

ПОРІВНЯННЯ РОЗРАХУНКОВИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ ВИЗНАЧЕННЯ БОКОВОГО ТИСКУ ҐРУНТУ НА ОГОРОЖІ

А. С. Моргун, А. Д. Балатюк

В роботі наведено порівняльний аналіз методів визначення активного тиску ґрунту на підпірні стінки: метод граничної рівноваги, аналітичний метод В. В. Соколовського, графічний метод Ш. Кулона, метод згідно з ДБН В2-10-2009. Проведено порівняння даних розрахунків з експериментальними даними.

В работе приведен сравнительный анализ методов определения активного давления ґрунта на подпорные стенки: метод предельного равновесия, аналитический метод В. В. Соколовского, графический метод Ш. Кулона, метод согласно ДБН В2-10-2009. Проведено сравнение данных расчетов с экспериментальными данными.

This paper provides a comparative analysis of methods for determining the active soil pressure on retaining walls. These methods are limited equilibrium analytical method V. V. Sokolovsky, S. Coulon's graphical method and normative SBN B2-10-2009 method. A comparison of the calculated and experimental obtained data is given.

Постановка проблеми

На теперішній час в зв'язку з необхідністю рішення практичних задач будівництва часто постає питання визначення бокового тиску ґрунтів на підпірні стінки чи стіни підземних паркінгів.

Розподіл тиску ґрунту на підпірні стінки залежить від переміщення стінки. Тут можна розглядати такі випадки:

- жорстка підпірна стінка абсолютно нерухома;
- стінка може здійснювати поступальний рух;
- стінка може повертатись навколо деякої осі.

Метою роботи є виконання порівняльного аналізу сучасних методів визначення активного тиску ґрунту.

Основна частина

Експериментальні дослідження І. В. Яропольського на рис. 1 [1] свідчать, що переміщення стінки викликають зменшення тиску ґрунту (сухий пісок з $\gamma = 14,6 \text{ кН/м}^3$, $c = 3 \text{ кПа}$, $\varphi = 36^\circ$, розмір зерен менше 0,25 мм) на стінку ($H = 0,6 \text{ м}$).

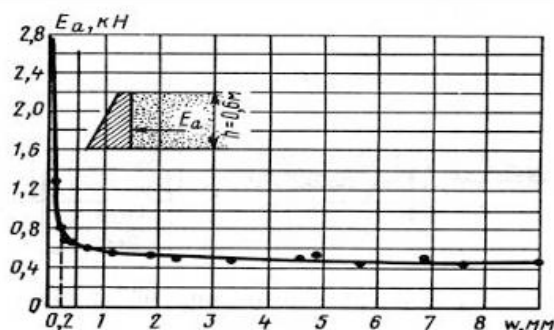


Рис. 1. Залежність активного тиску ґрунту від переміщення підпірної стінки

Коли стінка нерухома зсуви ґрунту за підпірною стінкою неможливі і боковий тиск ґрунту на стінку буде залежати лише від пружних властивостей скелета ґрунту.

Коли переміщення стінки не перебільшують середнього розміру діаметра зерен ґрунту ($w < 0,2$ мм) виникає зсув частинок ґрунту. При цьому в деякій області ґрунту настає гранична рівновага. Тиск ґрунту на цьому етапі буде близький до значень, що визначаються за класичною теорією граничної рівноваги (для гладких вертикальних стінок – за теорією Ш. Кулона). Коли стінка має значні переміщення, що значно перебільшують розмір середнього діаметра зерна (рис. 1) спостерігається різке зменшення бокового тиску ґрунту. Таким чином, при поступальних переміщеннях стінки тиск ґрунту на стінку змінюється в широких межах в залежності від переміщень.

Точне визначення обрису лінії ковзання в ґрунті за підпірною стінкою являє собою складну задачу, розв'язання якої крім математичних труднощів зустрічає ще труднощі достовірного урахування впливу тертя ґрунту по стінці.

З огляду на складність точного розв'язання вводяться ті чи інші припущення, одним із яких є прийняття прямолінійної поверхні ковзання, вперше запропонованої Ш. Кулоном. Для активного тиску ґрунту метод Ш. Кулона дає рішення, близьке до точних, для вертикальних гладких стінок з горизонтальною поверхнею засипки – повний збіг.

Припущення Ш. Кулона: 1 – Поверхня ковзання плоска; 2 – Призма руйнування відповідає максимальному тиску ґрунту на підпірну стінку.

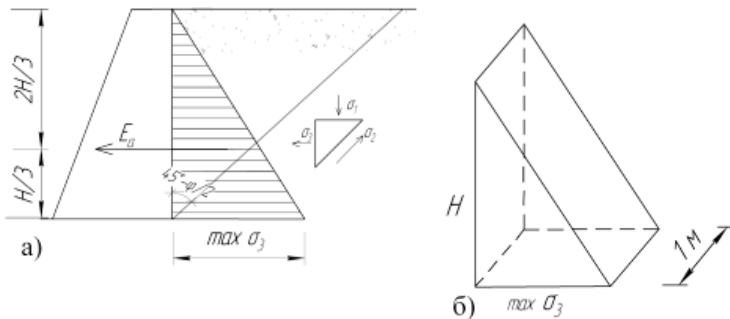


Рис. 2. Схема дії рівнодіючої активного тиску ґрунту на підпірну стінку: а – максимальний тиск ґрунту на підпірну стінку; б – до визначення активного тиску ґрунту

Довільна горизонтальна площадка в ґрунті за масивною гладкою вертикальною стінкою знаходиться під дією тільки стискаючого напруження (σ_1), рівного вазі стовпа ґрунту від поверхні до цієї площадки $\sigma_1 = \gamma \cdot z \cdot 1$. Боковий тиск σ_3 на підпірну стінку знаходиться із умови, що при відхиленні стінки ґрунт буде знаходитись за стінкою в граничній рівновазі. Із умови граничної рівноваги $\sigma_3 / \sigma_1 = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi / 2)$. Таким чином, максимальний активний тиск ґрунту на вертикальну гладку стінку $\sigma_3 = \gamma \cdot z \cdot \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi / 2)$.

Рівнодіюча активного тиску ґрунту на підпірну стінку E_a рівна площі епюри тиску $E_a = \max \sigma_3 \cdot H / 2$ (рис. 2, а) або

$$E_a = (\gamma \cdot H^2 / 2) \cdot \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi / 2). \quad (1)$$

Рівнодіюча E_a прикладена горизонтально на 1/3 висоти від низу підпірної стінки.

Для умов експерименту І. В. Яропольського [1] згідно з теорією граничної рівноваги визначено σ_1 , σ_3 та E_a для сухого дрібного піску $\gamma = 14,6$ кН/м³, $e = 0,55$, $\varphi = 36^\circ$, $H = 0,6$ м.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \gamma \cdot z = 14,6 \text{ кН/м}^3 \cdot 0,6 \text{ м} = 8,76 \text{ кН/м}^2; \\ \sigma_3^{\max} &= \gamma \cdot z \cdot \operatorname{tg}^2(45^\circ - 36^\circ / 2) = 2,274 \text{ кН/м}^2; \end{aligned}$$

$$E_a = (H / 2) \cdot \sigma_3^{\max} \cdot 1 = 0,6823 \text{ кН.}$$

Згідно з класичними методами теорії граничної рівноваги активний тиск ґрунту на підпірні стінки, отриманий В. В. Соколовським [2] шляхом числового інтегрування за методом скінченних різниць диференціальних рівнянь граничної рівноваги плоского граничного стану ґрунту за підпірною стінкою :

$$\sigma_3^{\max} = \bar{q}_0 \cdot (\gamma \cdot z + q), \quad (2)$$

де $\bar{q}_0 = 0,26$ – безрозмірний коефіцієнт згідно з інтерполяцією із таблиці [1],
 q – інтенсивність при вантаженні.

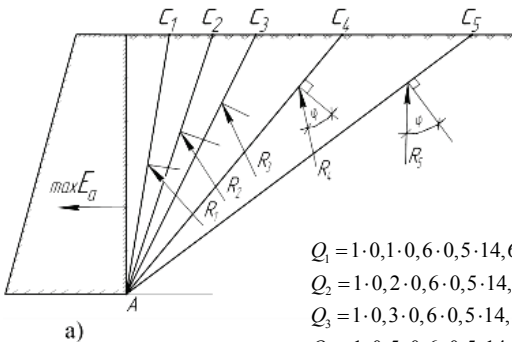
$$\sigma_3^{\max} = 0,26 \cdot (14,6 \text{ кН/м}^3 \cdot 0,6 \text{ м} + 0) = 2,28 \text{ кН/м}^2,$$

$$E_a = (H / 2) \cdot \sigma_3^{\max} \cdot 1 \text{ м} = 0,6823 \text{ кН.}$$

Графічний метод Ш. Кулона визначення активного тиску ґрунту на підпірні стінки базується на припущенні плоских поверхонь ковзання та побудові силових замкнутих трикутників (рис. 3, б).

Якщо одна частина масиву сипучого ґрунту переміщується відносно іншої по деякій поверхні то реакція R нерухомої частини масиву буде направлена назустріч руху під кутом тертя, відкладеним від нормалі до поверхні ковзання.

На рис. 3, а наведено визначення активного тиску графічним методом Ш. Кулона для умов підпірної стінки, поданих на рис. 1. Нехай т. А – нижнє ребро підпірної стінки, AC_1, AC_2 – можливі поверхні ковзання, вага блока ґрунту, що сповзає Q_1, Q_2 :



$$Q_1 = 1 \cdot 0,1 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 14,6 = 0,48 \text{ кН}$$

$$Q_2 = 1 \cdot 0,2 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 14,6 = 0,876 \text{ кН}$$

$$Q_3 = 1 \cdot 0,3 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 14,6 = 1,314 \text{ кН}$$

$$Q_4 = 1 \cdot 0,5 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 14,6 = 2,19 \text{ кН}$$

$$Q_5 = 1 \cdot 0,8 \cdot 0,6 \cdot 0,5 \cdot 14,6 = 3,504 \text{ кН}$$

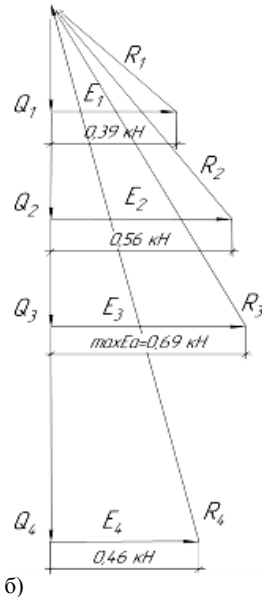


Рис. 3. Графічний метод Ш. Кулона

а – графічний метод Кулона визначення активного тиску ґрунту на підпірну стінку;
 б – замкнуті трикутники сил

Замкнуті трикутники сил для кожного із можливих блоків ковзання подано на рис. 3, б. Найбільш вірогідною поверхнею ковзання є поверхня 3, якій відповідає $\max E_a = 0,69 \text{ кН}$.

Згідно з діючими ДБН В2-10-2009 [3] боковий тиск визначається з урахуванням тертя по розрахунковій площині, абсолютну величину кута тертя φ_s рекомендується брати від 0 до φ_1 , та не більше 30° . Основний тиск ґрунту на одиницю висоти розрахункової площини підпірної стінки

$$P_{ah} = p_g \cdot \lambda_{ah\varphi} - \frac{c}{\operatorname{tg}\varphi} \cdot (1 - \lambda_{ahc}). \quad (3)$$

Для даного випадку $q = 0$, (підпірна стінка не навантажена вертикальним навантаженням, $\varepsilon = 0$ – розрахункова площина підпірної стінки перпендикулярна до горизонту), $\gamma = 14,6 \text{ кН/м}^3$, $c = 3 \text{ кПа}$, $\varphi = 36^\circ$, $\varphi_s = 30^\circ$, $h = 0,6 \text{ м}$.

$$p_y = \gamma \cdot h = 14,6 \text{ кН/м}^3 \cdot 0,6 \text{ м} = 8,6 \text{ кН/м}^2.$$

Коефіцієнт горизонтальної складової активного тиску ґрунту:

$$\lambda_{ah\varphi} = \left[\frac{\cos(\varphi - \varepsilon)}{\cos[\varepsilon \cdot (1 + \sqrt{k_1})]} \right]^2 = \frac{\cos^2(36 - 0)}{\cos[0 \cdot (1 + \sqrt{k_1})]} = 0,6545, \quad (4)$$

$$\lambda_{ahc} = \left[\frac{\cos(\varphi - \varepsilon + p)}{\cos[\varepsilon \cdot (1 + \sqrt{k_2})]} \right]^2 \cdot k_3 = \frac{\cos^2(36 - 0 + 0)}{\cos[0 \cdot (1 + \sqrt{k_2})]} \cdot 1,153 = 0,754, \quad (5)$$

$$p_{ah} = 8,6 \cdot 0,6545 - 3(1 - 0,754) / \operatorname{tg}36^\circ = 4,714 \text{ кН/м}^2 \quad (6)$$

Активний горизонтальний тиск ґрунту на 1 погонний метр довжини підпірної стінки складає $4,714 \text{ кН/м}^2 \cdot 1 \text{ м} \cdot 0,6 \text{ м} = 2,828 \text{ кН}$. Згідно з рис. 1 в стані спокою $E_a = 2,8 \text{ кН}$.

Висновки

- Класичні теорії тиску ґрунту на огороження витікають із мобілізації активного і пасивного тисків, які в дійсності виникає лише при повному руйнуванні. Згідно з класичними методами граничної рівноваги, графічного за Кулоном, та рішення В. В. Соколовського активний тиск E_a складає відповідно 0,6823 кН, 0,690 кН, 0,683 кН, що відповідає експериментальним дослідженням І. В. Яропольського $E_a = 0,670 \text{ кН}$ при переміщенні стінки $\omega = 0,4 \text{ мм}$, в момент настання стану граничної рівноваги.
- Дані величини бокового тиску ґрунту згідно з нормативними документами $E_a = 2,828 \text{ кН}$ відповідають експериментальним дослідженням І. В. Яропольського. $E_a = 2,8 \text{ кН}$ на момент вичерпання пружних властивостей скелета ґрунту.

Використана література

1. Цитович Н. А. Механика ґрунтов / Н. А. Цитович. – М. : «Высшая школа», 1983. – 288 с.
2. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский. – М. : «Высшая школа», 1960. – 241 с.
3. ДБН В2.10-2009 «Основи і фундаменти будівель і споруд».

Моргуни Алла Серафимівна – д.т.н., професор кафедри Промислової та цивільної будівництва Вінницького національного технічного університету.

Балатюк Анатолій Дмитрович – студент Вінницького національного технічного університету.