

УДК 519.87:624.191.8

К. Є. ФЕДОРОВ¹, О. Л. ТЮТКІН^{2*}

¹Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (096) 353 29 33, ел. пошта kostia.fedoroff1@gmail.com, ORCID 0000-0002-3010-0489

^{2*}Каф. «Транспортна інфраструктура», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 290 45 18, ел. пошта o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-4758

Математичне моделювання конструкції станції метрополітену пілонного типу на основі чисельного аналізу

Мета. Автори ставлять за мету провести математичне моделювання конструкції станції метрополітену пілонного типу на основі чисельного аналізу методом скінченних елементів, а також виконати пошук компонент напружено-деформованого стану й з'ясувати міцність комбінованого кріплення, яке зводиться на основі Новоавстрійського методу спорудження тунелів. **Методика.** Для досягнення поставленої задачі було розроблено скінченно-елементну модель станції метрополітену пілонного типу у професійному розрахунковому комплексі Structure CAD for Windows. В моделі повною мірою відображені властивості комбінованого (тимчасового та постійного) кріплення станції метрополітену пілонного типу. Змодельована половина станції метрополітену пілонного типу, моделі надані деформаційні характеристики, взяті з реальних інженерно-геологічних досліджень. Також до моделі прикладений комплекс граничних умов, які відповідають реальному деформуванню системи, а також сполучення навантажень. **Результати.** Під час чисельного аналізу отримано репрезентативну інформацію щодо напружено-деформованого стану станції метрополітену пілонного типу і з'ясовано, що наявність проходів, а також ділянок переходу проходів в пілон й навпаки, свідчить про значний їх перерозподіл. Детальний аналіз переміщень оправи довів, що деформування оправи середнього й бокового тунелів підтверджує майже однорідне переміщення станційної конструкції. Визначено максимальні значення напружень у постійній оправі станції метрополітену пілонного типу. Наявність системи пілонів, а також проходів формує неоднорідний напружений стан, який в комплексі з однорідним деформованим, представляє визначальну перевагу станційної конструкції такого типу. **Наукова новизна** результатів полягає у вперше отриманих в ході математичного моделювання результатах напружено-деформованого стану конструкції станції пілонного типу, що споруджується в міцних породах на основі NATM. **Практична значимість.** Її характеризують результати аналізу міцності комбінованого (тимчасового та постійного) кріплення станції пілонного типу глибокого закладення.

Ключові слова: метрополітен; станція пілонного типу; скельні породи; напружено-деформований стан; метод скінченних елементів; Новоавстрійський метод спорудження тунелів

Вступ

Математичне моделювання конструкції станції метрополітену пілонного типу глибокого закладення, що проводиться на основі чисельного аналізу методом скінченних елементів, є складним завданням навіть для вже відомих конструкцій цієї підземної споруди [3, 6, 10].

Для нової конструкції такого типу станції, що споруджується в міцних породах на основі Новоавстрійського методу спорудження тунелів (NATM) і має кардинально іншу структуру, задача проведення чисельного аналізу, який є адекватним реальній ситуації, ускладнюється ще більше [2]. Наявність професійних розрахункових комплексів для чисельного аналізу де-що зменшує складність задачі пошуку напру-

жено-деформованого стану конструкції станції метрополітену пілонного типу [1–3].

Задача математичного моделювання, що розв'язується в даній статті, навіть за наявності професійного розрахункового комплексу мала певні передумови. Передумовами чисельного аналізу є відображення реальної конструкції станції метрополітену пілонного типу в математичній моделі максимально повно, а також проведення чисельного аналізу із мінімальною кількістю припущень.

Не викликає ніяких сумнівів те, що постановка задачі, що вирішується в рамках чисельного аналізу, може бути виключно просторовою. Як вже було проаналізовано в роботах [4, 5, 8], слід враховувати просторовий фактор як

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

такий, що має першочергове значення під час формування напружено-деформованого стану. Відповідно, основною передумовою чисельного аналізу є врахування просторовості конструкції під час розробки моделі [9, 11].

Другою передумовою, яка реалізована під час математичного моделювання, є максимальне повне відображення в скінченно-елементній моделі розмірів станції метрополітену пілонного типу, що споруджується NATM, та властивостей оточуючого масиву, отриманих на основі аналізу інженерно-геологічних умов.

Безсумнівно, що в подальшому чисельному аналізі повною мірою відображено основний принцип геомеханіки, а саме принцип взаємного впливу підземної споруди та оточуючого масиву [7, 12]. Без його втілення в скінченно-елементних моделях станції метрополітену пілонного типу, що максимально тісно взаємодіє зі скельним оточуючим масивом, формуючи загальний напружено-деформований стан, неможливо відобразити особливості NATM, а саме багат шаровість та суцільність оправи.

Однак слід визнати, що не всі особливості цього методу спорудження підземних об'єктів були відображені в скінченно-елементних моделях, однак це не вплинуло негативно на досягнення мети наукової статті, а лише дещо скоригувало отримані результати. Важливим етапом будівництва станції метрополітену пілонного типу, який не був втілений в ході математичного моделювання, є послідовне створення виробки по частинах й закріплення її тимчасовим кріпленням, що складалося не тільки зі сталевих арок й торкрет-бетону товщиною 0,2 м, які в моделі відображені повною мірою. Відповідно, дослідження проводиться виключно в експлуатаційній стадії.

Мета

Метою наукової статті є проведення математичного моделювання конструкції станції метрополітену пілонного типу на основі чисельного аналізу методом скінченних елементів із пошуком максимальних компонент напружено-деформованого стану й подальшим з'ясуванням міцності комбінованого (тимчасове та постійне) кріплення, яке зводиться на основі Новоавстрійського методу спорудження тунелів (NATM).

Методика

Для досягнення поставленої задачі було розроблено скінченно-елементну модель станції метрополітену пілонного типу в професійному розрахунковому комплексі Structure CAD for Windows, version 11.5 (SCAD) [1]. У ній повною мірою відображені властивості комбінованого (тимчасового та постійного) кріплення станції метрополітену пілонного типу.

Таким чином, на першому етапі математичного моделювання на основі чисельного аналізу було створено пластинчастий прототип поперечного перерізу кріплення станції метрополітену пілонного типу (рис. 1), в якому відображена система «станційна конструкція – оточуючий масив» з її реальними розмірами та глибиною закладення, що характерна для станції «Центральна» Дніпровського метрополітену.

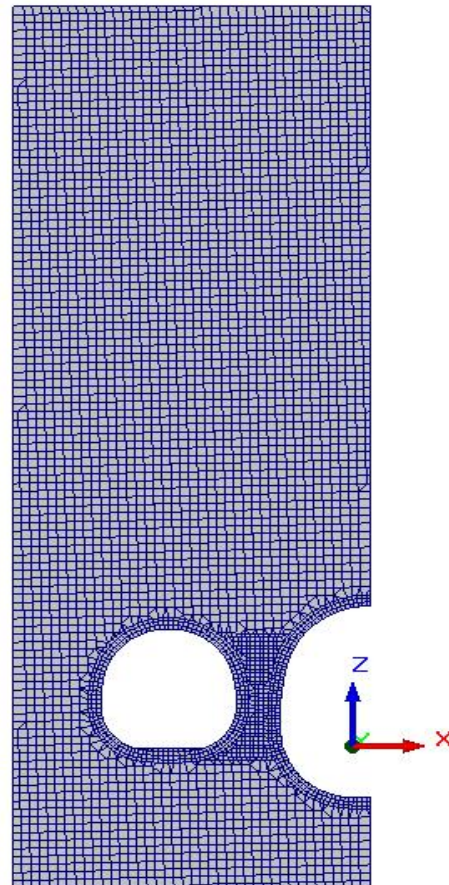


Рис. 1. Пластинчаста модель кріплення станції метрополітену пілонного типу

Fig. 1. Plate model of pylon-type metro station lining

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Остаточно створена пластинчаста модель кріплення станції метрополітену пілонного типу в пілонній частині (кількість вузлів – 4 938, кількість скінченних елементів – 4 780) має розміри: по горизонтальній осі – 20 м, по вертикальній осі – 55,5 м. Прийнята змінна висота скінченного елемента, що знаходиться в межах 0,2×0,2 м та 0,2×0,25 м. Близько 90 % моделі (скельний масив, оточуючий станцію метрополітену пілонного типу, й гірський масив до поверхні) складають скінченні елементи розмірами 0,5×0,5 м.

Змодельований фрагмент станції пілонного типу у 3D-виді (кількість вузлів – 124 320, кількість скінченних елементів – 115 067, завдання характеризується як задача високої розірності) (рис. 2).

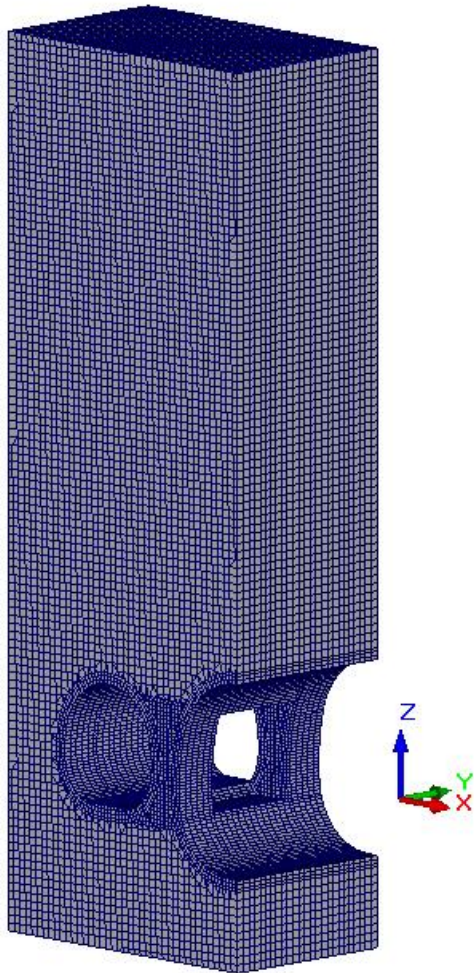


Рис. 2. Просторова модель станції пілонного типу

Fig. 2. Spatial model of a pylon-type station

Після створення моделі, їй надавалися граничні умови. Оскільки змодельована ділянка станції, що повторюється, торцям скінченно-елементної моделі надано граничні умови, що відповідають плоскій деформації (заборона деформування по горизонтальній й поздовжній осям, тобто осям X та Y комплексу SCAD відповідно). Моделювання половини станції метрополітену пілонного типу потребує граничної умови, що відображає симетрію (заборона деформування по горизонтальній осі, тобто осі X SCAD). Аналіз інженерно-геологічних умов свідчить, що станція покоїться на міцній малодеформованій основі (плагіограніт), то слід надати моделі граничні умови, що забороняють переміщення по трьом осям (осі X, Y та Z комплексу SCAD).

Деформаційні характеристики, які присвоювалися тетраедрам і призмам, відповідають матеріалам, що моделюють комбіноване кріплення станції метрополітену пілонного типу, тобто тимчасове товщиною 0,2 м з бетону класу C20/25 з модулем пружності $E_b = 23 \cdot 10^3$ МПа та розрахунковим опором на стиск $R_b = 14,5$ МПа, а також постійне з модулем пружності $E_b = 30,5 \cdot 10^3$ МПа та розрахунковим опором на стиск $R_b = 25,0$ МПа.

Після завдання деформаційних характеристик до моделі кріплення станції пілонного типу були додані навантаження: 1) власна вага постійного та тимчасового кріплення; 2) навантаження від навколишнього ґрунту; 3) тимчасове навантаження.

Результати

Загальний деформований стан для кріплення станції метрополітену пілонного типу завтовшки 0,5 м (постійне кріплення) та 0,2 м (тимчасове кріплення) для двох компонент наведено на рис. 3.

Якісний аналіз деформованого стану загальної моделі демонструє, що представлена геологічна товща має найбільше активне деформування в верхньому шарі осадових порід. Формування горизонтальних переміщень незначне, що пояснюється наявністю під осадовими породами потужного магматичного фундаменту. Вертикальна компонента більш виражена, що характеризується досить високими значеннями переміщень.

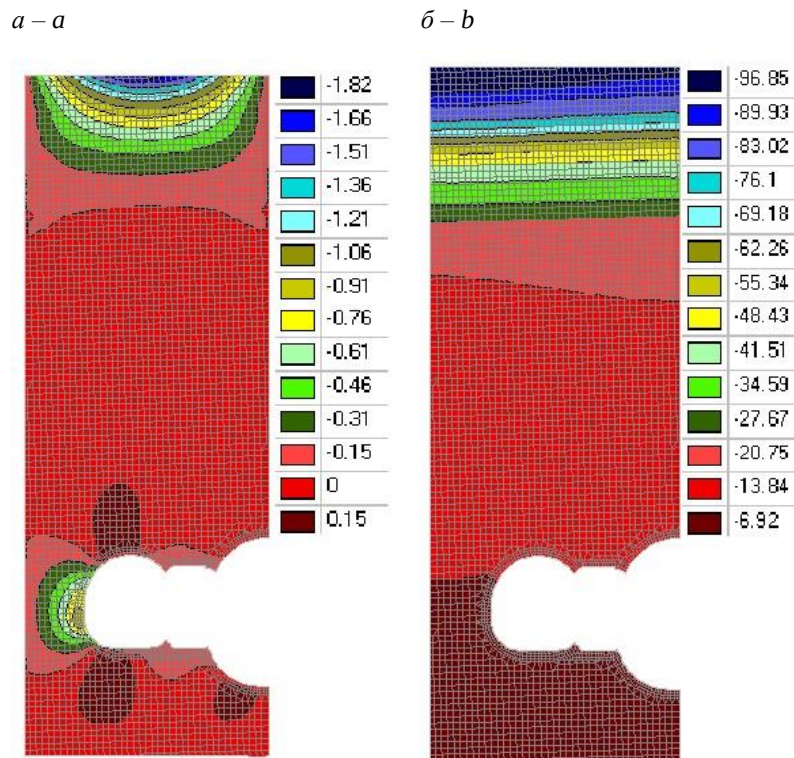


Рис. 3. Горизонтальні (а) та вертикальні (б) переміщення (мм) моделі станції метрополітену пілонного типу у місці проходу

Fig. 3. Horizontal (a) and vertical (b) displacements (mm) of the pylon-type metro station model at the passage location

Після якісного аналізу результатів визначено максимальні значення переміщень: горизонтальні (нижче за горизонтальний діаметр бокового тунелю у місці проходу) – $-1,82$ мм, вертикальні (шелига склепіння середнього тунелю у місці проходу) – $-96,9$ мм. Це значення вертикальних переміщень свідчить про потенційне значне осідання денної поверхні, що потребує запровадження постійного маркшейдерського контролю у межах будівництва станції.

Аналіз вертикальної компоненти деформування для загальної моделі також демонструє те, що у місці проходу й пілонній частині значення мають однаковий порядок. Переміщення середнього та бокового тунелів у місці проходу складає $-13,84$ мм, а в пілонній частині – $-12,58$ мм, а на рівні горизонтального діаметру станційної конструкції відповідно $-6,92$ й $-6,29$ мм. Такі отримані результати свідчать про те, що конструкція станції метрополітену пілонного типу, хоча і є структурою неоднорідною та все ж деформується в досить однорідному стані. Тобто,

значних стрибків вертикальних й горизонтальних переміщень в переході від місця проходу до пілону не спостерігається. Це пояснюється тим, що оправа станції метрополітену пілонного типу, котра складається з тимчасового й постійного кріплення, в повній мірі використовує просторовий фактор. Саме розподіл різних компонент напружено-деформованого стану, що цей фактор дозволяє реалізувати, характеризує конструкцію як таку, що не має непотрібного додаткового підкріплення.

Більш детальний аналіз переміщень оправи довів, що деформування оправи середнього й бокового тунелів, особливо в районі горизонтального діаметру й лоткової частини, підтверджує майже однорідне переміщення станційної конструкції. Наприклад, вертикальні переміщення лоткової частини бокового тунелю складають $-3,05 \dots -3,71$ мм (прохід) й $-3,37 \dots -3,91$ мм (в місці пілону), а для лоткової частини середнього тунелю відповідно $-1,73$ й $-1,57$ мм. Максимальне значення вертикальних переміщень

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

спостерігається у замку середнього тунелю і складає $-10,3$ мм (у місці проходу). Отримані результати характеризують деформований стан конструкції станції метрополітену пілонного

типу як майже однорідний із значеннями переміщень, що знаходяться в нормативних межах.

Напружений стан кріплення станції пілонного типу наведено для фрагментів конструкції в пілонній частині та місці проходу на рис. 4.

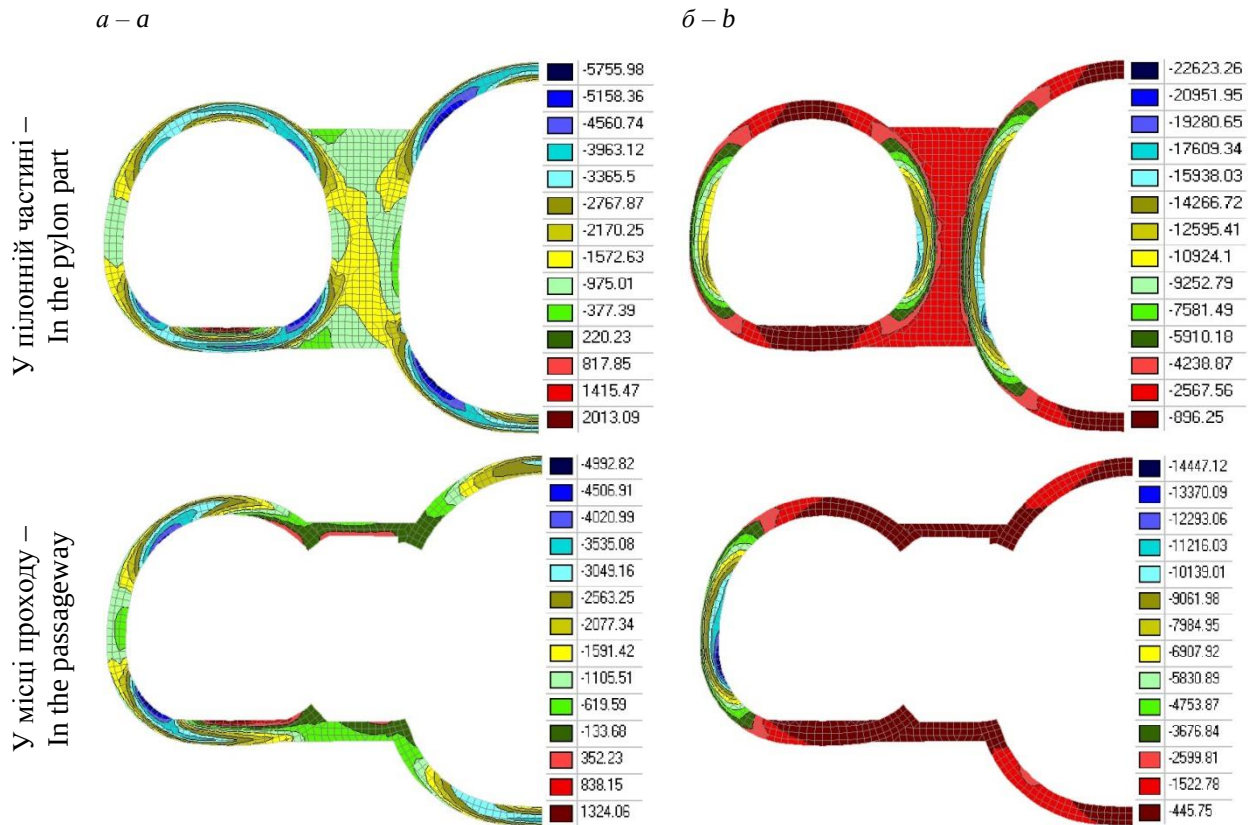


Рис. 4. Горизонтальне (а) й вертикальне (б) нормальне напруження (kN/m^2) у кріпленні станції метрополітену пілонного типу від поєднання навантажень

Fig. 4. Horizontal (a) and vertical (b) normal stress (kN/m^2) in the pylon-type metro station lining from a combination of loads

Якісний аналіз нормальних напружень доводить, що напружений стан конструкції станції метрополітену пілонного типу не є однорідним. Це об'єктивна ситуація, оскільки майже неможливо отримати однорідний напружений стан для структури з вирізами й підкріпленнями ділянками. В задачі проектування такого типу станції й не входить забезпечення однорідного напруженого стану конструкції, а виключно забезпечення її міцності.

Однак, констатуючи неоднорідність напруженого стану в станційній конструкції, слід також відмітити, що, наприклад, в боковому тунелі й лотковій частині середнього тунелю роз-

поділ горизонтальної компоненти майже ідентичний, а найбільша неоднорідність як в якісному, так і кількісному плані спостерігається для вертикальної компоненти, в якій жорсткість пілону є вирішальною для формування напруженого стану.

Наявність системи пілонів, а також проходів, що значно впливають на розподіл напружень, формує неоднорідний напружений стан, який в комплексі з однорідним деформованим, представляє визначальну перевагу станційної конструкції такого типу. Найбільш характерним в плані неоднорідності є розподіл дотичних компонент (рис. 5).

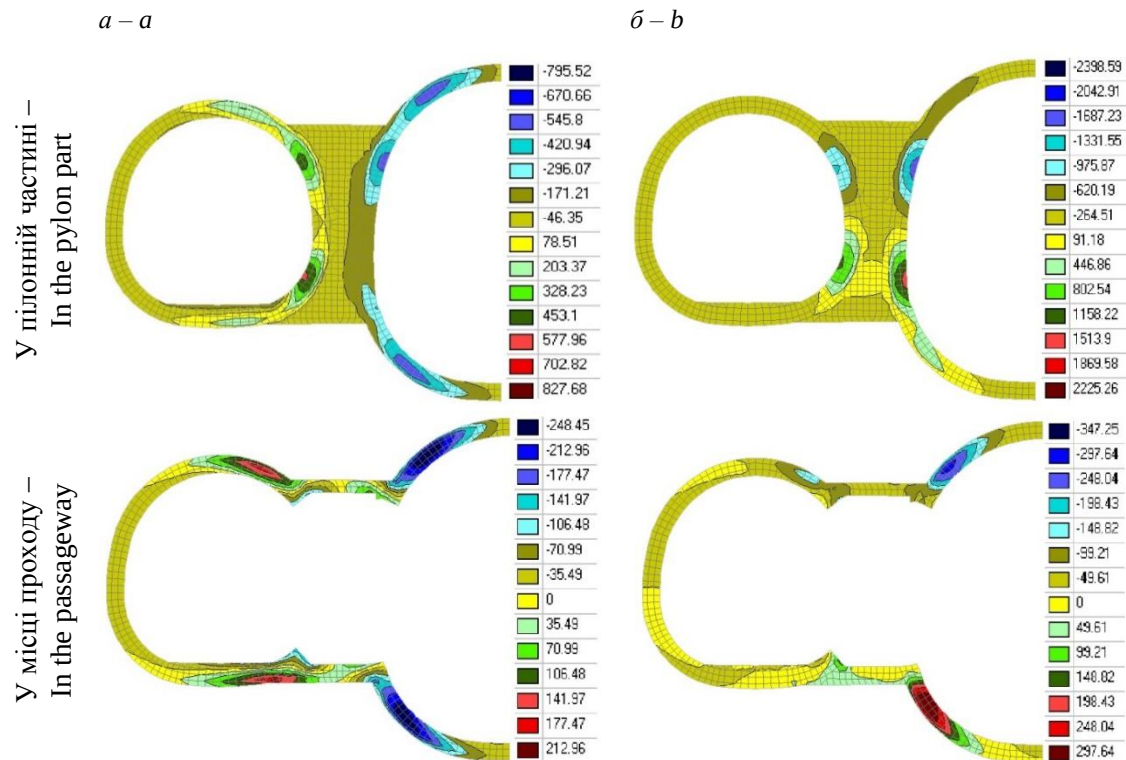


Рис. 5. Дотичні напруження в площині XY (кН/м²) (а) й площині YZ (кН/м²) (б) у кріпленні станції метрополітену пілонного типу від поєднання навантажень

Fig. 5. Tangential stresses in the XY plane (kN/m²) (a) and the YZ plane (kN/m²) (b) in the pylon-type metro station lining from the combination of loads

Якби структура станції метрополітену пілонного типу була б однорідною (будівельна стадія – випадок без проходів, який виникає до їхнього спорудження після закріплення трьох станційних тунелів), то напружений стан також був би однорідним. Наявність проходів, а також ділянок переходу проходу в пілон й навпаки, на прикладі розподілу компонент дотичних напружень свідчить про значний їх перерозподіл.

Концентратори напружень, наприклад, для дотичних напружень в площині YZ (рис. 5, б), збільшуючи значення напружень майже в 7 разів, зміщуються до пілона, який має високу міцність й може сприйняти такі напруження без руйнування. При цьому концентратори, що знаходяться на оправі середнього тунелю, також переміщуються в місце пілону, а концентрація нормальних напружень (див. рис. 4) залишається в місці оправы.

Після аналізу результатів визначено максимальні значення напруження у постійній оправі станції метрополітену пілонного типу: 1) нега-

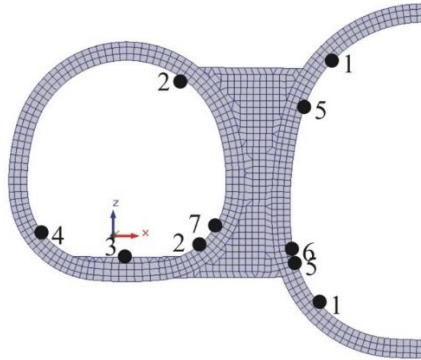
тивні горизонтальні напруження (вісь X, в пілонній частині) – –5,76 МПа; позитивне горизонтальне напруження (вісь X, в пілонній частині) – 2,6 МПа; 2) негативні нормальні напруження (вісь Y, в пілонній частині) – –8,03 МПа; позитивне горизонтальне напруження (вісь Y, у місці проходу) – 7,39 МПа; 3) негативні нормальні напруження (вісь Z, в пілонній частині) – –27,6 МПа; позитивне горизонтальне напруження (вісь Z, в пілонній частині) – 0,76 МПа; 4) дотичні напруження (площина XY, в пілонній частині) – –0,79 МПа; дотичні напруження (площина XY, в пілонній частині) – 0,95 МПа; 5) дотичні напруження (площина XZ, в пілонній частині) – –6,64 МПа; дотичні напруження (площина XZ, в пілонній частині) – 6,81 МПа; 6) дотичні напруження (площина YZ, в пілонній частині) – –2,39 МПа; дотичні напруження (площина YZ, в пілонній частині) – 2,58 МПа.

Однак значення напруженого стану компонентів не є детальним, оскільки в характерних точках можлива взаємодія компонент. Тому

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

проведено розрахунок еквівалентних напружень за четвертою теорією міцності (енергетична) у кількох характерних точках (концентракторах) (рис. 6).

a – a



б – б

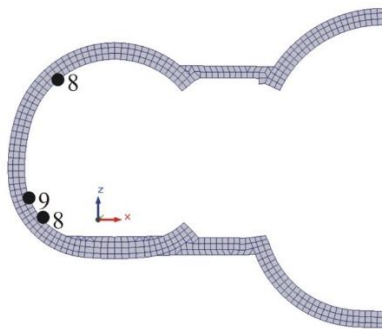


Рис. 6. Схема концентраторів напружень в комбінованому кріпленні станції метрополітену пілонного типу в пілонній частині (а) та місці проходу (б)

Fig. 6. Diagram of stress concentrators in the combined lining of a pylon-type metro station in the pylon part (a) and the passageway (b)

Аналіз розміщення концентраторів напружень свідчить про те, що більшість з них утворені різними компонентами напружень, тобто в кожній точці максимальне значення приймає одне напруження за нормальною або дотичною компонентами. Цей факт знову доводить те, що завдяки просторовому факторові, який утворюється в неоднорідній структурі станції метрополітену пілонного типу, компоненти напружень розосереджуються в елементах комбінованої оправи.

Судячи з наведеної схеми концентраторів напружень, п'ять з них відносяться до комбінованої оправи, яка обрамлює пілон (концентра-

тори в точках 5 (зверху), 5 (знизу), 6, 7 і 2 (знизу)); три точки концентрації напружень спостерігаються на внутрішній поверхні оправи середнього і бокового тунелів, що межують з пілоном (точки 1 (зверху), 1 (знизу) і 2 (зверху)) і п'ять точок концентрації напружень наявні на внутрішній поверхні оправи бокового тунелю (точки 3, 4, 8 (зверху), 8 (знизу) й 9). Слід відмітити, що в концентраторах, що знаходяться в околиці пілону та оправи, що до нього примикає, як буде показано нижче, формування напруженого стану є явно просторовим, з превалюванням компонент напружень, що виникають в зоні перемишки, але передаються на пілон.

Під час кількісного аналізу компонент напруженого стану в концентраторах напружень в точках 5 (зверху), 5 (знизу), 6 й 7 відмічено, що панівною компонентою нормального напруження є саме вертикальне напруження (по осі Z SCAD), яке має значення $-15,9 \dots -20,9$ МПа. При цьому рівень горизонтальної компоненти нормальних напружень (по осі X SCAD) також є достатньо високим ($-5,1 \dots -8,0$ МПа), а дотична компонента напружень є помірною (в діапазоні $-2,0 \dots 1,2$ МПа).

В точках 1 (зверху), 1 (знизу), 2 (зверху) і 2 (знизу), що знаходяться в околиці пілону, напружений стан вже є більш рівномірним, про що свідчать значення нормальних й дотичних напружень. В точках на поверхні бокової оправи 8 (зверху), 8 (знизу) й 9 напружений стан відповідає стиску.

Для вказаних концентраторів напружень за четвертою теорією міцності розраховано еквівалентні напруження в кріпленні станції пілонного типу від поєднання навантажень відповідно до площин XZ та YZ. Аналізуючи еквівалентні напруження, які вже є скалярними величинами і виражають сполучення компонент напружень, що є векторами, слід зважати, що вираз для енергетичної теорії міцності (четвертої) змінювався в залежності від площини.

Окрім цього в подальшому аналізі значень слід додатково враховувати, яка панівна компонента напружень формує еквівалентне напруження і в якій площині, а також межу міцності матеріалу комбінованої оправи. Матеріали тимчасового та постійного кріплень прийняті наступними:

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

1) тимчасове кріплення:

– торкрет-бетон (товщина 0,2 м, клас бетону C20/25, модуль пружності $E_b = 23 \cdot 10^3$ МПа, розрахунковий опір на стиск $R_b = 14,5$ МПа);

– сталеві дрітця сітка ($2 \times \varnothing 10/150$ мм, двошарова, клас A400С, характерна межа текучості – 4 000 МПа, розрахункова межа текучості – 3 636,4 МПа);

– ґратчасті балки (клас A400С, характерна межа текучості – 4 000 МПа, розрахункова межа текучості – 3 636,4 МПа);

2) постійне кріплення:

– торкрет-бетон (товщина 0,5 м, клас бетону C35/45, модуль пружності $E_b = 30,5 \cdot 10^3$ МПа, розрахунковий опір на стиск $R_b = 25,0$ МПа);

– арматура (клас A400С, характерна межа текучості – 4 000 МПа, розрахункова межа текучості – 3 636,4 МПа).

Судячи із форм та площі концентраторів напружень, представлених на рис. 6, вони не зачіпають тимчасове кріплення, знаходячись виключно в постійній оправі. Відповідно, в якості межі міцності матеріалу, у ролі якої виступає розрахунковий опір стиску бетону R_b , прийнято торкрет-бетон з класом C35/45 й розрахунковим опором на стиск $R_b = 25,0$ МПа.

Запас міцності, який розраховано виключно за торкрет-бетоном постійної (за тріщинуватістю), перебуває у межах 9,0...1,2, а точці 6 дорівнює одиниці (еквівалентне напруження дорівнює 24,4 МПа), а в точці 5 – 1,2 (еквівалентне напруження дорівнює 21,2 МПа). У цих точках, як вже було пояснено вище, проявляється концентрація напружень через те, що прохід був змодельований у вигляді не овоїдної, а прямокутної конструкції. Однак, враховуючи особливості скінченно-елементної моделі і аналізуючи разом із еквівалентним напруженням окремі компоненти напружень, слід відмітити, що в точках 5 (зверху і знизу) і 6 напруження стиску є високим (нормальна вертикальна компонента знаходиться в діапазоні –15,9...–20,9 МПа).

Судячи з значень запасу міцності, отриманих після розрахунку еквівалентних напружень, конструкція постійної оправі має достатню міцність для подальшої нормальної експлуатації. При цьому слід рекомендувати додаткове армивання в зоні концентраторів на внутрішній поверхні постійної оправі середнього тунелю (точки 5 (зверху і знизу), 6 і 7) для збільшення коефіцієнту запасу й локальної міцності.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна результатів полягає у вперше отриманих в ході математичного моделювання результатах напружено-деформованого стану станції пілонного типу, що споруджується в міцних породах на основі NATM. Практичну значимість досліджень характеризують результати аналізу міцності комбінованого (тимчасового та постійного) кріплення станції пілонного типу глибокого закладення.

Висновки

У статті проаналізовані передумови математичного моделювання конструкції станції метрополітену пілонного типу на основі чисельного аналізу. В розробленій просторовій моделі відображені властивості кріплення станції метрополітену пілонного типу й особливості станційної конструкції, такі як просторовий фактор, система «пілон – прохід» та взаємодія між елементами конструкції та оточуючим скельним масивом.

Під час чисельного аналізу отримано репрезентативну інформацію щодо напружено-деформованого стану станції метрополітену пілонного типу і з'ясовано, що наявність проходів, а також ділянок переходу проходу в пілон й навпаки, свідчить про значний їх перерозподіл, причому концентратори зміщуються до пілона, який має високу міцність й може сприйняти такі напруження без руйнування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тютюкін О. Л. *Теоретичні основи комплексного аналізу тунельних конструкцій* : монографія. Дніпро : Журфонд, 2020. 260 с.
2. Федоров К. Є., Тютюкін О. Л. Критичний аналіз методів розрахунку напружено-деформованого стану конструкції станції метрополітену пілонного типу. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2024. № 26. С. 104–112. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2024/315520>

3. Ding D. Y., Yang X. R., Lu W. D., Liu W. N., Yan M., Li A. M. Numerical Analysis of Metro Station Construction by Large-Diameter Shield and Pile-Beam-Arch Method. *Advanced Materials Research*. 2012. Vols. 368–373. P. 2711–2715. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.368-373.2711>
4. Do N. A., Dias D. A comparison of 2D and 3D numerical simulations of tunnelling in soft soils. *Environmental Earth Sciences*. 2017. Vol. 76. 102. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6425-z>
5. Fung I. W., Wang J. A., Au A. S., Zhou Y. F. Three-dimensional numerical analysis of stress and deformation of surrounding soil in safety construction of metro station. *International Symposium on Nonlinear Dynamics (2007 ISND). Journal of Physics : Conference Series* (Shanghai, China, 27–30 October 2007). Bristol : IOP Publishing, 2008. Vol. 96. 012121. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/96/1/012121>
6. Jin D., Yuan D., Liu S., Li X., Luo W. Performance of Existing Subway Tunnels Undercrossed by Four Closely Spaced Shield Tunnels. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2019. Vol. 33, Iss. 1. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001230](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001230)
7. Li Y., Jin X., Lv Z., Dong J., Guo J. Deformation and mechanical characteristics of tunnel lining in tunnel intersection between subway station tunnel and construction tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. Vol. 56. P. 22–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.02.016>
8. Svoboda T., Masin D. Comparison of displacement field predicted by 2D and 3D finite element modelling of shallow NATM tunnels in clays. *Geotechnik*. 2011. Vol. 34, Iss. 2. P. 115–126. DOI: <https://doi.org/10.1002/gete.201000009>
9. Yan M., Ding D. Y., Yang X. R., Yang X. R., Lu W. D., Liu W. N., Li A. M. 3D Numerical Analysis of Metro Station by PBA Method to Enlarge Existing Large-Size Shield Tunnel. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vols. 170–173. P. 1673–1678. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.170-173.1673>
10. Yanjuan H., Dingli Z., Ran L., Xu C., Weiwei Q. Calculation method for surrounding rock pressure of deeply buried triple-arch tunnel. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2024. Vol. 56, Iss. 11. P. 3213–3226. DOI: <http://doi.org/10.6052/0459-1879-24-015>
11. Zhang J.-L., Liu X., Zhao J.-B., Yuan Y., Mang H. Application of a combined precast and in-situ-cast construction method for large-span underground vaults. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2021. Vol. 111. 103795. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103795>
12. Zhou M., Chen J., Huang H., Zhang D., Zhao S., Shadabfar M. Multi-source data driven method for assessing the rock mass quality of a NATM tunnel face via hybrid ensemble learning models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2021. Vol. 147. 104914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104914>

K. Ye. FEDOROV¹, O. L. TIUTKIN^{2*}

¹Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (096) 353 29 33, e-mail kostia.fedoroff1@gmail.com, ORCID 0000-0002-3010-0489

^{2*}Dep. «Transport Infrastructure», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 290 45 18, e-mail o.l.tiutkin@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-4921-4758

Mathematical Modeling of the Pylon-Type Metro Station Design Based on Numerical Analysis

Purpose. The authors set the goal of conducting mathematical modeling of the pylon-type metro station structure based on numerical analysis using the finite element method, as well as searching for components of the stress-strain state and determining the strength of the combined reinforcement, which is constructed based on the New Austrian tunneling method. **Methodology.** To achieve the task, a finite element model of a pylon-type metro station was developed in the professional calculation complex Structure CAD for Windows. The model fully reflects the properties of the combined (temporary and permanent) lining of a pylon-type metro station. Half of the pylon-type metro station was modeled; the model was given deformation characteristics taken from real engineering and geological studies. Also, a set of boundary conditions was applied to the model, which corresponds to the real deformation of the system, as well as the combination of loads. **Findings.** During the numerical analysis, representative information was obtained on the stress-strain state of the pylon-type metro station and it was found that the presence of passages, as well as sections of the passage transition into the pylon and vice versa, indicates their significant redistribution. A detailed analysis of the frame displacements proved that the deformation of the frame of the middle

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

and side tunnels confirms the almost uniform movement of the station structure. The maximum values of stresses in the permanent frame of the pylon-type metro station were determined. The presence of a system of pylons, as well as passages, forms a non-uniform stress state, which, in combination with a uniform deformed state, represents a defining advantage of the station structure of this type. **Originality** of the results lies in the first obtained during mathematical modeling of the stress-strain state of the structure of a pylon-type station, which is being built in strong soils based on NATM. **Practical value.** It is characterized by the results of the analysis of the strength of the combined (temporary and permanent) lining of a deep-buried pylon-type station.

Keywords: metro; pylon-type station; rock formations; stress-strain state; finite element method; New Austrian tunneling method

REFERENCES

1. Tiutkin, O. L. (2020). *Teoretychni osnovy kompleksnoho analizu tunelnykh konstruktiv: monohrafiia*. Dnipro: Zhurfond (in Ukrainian)
2. Fedorov, K. Ye., & Tiutkin, O. L. (2024). Critical Analysis of Methods for Calculating the Stress-Strain State of the Pylon-Type Metro Station Structure. *Bridges and Tunnels: Theory, Research, Practice*, 26, 104-112. DOI: <https://doi.org/10.15802/bttrp2024/315520> (in Ukrainian)
3. Ding, D. Y., Yang, X. R., Lu, W. D., Liu, W. N., Yan, M., & Li, A. M. (2012). Numerical Analysis of Metro Station Construction by Large-Diameter Shield and Pile-Beam-Arch Method. *Advanced Materials Research*, 368-373, 2711-2715. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.368-373.2711> (in English)
4. Do, N. A., & Dias, D. (2017). A comparison of 2D and 3D numerical simulations of tunnelling in soft soils. *Environmental Earth Sciences*, 76, 102. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6425-z> (in English)
5. Fung, I. W. H., Wang, J. A., Au, A. S. K., & Zhou, Y. F. (2008). Three-dimensional numerical analysis of stress and deformation of surrounding soil in safety construction of metro station. *Journal of Physics: Conference Series*, 96, 012121. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/96/1/012121> (in English)
6. Jin, D., Yuan, D., Liu, S., Li, X., & Luo, W. (2019). Performance of Existing Subway Tunnels Undercrossed by Four Closely Spaced Shield Tunnels. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 33(1). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0001230](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001230) (in English)
7. Li, Y., Jin, X., Lv, Z., Dong, J., & Guo, J. (2016). Deformation and mechanical characteristics of tunnel lining in tunnel intersection between subway station tunnel and construction tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 56, 22-33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.02.016> (in English)
8. Svoboda, T., & Masin, D. (2011). Comparison of displacement field predicted by 2D and 3D finite element modelling of shallow NATM tunnels in clays. *Geotechnik*, 34(2), 115-126. DOI: <https://doi.org/10.1002/gete.201000009> (in English)
9. Yan, M., Ding, D. Y., Yang, X. R., Yang, X. R., Lu, W. D., Liu, W. N., & Li, A. M. (2012). 3D Numerical Analysis of Metro Station by PBA Method to Enlarge Existing Large-Size Shield Tunnel. *Applied Mechanics and Materials*, 170-173, 1673-1678. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.170-173.1673> (in English)
10. Yanjuan, H., Dingli, Z., Ran, L., Xu, C., & Weiwei, Q. (2024). Calculation method for surrounding rock pressure of deeply buried triple-arch tunnel. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 56(11), 3213-3226. DOI: <http://doi.org/10.6052/0459-1879-24-015> (in English)
11. Zhang, J. L., Liu, X., Zhao, J. B., Yuan, Y., & Mang, H. (2021). Application of a combined precast and in-situ-cast construction method for large-span underground vaults. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 111, 103795. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103795> (in English)
12. Zhou, M., Chen, J., Huang, H., Zhang, D., Zhao, S., & Shadabfar, M. (2021). Multi-source data driven method for assessing the rock mass quality of a NATM tunnel face via hybrid ensemble learning models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 147, 104914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104914> (in English)

Надійшла до редколегії: 01.08.2025

Прийнята до друку: 17.12.2025