$$

де $\gamma_{\text{ґрунту}}$ – питома вага ґрунту, кН/м^3 ; $h_{\text{виробки}}$ та $h_{\text{масиву}}$ – значення, наведені на рисунку 11.

$$Q = q_{p.p.} l B,$$

де l – ширина скінченного елемента (рис. 12), m ; B – ширина ґрунтового масиву (як і в характеристиках жорсткості ґрунтових скінчених елементів), m .

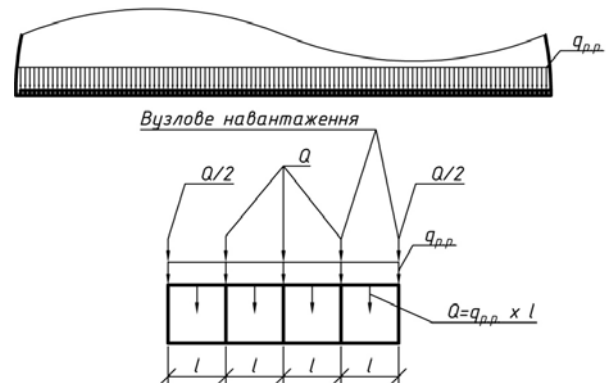


Рис. 12. Схема розрахунку вузлового навантаження на підшву

Навантаження задається у вигляді вузлового навантаження на підшву виробки. До крайніх вузлів підшви (спільних з тимчасовим кріпленням) прикладається навантаження $Q/2$. Необхідно перевіряти одиниці вимірювання сил у програмному комплексі.

В результаті розрахунку моделі з навантаженням на підшву отримані наступні результати.

На рис. 13 наведені ізополі переміщень по осі Z в моделі з навантаженням на підшву виробки.

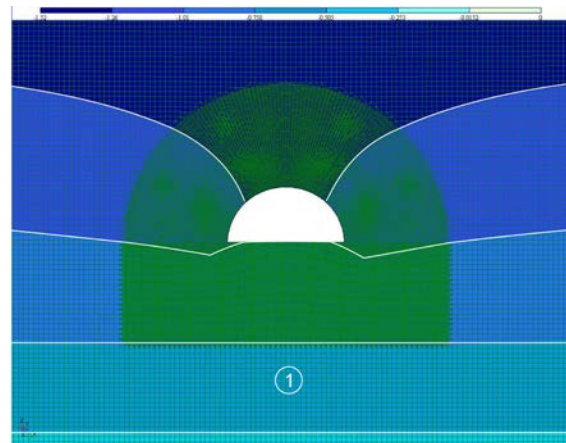


Рис. 13. Ізополі переміщень уздовж осі Z

На цьому рисунку чітко видно, що деформація склепіння аналогічна представлений на рисунку 11.

рис. 7, а ізополі переміщень по підшві виробки змінили свою форму, зона (1) на глибині під підшовою виробки вже не має значних деформацій в порівнянні з рис. 7.

Переміщення у підшві виробки виникають тільки у найближчому шарі ґрунту. Це викликано тим, що на елементи вузлів в боках виробки діє навантаження від власної ваги ґрунту, що знаходиться вище виробки та передається тимчасовим кріпленням на підшову.

На рис. 14 наведено ізополі напружень уздовж осі X . Максимальні стискаючі напруження у ґрунтовому масиві по осі X у зоні взаємодії тимчасового кріплення з ґрунтовим масивом збільшуються біля підшови виробки, а розтягнута зона напружень у підшві виробки вже відсутня.

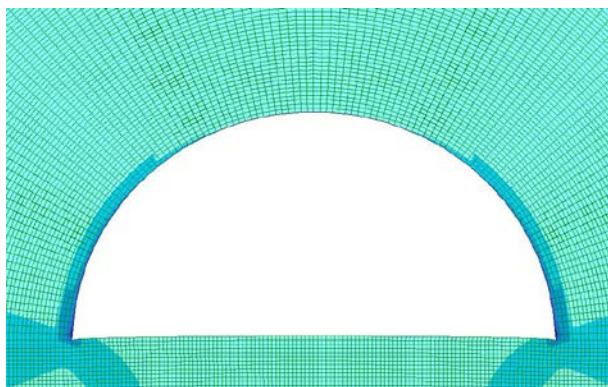


Рис. 14. Ізополі напружень уздовж осі X

На рис. 15 і 16 наведені епюри моментів у тимчасовому кріпленні в моделі без привантаження підшови виробки із привантаженням відповідно.

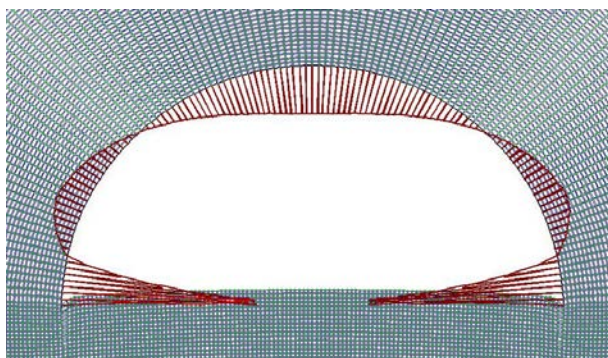


Рис. 15. Епюра згинального моменту у тимчасовому кріпленні

Аналіз результатів показує, що навантаження на підшову виробки впливає не тільки на зміну напруженого стану ґрунту підшови, а і на

величину зусиль в тимчасовому кріпленні склепіння виробки. В даному випадку різниця у величині моментів в замку склепіння складає 10 % відсотків і вона збільшується із зменшенням модуля деформації масиву ґрунту.

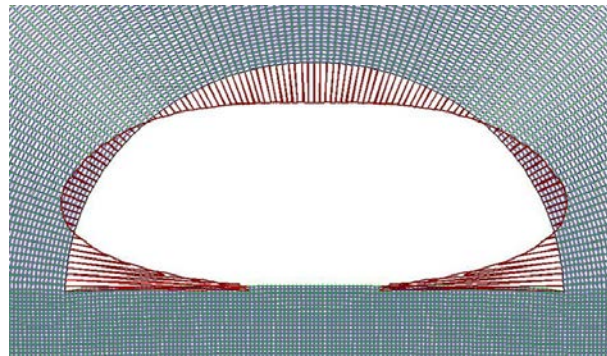


Рис. 16. Епюра згинального моменту у тимчасовому кріпленні

З наведених вище результатів моделювання напруженого стану ґрунтового масиву з кріпленням виробки, можна зробити висновок, що використання методу скінченних елементів, реалізованого в сучасних ПК без урахування їх особливостей призводить до помилок в розрахунках тунельних опор.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна отриманих результатів полягає у встановленні того факту, що при чисельному аналізі НДС тунельної оправи неколового окреслення його результати (напруження та переміщення елементів оправи тунелю, зусилля в тимчасовій оправі) суттєво залежать не тільки від форми, розмірів та конфігурації застосовуваних СЕ, від розмірів розрахункової області ґрунтового масиву, а також від умов урахування дійсної роботи ґрунтового масиву.

Практичну значимість отримано при визначенні особливостей навантаження моделі та необхідних розмірів розрахункової області ґрунтового масиву при моделюванні системи «оправа – ґрунтовий масив», що забезпечують достатню точність розрахунку параметрів напружено-деформованого стану оправи.

Висновки

Результати проведеного дослідження свідчать про те, що навіть апробовані автоматизовані процеси програмних комплексів, напри-

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

клад, такі, як дискретизація розрахункової області, не можна вважати остаточними. Безсумнівно те, що чисельний аналіз на основі методу скінченних елементів є не стовідсотково формалізованим процесом, і деякі його процедури потребують наукового обґрунтування в кожному конкретному випадку. В розглянутій конструкції неколового окреслення, для якої було створено три моделі із різним типом дискретизації, доведено, що її вплив є надто важливим при отриманні адекватних реальності результатам, і їм неможна нехтувати.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Городецкий, А. С. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений [Текст] / А. С. Городецкий, В. И. Заворицкий, А. И. Лантух-Лященко, А. О. Рассказов. – Москва : Транспорт, 1981. – 143 с.
2. Фадеев, А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике [Текст] / А. Б. Фадеев. – Москва : Недра, 1989. – 260 с.
3. Немчинов, Ю. И. Метод пространственных конечных элементов [Текст] / Ю. И. Немчинов. – Киев : НИИСК, 1995. – 368 с.
4. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Київ : Сталь, 2002. – 600 с.
5. ДБН В.2.3-7-2010. Споруди транспорту. Метрополітени [Текст]. – Надано чинності 2011-01-10. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 195 с.
6. Компаниец, С. А. Проектирование тоннелей [Текст] / С. А. Компаниец, А. А. Богородецкий, А. К. Поправко. – Москва : Транспорт, 1973. – 319 с.
7. Волков, В. П. Тоннели и метрополитены [Текст] / В. П. Волков, С. Н. Наумов, А. Н. Пирожкова, В. Г. Храпов. – Москва : Транспорт, 1975. – 618 с.
8. Петренко, В. Д. Обзор аналитических и экспериментальных методов исследования взаимодействия массива и крепи [Текст] / В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкин, В. И. Петренко // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2012. – Вип. 1. – С. 75-81.
9. Купрій, В. П. Моделювання сумісної роботи конструкції кріплення котловану та ґрунту з застосуванням методу скінченних елементів (МСЕ) [Текст] / В. П. Купрій, Є. Ю. Кулаженко, А. С. Гудкова // Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика. – 2015. – Вип. 7. – С. 19-26.
10. Петренко, В. Д. К вопросу о дискретизации конечно-элементных моделей [Текст] / В. Д. Петренко, А. Л. Тютюкин // Сб. научн. тр. ПГАСиА «Строительство. Материаловедение. Машиностроение», Днепропетровск, 2002. – Вип. 18. – С. 123-128.
11. Тютюкин, О. Л. Практичні основи створення моделі станції метрополітену методом автоматичної триангуляції [Текст] / О. Л. Тютюкин, Т. А. Педосенко // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту (14.05-15.05.2015) : тез. 75 міжнар. наук.-техн. конф. – Дніпропетровськ. – 2015. – С. 285-286.
12. Тютюкин, О. Л. Автоматична триангуляція для вирішення задач пошуку НДС взаємовпливаючих виробок [Текст] / О. Л. Тютюкин, В. М. Бізяєв // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту (19.05-20.05.2016) : тез. 76 міжнар. наук.-техн. конф. – Дніпропетровськ, 2016. – С. 169-170.
13. Купрій, В. П. Оптимізація режиму роботи тимчасового кріплення під час будівництва гірничого тунелю [Текст] / В. П. Купрій, Є. В. Сьомкіна // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту (19.05-20.05.2016) : тез. 76 міжнар. наук.-техн. конф. – Дніпропетровськ, 2016. – С. 199-201.
14. Cheon, D. S. Numerical analysis of geotechnical parameters on subsidence due to underground mining / D. S. Cheon, S. O. Choi, Y. S. Jeon, C. Ryu. – Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future, Erdem & Solak, 2005. – London : Taylor & Francis Group, 2005. – pp. 245-251.
15. Irons, B. M. The superpatch theorem and other proposition relating to the patch tests / B. M. Irons // Proc. of the 5th Canadian Congress of Applied Mechanics, Fredericton, 1975. – pp. 651-652.
16. Pang, C. H. Some considerations in finite element analysis of tunneling / C. H. Pang, K. Y. Yong, G. R. Dasari. – Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future, Erdem & Solak, 2005. – London : Taylor & Francis Group, 2005. – pp. 1149-1154.

В. П. КУПРІЙ^{1*}, А. Л. ТЮТЬКИН², П. Е. ЗАХАРЧЕНКО³

^{1*} Кафедра «Мости и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (099) 616 77 46, эл. почта kuryu@i.ua, ORCID 0000-0002-6517-2554

² Кафедра «Мости и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, эл. почта alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

³ Кафедра «Мости и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (096) 354 34 96, эл. почта paul902tv@gmail.com

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИКЛАДНОЙ ПРОГРАММЫ «ЛИРА» В РАСЧЕТАХ ОБДЕЛОК ТОННЕЛЕЙ НЕКРУГОВОГО ОЧЕРТАНИЯ

Цель. В статье исследовано влияние на напряженно-деформированное состояние параметров конечно-элементной модели, построенной в программном комплексе «Лира», в численном анализе тоннелей некругового очертания. **Методика.** Для достижения поставленной цели, авторами в программном комплексе «Лира» были разработаны конечно-элементные модели калотной части выработки при строительстве двухпутного железнодорожного тоннеля. В каждой из моделей в программном комплексе «Лира» была конкретным способом дискретизирована зона взаимодействия с временным креплением. После создания моделей, проводился их численный анализ с детальным исследованием его результатов. **Результаты.** В конечно-элементных моделях получены значения деформаций и напряжений по горизонтальной и вертикальной осям, а также максимальные значения моментов и продольных сил во временном креплении. Проведен сравнительный анализ полученных значений компонент напряженного и деформированного состояний при изменении параметров конечно-элементной модели. Построены графики закономерностей указанных результатов от особенностей дискретизации двух моделей. Исследована третья конечно-элементная модель с радиальной разбивкой узлов в зоне взаимодействия временного крепления с окружающим грунтовым массивом. **Научная новизна.** Установлено, что при численном анализе НДС тоннельной обделки некругового очертания его результаты существенно зависят от формы, размеров и конфигурации применяемых конечных элементов, от размеров расчетной области грунтового массива, а также от условий учета действительной (упругой или пластической) работы грунтового массива. **Практическая значимость.** Определено особенности дискретизации и необходимые размеры расчетной области грунтового массива при моделировании системы «обделка – грунтовый массив», которые обеспечивают достаточную точность расчета параметров напряженно-деформированного состояния обделки.

Ключевые слова: метод конечных элементов; тоннель; некруговое очертание; дискретизация; напряженно-деформированное состояние

V. P. KUPRIY^{1*}, O. L. TIUTKIN², P. YE. ZAKHARCHENKO³

^{1*} Department «Bridges and Tunnels» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (099) 616 77 46, e-mail kypriy@i.ua, ORCID 0000-0002-6517-2554

² Department «Bridges and Tunnels» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail alexeytutkin@gmail.com, ORCID 0000-0003-4921-4758

³ Department «Bridges and Tunnels» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 354 34 96, e-mail paul902tv@gmail.com

ANALYSIS OF FEATURES OF APPLIED SOFTWARE “LIRA” IN CALCULATIONS OF NON-CIRCULAR TUNNEL LININGS

Purpose. The article examines the effect on the stress-strain state of the parameters of the finite-element model created in the “Lira” software package in a numerical analysis of non-circular outlined tunnels. **Methodology** To achieve this goal, the authors developed finite element models of the calotte part of the mine during the construction of a double track railway tunnel using “Lira” software. In each of the models in the “Lira” software package, the interaction zone with temporary fastening was sampled in a specific way. After creation of models, their numerical analysis with the detailed research of his results was conducted. **Findings.** In the finite element models, the values of deformations and stresses in the horizontal and vertical axes, as well as the maximum values of the moments and longitudinal forces in the temporary fastening were obtained. A comparative analysis of the obtained values of the

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

components of the stress-strain state with a change in the parameters of the finite element model was carried out. The graphs of the laws of these results from the discretization features of the two models were plotted. The third finite element model with a radial meshing in the zone of interaction of temporary support with the surrounding soil massif was investigated. **Originality** It has been established that in the numerical analysis of the SSS of a tunnel lining of a non-circular outline, its results substantially depend on the shape, size and configuration of the applied finite elements, on the size of the computational area of the soil massif, and also on the conditions for taking into account the actual (elastic or plastic) behavior of the soil massif. **Practical value.** The features of discretization and the required dimensions of the computational area of the soil massif were determined when modeling the “lining – soil massif” system, which provide sufficient accuracy for calculating the parameters of the stress-strain state of the lining.

Keywords: finite element method; tunnel; non-circular outline; discretization; strain-stress state

REFERENCES

1. Gorodeckij A. S., Zavorickij V. I., Lantuh-Ljashhenko A. I., Rasskazov A. O. *Metod konechnykh jelementov v proektirovanii transportnykh sooruzhenij* [The finite element method in the design of transport structures]. Moscow, Transport Publ., 1981. 143 p.
2. Fadeev A. B. *Metod konechnykh jelementov v geomehanike* [Finite element method in geomechanics]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 260 p.
3. Nemchinov Ju. I. *Metod prostranstvennykh konechnykh jelementov* [The method of spatial finite elements]. Kyjiv, NIISK Publ., 1995. 368 p.
4. Perelmuter A. V., Slivker V. I. *Raschetnye modeli sooruzhenij i vozmozhnost ikh analiza* [Calculation models of constructions and possibility of their analysis]. Kyjiv, Stal Publ., 2002. 600 p.
5. *DBN V.2.3-7-2010. Sporudy transportu. Metropoliteny* [DBN V.2.3-7-2010. Constructions of transport. Metropolitan]. Kyjiv, Minreghionbud Ukrainy Publ., 2011. 195 p.
6. Kompaniec S. A., Bogorodeckij A. A., Popravko A. K. *Proektirovanie tonnelej* [Tunnel design]. Moscow, Transport Publ., 1973. 319 p.
7. Volkov V. P., Naumov S. N., Pirozhkova A. N., Hrapov V. G. *Tonneli i metropoliteny* [Tunnels and subways]. Moscow, Transport Publ., 1975. 618 p.
8. Petrenko V. D., Tyutkin A. L., Petrenko V. I. *Obzor analiticheskikh i eksperimentalnykh metodov issledovaniya vzaimodeystviya massiva i krepki* [Review of analytical and experimental methods of research of co-operation of massif and support]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2012, issue 1, pp. 75-81.
9. Kuprii V. P., Kulazhenko Ye. Yu., Hudkova A. S. *Modeliuvannia sumisnoi roboty konstruktsii kriplennia kotlovanu ta gruntu z zastosuvanniam metodu skinchenykh elementiv (MSE)* [Simulation of the joint operation of the foundation and soil fixation using the finite element method (FEM)]. *Mosty ta tuneli: teorija, doslidzhennja, praktyka – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 2015, issue 7, pp. 19-26.
10. Petrenko V. D., Tjut'kin A. L. *K voprosu o diskretizacii konechno-jelementnykh modelej* [On the question of discretization of finite element models]. *Sb. nauchn. tr. PGASiA «Stroitel'stvo. Materialovedenie. Mashinostroenie» – Collection of scientific works PGASiA "Construction. Materials Science. Mechanical engineering*», 2002, issue 18. pp. 123-128.
11. Tiutkin O. L., Pedosenko T. A. *Praktychni osnovy stvorennia modeli stantsii metropolitenu metodom avtomatichnoi trianhuliatsii* [Practical bases for creating a model of a subway station by the method of automatic triangulation]. *Tezy 75 Mizhnar. nauk.-tekhn. konferentsii «Problemy ta perspektyvy rozvytku zaliznychnoho transportu»* [Abstracts 75 International Sci.-Tech. Conference "Problems and Prospects for the Development of Railway Transport"]. Dnipropetrovsk, 2015, pp. 285-286.
12. Tiutkin O. L., Biziaiev V. M. *Avtomatychna trianhuliatsiia dlja vyrishennia zadach poshuku NDS vzaiemovplyvaiuchykh vyrobok* [Automatic triangulation for solving search problems for VAT interfacing workings]. *Tezy 76 Mizhnar. nauk.-tekhn. konferentsii «Problemy ta perspektyvy rozvytku zaliznychnoho transportu»* [Abstracts 76 International Sci.-Tech. Conference "Problems and Prospects for the Development of Railway Transport"]. Dnipropetrovsk, 2016, pp. 169-170.
13. Kuprii V. P., Somkina Ye. V. *Optymizatsiia rezhymu roboty tymchasovoho kriplennia pid chas budivnytstva hirnychoho tuneliu* [Optimization of the mode of temporary fixing during the construction of a mining tunnel]. *Tezy 76 Mizhnar. nauk.-tekhn. konferentsii «Problemy ta perspektyvy rozvytku zaliznychnoho transportu»* [Abstracts 76 International Sci.-Tech. Conference "Problems and Prospects for the Development of Railway Transport"]. Dnipropetrovsk, 2016, pp. 199-201.

14. Cheon D. S., Choi S. O., Jeon Y. S., Ryu C. Numerical analysis of geotechnical parameters on subsidence due to underground mining. *Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future*, Erdem & Solak, 2005. London, Taylor & Francis Group, 2005, pp. 245-251.
15. Irons B. M. The superpatch theorem and other proposition relating to the patch tests. *Proc. of the 5th Canadian Congress of Applied Mechanics*, Fredericton, 1975, pp. 651-652.
16. Pang C. H., Yong K. Y., Dasari G. R. Some considerations in finite element analysis of tunneling. *Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future*, Erdem & Solak, 2005. London, Taylor & Francis Group, 2005, pp. 1149-1154.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. М. М. Біляєвим (Україна), д.т.н, проф. Й. Й. Лучком (Україна).

Надійшла до редколегії 18.10.2017

Прийнята до друку 26.10.2017