

В.К. ЧИБІРЯКОВ, д-р техн.наук, проф., Р.В. ШУЛЬЦ, канд.техн.наук, доц.,
М.В. БІЛОУС, асп. (Київський національний університет будівництва і архітектури)

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТОЧНОСТІ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЗА ДЕФОРМАЦІЯМИ ТУНЕЛІВ МЕТРОПОЛІТЕНУ НА СТАДІЇ БУДІВНИЦТВА

В роботі розглянуто методику розрахунку точності спостережень за деформаціями тунелів метрополітену. Запропоновано визначати точність спостережень на основі розрахункового значення максимального переміщення кільця тунелю.

Постановка проблеми

При будівництві тунелів метрополітену, одразу після проходження щита постає задача визначення можливої деформації кільця тунелю. До теперішнього часу спостереження виконують тільки за якістю монтажу тьобінгів тунелю. За допомогою звичайних промірів виконують вимірювання еліптичності кільця за схемою, що наведена на рисунку 1.

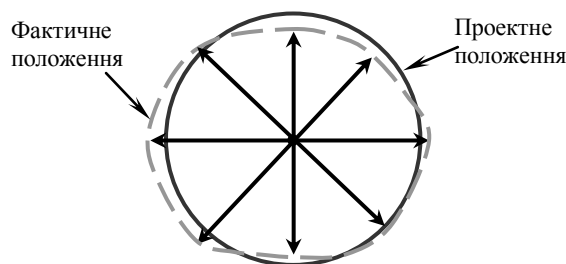


Рис. 1. Визначення відхилення тунелю від проектного положення

Згідно з [1] допустимі відхилення положення елементів тунелю від проекту знаходяться в межах $\delta = \pm 50$ мм. Якщо прийняти, що точність геодезичних спостережень визначають за виразом

$$m_T \leq 0.2\Delta D, \quad (1)$$

тоді $m_T = \pm 10$ мм.

Такої точності вимірювань можна досягнути за допомогою традиційного геодезичного обладнання.

Однак внаслідок неякісного монтажу оправи тунелю та не врахування окремих видів навантажень може виникнути додаткова деформація кільця оправи тунелю, яка з часом може перевищити допустимі значення. В нормативній літературі не передбачається окремого комплексу спостережень за оправою тунелю, а відтак не регламентується необхідна точність спостережень.

Огляд попередніх публікацій

Призначення точності за обраною методикою вперше було розглянуто в роботах В.С. Староверова [2]. Як зазначено вище до теперішнього часу такий важливий етап, як спостереження за деформаціями окремих частин тунелю метрополітену не розглядався. Певною мірою спроби вирішити дану проблему зроблені в роботах [3;4]. Але ці роботи вирішують питання спостереження за деформаціями лише з

технологічної точки зору. Вихідною величиною для розрахунку точності в [3] є вже вище згадувана величина $\delta = \pm 50$ мм з ДБН [1].

Постановка завдання

Метою роботи є розробити методику розрахунку точності спостережень за деформаціями окремого кільця тунелю метрополітену кругового перерізу.

Основний зміст роботи

На наш погляд найбільш доцільним і правильним підходом до розрахунку точності спостережень є підхід що запропонований в роботі [2]. При цьому підході точність спостережень призначають з умови виявлення максимально допустимої деформації споруди, яку розраховують за допомогою методів будівельної механіки.

В нашому випадку кожен ділянку тунелю метрополітену можна вважати оболонкою кругового перерізу. Оскільки при розрахунку оболонки нормативні навантаження множаться на коефіцієнт умов роботи (по суті, коефіцієнт запасу), який для різних дій варіюється від 1,1 до 1,4 [1], то середнє його значення наближено приймемо 1,2. Це означає, що навантаження на оболонку можуть перевершувати нормативні в середньому на 20%. Тому і похибки, що допускаються при геодезичних вимірюваннях, не повинні призводити до додаткових зусиль, що перевершують 20% від розрахункових для прийнятого перерізу. Виходячи з цих міркувань знайдемо максимальні переміщення Δ_1, Δ_2 , що їх викличуть надлишкові навантаження.

Оскільки напружено-деформований стан оболонки характеризується двома характеристиками жорсткості:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}; \quad H = \frac{Eh}{1-\nu^2}$$

де D – циліндрична жорсткість на розтягання-стиснення; E – модуль пружності матеріалу; ν – коефіцієнт поперечного розширення (коефіцієнт Пуассона) – 0,2; h – товщина оболонки – 0,3 м; R – радіус оболонки – 5,85 м.

тоді для бетону марки В40 з $E = 2,2 \cdot 10^6 \frac{\text{Т}}{\text{М}^2}$ матимемо відповідно:

$$D = 5,156 \cdot 10^4 \text{кН} \cdot \text{м} \quad H = 6,875 \cdot 10^6 \text{кН} / \text{м}$$

Найбільше зусилля N і згинальний момент M , які може сприйняти дана оболонка обчислюють:

$$M^{\max} = R_{32} \cdot \frac{h^2}{6(1-\nu^2)} = 306,56 \text{кН};$$
$$N^{\max} = R_{32} \cdot h = 5886 \text{кН} / \text{м}$$

Тепер можемо обчислити максимально допустимі зміни в навантаженні як:

$$\Delta M^{\max} = 0,2M^{\max} = 61,7 \text{ кН};$$

$$\Delta N^{\max} = 0,2N^{\max} = 1177 \text{ кН/м}$$

Напружено деформований стан (НДС) оболонки розглядають в криволінійній системі координат, яка віднесена до серединної поверхні оболонки.

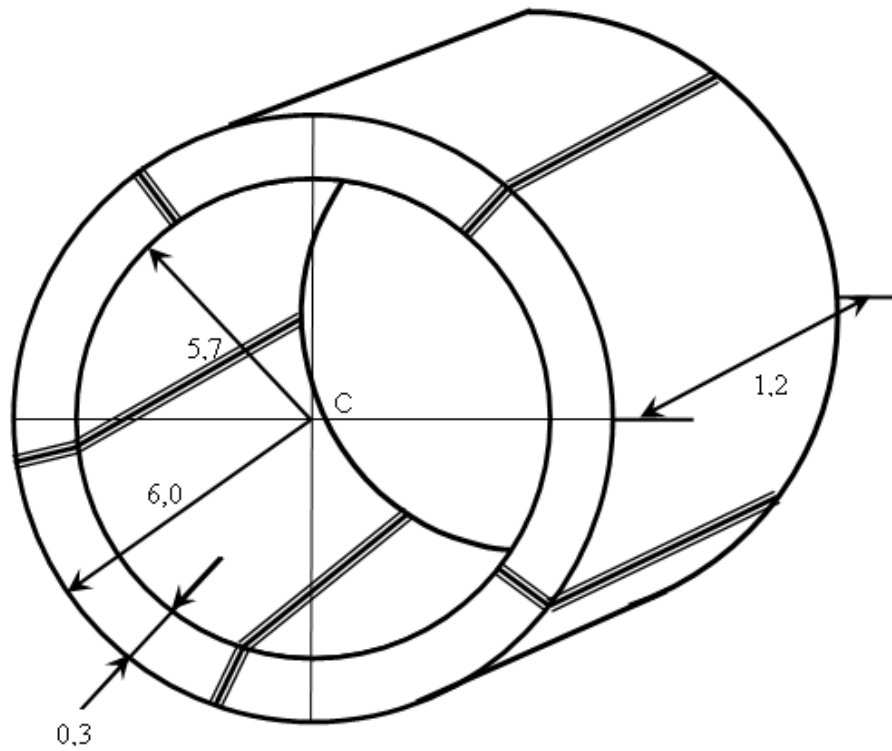


Рис. 2. Параметри окремого кільця оболонки

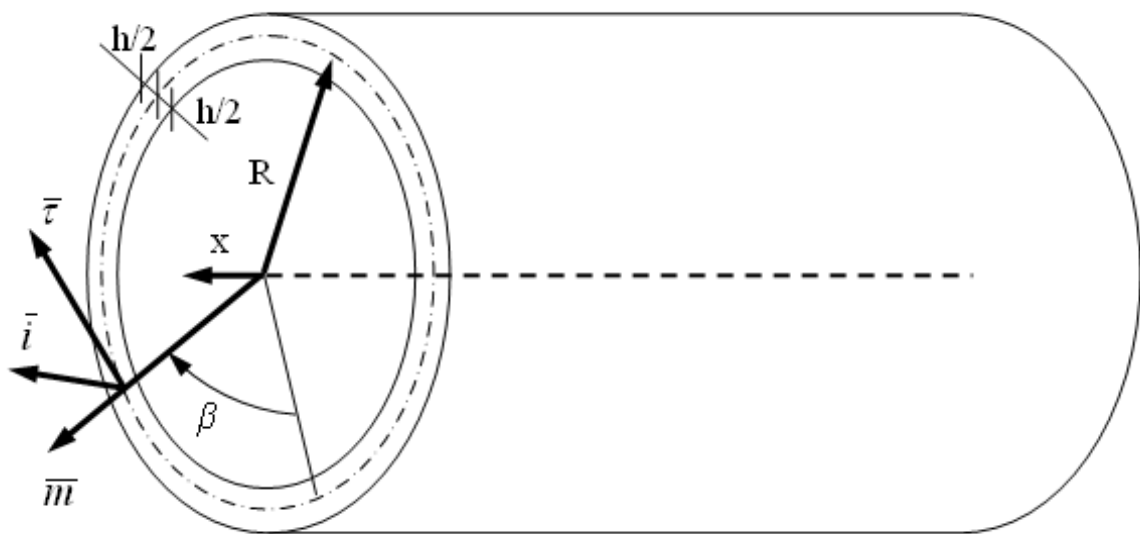


Рис. 3. Геометричні характеристики оболонки

Величини, що характеризують НДС це: – 1) кінематичні (переміщення точок оболонки до деформації), 2) статичні () у теорії оболонок замінюються величинами, віднесеними до серединної поверхні оболонки – 1) кінематичними (переміщеннями точок серединної поверхні і деформаціями серединної поверхні, 2) статичними (зусиллями і моментами). Таким чином, в теорії оболонок тривимірна теорія пружності зводиться до двовимірної для розрахункової моделі – серединної поверхні оболонки.

Характеристики НДС двовимірної моделі розглядаються місцевого базису в даній точці серединної поверхні $\{\vec{i}, \vec{\tau}, \vec{m}\}$, де \vec{i} – одиничний вектор – орт осі ОХ, $\vec{\tau}$ – одиничний вектор дотичної до направляючого кола, \vec{m} – вектор одиничної нормалі до серединної поверхні.

Як характеристики двовимірної розрахункової моделі розглядаються переміщення точок серединної поверхні $\{u, v, w\}$ (рис. 4), відносні деформації в дотичній площині до серединної поверхні $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \omega$ і деформації кривизни χ_1, χ_2, τ , а також зусилля $N_1, N_2, S_1, S_2, Q_1, Q_2$ і моменти M_1, M_2, M_{12}, M_{21} .

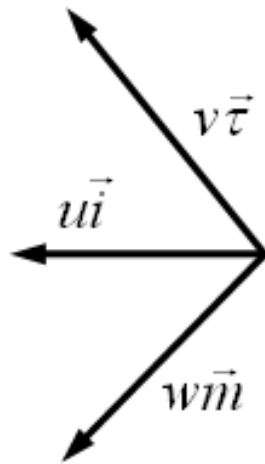


Рис. 4. Компоненти вектора переміщень серединної поверхні

Проте достатньо адекватну оцінку НДС в нашому випадку можна отримати істотно спростивши . Оскільки розглядається питання про оцінку НДС оболонки, що знаходиться в ґрунті на достатньо великій глибині, то навантаження, яке діє на оболонку, – г тиск, а оскільки ґрунт на такій глибині достатньо однорідний по довжині оболонки, то можна вважати, що НДС оболонки не залежить від повздовжньої координати. Таким чином, залишаються наступні характеристики НДС:

1. Переміщення – v, w
2. Деформації – ε_2, χ_2 ;
3. Зусилля – N_2, Q_2 ;
4. Моменти - M_2 ;

Відповідно двовимірні рівняння зводяться до одновимірних, тобто до звичайних диференціальних рівнянь. Згідно теорії оболонок маємо [5]:

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{R} \left(\frac{dV}{d\beta} + w \right)$$

$$\chi_2 = -\frac{1}{R^2} \left(\frac{d^2 w}{d\beta^2} + w \right)$$

$$N_2 = \frac{H}{R} \left(\frac{dV}{d\beta} + w + \frac{h^2}{12R^2} \frac{d^2 w}{d\beta^2} \right)$$

$$M_2 = \frac{D}{R^2} \left(\frac{d^2 w}{d\beta^2} + w \right)$$

$$Q_2 = -\frac{1}{R} \frac{dM_2}{d\beta} = -\frac{D}{R} \left(\frac{d^3 w}{d\beta^2} + \frac{dw}{d\beta} \right)$$

$$\frac{dN_2}{d\beta} + Q_2 + R \cdot Y = 0$$

$$\frac{dQ_2}{d\beta} - N_2 + R \cdot Z = 0,$$

де Y, Z – компоненти зовнішнього навантаження, векторів $\vec{\tau}$ і \vec{m} відповідно.

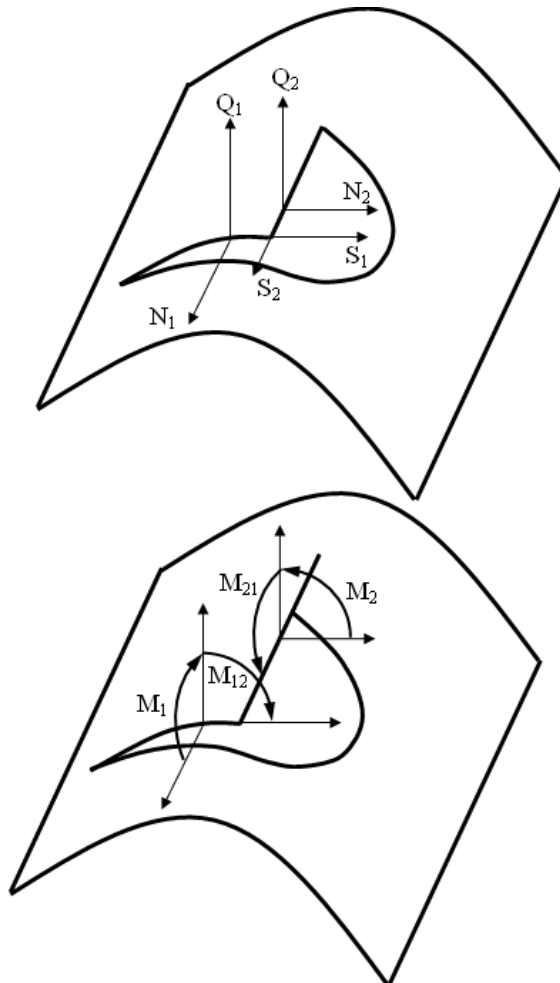


Рис. 5. Основні характеристики напружено-деформованого стану оболонки

Нехай по колу тунелю розташовано n марок, де n – парне, і похибки вимірювання нормальних переміщень Δ_1 , а дотичних переміщень Δ_2 . Розглядатимемо якнайгірший варіант виникнення похибок, коли по колу знаки похибок (як Δ_1 , так і Δ_2) чергуються. Можна вважати, що це відповідні переміщення точок поперечного перетину оболонки. Оскільки крива переміщень – гладка, то апроксимуємо її косинусоїдою, тобто вважатимемо, що:

$$V(\beta) = \Delta_2 \sin \frac{n}{2} \beta, \quad w(\beta) = \Delta_1 \cos \frac{n}{2} \beta.$$

Знаючи закон зміни переміщень, можна знайти решту всіх характеристик НДС, зокрема:

$$\begin{aligned} M_2 &= \frac{D}{R^2} \left(\frac{d^2 w}{d\beta^2} + w \right) = \Delta_1 \frac{D}{R} \left(-\left(\frac{n}{2}\right)^2 + 1 \right) \cos \frac{n}{2} \beta, \\ N_2 &= \frac{H}{R} \left(\frac{dV}{d\beta} + w + \frac{h^2}{12R^2} \frac{d^2 w}{d\beta^2} \right) = \\ &= \frac{H}{R} \left(-\frac{n}{2} \Delta_2 + \left(1 - \frac{h^2}{12R^2} \left(\frac{n}{2}\right)^2 \right) \Delta_1 \right) \cos \frac{n}{2} \beta. \end{aligned}$$

Найбільші значення моменту і нормальної сили:

$$\left. \begin{aligned} \Delta M_2^{max} &= \Delta_1 \frac{D}{R^2} \cdot \left[-\left(\frac{n}{2}\right)^2 + 1 \right], \\ \Delta N_2^{max} &= \frac{H}{R} \left(\frac{n}{2} \Delta_2 + \left[1 - \frac{h^2}{12R^2} \left(\frac{n}{2}\right)^2 \right] \Delta_1 \right). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

З виразів (2) знаходимо максимальні переміщення Δ_1 , і Δ_2 виклакині значеннями аномальних навантажень.

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1 &= \frac{\Delta M_2^{max}}{\frac{D}{R^2} \left(-\left(\frac{n}{2}\right)^2 + 1 \right)}; \\ \Delta_2 &= \frac{\Delta N_2^{max} - \frac{H}{R} \left(1 - \frac{h^2}{12R^2} \left(\frac{n}{2}\right)^2 \right) \Delta_1}{\frac{H}{R} \cdot \frac{n}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

За виразами (3) та геометричними та фізичними характеристиками оболонки отримаємо наступні значення переміщень $\Delta_1 = -0,0136 \text{ м}$; $\Delta_2 = 0,0073 \text{ м}$. Отримані

розрахункові значення переміщень дозволяють встановити необхідну точність спостережень. З виразу (1) маємо:

$$m_{\Gamma} \leq 2.7 \text{ мм,}$$

Таку точність можна забезпечити за допомогою електронного тахеометра, що працює в режимі без відбивача.

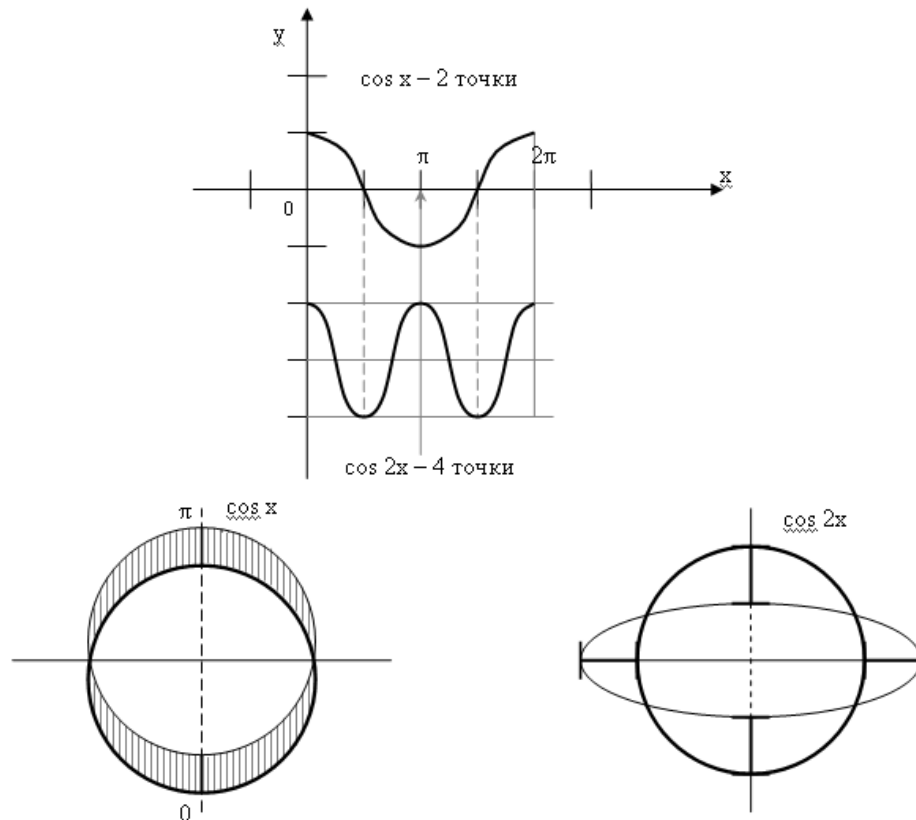


Рис. 6. Переміщення серединної поверхні оболонки при $n=2$ і $n=4$

Висновки і перспективи

В роботі отримані достатньо зручні та з теоретичної точки зору надійні вирази для попереднього розрахунку точності геодезичних спостережень за деформаціями тунелю метрополітену. Наступним кроком є розробка методики розрахунку точності визначення деформацій для тунелів прямокутного перерізу.

Бібліографічний список

1. Споруди транспорту. Метрополітени: ДБН В.2.3-7-2003.
2. Староверов В.С. К определению точности и периодов наблюдений осадок инженерных сооружений / Староверов В.С. // Инженерная геодезия. – 1978. - Вып. 21. - С. 57-61.
3. Карпик А.П. Расчет и оценка точности деформационных характеристик поперечных сечений круговых тоннелей / Карпик А.П. // Научные труды ВАГО. Инженерная геодезия в современном строительстве. - М.: 1986, С. 61-70.
4. Хамид Фарамарз Пур Разработка методов анализа деформаций подземных сооружений: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 25.00.32 "Геодезия" / Хамид Фарамарз Пур. – М., — 2007. -17 с.
5. Власов В.З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике / В.З. Власов. - ГИТТЛ, М.-Л., - 1949. - 784с.

Надійшла до редколегії 11.12.2009

В.К. ЧИБИРЯКОВ, Р.В. ШУЛЬЦ, М.В. БИЛОУС

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТОЧНОСТИ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДЕФОРМАЦИЯМИ
ТУННЕЛЕЙ МЕТРОПОЛИТЕНА НА СТАДИИ СТРОИТЕЛЬСТВА**

В работе рассмотрена методика расчета точности наблюдений за деформациями туннелей метрополитена. Предложено определять точность наблюдений на основе расчетного значения максимального перемещения.

V. CHIBIRYAKOV, R. SHULTS, M. BILOUS

**THE PROCEDURE OF CALCULATING THE MONITORING ACCURACY FOR
DEFORMATIONS OF UNDERGROUND TUNNELS AT THE STAGE OF CONSTRUCTION**

The paper considers the procedure of calculating the monitoring accuracy for deformations of underground tunnels. The accuracy of the monitoring is determined on the basis of the calculated value of the maximal displacement.

© В.К. Чибіряков, Р.В. Шульц, М.В. Білоус, 2010