

УДК 528.48/517.9

Кравченко З.М.,
Київський національний університет будівництва і архітектури

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ПЕРІОДИЧНОСТІ ГЕОДЕЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВИСОТНИХ СПОРУД

Пропонується методика дослідження точності та періодичності виконання моніторингу висотних споруд. Дана методика дозволяє проаналізувати вплив випадкових похибок визначення складових розрахункової функції осідання висотної споруди в часі.

Постановка проблеми. Під час будівництва та подальшої експлуатації висотних споруд відбуваються постійні деформаційні процеси. Загальні просторові переміщення висотної споруди можна поділити на кілька складових:

- Відносні переміщення, спричинені зовнішніми факторами та навантаженнями; перерозподілом зусиль в надземній та фундаментній конструкції.
- Абсолютні переміщення споруди за рахунок осідання ґрунтової основи.

Відносні переміщення залежать від геометрії висотної споруди, від жорсткості конструктивних елементів, а також від характеру взаємодії надземної частини з фундаментними конструкціями. Абсолютні переміщення залежать від фізико-механічних параметрів та характеру експлуатації ґрунтової основи. На етапі проектування обчислюються можливі значення осідання висотної споруди, можливий напружено-деформований стан (НДС) системи "споруда – ґрунтова основа". Тому пропонується методика дослідження впливу випадкових похибок визначення вихідних параметрів на результати обчислення можливої величини деформацій та осідання висотної споруди.

Аналіз останніх досліджень. На сьогоднішній день існує велика кількість наукових робіт, що присвячені моделюванню НДС висотних споруд та методам обчислення можливої величини осідання висотних споруд.

Мета статті. Розкрити зміст методики дослідження точності та періодичності геодезичного моніторингу висотних споруд.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо один з найпростіших методів визначення можливого осідання висотної споруди – метод пошарового сумування. Величина осідання лінійно деформованого півпростору за спрощеною формулою дорівнює [1]:

$$S = 1,44 \cdot \frac{\eta}{\eta + 1} \cdot \frac{(p - \sigma_{zg,0}) \cdot b}{\sum_{1}^n \frac{E_i \cdot h_i \cdot z_i}{0,5 \cdot H_i^2}}$$

Визначимо СКП кінцевого осідання наступним чином:

$$m_{S_{E_i}}^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial S}{\partial E_i} \right)^2 \cdot m_{E_i}^2,$$

$$\frac{\partial S}{\partial E_i} = \frac{2,88 \cdot \eta \cdot b \cdot h_i \cdot z_i \cdot (\sigma_{zg,0} - p)}{H_c \cdot (\eta + 1) \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{E_i \cdot h_i \cdot z_i}{H_c^2} \right)^2},$$

де η - співвідношення сторін фундаменту; p - середній тиск під подошвою фундаменту; $\sigma_{zg,0}$ - напруження від власної ваги ґрунту на рівні подошви фундаменту; b - ширина фундаменту; E_i - модуль деформації прошарку ґрунтової основи; h_i - висота окремого прошарку; z_i - відстань від середини окремого прошарку до нижньої границі стисливої товщі; H_c - глибина стисливої товщі; m_{E_i} - СКП визначення модуля деформації окремого прошарку; $m_{S_{E_i}}$ - загальна СКП визначення кінцевого осідання споруди.

Функція осідання фундаменту в часі має наступний вигляд.

$$S_t = S \cdot \left(1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot e^{-N \cdot t} \right), \quad N = \frac{\pi^2 \cdot c_v}{4 \cdot H_c^2}.$$

Функція характеризує процес консолідації ґрунтової основи. Визначимо спочатку швидкість осідання. Швидкість осідання є похідною від величини осідання по часу:

$$v = \frac{dS_t}{dt} = \frac{8 \cdot S \cdot N \cdot e^{-N \cdot t}}{\pi^2}.$$

Для того, щоб визначити приріст осідання функції необхідно про інтегрувати вираз за змінною t :

$$\Delta S = \int_{t_1}^{t_2} v \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} \frac{8 \cdot S \cdot N \cdot e^{-N \cdot t}}{\pi^2} \cdot dt = \frac{8 \cdot S \cdot N}{\pi^2} \left(\frac{e^{-N \cdot t_1} - e^{-N \cdot t_2}}{N} \right),$$

$$\Delta S = \frac{8 \cdot S}{\pi^2} (e^{-N \cdot t_1} - e^{-N \cdot t_2}) = a_i,$$

$$e^{-N \cdot t_2} = \left(e^{-N \cdot t_1} - \frac{\Delta S \cdot \pi^2}{8 \cdot S} \right) = a_i.$$

Якщо прийняти $\frac{\Delta S \cdot \pi^2}{8 \cdot S} = const = \varepsilon$, тоді можна визначити приріст спостереження за осіданням Δt_i :

$$e^{-N \cdot t_2} = (e^{-N \cdot t_1} - \varepsilon) = a_i.$$

Можемо знайти t_i , попередньо прологарифмувавши вираз:

$$\ln(e^{-N \cdot t_2}) = \ln(a_i) \rightarrow -N \cdot t_2 = \ln(a_i),$$

$$t_i = -\frac{\ln(a_i)}{N}.$$

Задача спрощується, якщо початковий час $t_0 = 0$, тоді:

$$e^{-N \cdot t_i} = 1 - i \cdot \varepsilon = 1 - i \cdot \left(\frac{\Delta S \cdot \pi^2}{8 \cdot S} \right).$$

Приріст ΔS задає величину постійного осідання, яку необхідно виявляти. Приріст осідання у такому випадку є величиною постійною, а змінюватимуться лише часові прирости при змінній швидкості осідання. Необхідно зауважити, що осідання затухають з часом. Якщо припустити, що приріст ΔS буде характеризуватися гранично допустимою відносною деформацією фундаментних елементів, тобто на певній відстані між точками відбувається

нерівномірне затухаюче осідання. Подібний підхід обумовлений важливістю виявлення гранично допустимих нерівномірних деформацій фундаментних конструкцій. Надземна частина висотної споруди надає певної жорсткості фундаментній частині, що зменшує нерівномірність осідання.

Визначимо періоди спостережень відносно $t_0 = 0$ наступним чином:

$$\frac{\Delta S \cdot \pi^2}{8 \cdot s} = const = \varepsilon,$$

де i – номер циклу спостереження, протягом якого величина осідання досягне значення ΔS ; ΔS – заздалегідь обумовлена величина приросту осідання, яку необхідно виявляти з відповідною точністю та періодичністю, а також знати час, коли відповідний приріст чи сума приростів досягнуть свого прогнозованого значення.

Виконаємо дисперсійний аналіз функції осідання фундаменту в часі.

$$m_{S_t}^2 = \left(\frac{\partial S_t}{\partial S}\right)^2 m_{S_{E_i}}^2 + \sum \left(\frac{\partial S_t}{\partial E_i}\right)^2 m_{E_i}^2 + \sum \left(\frac{\partial S_t}{\partial k_{f_i}}\right)^2 m_{k_{f_i}}^2,$$

$$\bar{m}_v = \frac{\sum_{i=1}^n h_i \cdot m_{v_i} \cdot z_i}{2 \cdot \left(\frac{H_c}{2}\right)^2}, \quad m_{v_i} = \frac{\beta_i}{E_i}, \quad \beta_i = \frac{1 - \nu - 2 \cdot \nu^2}{1 - \nu},$$

де m_{v_i} – відносний коефіцієнт стиснення окремого прошарку; β_i – коефіцієнт; E_i – модуль деформації окремого прошарку. Коефіцієнт консолідації визначається за формулою:

$$c_v = \frac{\bar{k}_f}{\bar{m}_v \cdot \gamma_\omega}, \quad \bar{k}_f = \frac{H_c}{\left(\frac{h_1}{k_{f1}} + \frac{h_2}{k_{f2}} + \frac{h_3}{k_{f3}}\right)},$$

де \bar{k}_f – середньозважене значення коефіцієнта фільтрації; γ_ω – питома вага води. Уявімо, що ґрунтова основа складається з трьох прошарків, тоді СКП прогнозування величини осідання визначатиметься:

$$\frac{\partial S_t}{\partial S} = \left(1 - \frac{8}{\pi^2} \cdot e^{-N \cdot t}\right),$$

$$\frac{\partial S_t}{\partial E_i} = -\frac{2,88 \cdot \eta \cdot b \cdot z_i \cdot h_i \cdot (\sigma_{z_{g,0}} - p) \cdot (0,81 \cdot e^{-\frac{1,2 \cdot H_c \cdot t}{\gamma_\omega \cdot (q1) \cdot (q2)} - 1})}{(H_c)^2 \cdot (\eta + 1) \cdot \left(\frac{2 \cdot h_1 \cdot E_1 \cdot z_1}{(H_c)^2} + \frac{2 \cdot h_2 \cdot E_2 \cdot z_2}{(H_c)^2} + \frac{2 \cdot h_3 \cdot E_3 \cdot z_3}{(H_c)^2}\right)^2} - \dots$$

$$\dots \frac{1,44 \cdot H_c \cdot \eta \cdot b \cdot z_i \cdot h_i \cdot t \cdot \beta_1 \cdot (e^{-\frac{1,2 \cdot H_c \cdot t}{\gamma_\omega \cdot (q1) \cdot (q2)} - 1}) \cdot (\sigma_{z_{g,0}} - p)}{(E_i)^2 \cdot \gamma_\omega \cdot (\eta + 1) \cdot (q1) \cdot \left(\frac{2 \cdot h_1 \cdot E_1 \cdot z_1}{(H_c)^2} + \frac{2 \cdot h_2 \cdot E_2 \cdot z_2}{(H_c)^2} + \frac{2 \cdot h_3 \cdot E_3 \cdot z_3}{(H_c)^2}\right) \cdot (q2)^2},$$

$$\frac{\partial S_t}{\partial k_{f_i}} = \frac{1,44 \cdot H_c \cdot \eta \cdot b \cdot h_i \cdot t \cdot \beta_1 \cdot (e^{-\frac{1,2 \cdot H_c \cdot t}{\gamma_\omega \cdot (q1) \cdot (q2)} - 1}) \cdot (\sigma_{z_{g,0}} - p)}{(k_{f_i})^2 \cdot (\eta + 1) \cdot \gamma_\omega \cdot (q1)^2 \cdot \left(\frac{2 \cdot h_1 \cdot E_1 \cdot z_1}{(H_c)^2} + \frac{2 \cdot h_2 \cdot E_2 \cdot z_2}{(H_c)^2} + \frac{2 \cdot h_3 \cdot E_3 \cdot z_3}{(H_c)^2}\right) \cdot (q2)^2},$$

$$q1 = \frac{h_1}{k_{f1}} + \frac{h_2}{k_{f2}} + \frac{h_3}{k_{f3}}, \quad q2 = \frac{h_1 \cdot \beta_1 \cdot z_1}{E_1} + \frac{h_2 \cdot \beta_2 \cdot z_2}{E_2} + \frac{h_3 \cdot \beta_3 \cdot z_3}{E_3}.$$

Оскільки швидкість є гіпотетичною величиною, то за такою самою методикою можна проаналізуємо вплив змінних параметрів ґрунтової основи на швидкість осідання й визначити СКП швидкості осідання:

$$m_v^2 = \left(\frac{\partial v}{\partial S}\right)^2 m_{S_{E_i}}^2 + \sum \left(\frac{\partial v}{\partial E_i}\right)^2 m_{E_i}^2 + \sum \left(\frac{\partial v}{\partial k_{f_i}}\right)^2 m_{k_{f_i}}^2.$$

Якщо припустити та змоделювати ситуацію, коли розвиток осідання відбувається з одної сторони фундаментної частини зі швидкістю гіпотетичної консолідації спричиняє розвиток крену та зміну НДС висотної споруди. Таким чином ми можемо оцінити СКП визначення швидкості та величини осідання. Якщо припустити, що осідання відбувається нерівномірно, тобто спостерігається крен фундаменту, то можна визначити величину та швидкість розвитку просторового переміщення точок надземної частини висотної споруди. Можна визначити СКП часу, за який відбувається осідання ΔS :

$$t_i = -\frac{\ln\left(1 - i \cdot \left(\frac{\Delta S \cdot \pi^2}{8 \cdot S}\right)\right)}{N},$$

$$m'_{t_i}{}^2 = \left(\frac{\partial t_i}{\partial E_i}\right)^2 m_{E_i}^2 + \left(\frac{\partial t_i}{\partial k_{f_i}}\right)^2 m_{k_{f_i}}^2 + \left(\frac{\partial t_i}{\partial S}\right)^2 m_S^2,$$

$$\left(\frac{\partial t_i}{\partial E_i}\right) = \frac{2 \cdot H \cdot h_i \cdot \beta_i \cdot \gamma_\omega \cdot z_i \cdot \ln\left(1 - \left(\frac{\Delta S \cdot i \cdot \pi^2}{8 \cdot S}\right)\right) \cdot (q1)}{\pi^2 \cdot E_i^2 \cdot h_e^2}, \quad \left(\frac{\partial t_i}{\partial k_{f_i}}\right) = \frac{2 \cdot H \cdot h_i \cdot \gamma_\omega \cdot \ln\left(1 - \left(\frac{\Delta S \cdot i \cdot \pi^2}{8 \cdot S}\right)\right) \cdot (q2)}{\pi^2 \cdot k_{f_i}^2 \cdot h_e^2},$$

$$\left(\frac{\partial t_i}{\partial S}\right) = \frac{i \cdot H \cdot \Delta S \cdot \gamma_\omega \cdot (q1) \cdot (q2)}{4 \cdot h_e^2 \cdot S^2 \cdot \left(\left(\frac{\Delta S \cdot i \cdot \pi^2}{8 \cdot S}\right) - 1\right)}.$$

Висновки. Описана вище методика обґрунтування точності та періодичності виконання моніторингу дозволяє дослідити вплив випадкових похибок визначення основних параметрів ґрунтової основи та напружено-деформований стан системи «споруда - ґрунтова основа». Саме величини приростів можливих деформацій та характер розвитку є визначальними на етапі обґрунтування точності виконання геодезичних робіт.

Перспективи наступних досліджень. Виконати процедуру моделювання НДС системи «споруда – ґрунтова основа», визначити похибку моделювання величин деформацій, перейти до СКП виконання геодезичних робіт, що дозволяють адекватно засвідчувати чи спростовувати характер деформування.

Література

1. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 104 с.

Аннотація

Предлагается методика исследования точности и периодичности выполнения мониторинга высотных сооружений. Данная методика позволяет проанализировать влияние случайных погрешностей определения составляющих расчетной функции осадки высотного сооружения во времени.

Annotation

The method of the study of accuracy and frequency of high-rise buildings geodetic monitoring is considered. This method allows to analyze the effects of random errors of components of function, that helps to determine the high-rise building settlement in time.