

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТРИСКЛЕПІНЧАСТИХ СТАНЦІЙ З УРАХУВАННЯМ СПЕЦИФІКИ ЇХ ПОВЕДІНКИ

У статті наводиться аналіз концепції оптимізації конструктивних елементів трисклепінчастих станцій метрополітену глибокого закладення. Проведена постановка задачі оптимізації, наведено її рішення та алгоритм її реалізації.

В статье приводится анализ концепции оптимизации конструктивных элементов трехсводчатых станций метрополитена глубокого заложения. Проведена постановка задачи оптимизации, приведено ее решение и алгоритм ее реализации.

The article provides the analysis of optimization concept of constructive elements in three-vaulted deep contour underground stations. Statement of the optimization task has been performed; its solution and algorithm of its realization have been presented.

Питання визначення оптимальної конструкції, виходячи із концепцій механіки підземних споруд чи геомеханіки, мало досліджене та практично не розроблене. Такий стан питання мотивований його складністю, недостатньою повнотою інформації про систему, що оптимізується, хоча спроби деяких авторів [1; 2] дуже цікаві та перспективні в економічному відношенні. Питання оптимізації у цьому ракурсі стає першорядним, але потребує всестороннього наукового обґрунтування та апробації у зв'язку з високою відповідальністю за підземну споруду.

Перш ніж перейти до авторського бачення задачі оптимізації, визначимо критерій оптимальності, яким будемо оперувати у подальшому. Специфіка цього терміну така, що він є за своїм змістом економічною категорією та виходить за межі чисто фізичних уявлень. Розробка цього критерію в наданій роботі мотивується тим фактом, що вартість матеріалів при будівництві станцій метрополітену глибокого закладення складає від 50 % та більше від загальної вартості будівництва [3]. Тому як критерій оптимальності з найбільш розповсюджених (мінімум вартості, мінімум ваги, мінімум математичного очікування витрат на конструкцію, мінімакс витрат, принцип раціональності конструкції тощо) оберемо мінімум вартості. Такий критерій оптимальності універсальний для всіх видів споруд, і тому, оскільки він надто широкий, треба його достатньо конкретизувати для даного випадку. Логічним було б припустити, що прагнення зведення вартості до мінімуму відображається у зниженні ваги конструкції, тобто

зменшенню об'єму будівельних матеріалів. Причому критерій оптимальності «мінімум ваги», який відповідає за створення оптимальної конструкції, у прихованому вигляді буде служити доповненням вимоги створення раціональної (рівномірної) конструкції чи максимально наближеної до неї. Нестрога постановка останньої тези викликана специфікою роботи підземної споруди та недостатньою кількістю репрезентативної інформації про неї.

Критерій оптимальності записується як умова мінімуму функціонала, який визначає обраний критерій – мінімум ваги:

$$G = G(x, U) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де G – вага; $x = [x_1 \dots x_n]$ – параметри проектування, наприклад, товщина перерізу елемента конструкції обробки станції метрополітену; $U = U_i(t)$ – функції проектування, наприклад, змінна товщина перерізу елемента конструкції обробки станції метрополітену; t – просторові координати.

Перш ніж перейти до видів обмежень у задачах оптимального проектування, перетворимо умову (1) у форму, яка більш підходить до умов обробок бокового та середнього тунелю трисклепінчастої станції глибокого закладення. Як відомо, для кожного конкретного випадку два розміри елемента обробки (блока чи тубінга) – радіальний та вздовж станції – не змінюються. Відповідно мінімум ваги можна замінити мінімумом товщини, оскільки лише вона змінюється у процесі оптимізації. Умова (1) для мінімуму товщини буде виглядати так:

$$h(x, y) \rightarrow \min, \quad (2)$$

де h – товщина елемента конструкції; x, y – просторові координати.

У задачах оптимального проектування до критерію оптимальності, звичайно, приходиться приєднати обмеження. Критерій оптимальності частіш усього пов'язується з обмеженнями за допомогою систем диференціальних та алгебраїчних рівнянь, які з застосуванням математичних методів дозволяють отримати оптимальне рішення. Через те що основним видом отримання даних про існування системи «кріплення-масив» є розрахунок на міцність, то буде потрібно виконання у кожній точці тіла умови:

$$F(\sigma_{ij}) \leq 0, \quad (3)$$

в якій вид функції $F(\sigma_{ij})$ залежить від фізичних властивостей матеріалу та від тензору напружень σ_{ij} . Така умова називається обмеженням по міцності.

Другим видом обмеження є «обмеження поперечних перерізів» (за Рожвани) [4]. Причому для спрощення постановки задачі будемо застосовувати простіший його різновид – встановлення верхньої та нижньої межі перерізу:

$$h_{\min} \leq h \leq h_{\max}, \quad (4)$$

$$h \in H, \quad (5)$$

де h – товщина перерізу, що змінюється; h_{\min} – нижня межа, у випадку проектування блоків (тубінгів) приймається 0,15 м із умови армування; h_{\max} – верхня межа, у загальному випадку обмеження на неї не накладається, але із раціональних міркувань, які не дозволяють звести задачу оптимізації до абсурду, $h_{\max} = 1,0$ м.

Вираз (5) свідчить: змінна товщина елемента h належить до множини товщин H , причому задача спрощується, трансформуючись у випадок знаходження лише оптимальної товщини, хоча аналіз просторового розрахунку станції метрополітену і перегінного тунелю показує, що і поздовжній розмір елемента b (вздовж станції) також впливає на оптимальність конструкції. Але у цій роботі розгляд наданого факту не акцентується через і так складну постановку задачі. У подальшому умова (5) опускається через логічне розуміння належності товщини h до множини товщин H .

Важливо відмітити, що у постановці задачі оптимізації, яка запропонована авторами, буде

враховуватися припущення про роботу системи у непружній області, оскільки припущення про роботу лише у пружній області призводить до перевитрат у порівнянні з тим розрахунком, який враховує появу непружних (пластичних чи пов'язаних з реологічними явищами) деформацій. Відмічено також, що конструкція, проєктована за умови роботи у непружній стадії, не може бути не кращою, ніж проєктована у пружній області [5; 6].

Постановка задачі для оптимізації геометричних розмірів (товщини) обробки бокових і середнього тунелів станцій метрополітену пілонного або колонного типів надається авторами у вигляді:

$$h(V) \rightarrow \min; \quad (6)$$

$$\sigma(V) \leq [\sigma_p]; \quad (7)$$

$$h_{\min} \leq h(V) \leq h_{\max}; \quad (8)$$

$$V \subseteq \Omega, \quad (9)$$

де $h(V)$ – змінна товщина обробки; $\sigma(V)$ – напруження у перерізі, який характеризується товщиною $h(V)$; $[\sigma_p]$ – міцність бетону на розтяг; V – деякий набір блоків із завданими перерізами, який належить множині блоків Ω (а точніше є підмножиною множини Ω); позначки умови (8) розглядалися вище.

Вербально постановка задачі оптимізації ставиться так: треба знайти таку товщину блока $h(V)$, яка б була найменша і у той же час виконувалися умови (7) та (8), тобто напруження у блоці було б допустимим, а товщина блока не виходила за межі h_{\min} та h_{\max} .

Слід зробити деякі зауваження щодо нерівності (7), яка свідчить, що при перевищенні напруженнями у деякому перерізі постійного значення міцності бетону на розтяг $[\sigma_p]$, переріз отримує тріщину і переходить у іншу стадію роботи, яку не можна припустити у підземному будівництві – бетон у тріщині не працює, арматура оголюється і починає працювати у пластичній стадії. Умова (7) не є остаточною умовою для оптимізації, оскільки $\sigma(V)$ може не перевищувати допустиме значення міцності бетону на розтяг. Ця умова є найбільш строгою і визначаючою тезу про недопущення виникнення тріщин в залізобетонних елементах у зоні розтягу

у випадку існування станції у полі складних гідрогеологічних умов.

«Грандентність» функції $h(V)$ (у значенні взаємовпливу товщини обробки на НДС масиву та зміну НДС масиву і разом з тим НДС обробки) є серйозним обмеженням на використання математичних методів оптимізації, направлених на роботу з функцією мети. Тому можливе лише застосування методів оптимізації, які базуються на послідовному аналізі варіантів [7]. Послідовний аналіз варіантів важко назвати математичним методом оптимізації (немає пошуку явного чи неявного екстремуму), важко також його зведення до системи, але у той же час він простий і тісно пов'язаний з неформальними прийомами, які частіш усього приводять до рішення задачі оптимізації скоріше, чим класичні методи оптимізації, фактично засновані на «чистій» математиці. В обґрунтування вибору послідовного аналізу варіантів (ПАВ) свідчить і той факт, що варіація товщини $h(V)$ між межами h_{\min} та h_{\max} невелика, а також крок варіації розбиває величини товщин, які кратні 5 см через умови та можливість індустріального виробництва елементів станцій. Зрозуміло, що останнє міркування не досить строге, але й відхилення від нього не приведуть ситуацію з визначенням товщин до нескінченного числа кроків варіації.

Застосуємо для рішення задачі такий різновид ПАВ як пошук із зменшенням області пошуку [5]. Цей спосіб складається з використання процедур, які дозволяють за допомогою деяких оцінок відкинути допустимі рішення, серед яких нема оптимального. У міру виконання цих процедур відбувається поступове зменшення множини конкурентоспроможних варіантів. Насамкінець залишаються декілька варіантів, котрі порівнюються між собою. Графічне уявлення способу наведено на рис. 1. Підмножини ω_1 , ω_2 множини Ω відкинуті після ПАВ у зв'язку з відсутністю у них оптимального рішення.

Підмножини, відкинуті після аналізу, слід докладно перевірити на наявність оптимального рішення, оскільки застосування цього методу може призвести до того, що може бути відкинута область, у якій є це рішення. У подальшому цей метод на практиці реалізується у наступному вигляді. Проводиться серія типових розрахунків станцій тільки з варіацією товщини бокових і середнього тунелів. За

отриманими даними пружно-в'язко-пластичних розрахунків будуються пари:

$$\begin{aligned} & h_1 - \Omega(\sigma)_{\text{ндс } 1}; \quad h_2 - \Omega(\sigma)_{\text{ндс } 2}; \\ & h_1 - \Omega(\sigma)_{\text{ндс } 3}; \quad (10) \\ & \dots; \\ & h_n - \Omega(\sigma)_{\text{ндс } n}. \end{aligned}$$

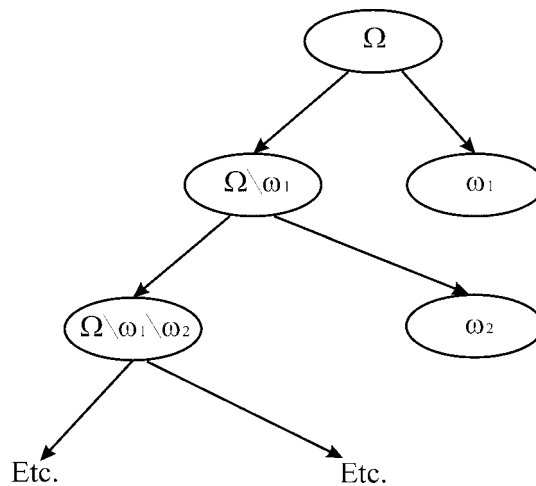


Рис. 1. Графічна схема пошуку зі зменшенням області пошуку

Під $\Omega(\sigma)_{\text{ндс } n}$ розуміється множина значень напружень у елементах обробок. Із цієї множини відбираються максимальні значення та проводиться перевірка умови (7). Умова (8) повинна виконуватися автоматично після визначення варіації товщини. Після ПАВ вибирається оптимальне рішення. На рис. 2. показана схема алгоритму знаходження оптимальних розмірів елементів конструкції.

Особливу увагу при рішенні задач оптимізації та розрахунків підземних споруд слід приділити об'єму та якості вхідної інформації. Це той випадок, коли інформація не буває надлишковою. Інформація повинна бути отримана безпосередньо з реальних умов існування підземної споруди. Тільки цей факт може бути запорукою отримання вірних результатів.

На підставі вищевикладених положень був проведений ряд розрахунків пілонної станції глибокого закладення ($H = 80$ м) у спонділових глинах з міцністю $f = 1..1,5$, які відповідають інженерно-геологічним умовам Київського метрополітену. Постановка задачі – просторова, розрахунок виконується на підставі пружнопластичної моделі (відшукувалися зони пластичних деформацій) із заміною породного масиву спеціальними «грунтовими» стрижня-

ми. Визначали оптимальний поперечний переріз бічних і середнього станційних тунелів. За результатами, отриманими за допомогою комплексу SCAD, переріз, що застосовувався у розрахунку (500×1000 мм), можна зменшити на 19...25 % (відповідно 405×1000 мм; 375×1000 мм) без погіршення роботи станції

(не перевищуючи розрахункову межу міцності). Економія бетону, отримана за результатами оптимізаційних розрахунків, в обсягах сучасного освоєння підземного простору України може дати стійкий економічний ефект (приблизно до 73 тис. грн на одну пілонну станцію у процесі проектування, розрахунку та будівництва).

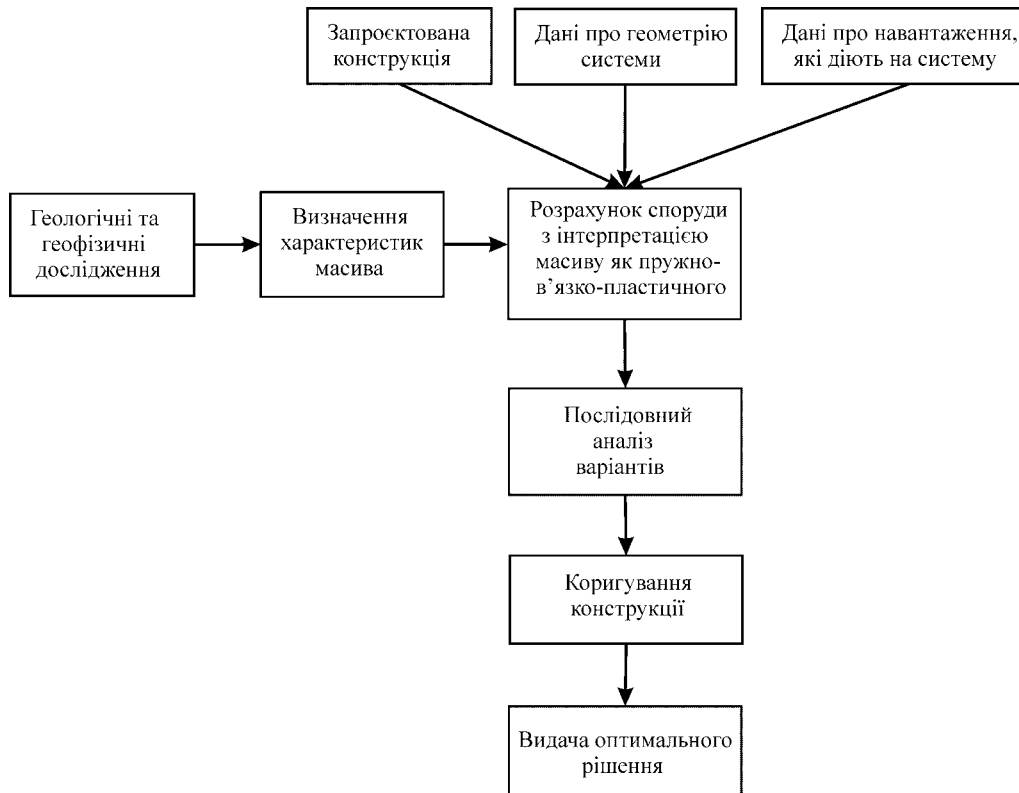


Рис. 2. Алгоритм оптимізації геометричних розмірів конструкції

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Меркин В. Е. Определение рациональных размеров целиков между станциями в пересадочных узлах метрополитена глубокого заложения / Сб. науч. трудов Всесоюзного науч.-исслед. ин-та транспортного строительства, 1968. – Вып. 25. – С. 46–55.
2. Дорман И. Я. Исследование и разработка сейсмостойких конструкций станций метрополитена из объемных элементов // Транспортное строительство. – 1980. – № 4. – С. 40–41.
3. Сборный железобетон в подземном строительстве / Безпальй В. И., Бялер И. Я., Карсницкий Н. Г., Сапрыкин Л. Д. – К.: Госстройиздат, 1961. – 248 с.
4. Рожваны Д. Оптимальное проектирование изгибаемых систем: Пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1980. – 316 с.
5. Рейтман М. И., Шапиро Г. С. Методы оптимального проектирования деформируемых тел (постановки и способы решения задач оптимизации параметров элементов конструкций). – М.: Наука, 1976. – 258 с.
6. Абовский Н. П., Енджиевский Л. В. и др. Регулирование, синтез, оптимизация (избранные задачи по строительной механике и теории упругости): Учебное пособие для вузов. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1985. – 384 с.
7. Моисеев Н. Н. Методы оптимизации. – М.: Наука, 1978. – 351 с.

Надійшла до редколегії 02.03.03.