

УДК 624.21
UDC 624.21

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-137-146

ОЦІНКА УМОВ РОБОТИ МУЛИСТИХ ҐРУНТІВ В ОСНОВІ ТА УКОСАХ ЗЕМЛЯНИХ СПОРУД

RESEARCH AND ANALYSIS OF ENGINEERING ANTI-LANDSLIDE MEASURES APPLIED DURING THE CONSTRUCTION OF AUTOMOBILE ROADS ON FOREST LANDS



***Петрови́ч Володи́мир Володи́мирович**, аспірант кафедри дорожньо-будівельних матеріалів і хімії, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: menor@ukr.net, тел. +380930932262*

<https://orcid.org/0009-0002-1513-2789>



***Петрови́ч Ігор Володи́мирович**, аспірант кафедри системного проектування об'єктів транспортної інфраструктури та геодезії, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: igor19932008@gmail.com, тел. +380663837188*

<https://orcid.org/0009-0008-3551-3718>



***Савенко Сергі́й Сергі́йович**, аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: sava0304@gmail.com, тел. +380639570047.*

<https://orcid.org/0009-0007-2243-3471>



***Чечуга Євге́н Сергі́йович**, аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: Cecugazena2@gmail.com, тел. +3800937533521*

<https://orcid.org/0009-0008-6799-4843>



***Юрчук Віта́лій Васи́льович**, аспірант кафедри міжнародних перевезень та митного контролю, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: urcukvitalij6@ukr.net, тел. +380966611626*

<https://orcid.org/0009-0008-8596-5296>

Анотація. В статті проведений аналіз загального положення оцінки умов роботи мулистих ґрунтів. Розглянуто умови переходу мулистих і піщаних ґрунтів у дограничний та позамежний за міцністю стан під дією додаткових навантажень від земляних споруд. Проаналізовано похибки розрахунків при використанні різних коефіцієнтів міцності та визначено їх межі для ґрунтів із різними кутами внутрішнього тертя. Наведено умови виникнення деформацій повзучості та можливості їх розвитку у слабких прошарках. Запропоновано застосування аналітичних залежностей для визначення швидкості осідання стисливих шарів, що має практичне значення для оцінки роботи основ земляних споруд та укосів.

Ключові слова: ґрунт, деформація, зсув, мулистий ґрунт, міцність, навантаження, напруження, насип, осідання, оцінка, пластичність, позамежний стан, стійкість, тиск, умови роботи.

Вступ. Розглядаючи питання про умови роботи мулистих ґрунтів в основі споруд – високих земляних насипів необхідно виділити три самостійні питання.

Перше полягає в оцінці можливого переходу ґрунтів основи в позаграничний за міцністю стан, при їх додатковому завантаженні вагою насипу, що споруджується.

Другий спрямований на виявлення зон можливого розвитку деформацій повзучості, та оцінку значущості цього фактору для розглянутих споруд.

Третє питання стосується можливого відтискування мулистого ґрунту під дією навантаження, що створюється на поверхні цього мулистого шару шаром, який розміщений вище або спорудою, що споруджується.

Незважаючи на зовнішню відмінність цих питань, ці питання загалом взаємопов'язані та мають загальну якісну основу. Разом з тим для простоти аналізу кожне з цих питань будемо розглядати окремо.

Оцінка міцності мулистих ґрунтів. Загальна ідея оцінки міцності ґрунтів, прийнята нами, полягає у визначенні коефіцієнта

$$K_{\tau} = S_{pw} / \tau_{max}. \quad (1)$$

Таким чином дограничному стану відповідають значення $K_{\tau} > 1$. Граничному $K_{\tau} = 1$ та позамежному $K_{\tau} < 1$.

Оцінку міцності по $K_{\tau} = S_{pw} / \tau_{max}$ виявляється достатньо справедливою для ґрунтів, у яких кут внутрішнього тертя має малу величину. Мулисті ґрунти в більшості своєму мають кут внутрішнього тертя $\varphi_w < 5^\circ$, що дозволяє прийняти зазначену вище форму оцінки міцності. Разом з тим при розрахунку опірності мулу зрушенню ми враховуватимемо діючі по площині τ_w повні нормальні напруги $P_n = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{P_x + P_y}{2}$; тоді матимемо:

$$K_{\tau} = \frac{P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_w + c_w}{\tau_{max}}, \quad (2)$$

Для більшої переконливості допустимості такого спрощення проведемо невеликий аналіз можливої помилки. Так, строго кажучи, оцінку міцності ґрунтів, що володіють тертям ($\varphi_w \neq 0$), слід вести по куту найбільше відхилення θ_{max} . Умови міцності тоді пов'язують із співвідношенням θ_{max} і φ_w , при $\theta_{max} > \varphi_w$ має позамежний стан, а при $\theta_{max} < \varphi_w$ забезпечену міцність. Тоді:

$$K_{\theta} = \frac{S_{pw}}{\tau_{\theta}} = \frac{P_{\theta} \cdot \operatorname{tg} \varphi_w + c_w}{\tau_{\theta}}. \quad (3)$$

Якщо порівняти K_{τ} і K_{θ} , будемо мати $N = K_{\theta} / K_{\tau}$:

$$N = \frac{(P_{\theta} \cdot \operatorname{tg} \varphi_w + c_w) \cdot \tau_{\max}}{(P_{\tau} \cdot \operatorname{tg} \varphi_w + c_w) \tau_{\theta}}. \quad (4)$$

Врахувавши, що $\tau_{\theta} = \tau_{\max} \cdot \cos \theta_{\max}$ будемо матимемо:

$$N = \frac{(P_{\theta} \cdot \operatorname{tg} \varphi_w + c_w) \cdot \tau_{\max}}{(P_{\tau} \cdot \operatorname{tg} \varphi_w + c_w) \cos \theta_{\max}}. \quad (5)$$

Найбільше значення N залежно від (4) ми отримаємо, якщо приймемо в аналізі $c_w = 0$. Тоді:

$$N = \frac{[(P_1 + P_2) - (P_1 - P_2) \sin \theta_{\max}] \cdot \operatorname{tg} \varphi_w}{(P_1 + P_2) \operatorname{tg} \varphi_w \cdot \cos \theta_{\max}} = \frac{1}{\cos \theta_{\max}} \left(\frac{(P_1 + P_2)}{(P_1 + P_2)} - \frac{(P_1 - P_2)}{(P_1 + P_2)} \right) \cdot \cos \theta_{\max} = \\ = \frac{1}{\cos \theta_{\max}} (1 - \sin^2 \theta_{\max}) = \cos \theta_{\max}. \quad (6)$$

Очевидно, що при кутах $\theta_{\max}$ до 18° ($\cos \theta_{\max} = 0,95$) точність рішення не виходить за межі 5%, а якщо врахувати, що кут внутрішнього тертя мулів до 5° , то помилка не буде більше 0,5% при використанні K_{τ} замість K_{θ} .

Проведений аналіз корисний ще й з тієї точки зору, що показує, що для піщаних ґрунтів з $\varphi_w \approx 20^\circ$ оцінку міцності проводити за $\frac{1}{K_{\tau}} = \frac{\tau_{\max}}{S_{pw}} = \frac{\tau_{\max}}{P_{\tau} \cdot \operatorname{tg} \varphi_w}$, і у даному випадку помилка не буде перевищувати для $\varphi_w \approx 20^\circ$ - 6%, а для $\varphi_w \approx 25^\circ$ - 10%.

Виявлення зон розвитку деформацій повзучості. Відповідно до критеріїв повзучості, висловлених Н.Н. Масловим, деформації повзучості матимуть місце в ґрунті в тому випадку, якщо діючі в ньому дотичні напруження τ виявляться більше деякого порогового значення τ_{lim} відбиває міцнісні властивості ґрунту і дорівнює:

$$\tau_{lim} = p \cdot \operatorname{tg} \varphi_w + c_c, \quad (7)$$

де c_c – властиве даному ґрунту структурне зчеплення.

Дослідження, проведені лабораторією UAM з виявлення параметрів повзучості, були засновані на базі, розробленій проф. М.М. Масловим, фізико-технічної теорії повзучості. На основі цієї теорії критерій можливості прояву деформації повзучості глинистого ґрунту в покраденому вигляді може бути поданий як:

$$\tau_{lim} < \tau < S_{pw}, \quad (8)$$

де τ_{lim} – межа повзучості;

τ – дотична напруження, що діє в ґрунті в даній точці та площадці;

S_{pw} – опір ґрунту зсуву.

Основним питанням в оцінці реологічних властивостей глинистого ґрунту є встановлення властивого йому "порога повзучості" (τ_{lim}), і навіть коефіцієнта в'язкості (η) ґрунту, необхідних для визначення інтенсивності деформації повзучості.

Визначення величини "порога повзучості" (τ_{lim}) велися кількома шляхами:

– у першому випадку, за аналітичним виразом (9) із використанням залежностей $\varphi_w = f(w)$ та $c_w = f(w)$, а також результатів дослідів "плашка по плашці";

$$\tau_{lim} = p \cdot \operatorname{tg} \varphi_w + c_c, \quad (9)$$

– у другому випадку визначення τ_{lim} виконувалося за даними випробувань з постійною швидкістю деформації зсуву ($v = \text{const} = 8,3 \cdot 10^{-10}$ см/сек);

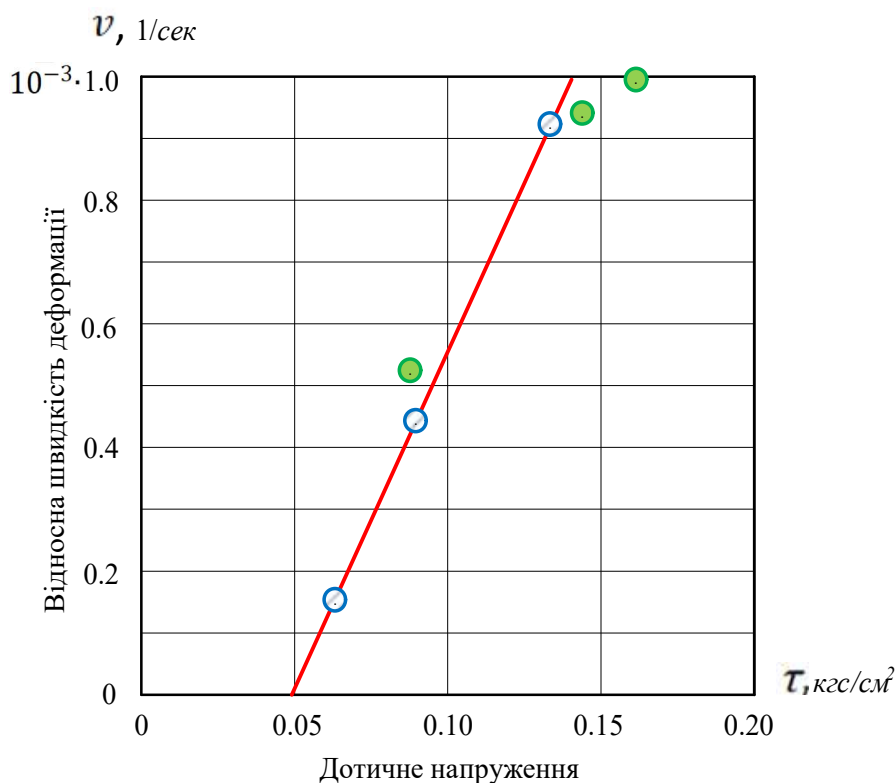
– у третьому випадку були виконані досліді з визначення τ_{lim} за величиною рівноважної дотичної напруги τ , відповідає граничному стану зразка за швидкістю деформації зміщення. Досліді щодо встановлення рівноважного значення дотичної напруги, що відповідає τ_{lim} , проводилися на апараті прямого зсуву з похилим столиком. Значення межі повзучості τ_{lim} визначали як:

$$\tau_{lim} = p \cdot \text{tg} \alpha_{kp} \quad (10)$$

де p – величина нормального навантаження на зразок;

α_{kp} – критичний кут нахилу столика зсувного приладу, при якому починала проявлятися деформація повзучості ґрунту;

– в четвертому випадку величину "порога повзучості" визначали за даними дослідів на тривалий зсув, в результаті побудови графіка залежності відносної швидкості від дотичних напруг $v = f(\tau)$, рис. 1. Отримана залежність носить лінійний характер і служить графічного визначення величини "порога повзучості" відповідного $v=0$.



⊙ – досліді при $p=0.5$ кгс/см²

● – досліді при $p=1.0$ кгс/см²

Рисунок 1 – Залежність відносної швидкості деформації зсуву від напруги.

Figure 1 – Dependence of relative shear strain rate on stress.

Як зазначалося вище величина τ_{lim} може бути визначена різними методами, але найпростіший і надійніший це за висловом наведеним вище (9).

І так, повзучість буде в тих зонах, де $\tau_{max} > \tau_{lim}$.

Разом з тим є і друга умова для деформації повзучості $\tau_{max} < S_{pw}$, що відбиває умови знаходження ґрунту в дограничному за міцністю стану, тобто $S_{pw} > \tau_{max} > \tau_{lim}$.

Очевидно, що за умовою повзучість розвиватиметься у зонах дограничного стану та в реальних умовах може контактувати з цими зонами.

Оцінка можливості віддавлення мулистого ґрунту. Це завдання виникає у зв'язку з ймовірністю видавлення слабого пластичного ґрунту з простору між жорсткішими шарами подібно до крему, який видавлюється з шаруватого пирога, коли його починають різати.

З відтисканням ґрунтів із-під країв насипів, зведених на слабких болотистих або мулистих ґрунтах, досить часто стикаються дорожники.

Свого часу проф. Л.К. Юргенсон виходячи з умови ступеня розвитку в цьому слабкому шарі пластичних деформацій з відтисканням з нього матеріалу вивів формулу для визначення навантаження p_o (умовно рівномірнорозподільну), при якій виникає цей процес:

$$p_o = \frac{1}{H} C \cdot b, \quad (11)$$

де H – потужність слабого шару,

b – половина ширини насипу,

C – зчеплення в ґрунті (при куті $\varphi_w \rightarrow 0$).

Рішення Л.К. Юргенсона виведено для умов, коли деформація охоплює весь шар, тобто у кожній точці $\tau_{max} = c$. Для віддавлення всього шару Юргенсоном отримано закон фактичного розподілу нормального тиску по поверхні слабого шару:

$$\sigma = 2C(b-x)/H. \quad (12)$$

Загальне навантаження необхідне для початку віддавлення:

$$p = \frac{2Cb^2}{H}. \quad (13)$$

Особливістю рішення Л.К. Юргенсона є те, що в ньому, по-перше, відсутнє врахування швидкості деформації при різних значеннях p і друге, у рішення введено граничне значення P , з якого починається процес віддавлення. Це (друге) впливає з умови $\tau_{max} \geq c$ (тільки тоді буде віддавлення, а це у свою чергу висуває „ C ” як деяке граничне значення. З теорії та практики відомо, що сили тертя ґрунту ($p \cdot \operatorname{tg} \varphi_w$) і структурне зчеплення (C_c) є факторами, що гальмують розвиток пластичних деформацій. Натомість сили зв'язності Σ_w допускають такі деформації. Тоді в рішенні Юргенсона „ C ” може бути прийнято рівним "порога повзучості" за М.М. Масловим ($\tau_{lim} = p \cdot \operatorname{tg} \varphi_w + C_c$). Очевидно, що для ґрунтів не маючих τ_{lim} , таких як пластичні глини та деякі види мулів, деформації віддавлення можуть починатися при найменших значеннях p , але швидкість цього віддавлення може виявитися дуже маленькою, і з нею в деяких випадках можна знехтувати.

Зазначимо, що у розрахунках, де враховувалась міцність мулистих ґрунтів ми часом використовували і кут внутрішнього тертя φ_w ($\approx 3^\circ$), тому в (5) якості „ C ” ми підставляли τ_{lim} .

Розробляючи більш детально питання віддавлення мулистого ґрунту ми скористалися основними рішеннями, які наводить А.Надай.

Розрахункова схема представлена на рис. 2.

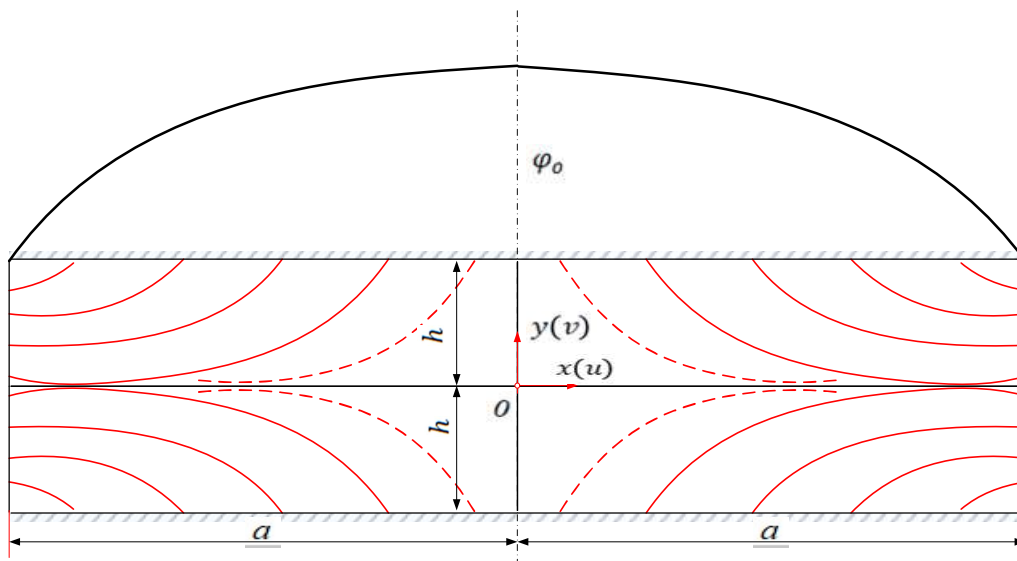


Рисунок 2 – Схема для розрахунку віддавлення пластичного ґрунту (за А. Надаї).

Figure 2 – Scheme for calculating the pressure drop of plastic soil (according to A. Nadai).

Шар пластичного матеріалу потужністю $2h_0$, шириною $2a$ і довжиною $2b$ стискається між паралельними пластинами. Оскільки довжини b дуже велика ($b \rightarrow \infty$), то віддавлення ґрунту в напрямку b немає. Віддавлення йде тільки в напрямку a по осі x . При вирішенні прийнято умови:

- 1) матеріал не стискаємо, тобто об'ємних деформацій немає;
- 2) на контакті з пластинами матеріал не прослизає, тобто при:

$$\begin{aligned} y = h \quad u = 0 \quad v = -v_0 = \text{const}, \\ y = -h \quad u = 0 \quad v = v_0 = \text{const}, \end{aligned} \quad (14)$$

де u і v – швидкості по осі x і y відповідно.

Відповідно до першої умови можна записати (для умов плоскої задачі) $a_0 \cdot h_0 = a_i \cdot h_i$, де нульові індекси відповідають початковим умовам, а i – проміжних при t_i .

У в'язкій речовині поле швидкостей u і v при плоскій деформації визначається бігармонічною функцією ψ .

У стані плоскої течії $v = -\frac{d\psi}{dx}$; $u = \frac{d\psi}{dy}$; функція струму ψ задовольняє вказівним умовам $y = h \rightarrow \psi = v_0 \cdot x$, $y = -h \rightarrow \psi = v_0 \cdot x$, $\frac{d\psi}{dy} = 0$ (на контакті з пластинкою немає струму).

Для даного випадку бігармонічну функцію ψ можна записати у вигляді

$$\psi = \frac{\tau_0 x}{2h^3} \cdot (3h^2 y - y^3). \quad (15)$$

Тоді для швидкостей u і v отримаємо такі вирази

$$u = \frac{3\tau_0 x}{2h} \left(1 - \frac{y^2}{h^2}\right), \quad v = \frac{v_0}{2} \left(\frac{3y}{h} - \frac{y^3}{h^3}\right). \quad (16)$$

Можна бачити, що u розподілена параболою. Середня напруження σ чи тиск $p = -\sigma$ можна обчислити за їх градієнтами з використанням рівнянь:

$$\begin{aligned}\eta \cdot \Delta u + \frac{d\sigma}{dx} &= 0; \\ \eta \cdot \Delta v + \frac{d\sigma}{dy} &= 0; \\ \Delta \gamma &= 0.\end{aligned}\quad (17)$$

Тоді

$$\begin{aligned}\frac{dp}{dx} &= \eta \cdot \Delta u = -\frac{3\eta \cdot v_0 \cdot x}{h^3}; \\ \frac{dp}{dy} &= \eta \cdot \Delta v = \frac{3\eta \cdot v_0 \cdot y}{h^3}; \\ p &= p_0 + \frac{3\eta \cdot v_0}{2h^3} (y^2 - x^2),\end{aligned}\quad (18)$$

де p_0 – тиск на початку координат $y = x = 0$.

Тиск p_0 одержують за останнім виразом з (18) умови $p=0$ при $x = \pm a, y = 0$, що відповідає умові рівності нулю тиску $p=0$ при $y = 0$ (по осі шару) та на межі шару ($x = \pm a$).

Тоді

$$\begin{aligned}p_0 &= \frac{3\eta \cdot v_0 \cdot a^2}{2h^3}; \\ p &= \frac{p_0}{a} (a^2 + y^2 - x^2).\end{aligned}\quad (19)$$

Компоненти напруги $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ можна знайти із рівнянь:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= p \cdot 2\eta \cdot \dot{\epsilon}_x = \frac{p_0}{a^2} (x^2 - 3y^2 - a^2 - 2h^2); \\ \sigma_y &= p \cdot 2\eta \cdot \dot{\epsilon}_y = \frac{p_0}{a^2} (x^2 + y^2 - a^2 - 2h^2); \\ \tau_{xy} &= \eta \cdot \dot{\gamma}_{xy} = \frac{2 p_0 \cdot x \cdot y}{a^2}.\end{aligned}\quad (20)$$

У (18) і (20) η – коефіцієнт в'язкості, $\dot{\epsilon}_x$ і $\dot{\epsilon}_y$ і $\dot{\gamma}_{xy}$ – швидкості деформації.

Рівняння (20) дають значення напружень, які виникають у точках видавлюваного шару за умови паралельного зближення пластин. Очевидно, що при $y = 0$, тобто по осі шару вздовж осі $\sigma_x = \sigma_y = -p$. Епюра $\sigma_x = \sigma_y = -p$ має параболічний обрис з максимальним значенням на початку координат, тобто в середині шару ($x = y = 0$).

Повне результуюче навантаження за площею $2b$ х $2a$ для осевої площини шару ($y = 0$) приблизно дорівнює

$$p = 4b \int_0^a (p)_{y=0} dx = \frac{2}{3} p_0 \cdot 4 \cdot a \cdot b = \frac{8}{3} a \cdot b \cdot \frac{3\eta \cdot v_0 \cdot a^2}{2h^3} = \frac{4\eta \cdot v_0 \cdot a^3 b}{h^3}; \quad (21)$$

Отриманий вираз (21) зручно використовувати для розрахунку швидкості v_0 :

$$v_o = \frac{p \cdot h^3}{2\eta \cdot a^3 \cdot b}. \quad (22)$$

Вираз (22) можна використовувати для розрахунку швидкості осідання верхнього шару (верхньої межі шару, що стискається), якщо в нашому розпорядженні буде загальний (сумарний) тиск по поверхні $2b \times 2a$. Слід однак мати на увазі, що загальна швидкість буде фактично меншою, так як в міру віддавлення ґрунту буде зменшуватися h , але цією зміною в більшості випадків можна знехтувати.

Практично маючи епюру напруг σ можна обчислити її площу в межах a , а далі прийнявши $b=1m$ отримаємо погонне (по довжині b) сумарне навантаження. Підставивши це навантаження у вираз (22) отримаємо швидкість стиснення шарів розмірність (см/сек). Для зручності можна ввести коефіцієнт $3,15 \times 10^7$ і тоді матимемо швидкість в (см/рік), що зручніше для аналізу результатів.

Висновки

При оцінці можливого переходу ґрунтів основи у позамежний за міцністю стан під час їх додаткового навантаження вагою насипу встановлено таке:

1. За кутів θ_{max} до 18° похибка розрахунків не перевищує 5%. Якщо ж врахувати, що кут внутрішнього тертя мулів зазвичай не перевищує 5° , то при використанні коефіцієнта K_τ замість K_θ помилка не перевищує 0,5%.

2. Отримані результати мають практичне значення і для піщаних ґрунтів $\varphi_w \approx 20^\circ$ до 25° . Похибка становитиме не більше ніж 6% при $\varphi_w \approx 20^\circ$ та до 10% при $\varphi_w \approx 25^\circ$.

Під час виявлення зон можливого розвитку деформацій повзучості важливо враховувати, що ця форма деформації виникає за умови $\tau_{max} < S_{pw}$, тобто коли ґрунт перебуває у дограничному за міцністю стані ($S_{pw} > \tau_{max} > \tau_{lim}$). Це свідчить про те, що повзучість розвивається саме у зонах, наближених до межі міцності, і в реальних умовах може поширюватися на суміжні ділянки.

Особливу увагу слід приділяти можливому відтискуванню слабких прошарків мулистого ґрунту під дією навантаження, створюваного вищележачими шарами або споруджуваною земляною конструкцією.

Формулу (22) можна використовувати для визначення швидкості осідання верхньої межі шару, що стискається, за умови, що відомий сумарний тиск на площі. При цьому фактична швидкість буде дещо меншою через поступове зменшення товщини шару h , однак у більшості практичних випадків цим впливом можна знехтувати.

Використовуючи наведені залежності (5)–(7), виконано оцінку умов роботи мулистих ґрунтів як в основі земляних споруд, так і в тілі укосу.

Перелік посилань

1. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи і фундаменти: Підручник / М. Л. Зоценко, В.І. Коваленко, А. В. Яковлев, О. О. Петраков, В. Б. Швець, О. В. Школа, С. В. Біда, Ю. Л. Винников. – Полтава: ПНТУ, 2003. – 446 с.
2. Основи та фундаменти. Навчальний посібник для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» / І.О.Парфентьєва, О.В. Верешко, Д.А. Гусачук □ Луцьк: ЛНТУ, 2017. □ – 296 с.
3. ДСТУ Б В.2.1–11:2009: Методи лабораторного визначення властивостей набухання та усадки. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 23 с.
4. ДСТУ Б В.2.1–23:2009 Ґрунти. Методи лабораторного визначення коефіцієнта фільтрації.
5. ДБН В.2.3–4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування . Частина ІІ Будівництво.
6. ДСТУ Б В.2.1–2–96 (ГОСТ 25100–95) Ґрунти. Класифікація.

7. ДБН В.1.1–25–2009. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі інженерний захист територій та споруд від підтоплення та затоплення.

8. Юрчук В.В., Петрович В.В., Петрович І.В., Чечуга Є.С. Дослідження та аналіз інженерних протипросідних заходів, які застосовуються при будівництві автомобільних доріг на лесових ґрунтах//Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: науковий журнал. Київ, 2024. Вип.115.1. С.302–308.

RESEARCH AND ANALYSIS OF ENGINEERING ANTI-LANDSLIDE MEASURES APPLIED DURING THE CONSTRUCTION OF AUTOMOBILE ROADS ON FOREST LANDS

Petrovych Volodymyr V., postgraduate student of the Road Construction Materials and Chemistry Department, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: menor@ukr.net, tel.+380930932262, <https://orcid.org/0009-0002-1513-2789>.

Petrovych Ihor V., postgraduate student of the System Design of Transport Infrastructure and Geodesy Department, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: igor19932008@gmail.com, tel.+380663837188, <https://orcid.org/0009-0008-3551-3718>.

Savenko Sergey S., postgraduate student, Road Construction and Property Management Department of National Transport University, e-mail: sava0304@gmail.com, тел.+380639570047, <https://orcid.org/0009-0007-2243-3471>.

Chechuha Yevhen S., postgraduate student, Road Construction and Property Management Department of National Transport University, e-mail: Cecugazena2@gmail.com, tel.+3800937533521, <https://orcid.org/0009-0008-6799-4843>.

Yurchuk Vitaly V., postgraduate student of the International Transportation and Customs Control Department, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: urcukvitalij6@gmail.com, tel.+380966611626, <https://orcid.org/0009-0008-8596-5296>.

Summary. The article examines the conditions under which silty and sandy soils transition to the ultimate and beyond-limit strength state under additional loading from earth structures. Errors in calculations using different strength coefficients are analyzed, and their limits for soils with varying internal friction angles are determined. The conditions for creep deformation and its potential development in weak soil layers are discussed. Analytical relationships for estimating the settlement rate of compressible layers are proposed, which have practical significance for assessing the performance of foundations and slopes of earth structures.

Keywords: soil, deformation, landslide, silty soil, strength, load, stress, embankment, settlement, assessment, plasticity, limit state, stability, pressure, operating conditions..

References

1. Engineering Geology. Soil Mechanics, Foundations and Foundations: Textbook / M. L. Zotsenko, V. I. Kovalenko, A. V. Yakovlev, O. O. Petrakov, V. B. Shvets, O. V. Shkola, S. V. Bida, Yu. L. Vinnikov. – Poltava: PNTU, 2003. – 446 p. [in Ukrainian]
2. Bases and foundations. Textbook for students majoring in 192 “Construction and Civil Engineering” / I.O. Parfentyeva, O.V. Vereshko, D.A. Gusachuk. – Lutsk: LNTU, 2017. – 296 p. [in Ukrainian]
3. DSTU B V.2.1–11:2009: Methods for laboratory determination of swelling and shrinkage properties. – Kyiv: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine, 2010. – 23 p. [in Ukrainian]
4. DSTU B V.2.1–23:2009 Soils. Methods for laboratory determination of filtration coefficient. [in Ukrainian]
5. DBN V.2.3–4:2015. Motorways. Part I. Design. Part II Construction. [in Ukrainian]
6. DSTU B V.2.1–2–96 (GOST 25100–95) Soils. Classification. [in Ukrainian]

7. DBN V.1.1–25–2009. Protection against hazardous geological processes, harmful operational influences, fire, engineering protection of territories and structures against flooding and inundation. [in Ukrainian]

8. Yurchuk V.V., Petrovich V.V., Petrovich I.V., Chechuga E.S. Research and analysis of engineering anti-subsidence measures used in the construction of motor roads on loess soils//Motor roads and road construction: scientific journal. Kyiv, 2024. Issue 115.1. P. 302–308. [in Ukrainian]

Дата надходження до редакції 05.06.2025