

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ФІЛЬТРАЦІЙНО-СУФОЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ НА ДЕФОРМАЦІЇ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ МІКРОГРАВІМЕТРИЧНИХ ТА РЕМ-СТЕРЕОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Запропонована концепція інтегративної фізико-геометричної моделі прогнозування деформацій відповідальних інженерних споруд. Для оцінки фільтраційно-суфозійних властивостей ґрунтів пропонується використовувати метод мікрогравіметрії та РЕМ-дослідження. Подані конкретні результати такого підходу.

Ключові слова: *мікрогравіметрія, РЕМ-дослідження, суфозія, фільтрація*

Постановка проблеми. Зростання рівня забудови територій, влаштування систем водопостачання, водовідведення, дренажних систем, геологічних виробіток тощо призводить до підвищення інтенсивності винесення піщано-глинистого матеріалу. Це веде до зміни природних умов території населених пунктів, зміни фізико-механічних властивостей ґрунтів, розвитку несприятливих геологічних процесів, осідання ґрунту внаслідок ущільнення порід основ, деформації будівель і споруд.

Для вивчення просторово-часового стану інженерних споруд необхідно виконувати комплексні спостереження за рухом їхніх елементів. На основі цих даних оцінюються різні параметри і явища, що спричиняють процеси деформацій, розробляються математичні моделі оцінки і прогнозування вертикальних і горизонтальних зміщень споруд.

Створення математичних моделей для прогнозування деформацій інженерних споруд на основі геодезичних спостережень тісно пов'язані з аналізом значної кількості результатів вимірювань та вивченням впливів домінуючих факторів на них. Математична модель буде репрезентативною тільки в таких випадках, при яких зміна будь-якого параметра завжди враховується цією моделлю.

Аналіз останніх досліджень. При моделюванні деформацій інженерних споруд одними з перших були імовірно-статистичні [1], кореляційно регресійні методи [2], метод випадкових функцій [1], аналіз деформацій та їх зв'язок із конкретними явищами (набухання ґрунту тощо) [3].

Виділяються також статистичні моделі, які виражають залежність переміщень від фізико-механічних властивостей ґрунтів, гідрогеологічних, геологічних та інших факторів у поєднанні з конструктивними та будівельно-експлуатаційними напрямками. Статистичні моделі є видозміненими динамічними моделями у випадку, коли не враховують динаміку параметрів з часом [4].

Враховуючи широкий спектр інженерно-геологічних умов будівництва та різноманітну складність інженерних споруд, застосування того чи іншого методу має свої переваги та недоліки залежно від того, які параметри моделі визначаються і яка проблема моделювання залишається актуальною.

Ми зупинимось на одному з методів прогнозування, який ґрунтується на створенні інтегративних фізико-геометричних методів з використанням мікрогравіметрії та растрово-електронномікроскопічних (РЕМ) досліджень.

Прогнозування деформацій інженерних споруд на основі інтегративної фізико-геометричної моделі

Передбачається, що в результаті застосування такої моделі отримується комплексна прогнозна фізико-геометрична модель.

Фізичну частину моделі можна інтерпретувати відповідно до лінійної теорії повзучості Больцмана-Вольтерра [5], коли осідання споруди відбувається головним чином через скелет ґрунту, що характеризується ядром повзучості.

Відомо [3], що в загальному вигляді для однорідної задачі двофазного ґрунту деформованість записується у формі:

$$S_1 = hm_{\nu} p \left[1 + \int_0^t k(t-t_0) dt - \frac{8}{\pi^2} \sum \frac{1}{m^2} \psi(t) \right], \quad (1)$$

де $\psi(t)$ – функція консолідації двофазного ґрунту.

Аналітичний вигляд функції $\psi(t)$ визначається ядром повзучості або, інакше, функцією впливу $k(t-t_0)$. На практиці найчастіше застосовується функція впливу виду $k(t) = \delta \cdot e^{-\lambda_1 t}$, де δ і δ_1 – параметри повзучості, які нами пропонуються визначати на основі кореляційних залежностей РЕМ стереолого-стереометричних вимірювань [6], а саме як фізико-механічні властивості ґрунту, які визначаються модулем загальної деформації і модулем пружної деформації та міцністю зразків ґрунту на стиск і зсув. Це один із можливих методів розрахунку виключно за даними растрово-електронно-мікроскопічних (РЕМ) досліджень ґрунту. З цієї метою доцільно представляти прогнозне співвідношення, яке враховує початкові умови, наступним чином:

$$S_{t_0-t_i} = \left[\tilde{S}_{t_0-t_i} + \mu \psi(E_{0,y,\dots}) \right] \quad (2)$$

де $\tilde{S}_{t_0-t_i}$ – з прогнозоване за геодезичними даними значення деформації (осідання); $\mu \psi(E_{0,y,\dots})$ – деякий коректуючий оператор, що враховує фізико-механічні дані на виході, які надійшли до моменту прогнозу:

$(E_{0,y,\dots})$ – модуль загальної деформації і пористості ґрунту, який визначається за результатами стереолого-стереометричних досліджень;

μ – коректуючий коефіцієнт.

Для оператора $\psi(E_{0,y,\dots})$ можна застосувати відомий в курсах механіки ґрунтів [3] вираз:

$$\psi(E_{0,y,\dots}) = (1 - e^{\alpha_{сеп} t_1}) \sum_{i=1}^n h_i \frac{B_i}{E_{0i}} P_{iz}, \quad (3)$$

де $\alpha_{сеп}$ – коефіцієнт відносного стиснення ґрунту; t_1 – час прогнозу; P_{iz} – навантаження; h – товщина i -го шару.

Модельовання суфозійних процесів методом мікрогравіметрії

Основними причинами розвитку фільтраційно-суфозійних процесів є: неоднорідність складу піщаних ґрунтів, швидкість фільтраційного потоку, наявність умов для виносу дрібних частинок з піщаної товщі.

При експлуатації інженерних споруд у специфічних інженерно-геологічних умовах може виникати несприятливий процес, що призведе до значних деформацій. Прикладом такого процесу може бути суфозійно-карстовий процес, що призводить до непередбачених за результатами повторних вимірів стрибкоподібних змін осідання споруд.

Принциповою схемою такого явища може бути наступна модель, яку можна ілюструвати методами мікрогравіметрії.

Нехай, на момент t_1 початку будівництва споруди ґрунти її основи детально вивчені і мають наступну будову: верхній шар – піски, водотривкий шар, розчинні породи, основа – скельні породи.

Нехай, після моменту t_1 в розчинних породах виникли умови, що сприяють розвитку суфозійно-карстового процесу, наприклад, в результаті пониження рівня ґрунтових вод і утворення гідравлічного напору, тобто після t_1 в породах, що розчиняються, відбувається поступове зменшення кількості маси внаслідок механічного виносу часток або мінералізації піску і, як наслідок цього, – послаблення несучих фізико-механічних властивостей цього шару.

Ясно, що до тих пір, поки виконується умова $R < \Phi$ (R – навантаження від споруди, Φ – несуча здатність основи), процес залишається “невидимим” для повторних вимірювань (наприклад, нівелювання тощо).

Поступове винесення часток піску із шару розчинних порід приведе до утворення по нижній межі водотривкого шару склепіння, яке в залежності від властивостей міцності може або осідати, проявляючись на зовнішній поверхні у вигляді мульди осідання, і тим самим не допускати розвитку значних по висоті пустот, або навпаки, призводить до утворення значних за розміром пустот. В останньому випадку невиконання умови $R < \Phi$ приведе до руйнування і появи стрибка в осіданні споруди. Тому важливо оцінити значення, за яким можна судити про потенційну

можливість появи стрибків. Одним із можливих методів оцінки значення є співставлення результатів високоточних гравіметричних вимірів, виконаних на фізичній поверхні в момент t і t_1 .

Існує велика кількість формул для обчислення V_{zzz} на спостережуваній поверхні за поміряними значеннями аномалій сили тяжіння Δg . Виберемо одну них, яка забезпечує найменшу середню квадратичну похибку та більш зручна для використання в даному випадку:

$$V_{zzz}(0) = \frac{1}{7l^2} [4\Delta g(0) + 2\bar{\Delta}g(l) - 6\bar{\Delta}g(\sqrt{5l})], \quad (4)$$

де $\bar{\Delta}g$ – середні значення із аномалій сили тяжіння, поміряні в вершинах вписаних в окіл квадрату сторони $2l$ і $2\sqrt{5}l$.

Із теорії інтерполяції гравітаційних аномалій відоме співвідношення [7], [8] яке визначає значення V_{zzz} в циліндричній системі координат Z, R, α за середньою щільністю та формою аномалієподібного тіла:

$$V_{zzz}(0,0,0) = 3f\sigma \int_{z_1}^{z_2} \int_0^R \int_0^{2\pi} \frac{z(2z^2 - 3r^2) \cdot r dr dz d\lambda}{(z^2 + r^2)^{7/2}} \quad (5)$$

де $z_1 \leq z \leq z_2$; $0 \leq r \leq R$; $0 \leq \lambda \leq 2\pi$; $\sigma = \sigma' - \sigma_0$ і т.д.; z_1, z_2 – глибини поверхні вертикального циліндра; λ – полярний кут.

Інтегруючи (2) по λ, r, z одержимо:

$$V_{zzz}(0,0,0) = 2\pi f\sigma X, \quad (6)$$

де

$$X = \frac{12}{5} \left(\frac{1}{z_2} - \frac{1}{z_1} \right) - \frac{24}{5} \left(\frac{1}{\sqrt{R^2 + z_2^2}} - \frac{1}{\sqrt{R^2 + z_1^2}} \right) - \frac{2}{5} R^2 \left(\frac{1}{\sqrt[3]{R^2 + z_2^2}} - \frac{1}{\sqrt[3]{R^2 + z_1^2}} \right) \quad (7)$$

Виконавши вимірювання в двох циклах, знайдемо за формулами (3) і (4):

$$\delta V_{zzz}(0,0,0) = V_{zzz}''(0,0,0) - V_{zzz}'(0,0,0). \quad (8)$$

Нехтуючи можливою варіацією форми τ між циклами та зіставляючи варіацію δV_{zzz} з варіацією $\delta\sigma$ (середньої надлишкової щільності σ) і τ , одержимо на основі (3) і (5)

$$\delta\sigma = \frac{\delta V_{zzz}}{f\pi X} \quad (9)$$

Обчислимо решту маси в τ за очевидною формулою:

$$(m - \delta m) = 2\pi R^2 (z_2 - z_1 (\sigma' - \delta\sigma)), \quad (10)$$

де

$$\delta m = 2\pi R^2 (z_2 - z_1) \delta\sigma = 2\pi R^2 \zeta \sigma', \quad (11)$$

Звідси одержимо основну формулу для обчислення висоти ζ за “поміряною” варіацією третьої похідної δV_{zzz} в двох циклах спостережень та заданою формою і щільністю аномалоутворюючого тіла, які повинні бути відомі за результатами мікрогравіметричних та інженерно-геологічних вишукувань z_1, z_2, σ' :

$$\zeta = (z_2 - z_1) \frac{\delta\sigma}{\sigma'} = \frac{(z_2 - z_1)}{\pi f \sigma' X} \delta V_{zzz}(0,0,0) \quad (12)$$

Точність висновку з визначення точності отримання варіації δV_{zzz} і в кінцевому рахунку точністю поділених Δg в циклах і рівна:

$$m_\zeta = \frac{(z_2 - z_1)}{\pi f \sigma' X} m V_{zzz} \quad (13)$$

Нехай $z_1 = 5\text{м}$, $z_2 = 15\text{м}$, $\sigma' = 2,5 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, $R = 15\text{м}$, тоді $m_\zeta = 3 \text{ см}$.

Аналіз фільтраційно-суфозійних властивостей за даними РЕМ-стеорологічних досліджень на прикладі греблі ХАЕС

Фільтраційно-суфозійні властивості ґрунтів визначаються закономірностями будови їх порового простору і особливостями взаємодії частинок з фільтраційними потоками.

Будова ґрунту переважно залежить від розподілу частинок за розмірами, які разом з іншими властивостями можна розглядати як різнозернистість. Різнозернистий ґрунт складається з фракцій (до десятка і більше), кожна з яких об'єднує частинки, що відрізняються за розмірами не більше ніж в два-три рази. Через це, різнозернистість в значній мірі визначає фільтраційно-суфозійні властивості ґрунтів. В залежності від зернового складу ґрунт може бути як суфозійним, так і несуфозійним, тобто таким, в якому неможлива механічна суфозія. Ідеальним несуфозійним ґрунтом являється матеріал, що складається з частинок одного розміру.

Для оцінки фільтраційної міцності визначається діаметр максимальних фільтраційних пор в ґрунті за формулою М.П. Павчіча:

$$d_{0\max} = 0,455k\sqrt{\eta} \frac{n}{(1-n)} d_{17}, \quad (14)$$

де η – коефіцієнт різнозернистості ґрунту: $\eta = d_{60}/d_{10}$;

d_{17} – діаметр частинок 17%-ної забезпеченості по кривій зернистого складу;

k – коефіцієнт нерівномірності розподілу частинок в ґрунті: $k = 1 + 0,05\eta$.

За значенням $d_{0\max}$ визначається максимальний розмір частинок, які можуть бути винесені в результаті суфозії:

$$d_{ci\max} = 0,77d_{0\max} \quad (15)$$

Якщо $d_{ci\max}$ менше за мінімальний діаметр частинок ґрунту, то такий ґрунт вважається несуфозійним. А якщо $d_{ci\max} > d_{\min}$, то такий ґрунт вважається суфозійним і з такого ґрунту можуть бути винесені всі частинки, діаметр яких менший $d_{ci\max}$. Інші фактори, які необхідно враховувати, це швидкість фільтрації і градієнт напору.

Для виносу частинок необхідно, щоб швидкість фільтрації або градієнт напору були більшими за деякі критичні величини.

Для розрахунку критичної швидкості фільтрації скористаємося наступною залежністю:

$$v_p = \frac{v_k \sqrt{Dd} \cdot d_{80}}{5 \cdot d_{50} \cdot \delta}, \quad (16)$$

де v_p – розмиваюча швидкість фільтрації;

d_{50} і d_{80} – величина частинок ґрунту, що розмивається;

δ – характерний розмір частинок, рівний 0,015 см;

D – максимальний розмір частинок;

d – мінімальний розмір частинок.

Формула (16) отримана в результаті обробки багатьох експериментальних даних по контактному розмиву незв'язаних ґрунтів фільтраційним потоком. При цьому враховувались відношення розмірів частинок різнозернистого колектора \sqrt{Dd} , що містить фільтраційний потік, і характерні розміри d_{50} і d_{80} незв'язаного ґрунту, що розмивається.

Отримавши величину розмиваючої швидкості, можна визначити градієнт фільтраційного потоку, що відповідає цій швидкості, за відомою формулою Форхгеймера:

$$I_p = \frac{v_p}{k} + \left(\frac{v_p}{k_m} \right)^2 \quad (17)$$

Коефіцієнт турбулентної фільтрації, що входить в цю формулу, можна визначити за допомогою емпіричної формули:

$$k_m = 0,09 \sqrt[3]{\frac{g^5}{v}} \cdot \sqrt[3]{Dd}. \quad (18)$$

Приведена залежність дозволяє розрахунковим шляхом оцінити фільтраційну міцність ґрунтів.

Нехай для зернистого складу свердл. №1, h=18 м:

$$\eta = 3,571$$

$$k = 1 + 0,005 \cdot 3,571 = 1,178$$

$$\xi\sqrt{\eta} = \xi\sqrt{3,571} = 1,241$$

$$d_{17} = 0,08 \text{ мм}$$

$$\pi = 0,355$$

$$d_{0\max} = 0,455 \cdot 1,178 \cdot 1,241 \cdot 0,08 \cdot \left(\frac{0,355}{0,645} \right) = 0,29 \text{ мм}$$

$$d_{ci\max} = 0,77 \quad d_{0\max} = 0,77 \cdot 0,029 \text{ мм} = 0,022 \text{ мм}$$

$$d_{\min} \cong 0,054 \text{ мм}$$

Відповідно, $d_{ci\max} < d_{\min}$, бо $0,022 < 0,054$.

Виходячи з даних розрахунків ґрунт можна вважати несупозійним.

Відповідно до виконаного стерологічного аналізу [11] d_{\min} пори дорівнює $\cong 0,016$ мм.

Таким чином, можна вважати, що розрахункове значення мінімального діаметра пори відповідає емпіричному значенню, оскільки

$$d_{\min\text{ теор.}} = 0,022, \text{ мм а } d_{\min\text{ емп.}} = 0,016 \text{ мм.}$$

Виходячи з даних таблиць 1-3, в яких зведено РЕМ-дослідження зразків греблі ХАЕС, зроблено розрахунок розмиваючої швидкості фільтраційного потоку (табл. 4).

Табл. 1.

Процентний вміст фракції зернистого складу

Розмір фракції, мм	Свердловина № 3		Свердловина № 1	
	h = 9 м	h = 15 м	h = 18 м	h = 18 м
1 – 0,5	1,5	1,5		
0,5 – 0,25	10,3	1,3		1,9
0,25 – 0,10	88,2	4,6	1,6	51,0
0,10 – 0,05		92,6	25,3	47,1
0,05 – 0,005			73,1	

Табл. 2.

Стерологічна характеристика порового простору (свердл. № 3)

h, м	К-ть порів	Пористість, %	Середній діаметр пор	Середнє значення фактору форми	Фільтраційний коефіцієнт
9	1709	32,78	0,030	0,48	2,12
15	773	33,37	0,041	0,52	18,19
18	1544	35,51	0,040	0,49	9,54

Табл. 3.

Структурний аналіз піску свердловин № 1 і 3

№ свердл	h, м	К-ть частинок	Середній діаметр, мм	Розподіл за факторами форми		
				min	max	mid
3	9	66	0,217	0,077	0,945	0,672
3	15	61	0,176	0,357	0,894	0,554
3	18	252	0,066	0,067	0,878	0,486
1	18	43	0,148	0,236	0,846	0,619

Розрахунок $\frac{v_p}{v_k}$

h, м	d_{50}	d_{80}	D	d	$\frac{\sqrt{Dd}}{d_{50}}$	$\frac{v_p}{v_k}$
9	0,217	0,17	0,607	0,113	2,8 x 10	0,12 x 10
15	0,177	0,07	0,999	0,053	1,2 x 10	0,13 x 10
18	0,067	0,027	1,163	0,027	1,0 x 10	0,26 x 10

Висновки

1. Запропонована концепція інтегративної фізико-геометричної моделі прогнозування деформацій інженерних споруд. Модель базується на принципах механіки ґрунтів.
2. Для підвищення надійності прогнозування гідротехнічних споруд, особливо ґрунтових гребель, пропонується проводити мікрогравітаційні та лабораторно-стендові дослідження.
3. Запропонована в роботі оцінка фільтраційно-суфозійних процесів за даними РЕМ-мікроскопії є новаторською і перспективною, проте вона потребує подальших досліджень.

1. Зайцев А.К., Морфенко С.В., Михалёв Д.М. Геодезические методы исследования деформаций сооружений. М.: Недра, 1991. – 271 с.
2. Гуляев Ю.П. Алгоритм оценивания параметров динамической модели и прогнозирование процессов перемещений наблюдаемых точек сооружений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 1984. – № 3. – с. 26-32.
3. Цытович Н.А. Механика ґрунтов. – М.: Высшая школа, 1983. – 287 с.
4. Гуляев Ю.П. Динамическая модель для прогнозирования осадок сооружений. // Геодезия и картография. – 1985. – № 11. – с. 23-96.
5. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твёрдых тел. – М.: Недра, 1977. – 383 с.
6. Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород. М.: Недра, 1989. – 208 с.
7. Миронов В.С. Курс гравиразведки. – М.: Недра, 1972. – 512 с.
8. Харкевич Г.А. Предварительное вычисление осадок инженерных сооружений в условиях геодинамических процессов. // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъёмка. – 1985. – № 2. – с. 97-102.
9. Осенняя Е.Д., Догмы Ияд. Влияние суффозии на геологическую среду. // Проблемы строительства и эксплуатации автомобильных дорог. – Суздаль, 1992. с. 56-58.
10. Жиленков В.Н., Шевченко В.И. О влиянии разнородности на фильтрационно-суффозионные свойства ґрунтов. // Изв. ВНИИГ. – 1984. – Т. 148. с. 44-51.
11. Sergeev Y.V., Osipov V.T., Sokolov V.N. Quantitative morphological analysis of complex SEM-image // J/ of Microscopy, 1984. – V. 135. – P. 13-24.