

ДО ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДОПОМІЖНИХ ОБ'ЄКТІВ У ПІДСТАВАХ ДОВГОМІРНИХ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД

Самедов А. М. , д.т.н., проф. (каф. ГБ КПІ ім. Ігоря Сікорського), Загоруйко Є. А., к.т.н., доцент (каф. ГБ КПІ ім. Ігоря Сікорського), Нестєрков І. А., студ. (гр. ОС-61м, ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського)

Анотація. Розглянуто проблему безпечної експлуатації допоміжних інфраструктурних об'єктів, розташованих в основі підземної споруди великої протяжності, що деформується. Дано оцінку рівня напружень в матеріалі конструкцій допоміжних об'єктів, що знаходяться в масиві ґрунту підстави підземної споруди в порівнянні з опірністю матеріалу конструкцій. Рекомендовано заходи щодо запобігання руйнування матеріалу конструкцій допоміжних об'єктів.

Ключові слова: підземна конструкція, матеріали, допоміжний об'єкт, ґрунтова основа, компоненти напружень, компоненти деформацій, еліпсоїд напружень.

Мета роботи: дати оцінку безпечного стану підстави підземної споруди з урахуванням впливу деформації конструкцій допоміжних об'єктів, а також самої споруди.

Результати досліджень. В літературі [1...3] наводиться розрахунок конструкцій на пружній основі, а також визначається напружений стан ізотропної та анізотропної ґрунтової підстави споруди. Однак при цьому відсутня оцінка можливих неприпустимих величин деформацій в конструкціях допоміжних об'єктів, розміщених в підставі протяжної підземної споруди.

Визначення напружено-деформованого стану основи довгомірної підземної споруди можна віднести до плоскої задачі. Плоскі задачі досліджують плоский деформований і плоский напружений стан на основі закономірностей теорії пружності. У першому випадку розподілене навантаження діє по осі ОУ, тоді $\sigma_y \neq 0$; відносна деформація в напрямі осі ОУ дорівнює нулю (рис.1, а, б, в).

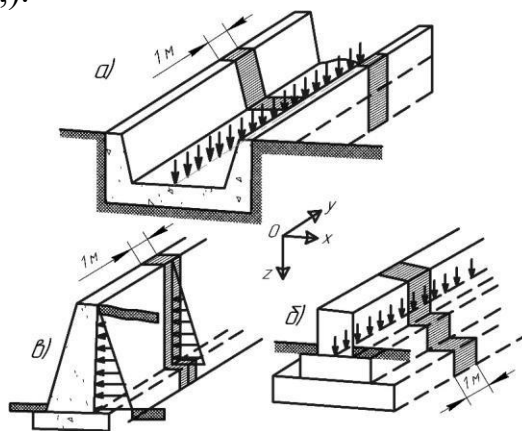


Рис.1. Плоска задача про напружено-деформований стан лінійних споруд: а) - каналу; б) - стрічкового фундаменту; в) – підпірної стіни.

У другому випадку (рис.2) значення відносної деформації у напрямку осі ОУ відрізняється від нуля, тобто $e_y \neq 0$.

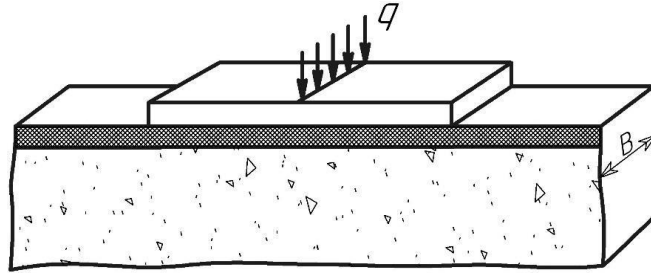


Рис.2. Плоске навантаження, при якому відносна деформація у напрямку осі ОУ відрізняється від нуля, тобто $e_y \neq 0$.

Позначаючи компоненти деформацій e_x , e_y , γ_{xy} , переміщення U , V , компоненти напружень σ_x , σ_y , τ_{xy} , для стисливого ізотропного матеріалу можна записати галупні залежності:

$$e_x = \frac{\partial U}{\partial x}; \quad e_z = \frac{\partial V}{\partial z}; \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial z} \quad (1)$$

Для плоского напруженого стану згідно з законом Гука компоненти деформацій:

$$e_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \mu\sigma_z); \quad e_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \mu\sigma_x); \quad \gamma_{xz} = \frac{1}{E}\tau_{xz}; \quad (2)$$

Для плоского деформованого стану за Гуком компоненти деформацій будуть:

$$e_x = \frac{1}{2G}[(1 - \mu)\sigma_x - \mu\sigma_z]; \quad e_z = \frac{1}{2G}[(1 - \mu)\sigma_z - \mu\sigma_x]; \quad (3)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{1}{G}\tau_{xz} \quad (4)$$

Диференційне рівняння рівноваги отримає вигляд:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \gamma \quad (5)$$

де τ_{xz} – компоненти дотичних напружень; γ – питома вага матеріалу конструкцій споруди.

Якщо компоненти напружень в рівняннях (4) замінити компонентами деформацій, отримаєм рівняння Нав'є для плоских тел в наступному вигляді:

$$\begin{cases} (1 - 2\mu)\nabla^2 U + \frac{\partial(e_x + e_z)}{\partial x} = 0 \\ (1 - 2\mu)\nabla^2 V + \frac{\partial(e_x + e_z)}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Рішенням системи рівнянь (5) отримаєм:

$$\frac{\partial^2(e_x + e_z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(e_x + e_z)}{\partial z^2} = \nabla^2(e_x + e_z) = 0; \quad (7)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (8)$$

Тут ∇^2 - оператор Лапласа.

В формулах (1) дві невідомі функції зміщень $U(x,z)$ і $V(x, z)$ з трьома залежностями зв'язані між собою. З цих залежностей останню можна ліквідувати шляхом диференціювання. Дійсно, якщо першу диференціювати по z , а другу по x , отримаємо:

$$\frac{\partial^2 e_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2 \partial x}; \frac{\partial^2 e_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^3 U}{\partial x^2 \partial z} \quad (9)$$

Послідовно диференціюючи третю величину із (1) в правій і лівій частинах по x і z , отримаємо:

$$\frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial x \partial z} = \frac{\partial^3 V}{\partial x^2 \partial z} + \frac{\partial^3 U}{\partial x \partial z^2} \quad (10)$$

Якщо співставити останні дві величини, отримаємо умову нерозривності компонентів деформацій при напружено-деформованому стані працюючих плоских споруд:

$$\frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial x \partial z} = \frac{\partial^2 e_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 e_z}{\partial x^2} \quad (11)$$

Розглянемо рішення плоскої задачі напруженого стану основи від рівномірно розподіленим навантаженням від підземної споруди. Припустимо, що на поверхні основи під подошвою підземної споруди з арочними конструкціями, котрі спираються на стрічковий фундамент, діє рівномірно розподілене навантаження інтенсивністю q , кН / м² або Н / см². Потрібно визначити компоненти напружень на глибині Z в довільній точці M , де знаходиться підземний колектор, і дати оцінку міцності матеріалу конструкцій колектора (рис.3). Якщо від компонентів напружень, що виникають внаслідок навантаження від споруди, можуть деформуватися конструкції колектора, необхідно вжити заходів щодо збільшення міцності матеріалу конструкції колектора або посилювати фундамент споруди.

З'єднаємо променями точку M з початковою і кінцевою точками діючого навантаження від ваги споруди q . Отриманий кут α буде кутом видимості.

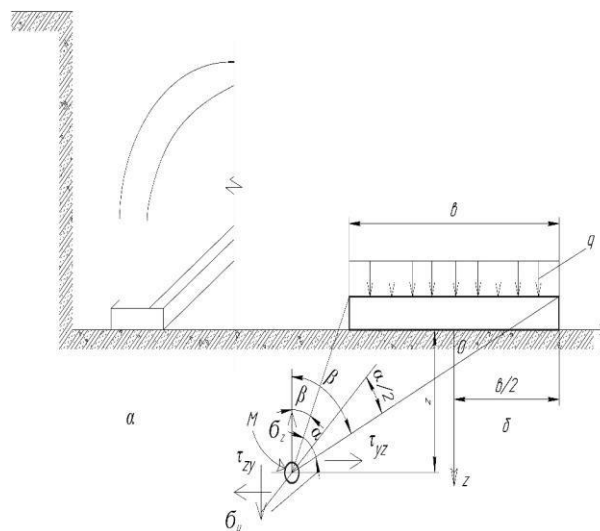


Рис.3. Плоский напружено-деформований стан підземної споруди (а) і розрахункова схема визначення компонентів напружень σ_z , σ_y и $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ в точці $M(b)$.

Напрямки дії компонентів напружень σ_z , σ_y і $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ в точці М приймаємо у вигляді трикутника (рис. 3, б). Проведемо з точки М бісектрису кута α і приймемо за початок координат ОУ і ОZ точку О, яка знаходиться в центрі діючого навантаження q . Вісь нормальних максимальних напружень σ_z вертикальна і утворює з променем, що з'єднує віддалений кінець діючого навантаження q , кут β , або з променем, що проходить по бісектрисі кута $\alpha / 2$, кут β' , тобто $\beta = \beta' + \alpha / 2$. Тоді компоненти напружень мають вигляд:

$$\begin{cases} \sigma_z = \frac{q}{\pi}(\alpha + \sin\alpha \cdot \cos 2\beta) \\ \sigma_y = \frac{q}{\pi}(\alpha - \sin\alpha \cdot \cos 2\beta) \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} = \frac{q}{\pi}(\sin\alpha \cdot \sin 2\beta) \end{cases} \quad (12)$$

Тут α і β вимірюються в радіанах.

Якщо визначити співвідношення z/b та y/b , можна використати коефіцієнти K_z , K_y , K_{yz} у вигляді:

$$\sigma_z = K_z q; \quad \sigma_y = K_y q; \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = K_{yz} q \quad (13)$$

Таким чином, компоненти напружень залежать від розташування точки М, кута видимості α і кута $\beta = \beta' + \alpha / 2$.

Припустимо, що від діючого рівномірно розподіленого навантаження підземної споруди q по глибині масиву z в точках M_1 , M_2 і M_3 (рис. 4) знаходиться допоміжний об'єкт. Під дією навантаження q в масиві основи виникають напруження, які можуть деформувати конструкції допоміжних об'єктів або зруйнувати саму споруду. Потрібно визначити компоненти напружень в точках M_1 , M_2 і M_3 . Рішення плоскої задачі виконуємо із застосуванням компонентів головних напружень σ_1 і σ_2 . Точки M_1 , M_2 і M_3 , де моуть знаходитись конструкції допоміжних об'єктів, з'єднуємо променями з початком і кінцем навантажень q , отримуючи кути видимості α_1 , α_2 і α_3 . З точок M_1 , M_2 і M_3 проводимо бісектриси кутів α_1 , α_2 і α_3 і на бісектрисах відкладаємо величини компонентів головних напружень σ_1 , σ_2 , що визначаються за формулами:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{q}{\pi}(\alpha + \sin\alpha) \\ \sigma_2 = \frac{q}{\pi}(\alpha - \sin\alpha) \end{cases} \quad (14)$$

У перпендикулярному напрямку до бісектрис відкладаємо величину напруження σ_2 . Завдавши величини σ_1 і σ_2 в точках, будуємо в них еліпсоїди напружень. Ці еліпсоїди характеризують характер напруженого стану в даних точках. Чим більш витягнутий еліпсоїд, тим більше величина напружень в даній точці наближається до стану зсуву. Чим більше еліпсоїд набуває форму кола, тим більше в даній точці ґрунт стискається, тобто в цій точці відбувається ущільнення ґрунту.

Порівнюємо величини максимальних компонентів головних напружень σ_1 з граничною опірністю матеріалів конструкцій R_{gr} , що знаходяться в точках M_1 , M_2 і M_3 . У разі $\sigma_1 > R_{gr}$ вживаються заходи щодо посилення конструкцій

допоміжних об'єктів, що знаходяться в цих точках. Для цього або збільшується R_{gr} матеріалу конструкції, або використовується зміцнення ґрунту основи механічним, фізичним або хімічним способами. Можливий також перехід до пальових фундаментів або до влаштування споруди типу «стіна в ґрунті» під подошвою підземного об'єкта.

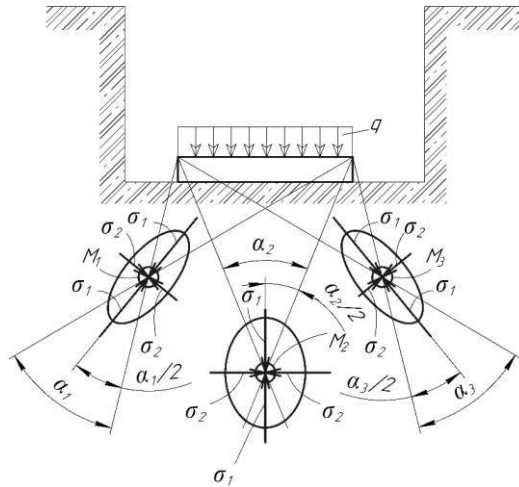


Рис.4. Розрахункова схема для побудови еліпсоїдів головних напружень σ_1 і σ_2 в масиві підстави підземної споруди

На основі викладеного вище можна зробити наступні висновки:

Під дією власної ваги підземної споруди в її підставі виникає напружений стан, які може зруйнувати допоміжний об'єкт (колодязь, трубопровід, колектор і ін.).

У зв'язку з цим визначення величин компонентів напружень і порівняння з опірністю матеріалів конструкцій допоміжного об'єкта дозволить своєчасно вжити відповідних заходів. Попередити аварійний стан, що загрожує безпеці експлуатації підземних споруд, можна шляхом посилення конструкцій об'єктів, тобто збільшенням R_{gr} конструкцій, що потребують захисту, а також шляхом закріплення всього масиву підстави під подошвою споруди механічним ущільненням чи закріпленням хімічними або фізичними методами.

Література

1. Гениев Г.А. Плоская деформация анизотропной идеально-пластической среды. // Строительная механика и расчет сооружений №3, 1982. _с.14÷18.
2. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А., Соломин В.И. Расчет конструкций на упругом основании_: Стройиздат, 1984_679с.
3. Самедов А.М. Расчет и проектирование подземных сооружений мелкого заложения (Монография), г.Киев, НТУУ «КПИ», 2013. 851с.