

УДК 624.191.044

Оптимізація геометричних параметрів тунельної конструкції колонної станції метрополітену

Петренко В. Д.¹, Тютюкін О. Л.¹, Петренко В. І.²

¹ Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, Україна,

² ВАТ «Київметробуд», Київ, Україна

Анотація

В роботі викладено результати критичного аналізу побудови скінченно-елементних моделей колонної станції метрополітену та виконано дослідження та оптимізацію геометричних параметрів її тунельної конструкції, зокрема, отримано аналітичну залежність напружень в елементах від кроку колон.

1. Постановка проблеми

Розрахунок об'єктів зі складною геометрією, до яких відносяться тунельні конструкції, успішно може проводитися на основі числових методів, до яких відноситься метод скінченних елементів (МСЕ). Достоїнства і недоліки його застосування в повному об'ємі аналізувалися у ряді робіт [1–4].

Розвиток числового аналізу МСЕ складних тунельних конструкцій (станцій метрополітену, ескалаторних тунелів, вестибюлів) також був пов'язаний з аналітичними методами, з яких були запозичені як позитивні, так і негативні прийоми створення моделей. Результати критичного аналізу створення моделей, який можна провести, на ряді моделей колонної станції глибокого закладення дозволяють визначити не тільки тенденцію розвитку числового моделювання МСЕ, але і з'ясувати переваги і недоліки даних моделей.

2. Огляд досліджень і публікацій

Звичайним перенесенням з прийомів аналітичних методів аналізу напружено-деформованого стану (НДС) тунельних конструкцій в МСЕ є стрижньова скінченно-елементна модель (СЕ-модель), яка є результатом повної ідеалізації як тунельної конструкції, так і навколишнього масиву [1, 5, 6]. Всі частини системи «тунельна конструкція–оточуючий масив» замінені стрижнями з певною жорсткістю, що є основним прийомом таких аналітичних методів, як методи О. Ю. Бугаєвої, С. С. Давидова, С. О. Орлова, Метродіпротрансу та інших. Поза сумнівом, проводити детальний аналіз таких схем не потрібно, оскільки такий ступінь ідеалізації системи і без жодних доказів викликає сумніви в точності і достовірності результатів, які одержуються в процесі розрахунку.

Просторова стрижньова модель практично не відрізняється від плоских моделей, проте в ній врахований просторовий чинник роботи елементів тунельної конструкції, що значно підвищує достовірність результатів розрахунку. Детальний аналіз плоских і просторових стрижньових схем з визначенням їх переваг і недоліків наведений в роботі [1]. Деяко більш адекватною до реальної тунельної конструкції є гібридна стрижньово-пластинчаста модель, в якій конструкція станції моделюється стрижнями, а навколишній масив – пластинами, проте подальше дослідження даної моделі показало, що застосування гібридних кінцевих елементів, що мають різні функції форми, закони сумісної деформації і кількість ступенів свободи, приводить до зниження точності результатів. Проте, гібридні моделі є першими моделями, які не спираються на аналітичні методи, а будуються за принципами числового моделювання МСЕ.

Моделлю, яка б відображала і просторовий чинник роботи тунельної конструкції, і взаємодію між конструкцією і масивом є СЕ-модель на основі пластинчастих елементів [1, 7]. Проблема взаємодії між стрижнями і пластинами в даній моделі розв'язана, що привело до значного підвищення точності і достовірності результатів при достатньо простій роботі із створення моделей.

Останньою за часом створення є континуальна СЕ-модель на основі об'ємних елементів, яка може вважатися наближеною до реальної тунельної конструкції. При її створенні

враховуються геометричні параметри, характеристики деформації і густина матеріалів, складні комплекси навантажень і дій, а також принципи числового моделювання з позиції механіки суцільного середовища і підземних споруд.

3. Мета дослідження

Метою наданої роботи є дослідження та оптимізація геометричних параметрів колонної станції, зокрема, кроку колон на основі просторової СЕ-моделі.

4. Викладення основного матеріалу

Побудова математичної моделі МСЕ містить в собі ідеалізацію властивостей конструкції і зовнішніх дій. Проте, при математичному описі поведінки моделі часто доводиться вводити додаткові спрощення характеру взаємодії частин моделі і матеріалу. МСЕ не вимагає введення спеціальних обмежень, що є його перевагою в дослідженні складних нерегулярних конструкцій із значними скачками жорсткостей. Модель трьохсклепінчастої станції колонного типу, яка представлена в наданій роботі, побудована на основі реальних геометричних розмірів, результатів лабораторних досліджень і застосування розрахункового професійного комплексу Structure CAD for Windows, version 7.29 R.3 (SCAD) (рис. 1).

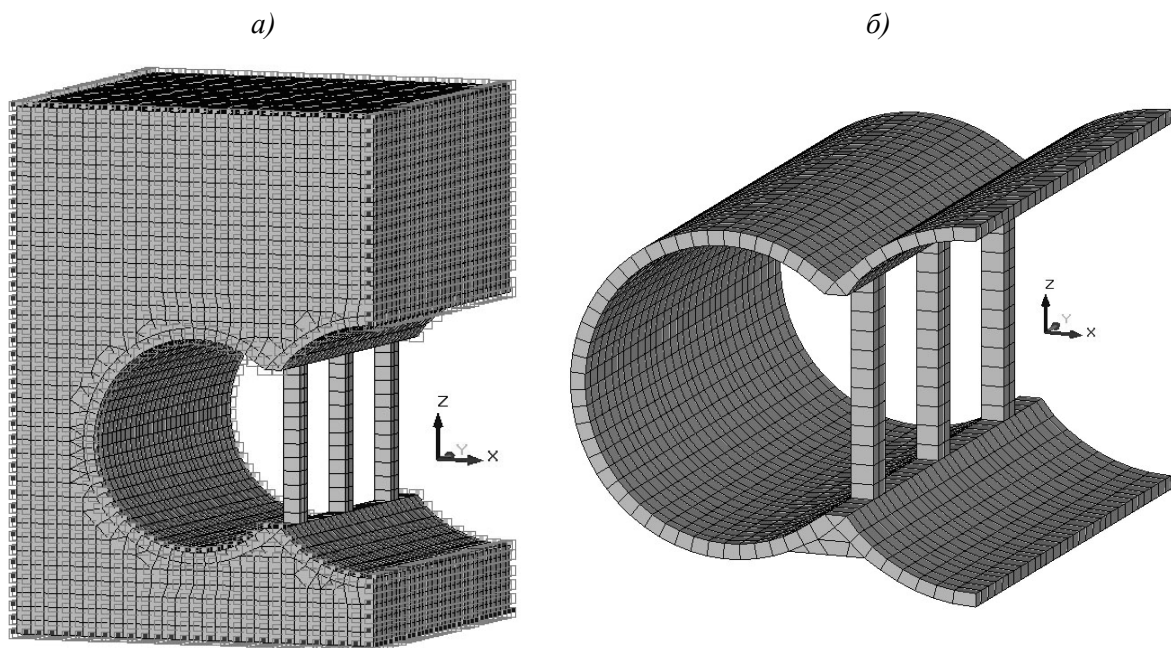


Рис. 1. Скінченно-елементна модель колонної станції:
а) загальний вигляд; б) фрагмент

Модель заснована на об'ємних скінченних елементах (26114 вузлів, 23142 скінченних елементів) і більш повно відображає статичну роботу конструкції колонної станції з навколишнім масивом, ніж плоскі моделі [1, 4]. Після створення просторової моделі їй призначалися деформаційні характеристики (модуль пружності, коефіцієнт Пуассона), причому для ґрунтів і залізобетону вони задавалися окремо. Оскільки деформаційні характеристики залізобетону складаються із значень деформаційних характеристик бетону і арматури, запропоновано враховувати їх анізотропію згідно приведеним характеристикам [7].

Після привласнення деформаційних характеристик до моделі прикладалися граничні умови. Потім виконувався розрахунок на дію власної ваги, і проводився аналіз його результатів. Причому базова модель, яка прийнята для розрахунку, мала крок колон 3,75 м (між гранями колон). Результати розрахунків у вигляді ізоліній і ізополів НДС моделі в роботі не наводяться внаслідок їх значного об'єму.

Для пошуку еквівалентних напружень $\sigma_{екв}$ застосуємо енергетичну четверту теорію міцності, згідно якої еквівалентні напруження розраховуються як:

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_x \sigma_z + \sigma_z^2 + 3\tau_{xz}^2} \leq [\sigma],$$

де σ_x і σ_z – компоненти нормальних напружень по глобальних осях X та Z; τ_{xz} – компонента дотичних напружень в площині XZ; $[\sigma]$ – межа міцності матеріалу (для бетону В30 – $[\sigma]=21,0$ МПа).

На рис. 2 представлена схема точок і областей, в яких спостерігається концентрація напружень (однієї або декількох компонент) і знаходяться еквівалентні напруження.

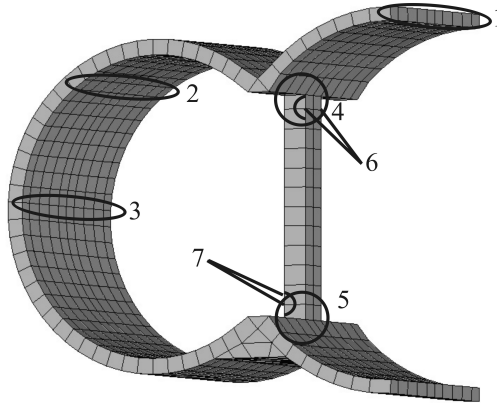


Рис. 2. Схема точок і областей концентрації напружень

Для наочного уявлення результати аналізу зведені в табл. 1.

Табл. 1. Визначення еквівалентних напружень (крок колон – 3,75 м)

Номер точки	Напруження, МПа			Еквівалентне напруження, МПа	Коефіцієнт запасу $n = \frac{[\sigma]}{\sigma_{екв}}$
	Нормальне по осі X	Нормальне по осі Z	Дотичне в площині XZ		
1	+0,256	-0,047	-0,046	0,249	84,3
2	-0,381	-0,473	-0,349	0,956	22,0
3	-0,107	-1,115	-0,013	1,172	17,9
4	-0,107	-0,834	+0,035	0,894	23,5
5	-0,153	-1,196	+0,035	1,281	16,4
6	-0,017	-2,281	-0,061	2,292	9,2
7	-0,017	-2,281	-0,061	2,290	9,1

Як видно з табл. 1, значення еквівалентних напружень не досягають межі міцності матеріалу, а значення коефіцієнтів запасу ($n=9,1...84,3$) також свідчить про те, що умова міцності виконується.

Для глибшого розуміння поведінки станційної конструкції при зміні важливих геометричних параметрів, які надалі впливають на архітектурне рішення станційного простору і пасажиропотоки, проведемо дослідження впливу кроку колон на загальний НДС конструкції колонної станції.

З аналізу результатів попереднього розрахунку станційної конструкції з кроком колон, рівним 3,75 м, витікає, що, по-перше, колони є найбільш напруженим елементом конструкції (чотири зони концентрації з семи), а, по-друге, значення еквівалентних напружень значно менше межі міцності бетону конструкції. Тобто результати аналізу свідчать про те, що деякі геометричні розміри станції можна змінити у бік збільшення, а саме можливо збільшити крок між колонами. Така дія приведе до кількісного збільшення напружень в конструкції станції, зокрема в системі колон, а також в обробці середнього і бічного тунелів. Варіюючи крок колон, можна встановити залежність їх зміни і, таким чином, прогнозувати збільшення напружень при

збільшенні кроку між колонами. Також можна з'ясувати крок колон, при якому еквівалентні напруження дорівнюватимуть межі міцності бетону, тобто критичний крок колон рівний $b_{кр}$.

Для подальших розрахунків приймемо два варіанти кроку колон: 1 варіант – 4,8 м; 2 варіант – 5,6 м. Для побудови залежностей напружень від кроку колон застосуємо також результати аналізу варіанту з кроком 3,75 м.

Перед аналізом слід зазначити, що місце знаходження точок і областей концентрації напружень (рис. 2), не змінили свого місцеположення, тобто порівняння напружень в моделях з різним кроком колон є коректним. У табл. 2 і 3 представлені результати розрахунку еквівалентних напружень.

Табл. 2. Визначення еквівалентних напружень (крок колон – 4,8 м)

Номер точки	Напруження, МПа			Еквівалентне напруження, МПа	Коефіцієнт запасу $n = \frac{[\sigma]}{\sigma_{екв}}$
	Нормальне по осі X	Нормальне по осі Z	Дотичне в площині XZ		
1	+0,263	-0,046	-0,048	0,257	81,7
2	-0,389	-0,474	-0,355	0,969	21,7
3	-0,109	-1,147	-0,062	1,210	17,4
4	-0,109	-0,979	+0,035	1,040	20,2
5	-0,156	-1,316	+0,035	1,402	15,0
6	-0,016	-2,326	-0,063	2,337	9,0
7	-0,016	-2,326	-0,063	2,337	9,0

Табл. 3. Визначення еквівалентних напружень (крок колон – 5,6 м)

Номер точки	Напруження, МПа			Еквівалентне напруження, МПа	Коефіцієнт запасу $n = \frac{[\sigma]}{\sigma_{екв}}$
	Нормальне по осі X	Нормальне по осі Z	Дотичне в площині XZ		
1	+0,315	-0,046	-0,049	0,307	68,5
2	-0,393	-0,485	-0,358	0,982	21,4
3	-0,139	-1,171	-0,064	1,251	16,8
4	-0,139	-1,000	+0,034	1,078	19,5
5	-0,139	-1,342	+0,034	1,418	14,8
6	-0,037	-2,371	-0,064	2,392	8,78
7	-0,037	-2,371	-0,064	2,392	8,87

Для подальшого аналізу побудована діаграма залежності еквівалентних напружень від кроку колон (рис. 3) і проведена апроксимація графіка максимальних еквівалентних напружень, в результаті якої одержана аналітична залежність. За допомогою даної залежності можна одержати критичний крок колон $b_{кр}$, при якому напруження в точках 6 і 7 (концентратор на колоні, рис. 2) дорівнюватимуть межі міцності бетону В30 ($[\sigma]=21,0$ МПа).

Як видно з графіка, аналітична залежність еквівалентних напружень в точках концентрації 6 і 7 від кроку колон має вид рівняння прямої лінії: $\sigma_{екв} = 0,0535b + 2,0881$, а величина достовірності апроксимації – $R^2 = 0,9817$, тобто одержана залежність має практично функціональний вигляд. Користуючись цим виразом, набудемо значення критичного кроку колон $b_{кр}$, який дорівнює 353,0 м, тобто для інженерно-геологічних умов, в яких була закладена станція колонного типу можна було б застосувати односклепінчасту станцію, або збільшити крок колон, наприклад, до $b=6\dots 8$ м, причому максимальні еквівалентні напруження коливалися б близько 2,5 МПа.

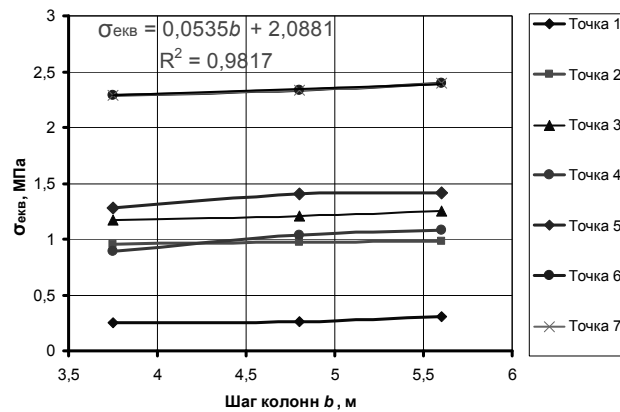


Рис. 3. Графік залежності $\sigma_{екв}$ в точках концентрації від кроку колон (точка 6 і 7 – співпадають)

5. Висновки

З розрахунку станційної конструкції і дослідження впливу кроку колон на загальне ПДВ можна зробити наступні висновки.

1. Значення напружень в моделі з кроком $b = 3,75$ м складає $0,249 \dots 2,292$ МПа, що значно менше межі міцності бетону В30 (запас міцності $n = 9,1 \dots 84,3$), тобто конструкція станції витримує навантаження від власної ваги оточуючого масиву.

2. Дослідження впливу кроку колон на загальне ПДВ доводить, що критичний крок колон для представлених умов складає $b_{кр} = 353$ м, тобто крок колон можна було збільшити до $b = 6 \dots 8$ м, причому максимальні еквівалентні напруження склали б близько 2,5 МПа.

Бібліографічний список

1. Петренко В.І. Розрахунок трисклепінчастих станцій метрополітену глибокого закладення [Текст] / В.І. Петренко, В.Д. Петренко, О. Л. Тют'їн. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2004. – 176 с.
2. Шашенко А. Н. Расчет несущих элементов подземных сооружений [Текст] / А.Н. Шашенко, В.П. Пустовойтенко. – К.: Наукова думка, 2001. – 168 с.
3. Фролов Ю.С. Системный анализ конструкций колонной станции полузакрытого способа [Текст] / Ю.С. Фролов. // Метро. – 1994. – №2. – С. 30-31.
4. Юркевич П.Б. Геомеханические модели в современном строительстве [Текст] / П.Б. Юркевич. // Подземное пространство мира. – № 1-2. – 1996. – С. 10-31.
5. Баклашов И.В. Механика подземных сооружений и конструкции крепей [Текст] / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия. – М.: Недра, 1984. – 415 с.
6. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений [Текст] / Н.С. Булычев. – М.: Недра, 1994. – 382 с.
7. Устинов В.П. Метод конечных элементов в расчете железобетонных конструкций [Текст] / В.П. Устинов, В.М. Круглов, В.И. Кудашов. // Метод конечных элементов в строительной механике. – Горький: Горьковский университет, 1975. – С. 141-148.

© Петренко В. Д., Тют'їн О. Л., Петренко В. І.