

УДК 528.48/517.9

д.т.н., професор Чибіряков В. К.,
к.т.н., професор Староверов В. С., Кравченко З. М.,
Київський національний університет будівництва й архітектури

ОБҐРУНТУВАННЯ ТОЧНОСТІ ВИКОНАННЯ ГЕОДЕЗИЧНИХ РОБІТ

В статті розглянуто методика обґрунтування точності виконання геодезичних робіт при моніторингу інженерних об'єктів за умов моделювання їх НДС.

Постановка проблеми. Протягом будівництва й експлуатації інженерних об'єктів з різними рівнями відповідальності та різними категоріями постає питання моніторингу існуючого стану об'єкта. Головним завданням геодезичного моніторингу інженерних об'єктів є отримання, накопичення та аналіз фактичних просторових даних щодо переміщень окремих характерних точок об'єктів у просторі. Отримані дані допомагають вирішити ряд конструктивно-технічних та будівельно-технологічних проблем, а також допомагають апробації прийнятих рішень, що мають за основу математичні та/або фізичні моделі інженерних об'єктів. Перелік об'єктів та призначення моніторингу регламентуються державними будівельними нормами ДБН В.1.2-5:2007 «Науково-технічний супровід будівельних об'єктів» [1].

Аналіз останніх досліджень. Задача обґрунтування точності виконання геодезичних робіт при моніторингу стану інженерних об'єктів є дуже актуальною, оскільки відповідна точність виконання геодезичних робіт засвідчує фактичні переміщення на адекватному рівні з відповідною ймовірністю, що в подальшому дозволяє виявити та перевірити запроектований характер роботи конструктивних елементів (напружено-деформований стан).

Мета статті. Метою статті є розкриття методики обґрунтування точності виконання геодезичних робіт при моніторингу деформацій балок на пружній основі, шляхом моделювання взаємної роботи конструкції з ґрунтової основою, а також урахуванням середньо квадратичних похибок визначення фізико-механічних характеристик ґрунтової основи.

Викладення основного матеріалу. Для того, щоб обґрунтувати точність виконання геодезичних робіт, що мають на меті виявлення переміщень окремих характерних точок інженерного об'єкта (геодезичний моніторинг), необхідно заздалегідь з'ясувати величину можливих переміщень окремих точок. В попередніх публікаціях [2] було розглянуто методика визначення величин переміщень, шляхом моделювання сумісної роботи елементарних конструкцій із ґрунтовою основою. Окрім моделюванням напружено-деформованого стану

конструкцій необхідно проаналізувати та врахувати можливе накопичення похибок моделювання, вихідних даних щодо фізико-механічних параметрів ґрунтової основи. Подібний підхід дозволяє з певною адекватністю та вірогідністю визначити величину можливих переміщень (прогнозування величини переміщення). Звісно, що визначення можливих переміщень характерних точок конструктивних елементів є кінцевим результатом використання розрахункових моделей, що мають враховувати основні характерні властивості конструктивних елементів та ґрунтового середовища.

Загальні принципи розрахунків та розрахункових моделей наведені в розділі №6 ДБН В.1.2-14:2009 «Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ». Також розкривається питання доцільності використання геометричної та фізичної нелінійності окремих елементів чи всієї системи [3].

Оскільки зміна напружено-деформованого стану конструктивних елементів залежить від зміни характеру впливів та навантажень, то необхідно враховувати природу походження навантаження та впливу. Згідно з ДБН 1.2.-2:2006 «Навантаження і впливи» всі навантаження та впливи поділяють за механічною та немеханічною природою [4]. На основні та епізодичні, залежно від причин виникнення. На постійні та змінні, залежно від змінюваності в часі. У свою чергу змінні навантаження й впливи поділяються на тривалі, короткочасні та епізодичні. Необхідно зважати на той факт, що під час розрахунків конструктивних елементів використовують коефіцієнти надійності γ_n (ГОСТ 27751) [5]. Залежно від характеру навантаження та мети розрахунків використовуються чотири розрахункові значення: *граничне, експлуатаційне, циклічне та квазіпостійне*.

Особлива увага приділяється граничним станам конструктивних елементів. Граничні стани поділяються на дві групи, що в свою чергу можуть мати власні підгрупи. *Перша група* містить такі граничні стани, поява яких призводить до повної непридатності будівельного об'єкта (конструкції, елемента, ґрунтової основи). Досягнення граничного стану першої групи класифікується як відмова-зрив. *Друга група* містить такі граничні стани, поява яких ускладнює нормальну експлуатацію об'єкта та/або зменшує період довговічності. Досягнення граничного стану другої групи класифікується у більшості випадків як відмова-перешкода.

Пункт 7.4.4 ДБН В.1.2-14:2009: «За наявності досить тісного кореляційного зв'язку між певними характеристиками міцності та деформативності матеріалу допускається визначати розрахункові значення одних характеристик як функції інших, безпосередньо виміряних величин, користуючись достовірно встановленими функціональними чи кореляційними

залежностями (наприклад, опір зрізу сталі встановлюється залежно від опору стиску або навпаки).» [3].

Таким чином ми розглянули послідовність та мету визначення розрахункових параметрів конструктивних елементів споруди чи цілої системи (об'єкта). Кінцевими результатами подібних розрахунків є прогнозовані значення параметрів (величини переміщень, моменти, перерізуючі сили, прогини та інше). На основі моделювання граничного напружено-деформованого стану конструктивних елементів; використанні існуючих функціональних залежностей та кореляційних зв'язків між розрахунковими параметрами елемента та/або системи; апробації результатів моделювання та подальшого уточнення моделей об'єктів, ми отримуємо цілісну картину напружених та деформованих станів системи.

Після того як визначені граничні величини (чи інтервал можливих значень параметрів конструктивного елемента, що взаємодіє з середовищем) є

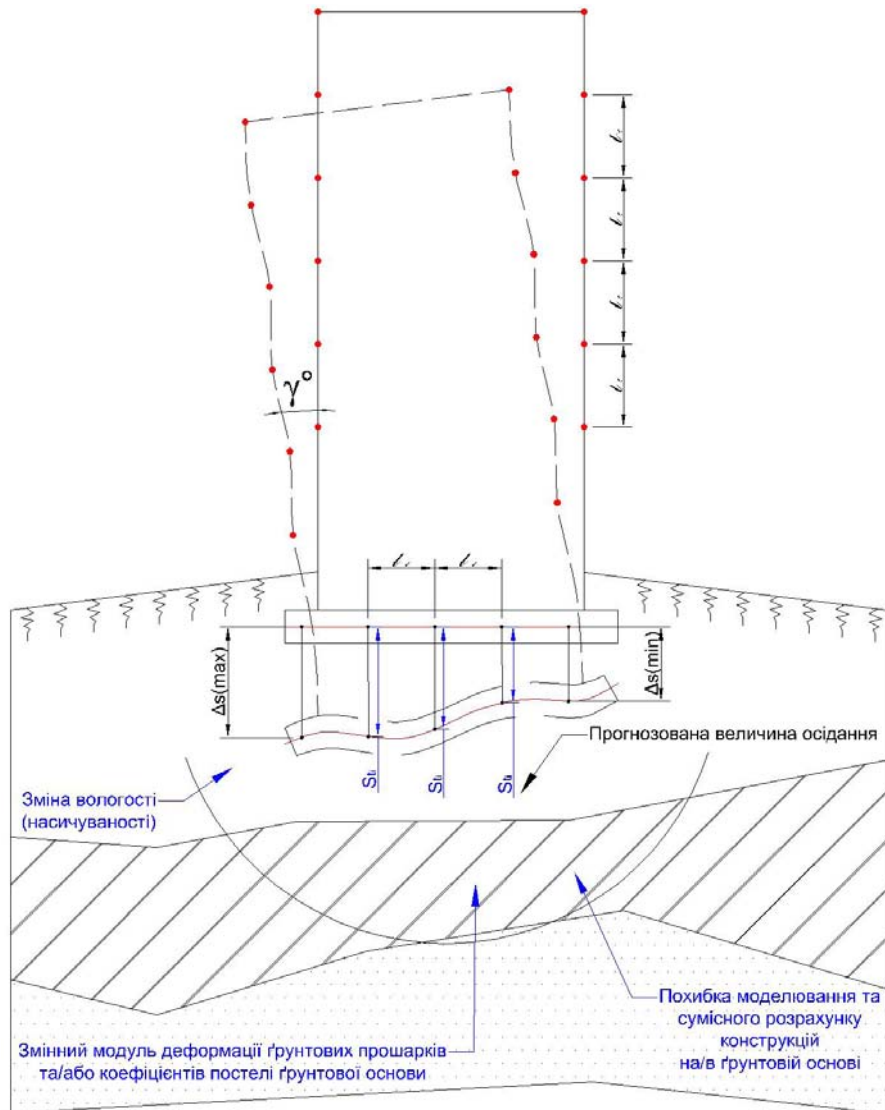


Рис.1 Загальна схема деформування інженерного об'єкта

можливість обґрунтованого переходу до СКП геодезичних робіт, за результатами яких буде можливо виявити, підтвердити, спростувати чи уточнити проектні величини просторового деформування та осідання.

Розглянемо уявну ситуацію, коли відбувається осідання споруди; деформування фундаментних конструкцій та деформування надземної частини (рис. 1). Необхідно зауважити, що гранично допустимі величини деформації фундаментних конструкцій, надземної частини та кінцеве значення величини осідання споруди будуть відрізнятися між собою й матимуть власну СКП визначення. На результати визначення можливих граничних величин деформацій та осідання впливатимуть різні СКП складових аргументів; похибки моделювання; похибки сумісного розрахунку. Наприклад:

- на кінцеве значення величини осідання S_x впливатимуть похибки фізико-механічних параметрів ґрунтової основи, що в подальшому матиме вплив на прогнозування величини осідання за тією чи іншою моделлю розвитку процесу консолідації ґрунтового масиву;
- від прогнозованої величини приросту осідання за певний період залежить точність та періодичність виконання геодезичних робіт;
- від того як взаємодіятиме фундаментна конструкція з ґрунтовою основою залежить характер просторових переміщень надземної частини, яка також сприймає впливи та навантаження та передає їх фундаменту.

Таким чином ми маємо справу з трьома величинами: можливими просторовими переміщеннями точок надземної частини споруди, точок фундаментної конструкції та величинами приростів осідань інженерного об'єкта.

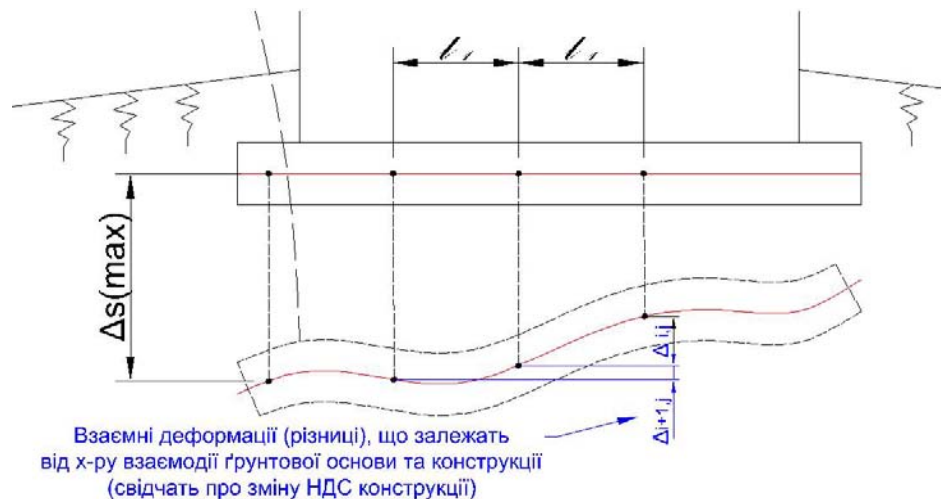


Рис. 2 Взаємні деформації точок фундаменту

Проаналізувавши результати наукових досліджень В.С. Староверова [6,7], що змістовно розкривають питання визначення НДС будівельних конструкцій на пружній основі за допомогою визначення приростів переміщень характерних

точок конструкцій геодезичними методами, розглянемо загальну методику визначення НДС конструкцій за допомогою геодезичних методів.

Розглянемо балку, що є широко розповсюдженою фундаментною конструкцією. При взаємодії балки з навколишнім середовищем (грунтовою основою) та під дією впливів і навантажень ми маємо функціональну залежність між приростами прогинів та зусиллями, що виникають в конструкції.

Баžано, щоб деформаційна крива згину балки спочатку отримувалася шляхом попереднього моделювання (на стадії проектування), а не за результатами фактичних спостережень. Функціональна залежність вертикальної складової переміщення y точки балки та значенням координати x цієї точки має наступний вигляд:

$$y = f(x). \quad (1)$$

Попереднє моделювання дозволяє одразу визначити такі необхідні параметри:

- максимально допустимі величини приростів моментів, перерізувальних сил в конструкції (20% від експлуатаційної величини);
- величини переміщень точок конструкції, що відповідають відповідному приросту (20%) моментів та/або перерізуючих сил. Рівняння (2) характеризує взаємозв'язок між моментом та величиною прогину балки:

$$M = -EI \frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{EI}{\rho}, \quad (2)$$

де E – модуль пружності балки; I – момент інерції відповідного перерізу; y – величина прогину осі балки; x – поздовжня точки; ρ – радіус кривини деформованої вісі балки [8]. Рівняння (3) характеризує зв'язок між поперечною силою Q та моментом [8]:

$$Q = \frac{dM}{dx} = -EI \frac{d^3 y}{dx^3}. \quad (3)$$

На цьому етапі визначення можливих переміщень та моментів окремих точок (шляхом моделювання) необхідно врахувати вплив похибок вихідних параметрів (похибки, що стосуються параметрів ґрунтової основи; що стосуються конструкції). Після врахування СКП вихідних параметрів ми отримуємо СКП величини прогину в будь-якій точці конструкції (рис.3).

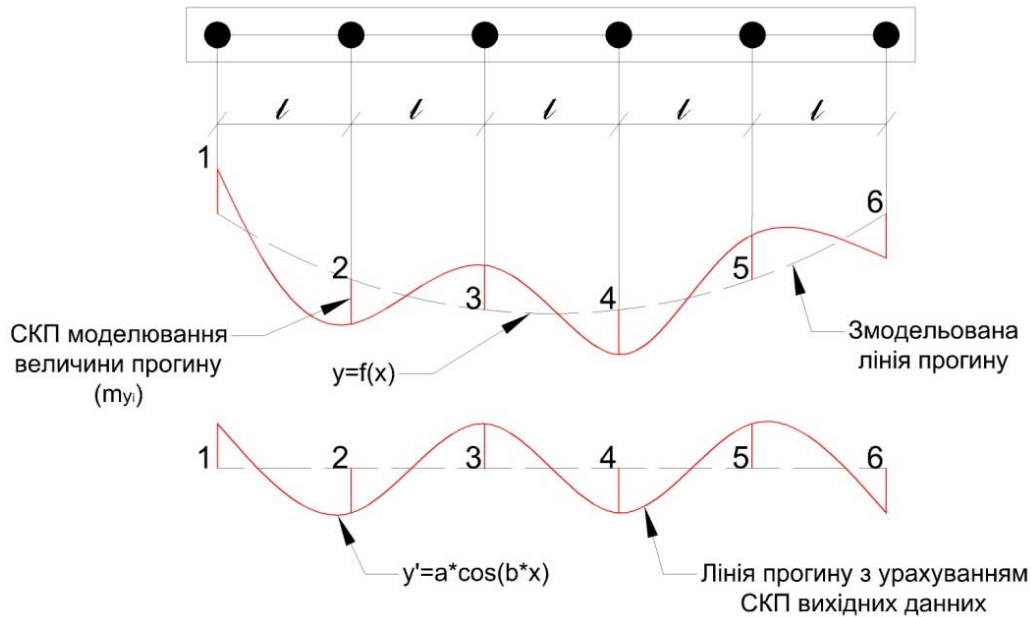


Рис.3 Деформаційна крива

На рисунку 3 показана змодельована лінія прогину балки без урахування СКП вихідних параметрів та змодельована лінія з урахуванням СКП вихідних даних. Оскільки випадкова величина похибки має властивість симетричного прояву, тобто СКП зі знаком мінус зустрічаються з майже тією ж самою частотою що й додатні, тому на рис.3 в точці 1 та 2 СКП мають різний знак прояву. Оскільки радіус кривини деформаційної кривої досить великий, то можна перейти до прямої лінії, на якій розглядати вплив СКП. У разі, якщо СКП будуть неоднаковими для кожної з характерних точок балки, тобто відрізки будуть різними за величиною, то необхідно виконати апроксимацію цієї кривої за допомогою виразу (4):

$$y' = a \cdot \cos(b \cdot x), \tag{4}$$

Величина вертикального відрізка в кожній точці характеризує величину СКП моделювання $m_{y_{СКП}}$. Розглянемо другу похідну від апроксимованої кривої (5):

$$\frac{d^2 y'}{dx^2} = -a \cdot b^2 \cdot \cos(b \cdot x) = -b^2 \cdot y', \tag{5}$$

де $b = \frac{\pi}{l}$ – параметр, що характеризує частоту кривої, a – амплітуду кривої; x – поточна поздовжня координата точки балки. Оскільки апроксимувальна крива описує характер впливу відхилення величини прогинів, то друга похідна від функції буде характеризувати величини відхилень моментів в характерних точках балки. Максимальна абсолютна величина похибки визначення моментів складає $m_{M_{СКП}}$ та має наступний вираз:

$$m_{M_{СКП}} = E \cdot I \cdot b^2 \cdot y'. \tag{6}$$

Якщо ми маємо певне значення експлуатаційного моменту конструкції та бажаємо визначити допустиме значення приросту ΔM в 20%, тоді визначимо СКП, із якою необхідно визначати отриманий приріст:

$$m_{\Delta M} \leq \frac{\Delta M}{2 \cdot t_{\beta}}, \quad (7)$$

де t_{β} – нормований коефіцієнт, що залежить від характеру розподілення та рівня довірчої ймовірності. Оскільки похибки мають переважно нормальний закон розподілу, а довірна ймовірність для подібних робіт складає 0,997, тоді $t_{\beta} = 3$.

$$m_{\Delta M} \leq \frac{\Delta M}{2 \cdot 3} = 0,17 \cdot \Delta M. \quad (8)$$

Після цього визначимо з виразу (6), підставляючи вираз (8), значення відстані між характерними точками балки, за якими будуть виконуватися геодезичні спостереження. Відстань l є такою, що враховує похибку моделювання НДС конструкції $m_{y_{\text{вс}}}$ та дозволяє із відповідною точністю (8) визначати величину приросту моментів:

$$0,17 \cdot \Delta M = E \cdot I \cdot \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \cdot m_{y_{\text{вс}}}, \quad (9)$$

$$l = \pi \cdot \sqrt{\left(\frac{E \cdot I \cdot m_{y_{\text{вс}}}}{0,17 \cdot \Delta M}\right)}. \quad (10)$$

Визначимо точність виконання геодезичних робіт m_{Γ} з виразу (6), підставляючи до нього визначене значення відстані між характерними точками:

$$m_{\Gamma} = \frac{0,17 \cdot \Delta M \cdot l^2}{E \cdot I \cdot \pi^2} \approx \frac{0,017 \cdot \Delta M \cdot l^2}{E \cdot I} \approx \frac{0,02 \cdot \Delta M \cdot l^2}{E \cdot I} \approx \frac{\Delta M \cdot l^2}{50 \cdot E \cdot I}. \quad (11)$$

Вираз (11) є кінцевою формулою, що дає змогу визначити та обґрунтувати точність виконання геодезичних робіт при визначення НДС конструкцій (балок) на пружній основі. Формула враховує похибки вихідних параметрів ґрунтової основи та конструкції, що впливають на похибку моделювання $m_{y_{\text{вс}}}$ прогинів; враховує СКП визначення допустимого приросту моменту в конструкції.

Висновки. За рахунок моделювання НДС конструкції (балки) на пружній ґрунтовій основі було обґрунтовано точність виконання геодезичних робіт, за якої є можливість виявити прирости напруженого стану конструкції.

Перспективи наступних досліджень. За подібною схемою обґрунтування точності виконання геодезичних робіт необхідно виконати аналіз плитних фундаментів, а також надземної частини інженерного об'єкта. Подібний підхід дає уяву про НДС всієї системи.

Література

1. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Науково-технічний супровід будівельних об'єктів : ДБН В 1.2-5:2007. – [Чинний від 2008-01-01]. – К. : Мінрегіонбуд України 2007.
2. Кравченко З.М. Математичні основи визначення напружено-деформованого стану елементарних конструкцій на пружній основі / Чибіряков В.К., Староверов В.С., Кравченко З.М. // Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник / Відпов. ред. М.М. Осетрін. – К., КНУБА, 2011. – Вип.43. – 605с. Українською та російською мовами. – с.510-515.
3. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ : ДБН В 1.2-14:2009. – [Чинний від 2009-12-06]. – К. : Відкрите акціонерне товариство "Український науково-дослідний та проектний інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського".
4. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування : ДБН В 1.2.-2:2006. – [Чинний від 2007-10-01]. – К. : Відкрите акціонерне товариство "Український науково-дослідний та проектний інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського".
5. Надежность строительных конструкций и оснований : ГОСТ 27751-88. – [Чинний від 1988-07-01]. – Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт комплексных проблем строительных конструкций и сооружений имени В.А. Кучеренко Госстроя СССР.
6. Староверов В.С. К определению точности и периодов наблюдений осадок инженерных сооружений / Староверов В.С., // Республиканский межведомственный научно-технический сборник. «Инженерная геодезия». Вып. 21. К., «Будівельник», 1978, с.57-61.
7. Староверов В.С. К прогнозированию состояния инженерных сооружений / Староверов В.С., // Республиканский межведомственный научно-технический сборник. «Инженерная геодезия». Вып. 25. К., «Будівельник», 1978, с.11-14.
8. Тимошенко С. П. Соппротивление материалов. Т.1. – М.: Наука, 1965, т.1. – 363с.

Аннотация

В статье рассмотрена методика обоснования точности выполнения геодезических работ при мониторинге инженерных объектов и условия моделирования их НДС.

Annotation

The method of geodetic accuracy substantiation during the monitoring of engineering objects by modelling a strained and deformed state is considered.