



СУЧАСНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОСТОРОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ ТУНЕЛІВ МЕТРОПОЛІТЕНУ

Рассмотрены современные методы определения деформаций тоннелей метрополитена на стадии строительства. Основное внимание уделено применению современных геодезических приборов, таких как электронные тахеометры и наземные лазерные сканеры. Изложена методика обработки результатов наблюдений за деформациями тоннелей.

The modern methods of underground tunnels deformations determination on the stage of building are considered. Basic attention is spared to application of modern geodetic instruments like electronic tacheometers and terrestrial laser scanners. The method of underground tunnels deformations results treatment is expounded.

Постановка проблеми. Спостереження за деформаціями та переміщеннями тунелів метрополітену завжди було і залишається актуальною задачею інженерної геодезії. З появою нових геодезичних приладів, таких як електронні тахеометри, що працюють у режимі без відбивача, та систем наземного лазерного сканування з'явилась можливість значно спростити трудомісткий процес геодезичних робіт, визначати деформації в просторі.

Визначення геометричних параметрів тунелю та його деформацій – досить складна методична і технологічна задача. Тунелі зазнають впливу різних факторів, тому навіть при ідеальному виконанні будівельних робіт неминуче виникають як локальні деформації окремих частин, так і всього тунелю в цілому. Застосування нових сучасних геодезичних технологій дає змогу визначати деформації тунелів у плані та по висоті одночасно.

При дослідженні деформації тунелів визначають головним чином дві складові: еліптичність кільця і загальну деформацію споруди по висоті. Згідно з вимогами інструкцій, вимірювання деформацій під час будівництва виконують:

- при монтажі тубінгів кільця;
- після виходу кільця за щитовий комплекс;
- раз на 20 днів до повного затухання процесу деформації;
- два рази на рік до здачі тунелю в експлуатацію.

Щоб знайти значення загальних переміщень тунелю, необхідно визначити найбільш імовірне положення просторової осі тунелю. Для цього найпростіше користуватись рівнянням просторової осі тунелю в аналітичній формі. Рекомендовані в нормативних документах методи і прилади не дозволяють визначити положення осі в просторі.

Огляд попередніх публікацій. Незважаючи на важливість означеної вище теми, публікацій, присвячених дослідженню деформацій тунелів метрополітену, небагато. Це пов'язано з обмеженістю методів і приладів, які донедавна можна було використати для спостережень. Основні методи описано в більшості підручників з інженерної геодезії, серед яких виділимо працю [4].

Спроби узагальнити відомі методи зроблено в публікаціях [2,3]. У цих працях як основне устаткування для виконання робіт розглядаються

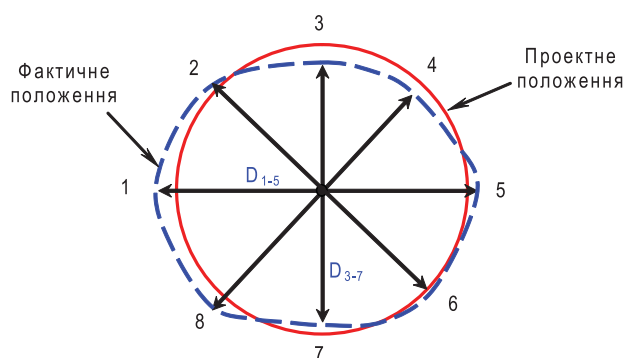
точні оптичні теодоліти, сталеві стрічки та нівеліри. Головним недоліком названих публікацій є поділ на складові деформації окремо взятого кільця тунелю, яку представляли як еліптичність кільця, та загальної деформації тунелю, спостереження за якою досить часто взагалі не проводились. Просторові переміщення у них розглядаються по перерізах через 5 кілець з визначенням їх еліптичності. У документі [5] запропоновано використувати електронний тахеометр для визначення деформації окремого кільця. Недоліком роботи є те, що спостереження за деформаціями кільця виконують без прив'язки результатів спостережень до системи координат тунелю, а отже, електронний тахеометр використовують фактично як вимірювальну стрічку.

З появою наземних лазерних сканерних систем з'явилась можливість визначити повне просторове зміщення тунелю та його геометричні параметри за допомогою одного комплексу обладнання [9,10]. Головним стримуючим фактором при використанні наземних лазерних сканерних систем є їх висока вартість та складність оброблення результатів спостережень. Крім того, при використанні наземного лазерного сканування для кожного типу інженерних споруд необхідно розробляти нову технологію сканування та методику оброблення результатів спостережень.

Постановка завдання. Мета даного дослідження – вивчення можливості використання сучасного геодезичного устаткування для виконання спостережень за деформаціями тунелів метрополітену.

Основний зміст роботи. Згідно з державними будівельними нормами, спостереження за деформаціями тунелів метрополітену на стадії будівництва виконують головним чином шляхом визначення еліптичності елементів тунелю через кожні 5 кілець. Вимірювання виконують за допомогою металевих стрічок за схемою, яка наводиться на мал. 1.

Оскільки еліптичність кільця характеризує тільки зміну його власної геометрії і не вказує на переміщення кільця відносно тунелю, то зрозуміло, що такої характеристики недостатньо для визначення повної деформації тунелю. Тому постає завдання визначення реальних просторових координат кільця в заданій системі. Представимо можливі варіанти визначення просторових деформацій тунелю



Мал. 1. Визначення деформацій тунелю за традиційною схемою

методами електронної тахеометрії та наземного лазерного сканування з подальшою обробкою результатів спостережень.

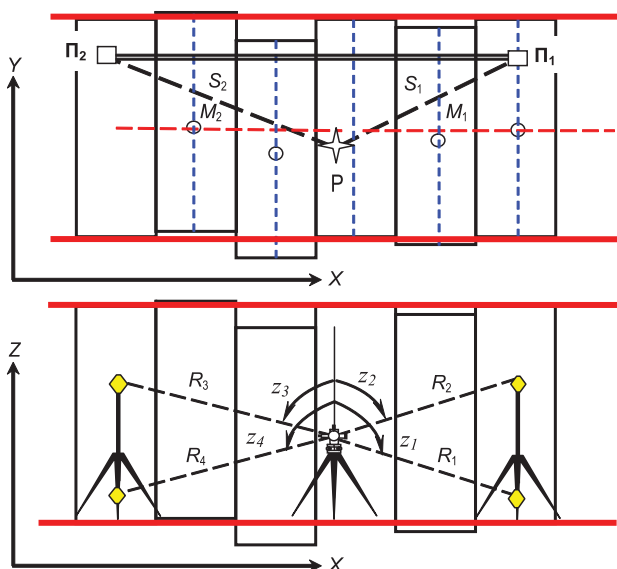
Відомо, що при будівництві тунелю одночасно прокладається підземна полігонометрія, пункти якої розташовують на відстані 25 м один від одного. Положення цих пунктів відоме в просторовій системі координат. Від цих пунктів ведуть усі подальші розпланувальні роботи в тунелі. Методика вимірювання при прокладанні ходів підземної полігонометрії дозволяє отримати координати пунктів з точністю, що забезпечує подальші будівельні роботи в тунелі.

Для спостереження за просторовими переміщеннями тунелю метрополітену нами запропоновано використовувати електронний тахеометр, що працює в режимі без відбивача. Спостереження виконують за такою технологією. На пунктах підземної полігонометрії (не обов'язково на кожному) встановлюють відбивачі, які являють собою вертикальні штанги, на кінцях яких розташовані відбивачі. Штанги такої конструкції найчастіше є в комплектах систем наземного лазерного сканування, хоча її можна виготовити і власноруч. Між пунктами підземної полігонометрії, на яких встановлені відбивачі, розташовують електронний тахеометр таким чином, щоб він знаходився приблизно на середині тунелю. Положення тахеометра відносно просторової системи координат визначають, вимірюючи нахилені відстані R_1, R_2, R_3, R_4 , зенітні відстані z_1, z_2, z_3, z_4 та напрямки M (мал. 2).

Потім методом найменших квадратів вирішують просторову зворотну засічку. Для цього можна поради скористатися, наприклад, формулами із праці [1]. Складають рівняння поправок для вимірних величин:

$$\begin{aligned} -\delta Z_{P\Pi_i} - a_{P\Pi_i} \delta X - b_{P\Pi_i} \delta Y + l_M &= v_M; \\ c_{P\Pi_i} \delta X + d_{P\Pi_i} \delta Y + e_{P\Pi_i} \delta Z + l_R &= v_R; \\ f_{P\Pi_i} \delta X + g_{P\Pi_i} \delta Y - h_{P\Pi_i} \delta Z + l_z &= v_z, \end{aligned} \quad (1)$$

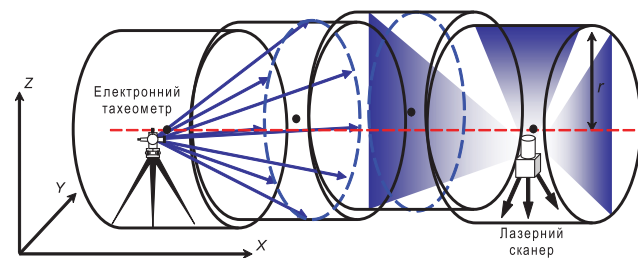
де $a_{P\Pi_i} \dots h_{P\Pi_i}$ – коефіцієнти рівнянь поправок виміряного напрямку, відстані та зенітної відстані; $\delta X, \delta Y, \delta Z$ – поправки до наближених значень просторових координат станції спостереження P.



Мал. 2. Прив'язка електронного тахеометра до пунктів підземної полігонометрії

Використовуючи вирази (1), складають систему нормальних рівнянь, яку вирішують з урахуванням умови $V^T P V = \min$. У першому наближенні призначають ваги вимірів, виходячи з точності приладу. Використовуючи, наприклад, ітераційний метод варіаційно-зважених наближень, у процесі зрівнювання виконують уточнення ваг вимірів. У результаті розв'язку отримують просторові координати станції вимірювань.

Визначивши координати станції вимірювань, переходять до знімання кожного кільця, для якого кут відбивання променя не є критичним (мал. 3).



Мал. 3. До визначення деформацій тунелю

Координати кожної точки отримують з виразів:

$$\begin{aligned} X_i &= X_P + R \cos \beta \cos z; \\ Y_i &= Y_P + R \sin \beta \cos z; \\ Z_i &= Z_P + R \sin z, \end{aligned} \quad (2)$$

де X_P, Y_P, Z_P – координати станції вимірювань.

Спостережуваними можуть бути не тільки вісім стандартних точок, а й будь-які інші (див. мал. 3). Збільшення кількості точок спостереження покращує точність оцінки положення кільця і точність визначення деформацій.

Зауважимо, що вирази (1) цілком придатні для



обчислень і при використанні наземного лазерного сканера.

Після визначення просторових координат точок кожного кільця обробляють результати за методикою, наведеною в статті [3].

До моменту появи деформації точки кільця знаходяться на поверхні проектного кола. Для оцінки фактичного положення кільця виконують апроксимацію колом за методом найменших квадратів. За вихідне для кожного кільця приймають таке рівняння кола:

$$(Y_i - Y_S)^2 + (Z_i - Z_S)^2 = r^2, \quad (3)$$

де Y_S, Z_S – координати центра кола; r – радіус кола, якому відповідає таке рівняння поправок:

$$a_i \delta Y_S + b_i \delta Z_S + c_i \delta r + l_i = v_i. \quad (4)$$

Це рівняння розв'язують за умови, що $V^T P V = \min$. Важливо пам'ятати, що електронні тахеометри або системи лазерного сканування базуються на технології вимірювання двох кутів орієнтування та відстані до точки. Ці прилади визначають місцеположення точок об'єкта за виразами (2). Точність визначення координат точок змінюватиметься в залежності від зміни відстані та кутів, а отже, вагові коефіцієнти у ваговій матриці \mathbf{P} для різних точок будуть неоднаковими. В подальшому методом варіаційно-зважених наближень виконують уточнення ваг вимірів. Матриця СКП вимірювання відстаней та кутів \mathbf{M} без врахування кореляційних зв'язків матиме вигляд:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_B^2 & 0 & 0 \\ 0 & m_z^2 & 0 \\ 0 & 0 & m_R^2 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Для отримання СКП координат точок матрицю \mathbf{M} трансформують відповідно до правила перетворення коваріацій:

$$\mathbf{M}_i = \mathbf{A} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{A}^T, \quad (6)$$

де \mathbf{M}_i – матриця СКП координат точки; \mathbf{A} – матриця частинних похідних від виразів (2). Отримавши матрицю СКП координат, установлюють відповідні значення ваг.

Для оцінки просторових деформацій кільця тунелю можна скористатися методом апроксимації отриманих координат точок поверхнею циліндра. Застосування такої методики найбільш раціональне при використанні для знімання систем наземного лазерного сканування.

Здобутий в результаті апроксимації набір перерізів дає змогу оцінити фактичне положення осі тунелю і відхилення окремих кільць від проектнової осі тунелю.

Для визначення найбільш імовірного положення просторової осі тунелю, ґрунтового дослідження переміщень кожного кільця окремо і визначення загальних переміщень тунелю необхідно виконати апроксимацію даної осі за коор-

динатами центрів окремих кільць, отриманих за результатами апроксимації рівнянням кола (3).

Найпростіше оцінка просторового положення осі тунелю виконується за рівнянням просторової прямої в параметричній формі:

$$X_S = X_1 + lt; \quad Y_S = Y_1 + mt; \quad Z_S = Z_1 + nt, \quad (7)$$

де X_S, Y_S, Z_S – координати центрів кіл, отримані з апроксимації; X_1, Y_1, Z_1 – координати точки на прямій; l, m, n – напрямні косинуси прямої; t – параметр.

Від рівнянь (7) зручно перейти до рівнянь поправок, які, як і в попередньому випадку, вирішують за умови, коли $V^T P V = \min$.

Вісь будь-якого тунелю являє собою просторову криву, в точках повороту якої влаштовуються горизонтальні та вертикальні криві. Для оцінки положення просторової траєкторії найчастіше застосовують поліноми різних степенів, періодичні функції та сплайни третього степеня, а згладжування прямих ділянок та кругових кривих проводиться способом найменших квадратів [6].

Розглянемо задачу апроксимації осі тунелю з використанням поліномів однієї змінної.

Нехай значення X_S, Y_S, Z_S задані на рівновіддаленій системі вузлів. Для кожної координати визначають коефіцієнти багаточлена $f(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n$ за умови мінімуму суми квадратів поправок. Найкращий спосіб пошуку степеня n полінома – це порівняння СКП одиниці ваги μ_n і μ_{n+1} при апроксимації поліномами степенів n та $n+1$. При ознаках певної стабілізації цих похибок степенів полінома не збільшують. Загальновідомо, що недоліком апроксимації алгебраїчними поліномами є зниження точності визначення коефіцієнтів a_i з підвищенням степеня n полінома.

А тепер розглянемо цю саму задачу з використанням ряду Фур'є. Приміром, спостереження X_S, Y_S, Z_S проволотиться на рівновіддаленій системі вузлів $x_t = \frac{2\pi}{K} t = \omega t$ де $t = 0, 1, 2, \dots, k-1$, а $\omega = \frac{2\pi}{K}$. Тоді умовне рівняння матиме такий вигляд:

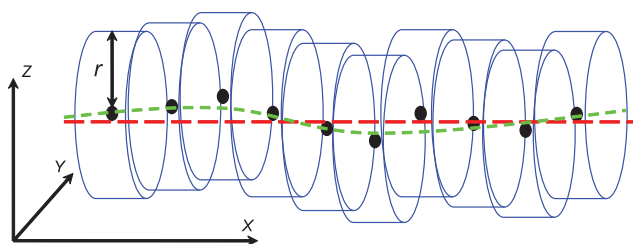
$$Y_t = A_0 + \sum_{p=1}^v (A_p \cos \omega_p t + B_p \sin \omega_p t),$$

де $\omega_p = p\omega$; v – ціле число; $v < \frac{K}{2}$; A_0, A_p, B_p ($p = 1, 2, \dots, v$) – невідомі коефіцієнти, які потрібно визначити.

Фур'є-апроксимація повніше описує ряди спостережень у порівнянні з поліноміальною, хоча точність визначення коефіцієнтів ряду Фур'є при певному v менше. Так, для першого коефіцієнта $m_{A_0} = m_i \sqrt{\frac{1}{n}}$ де n – кількість точок, використаних при апроксимації. Всі інші СКП коефіцієнтів визначаються як $m_{A_i B_i} = m_i \sqrt{\frac{2}{n}}$. Характерна особливість поліноміальної апроксимації – краще наближення кривої в цілому, тоді як Фур'є-апроксимація описує незначні



осциляції кривої. У випадку апроксимації осі тунелю найбільш вдалою слід вважати модель, яка являє собою суперпозицію поліноміальної та Фур'є-апроксимацій [4] (мал. 4).



Мал. 4. Апроксимація осі тунелю

Така модель має вигляд:

$$Y_i = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^2 + \sum_{p=1}^v (A_p \cos \omega_p t + B_p \sin \omega_p t).$$

До вибору таких моделей слід ставитись досить обережно, оскільки їх поведінка суттєво змінюється при включенні або, навпаки, виключенні додаткових коефіцієнтів.

Висновки та рекомендації. У статті описуються методики виконання спостережень та математичного опрацювання результатів цих спостережень за деформаціями тунелів метрополітену. Визнано переваги сучасних геодезичних приладів, електронних тахеометрів та лазерних сканерів над традиційними геодезичними приладами. Вказано, що за допомогою методів наземного лазерного сканування та електронної тахеометрії можливе визначення не тільки деформацій окремих ділянок тунелю, а й усієї споруди загалом. Подальші дослідження слід спрямувати на вивчення можливостей і вимірювальної точності існуючих лазерних сканерних систем та електронних тахеометрів при спостереженні за деформаціями тунелів метрополітену.

Література

1. Баран П.І. Тригонометричне нівелювання в інженерно-геодезичних роботах: Монографія / П.І. Баран, Ф.Ф. Соловійов, В.Я. Черноконь – К.: Укргеодезкартографія, 1996. – 130 с.
2. Карпик А.П. Влияние деформации обделки тоннеля на положение пунктов подземной полигонометрии / А.П. Карпик // Инженерно-геодезические работы в строительстве: Межвуз. сб. – М., 1981. – Вып. 7(6). – С. 74-78.
3. Карпик А.П. Расчет и оценка точности деформационных характеристик поперечных сечений круговых тоннелей / А.П. Карпик // Науч. тр. ВАГО. Инженерная геодезия в современном строительстве. – М., 1986. – С. 61-70.
4. Левчук Г.П. Прикладная геодезия. Геодезические работы при изысканиях и строительстве инженерных сооружений / Г.П. Левчук, В.Е. Новак, Н.Н. Лебедев; Под. ред. Г.П. Левчука. – М.: Недра, 1983. – 400 с.
5. Хамид Фарамарз Пур. Разработка методов анализа деформаций подземных сооружений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 25.00.32 "Геодезия" / Хамид Фарамарз Пур. – М., 2007. – 17 с.
6. Шульц Р.В. Методи і алгоритми математичного моделювання просторових переміщень тунелів метрополітену / Р.В. Шульц, М.В. Білоус // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – 2008. – Вип. 80. – С. 532-536.
7. Шульц Р.В. Визначення траєкторії рухомого об'єкта / Р.В. Шульц, С.А. Іванченко // Инж. геодез. – 2005. – Вип. 51. – С. 242-249.
8. Шульц Р.В. Визначення деформацій підпірних стінок при будівництві метрополітену / Р.В. Шульц, Т.Т. Чмчян, М.В. Білоус // Містобудування та територіальне планування – 2008. – Вип. 31. – С. 462-469.
9. Lindenbergh R., Pfeifer N., Rabbani T. Accuracy analysis of the leica HDS3000 and feasibility of tunnel deformation monitoring. ISPRS WG III/3 Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, the Netherlands, September 12-14, 2005. – 6 p.
10. van Gosliga R., Lindenbergh R., Pfeifer N. Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. – Vol. XXXV. – 6 p.

Надійшла 04.09.09