

Складність процесів та значна кількість чинників, що виникають в природній основі при влаштуванні укріплень недостатньо враховуються в розрахунках. Деформації огорожувачих конструкцій, явища суфозії, випору, порушення стійкості та ін. приводять до зміни структури властивостей ґрунту та зниження механічної їх міцності. Все це є одними з основних чинників, що викликають аварійні руйнування конструкцій будівель і споруд.

У спорудах укріплення ґрунтових масивів, а особливо огорожувальних конструкцій котлованів, одним з визначальних чинників, що впливають на їхню конструктивну схему і на економічність прийнятих проектних рішень, є горизонтальний тиск ґрунту на огорожу, величини деформацій ґрунту в основах споруд, що розташовані неподалік від кордону котловану, які на сьогодні для складних інженерно-геологічних умов вивчені недостатньо. Створення і розвиток ефективних методів розрахунку і досліджень будівельних конструкцій, що найбільш повно враховують специфіку взаємодії з ґрунтовим півпростором, а також впливу неоднорідних включень порід з різними фізико-механічними характеристиками в ґрунтовій основі, та встановлення залежностей за визначенням деформованого стану конструкцій на основі математичного моделювання з використанням автоматизованих засобів досліджень і проектування, а особливо проблема визначення впливу комплексу чинників на прилеглу забудову залишається актуальною і важливою прикладною задачею і її вирішення є пріоритетним завданням.

При розв'язку задач визначення стану рівноваги і поля напружень в середині ґрунтового масиву на основі співвідношень теорії пружності отримані достатньо достовірні результати, про що свідчать порівняння з експериментальними даними (див. розділ 4.1), однак розрахунок деформацій за допомогою цих співвідношень викликає певні сумніви у достовірності

отриманих результатів. Існують напівемпіричні методи, які свідчать, що початковий модуль пружності (початковий дотичний), отриманий з урахуванням обмежуючого тиску, помітно збільшується зі зростанням щільності і є наближено пропорційним обмежуючому – гідростатичному тиску. Окрім того, було помічено, що на величину виміру модулю пружності з глибиною ґрунтового півпростору впливає неоднорідність шарів ґрунтового масиву — взаємодія окремих шарів багат шарової системи при відсутності урахування тертя між ними. Відхилення будови ґрунтового масиву від ізотропного тіла пояснюється наявністю в ньому шаруватості, тобто суттєвої різниці властивостей ґрунтів у вертикальному напрямі, і практично при відсутності різниці у горизонтальній площині, тобто має місце поперечна анізотропія, яку досить точно можна описати за допомогою узагальненого закону Гука для матеріалу з трансверсальною анізотропією за Лехницьким [97]:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x &= a_{11} \sigma_x + a_{12} \sigma_y + a_{13} \sigma_z ; \\
 \varepsilon_y &= a_{12} \sigma_x + a_{11} \sigma_y + a_{13} \sigma_z ; \\
 \varepsilon_z &= a_{13} (\sigma_x + \sigma_y) + a_{33} \sigma_z ; \\
 \gamma_{yz} &= a_{44} \tau_{xy} ; \\
 \gamma_{xz} &= a_{44} \tau_{xz} ; \\
 \gamma_{xy} &= 2(a_{11} - a_{12}) \tau_{xy} .
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

У рівняннях стану маємо шість незалежних пружних констант. Вводимо наступні технічні константи:

$E'$  — модуль пружності у напрямі площини ізоτροпії,

$E$  — модуль пружності у напрямі, нормальному до площини ізоτροпії,

$\nu_1$  — коефіцієнт Пуассона, що характеризує поперечний стиск в площині ізоτροпії та розтяг у цієї ж площині,

$\nu_2$  — те ж, при розтягу у напрямі, нормальному до площини ізоτροпії,

$G'$  — модуль зсуву для площини ізоτροпії,

$G$  — модуль зсуву для площини, що перпендикулярна до площини ізоτροпії.



Виходячи з результатів емпіричних методів [107, 108, 109], враховуючи незначність деформацій (у випадку нелінійної теорії пружності враховується незначність приростів деформацій) та вводячи коефіцієнт співвідношення модулів пружності відносно напрямлень у площині ізотропії і ортогональної до неї:

$$n = \frac{E'}{E}; \quad E' = nE, \quad (4.5)$$

рівняння стану (4.4) приймають вигляд:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{nE} (\sigma_x - \nu_1 \sigma_y) - \frac{\nu_1}{E} \sigma_z; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{nE} (\sigma_y - \nu_1 \sigma_x) - \frac{\nu_2}{E} \sigma_z; \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu_2}{E} (\sigma_x - \sigma_y) + \frac{1}{E} \sigma_z; \\ \gamma_{yz} &= \frac{1 + 1/n + 2\nu_2}{E} \tau_{yz}; \\ \gamma_{xz} &= \frac{1 + 1/n + 2\nu_2}{E} \tau_{xz}; \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1 + \nu_1)}{nE} \tau_{xz}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

У рівняннях стану (4.6) незалежних технічних констант — чотири:

$$E, \nu_1, \nu_2 \text{ і } n.$$

На основі експериментальних досліджень і аналізу побудованих графічних залежностей для основної задачі механіки ґрунтів були зроблені висновки, що напруження в ґрунтах є досить чутливими до співвідношення модулів (4.5) і є малочутливими до співвідношення коефіцієнтів Пуассона, крім того переміщення також є малочутливими до коефіцієнтів Пуассона. Виходячи з вищевикладеного, можна прийняти допущення

$$\nu_1 = \nu_2 = \nu, \quad (4.7)$$

і тоді рівняння стану (4.6) для прийнятої моделі поперечної анізотропії будуть мати лише три незалежних константи:

$$E, \nu \text{ і } n.$$

Виходячи з результатів попередніх досліджень для того, щоб задовольнити умовам сумісності деформацій для ізотропного середовища, модуль пружності повинен змінюватись з глибиною у відповідності до закону:

$$E = E_1 z^\lambda; \quad \lambda = \frac{1}{\nu} - 2, \quad (4.8)$$

де  $E_1$  — модуль пружності ґрунту при  $z=1$ .

При таких обмеженнях напівемпіричні залежності між напруженнями і деформаціями відповідають умовам теорії пружності.

При різних значеннях  $\lambda$  маємо різні залежності модуля пружності за глибиною ґрунтового багат шарового масиву:

$\lambda = 0$  — відповідає постійному значенню  $E(z) = const$ ;

$\lambda = 1$  — відповідає лінійній залежності  $E(z) = E_1 z$ ;

$\lambda = 0,5$  — відповідає залежності  $E(z) = E_1 \sqrt{z}$ ;

$\lambda = 1,5$  — відповідає залежності  $E(z) = E_1 \sqrt{z^3}$ ;

На основі вищевикладених даних, що пов'язані з реалізацією урахування впливу умов гідростатичного тиску та багат шаровості ґрунтового масиву після значного числа проведених чисельних експериментів були прийняті наступні залежності модуля загальної деформації  $E_0$  від глибини. Вважаємо, що середній коефіцієнт Пуассона для розв'язку плоских задач в ґрунтовому просторі може бути

$$\nu \approx 0,4. \quad (4.9)$$

Тоді маємо:

$$\lambda = \frac{1}{0,4} - 2 = \frac{1}{2}; \quad E(z) = E_0 \sqrt{z} \quad (4.10)$$

Аргумент глибини півпростору фактично визначає гідростатичний тиск  $-\gamma z$ , тоді можна прийняти:

$$E(z) = k_s E_0; \quad k_s = k_u \sqrt{\gamma z}, \quad \text{при } z \leq 2 \quad K_S = 1, \quad (4.11)$$

де  $k_u$  — коефіцієнт умов роботи ґрунтового півпростору.

Для задач взаємодії ґрунтового масиву з огорожуючими конструкціями глибоких котлованів на основі чисельних експериментів встановлено

$$k_u = 1,0 \dots 1,75.$$

Побудуємо графік залежності  $E(z)$  при  $E_0 = 200 \text{ кг/см}^2$ ;  $k_u = 1; 1,5; 1,75$ ;  $\gamma_0 = 0,0017 \text{ кг/см}^2$ ; та глибина ґрунтового півпростору  $z = 0 \dots 50 \text{ м}$ :

$z_1 = 0 \dots 2 \text{ м},$	$\rightarrow k_s = 1,$	$\rightarrow E_{Z=0 \dots 2} = 200 \text{ кг/см}^2;$
$z_2 = 10 \text{ м},$	$\rightarrow k_s^1 = 1,5 \sqrt{(0,0017 \cdot 1000)} = 1,96,$	$\rightarrow E^1_{Z=10} = 392 \text{ кг/см}^2;$
	$\rightarrow k_s^2 = 1,75 \sqrt{(0,0017 \cdot 1000)} = 2,28,$	$\rightarrow E^2_{Z=10} = 456 \text{ кг/см}^2;$
	$\rightarrow k_s^3 = \sqrt{(0,0017 \cdot 1000)} = 1,31,$	$\rightarrow E^3_{Z=10} = 262 \text{ кг/см}^2;$
$z_3 = 15 \text{ м},$	$\rightarrow k_s^4 = 1,5 \sqrt{(0,0017 \cdot 1500)} = 2,40,$	$\rightarrow E^4_{Z=15} = 480 \text{ кг/см}^2;$
	$\rightarrow k_s^5 = 1,75 \sqrt{(0,0017 \cdot 1500)} = 2,80,$	$\rightarrow E^5_{Z=15} = 560 \text{ кг/см}^2;$
	$\rightarrow k_s^6 = \sqrt{(0,0017 \cdot 1500)} = 1,60,$	$\rightarrow E^6_{Z=15} = 320 \text{ кг/см}^2;$
$z_4 = 25 \text{ м},$	$\rightarrow k_s^7 = 1,5 \sqrt{(0,0017 \cdot 2500)} = 3,09,$	$\rightarrow E^7_{Z=25} = 618 \text{ кг/см}^2;$
	$\rightarrow k_s^8 = 1,75 \sqrt{(0,0017 \cdot 2500)} = 3,61,$	$\rightarrow E^8_{Z=25} = 722 \text{ кг/см}^2;$
	$\rightarrow k_s^9 = \sqrt{(0,0017 \cdot 2500)} = 2,06,$	$\rightarrow E^9_{Z=25} = 412 \text{ кг/см}^2;$
$z_5 = 30 \text{ м},$	$\rightarrow k_s^{10} = 1,5 \sqrt{(0,0017 \cdot 3000)} = 3,39,$	$\rightarrow E^{10}_{Z=30} = 678 \text{ кг/см}^2;$
	$\rightarrow k_s^{11} = 1,75 \sqrt{(0,0017 \cdot 3000)} = 3,95,$	$\rightarrow E^{11}_{Z=30} = 790 \text{ кг/см}^2;$
	$\rightarrow k_s^{12} = \sqrt{(0,0017 \cdot 3000)} = 2,26,$	$\rightarrow E^{12}_{Z=30} = 452 \text{ кг/см}^2;$
$z_6 = 40 \text{ м},$	$\rightarrow k_s^{13} = 1,5 \sqrt{(0,0017 \cdot 4000)} = 3,91,$	$\rightarrow E^{13}_{Z=40} = 782 \text{ кг/см}^2;$
	$\rightarrow k_s^{14} = 1,75 \sqrt{(0,0017 \cdot 4000)} = 4,56,$	$\rightarrow E^{14}_{Z=40} = 912 \text{ кг/см}^2;$
	$\rightarrow k_s^{15} = \sqrt{(0,0017 \cdot 4000)} = 2,61,$	$\rightarrow E^{15}_{Z=40} = 522 \text{ кг/см}^2;$



$$z_7=50 \text{ м}, \quad \rightarrow k_s^{16} = 1,5 \sqrt{(0,0017 \cdot 5000)} = 4,37, \quad \rightarrow E_{z=50}^{16} = 868 \text{ кг/см}^2;$$

$$\rightarrow k_s^{17} = 1,75 \sqrt{(0,0017 \cdot 5000)} = 5,10, \quad \rightarrow E_{z=50}^{17} = 1020 \text{ кг/см}^2;$$

$$\rightarrow k_s^{18} = \sqrt{(0,0017 \cdot 5000)} = 2,92, \quad \rightarrow E_{z=50}^{18} = 584 \text{ кг/см}^2.$$

За отриманими значеннями побудовані графіки, що наведені на рис. 4.12.

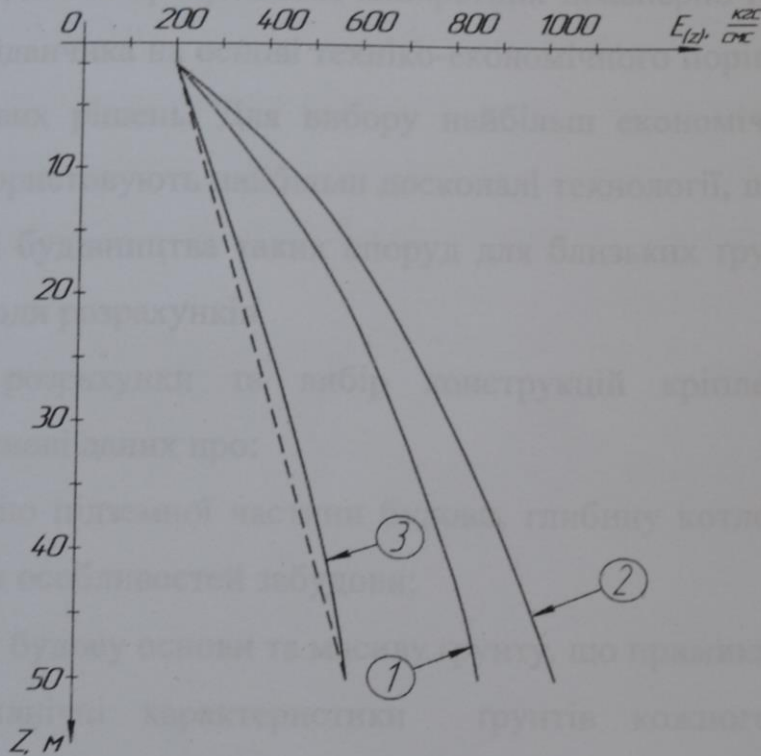


Рис. 4.12. Функції зміни модуля загальної деформації ґрунту при  $\lambda=1/2$ :  
 1 –  $k_u=1$ ; 2 –  $k_u=1,5$ ; 3 –  $k_u=1,75$ .

Характер кривих має яскраво виразну параболічну залежність, починаючи з точки  $z=2,0$  м. Для конструкцій огорожень глибоких котлованів більш прийнятним діапазоном змін функції  $E(z)$  є діапазон при  $k_u = 1,5 \dots 1,75$ , для звичайних підпірних стін висотою більше 6,0 м рекомендується використовувати залежність за графіком кривої "3" (рис. 4.12).

Таким чином, запропонований спосіб моделювання ґрунтового півпростору на основі нової модифікованої моделі урахування неоднорідності та анізотропних властивостей багат шарового півпростору при відсутності тертя між окремими шарами, що впливає на міцнісні характеристики ґрунту, а також на розрахунки в закритичному стані ґрунтових відкосів при взаємодії з огорожувальними конструкціями.