
УДК 624.131.23; 624.131.537

Вплив потоків ґрунтових вод на зміну характеристик міцності лесового ґрунту

С.В. Біда, О.В. Куц

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, м. Полтава

Розглянуто проблему стійкості схилів – одну із найбільш актуальних на теперішній час. Доведено, що на достовірність оцінки стійкості схилу впливає точність визначення характеристик міцності ґрунту. З'ясовано, що одним із найпоширеніших є метод одноплосинного зрушення. Установлено, що обробка результатів випробування ґрунтів на зрушення в логарифмічних координатах дозволяє більш точно визначити показники їх міцності. Виявлено, що величина характеристик міцності ґрунту, одержаних за результатами випробувань на одноплосинне зрушення, залежить від вертикального тиску під час випробувань.

Ключові слова: схил, ґрунтові води, лесові ґрунти, міцність ґрунту.

The influence of groundwater flow effect on changes of loess soil strength characteristics

S.V. Bida, O. V. Kuts

Yuri Kondratyuk Poltava National Technical University

The problem of stability of slopes - one of the most topical at present. It is proved that the reliability of the slope stability assessment affects the accuracy of the strength characteristics of the soil. One of the most common methods is one-plane shifts method. Established that processing of results of soil shift test in logarithmic coordinates can more accurately identify indicators of strength. Discovered that the magnitude of the strength characteristics of soil test results which is obtained on one plane shift depends on the vertical pressure during testing.

Key words: slopes, groundwater, loess soils, soil strength.

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, просп. Першотравневий, 24, м. Полтава, 36011, Україна.

Yuri Kondratyuk Poltava National Technical University, pr. Pershotravnevyi, 24, Poltava, 36011, Ukraine.
Tel.: (05322)738-57. E-mail: svbeda@rambler.ru

Вступ. У ході виконання практичних завдань, пов'язаних зі стійкістю ґрунтового масиву, основну увагу необхідно приділяти правильному визначенню механічних характеристик ґрунтів. Лише в цьому випадку можна правильно визначити максимальне допустиме навантаження на масив ґрунту, за якого він зберігатиме рівновагу та не втратить стійкість. Порушення рівноваги масиву ґрунту може призвести до значних деформацій фундаментів будівель і споруд, випирання ґрунту з-під фундаментів, сповзання ґрунтів по схилу тощо [5; 13; 20].

Досить цікава ситуація склалася в період інтенсивного розвитку зсувних процесів в Україні в кінці 90-х рр. минулого століття. За розрахунками, виконаними на основі результатів інженерно-геологічних вишукувань, здебільшого схили були стійкі (коефіцієнт стійкості знаходився в межах 1,2 – 1,5 і вище), але насправді на схилах інтенсивно відбувалися зсувні явища. Постало питання відповідності розрахункових характеристик дійсним.

Проблема розрахунку достовірних характеристик міцності ґрунтів під час визначення стійкості схилів досить актуальна. Діючі нормативні документи [7; 8] регламентують визначення характеристик міцності ґрунту в польових і лабораторних умовах. Для цього здійснюють випробування ґрунтів як на одноплосинне зрушення, так і за складного напруженого стану, а також застосовують метод обертального зрізу тощо [22]. Однак найбільш актуальною залишається проблема відповідності умов проведення досліду умовам, у яких ґрунт перебуває в природному стані.

Згідно із нормами регламентовано проведення випробувань на зрушення за двома схемами – консолідовано-дренованою та неконсолідовано-недренованою. Перед випробуваннями ґрунти попередньо ущільнюють за різних значень вертикального тиску. Залежно від схеми випробування і стану ґрунту значення тиску коливаються в межах 0,05 – 0,30 МПа. Однак вони часто перевищують природний тиск на ґрунт, що призводить до ущільнення ґрунту й одержання завищених результатів. Таким чином, після попереднього ущільнення ґрунт, який у природному стані набував в'язкої консистенції в разі намокання, може набути лише плиннопластичного стану (а в деяких випадках – лише м'якопластичного). Отже, ми свідомо зміцнюємо ґрунт перед випробуванням вертикальним навантаженням, яке перевищує природне.

У той же час у разі застосування неконсолідовано-недренованої схеми випробувань їх тривалість не повинна перевищувати двох хвилин. Випробування вважають закінченими, якщо у випадку прикладання чергового дотичного навантаження відбувається миттєвий зріз (зрив) однієї частини зразка по відношенню до іншої або загальна деформація зрізу буде перевищувати 5 мм. Якщо для консолідовано-дренованої схеми випробування така умова цілком прийнятна, то прискорені випробування за іншою схемою дають завищені результати, оскільки під час випробувань немає стабілізації деформацій.

Денисов [6], Маслов [20] та інші виділили із загального зчеплення, яке визначає міцність ґрунту, два складники – структурне зчеплення та зчеплення зв'язності. Міцність лесових порід зумовлена впливом обох видів зчеплення, однак їх значення різне. Основним є структурне зчеплення. Структурне зчеплення надає породі певну жорсткість, твердість. Наявністю цього виду зчеплення можна пояснити деякі жорсткі зв'язки, які діють між частинками. Структурні зв'язки мають здебільшого пружний характер, який визначає ступінь деформування порід

та їх щільність. Однак у разі порушення структури породи чи ґрунту жорсткі структурні зв'язки порушуються. Ця властивість структурного зчеплення – головна. Зчеплення зв'язності властиве глинистим і лесовим породам будь-якої консистенції, в основному воно визначає їх міцність. Зчеплення зв'язності має трохи інший характер, ніж структурне зчеплення. У лесових супісках і легких суглинках зв'язність має невелике значення і залежить від щільності ґрунту. У разі визначення характеристик міцності ґрунтів на зсувних і зсувонебезпечних схилах необхідно розробити метод обробки результатів випробування ґрунтів на зрушення, за допомогою якого можна було б визначати обидва складники зчеплення.

Одна з основних причин появи зсувів – вихід ґрунтових вод на схил, особливо за наявності улоговини на поверхні водотривкого шару [2; 17]. У місці виходу вод відбувається перезволоження ґрунту, розвивається механічна і хімічна суфозія що, у свою чергу, призводить до зменшення значень характеристик міцності лесового ґрунту.

Численні дослідження лесового ґрунту свідчать, що після зволоження його міцність різко зменшується. Так, за даними Зарецького [24], кут внутрішнього тертя знижується на $3 - 5^\circ$, а зчеплення зменшується в 3 – 5 разів. Аналогічні цифри одержані Абелевим [1]: для лесових ґрунтів Грозного величина зменшення кута внутрішнього тертя становить $3 - 5^\circ$, а зчеплення зменшується у 4 – 5 разів. Цю тенденцію підтверджують дослідження Гільмана [10], Клепікова [12], Яковлева [23] (відбувається зменшення питомого зчеплення c у 1,7 – 2 рази, кута внутрішнього тертя φ – у 1,1 – 1,2 разу), Сергєєва [19] (c зменшується у 2 рази), Коновалова [14] (c – у 3 рази, φ – у 2 рази). Внаслідок цього лесові основи, що мали достатньо високу первинну несучу здатність за природної вологості, значно втрачають міцність після досягнення коефіцієнта водонасичення $S_r = 0,8$ [14]. Причому втрата міцності відбувається і у випадку просідання ґрунтів, що призводить до їх ущільнення. Однак відповідно до діючих будівельних норм ми проводили випробування замоченого протягом незначного часу ґрунту і не враховували вплив потоку ґрунтових вод на нього, що також може призвести до помилок під час визначення стійкості схилу.

Суть роботи. Для підвищення точності розрахунків стійкості зсувонебезпечних схилів необхідно, по-перше, удосконалити метод обробки результатів випробувань для визначення характеристик міцності ґрунту з урахуванням можливості проведення випробувань як за консолидовано-дренованою, так і за неконсолідовано-недренованою схемою і визначення усіх складових частин зчеплення. По-друге, виявити характер впливу ґрунтового потоку на зміну характеристик міцності ґрунту та встановити залежність величини характеристик від тривалості дії ґрунтового потоку й напірного градієнта.

Матеріал і методи досліджень. Процес деформування ґрунту детально був розглянутий Герсевановим [9], який на основі експериментальних даних запропонував таку залежність деформацій від дотичних напружень:

$$\ell = \alpha \tau^k, \quad (1)$$

де ℓ – деформація в результаті зрушення; τ – дотичні напруження; α і k – коефіцієнти, що визначають дослідним шляхом і залежать від схеми випробувань і властивостей ґрунту. Графік залежності дотичних напружень τ від деформацій ΔL наведено на рис. 1.

У результаті аналізу процесу зрушення за постійних нормальних напружень можна виділити декілька фаз розвитку деформацій. Спочатку, за малих значень дотичних напружень, наростання деформацій відбувається повільно і пропорційно зміні дотичних напружень. Зумовлено це тим, що значення напружень не перевищують міцності структурних зв'язків у ґрунті, вони не руйнуються, а їх деформування пружне. Однак після досягнення дотичними напруженнями критичного значення крім ущільнення в ґрунті починають розвиватися локальні зрушення. Спочатку вони виникають лише в окремих зонах, де величина дотичних напружень перевищує міцність зв'язків між частинками, але зі збільшенням дотичного навантаження поширюються на все більші області, із часом з'єднуються і утворюють поверхню зрушення; залежність між напруженнями та деформаціями стає криволінійною. Після утворення загальної поверхні ковзання ґрунт втрачає несучу здатність.

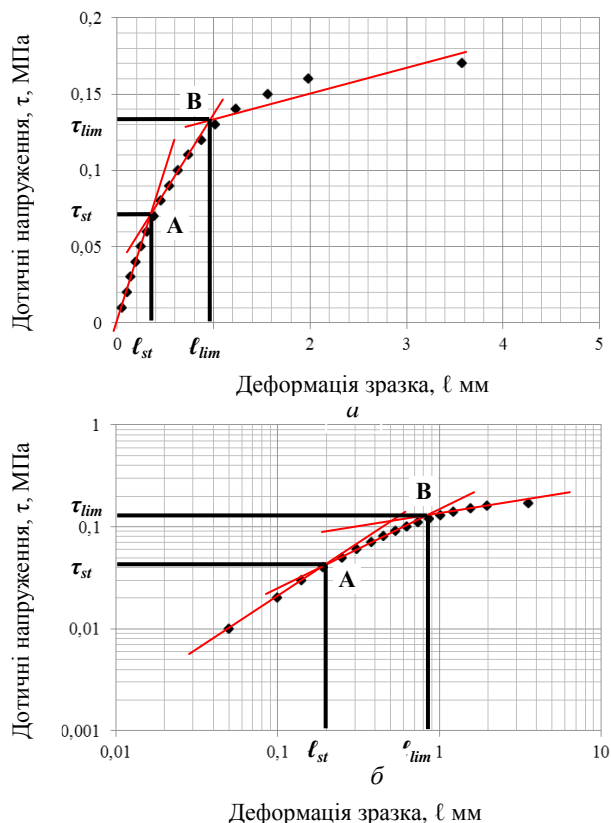


Рис. 1. Графіки залежностей деформацій l від дотичних напружень τ у лінійних (а) та логарифмічних (б) координатах:
 А, В – межі між фазами деформування; l_{st} , τ_{st} , l_{lim} , τ_{lim} – відповідно деформації та дотичні напруження, за яких руйнуються структурні й загальні зв'язки

Таким чином, стан ґрунту в ході випробування на зрушення можна поділити на три фази: 1) ущільнення; 2) утворення та розвиток локальних зрушень; 3) пластичне деформування [15].

На графіку залежності дотичних напружень від деформацій ці три фази можна умовно позначити трьома прямими лініями (рис. 1, *a*). Дотичні напруження, які відповідають точкам розмежування фаз, називають критичними опорами (точки *A* і *B* на графіках). У першій фазі залежність між дотичними напруженнями та деформаціями має лінійний характер, який порушується у другій фазі, тому дотичні напруження, що відповідають межі між першою і другою фазами (перший критичний тиск), називають межею пропорційності. Вони характеризують опір ґрунту, за якого руйнуються його структурні зв'язки, і мають назву структурного опору ґрунту τ_{st} .

Другий критичний опір τ_{lim} називають межею міцності, він відповідає межі між другою та третьою фазами, тобто фазою локальних зрушень і фазою пластичних деформацій.

У ході обробки результатів дослідів у лінійних координатах «дотичні напруження – деформації» дуже часто стикаються з труднощами під час виділення фаз, особливо це стосується переходу від другої до третьої фази. Однак оскільки деформації ґрунту в кожній фазі мають свої особливості, то коефіцієнти α і k у рівнянні (1) будуть різні. Для їх визначення прологарифмуємо рівняння 1 і одержимо залежність

$$\lg \ell = \lg \alpha + k \lg \tau. \quad (2)$$

Таким чином, подавши залежність між дотичними напруженнями і деформаціями в логарифмічних координатах, матимемо графік, на якому значно легше виділити три лінійні ділянки, що відповідають фазам ущільнення, локальних зрушень та пластичних деформацій (рис. 1, *b*).

Для визначення характеристик міцності ґрунту під час розрахунку стійкості схилу досить часто застосовують зрушення, яке проводять за неконсолідовано-недренованою схемою (так зване «швидке зрушення»). У такому випадку тривалість випробування суттєво скорочується, а тривалість витримки одного ступеня навантаження може варіюватися. Для визначення можливості застосування наведеної обробки результатів зрушення було проведено лабораторні випробування зразків однорідних ґрунтів із різним терміном витримки ступеня горизонтального навантаження. У контрольних серіях випробування проводили згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.1-4-96, а в інших – за допомогою обробки результатів у логарифмічних координатах. Порівняння результатів випробувань дозволяє зробити висновок, що значення характеристик міцності ґрунту, одержані з допомогою питомого опору τ_{lim} , не залежать від часу витримки кожного ступеня й відповідають характеристикам міцності, визначеним за ДСТУ Б В.2.1-4-96 за тривалої витримки.

Методику визначення структурних характеристик міцності за величинами питомого опору τ_{st} називають методом структурного зчеплення, а таку ж методику із застосуванням τ_{lim} – методом довготривалого зчеплення.

Таким чином, характеристики міцності досліджуваного ґрунту визначали за результатами випробувань на одноплощинне зрушення з подальшою їх обробкою у логарифмічних координатах для визначення характеристик міцності ґрунту за методами структурного та довготривалого зчеплення. У процесі випробувань зразки кожної серії ділили на дві групи. Для однієї групи зразків зрушення проводили за вертикального тиску, що не перевищував природний (за вертикальних тисків 0,025, 0,05 і 0,075 МПа), а для іншої – згідно з вимогами ДСТУ (відповідно за вертикальних тисків 0,1, 0,2 і 0,3 МПа). Величину ступеня прикла-

дання навантаження брали із урахуванням зручності виявлення характерних точок, що відповідають τ_{st} та τ_{lim} , однак вони не перевищували 1/10 значення нормального тиску. Тривалість витримки кожного ступеня – 1 хв. Застосування такого підходу дозволяє здійснити випробування з необхідною точністю та забезпечити однакові умови для усієї серії зразків.

Особливий вплив на міцність лесових ґрунтів мають ґрунтові води. Шукаючи вихід, ґрунтові води часто рухаються по улоговинам. Під впливом цих потоків у ґрунтах спочатку відбувається фільтрація води, у разі збільшення градієнта – суфозія, а у випадках подальшого збільшення градієнта ґрунт розріджується і переходить у плинний стан.

Для вивчення зміни фізико-механічних властивостей ґрунтів улоговин під дією ґрунтових вод у лабораторних умовах було проведено низку випробувань. Було відібрано зразки лесового суглинку з території зсуву на Інститутській горі в Полтаві. Зразки ґрунту відбирали в кільця з площею поперечного перерізу $A=40\text{ см}^2$ та висотою $h_0=35\text{ мм}$. Після відбору зразків ґрунту у шурфі визначали його фізичні характеристики. Для дослідження впливу фільтрації води кільце з ґрунтом поміщали у склянку і зазор між стінкою склянки та кільцем герметизували. На кільце одягали спеціальні герметичні прокладки, які щільно прилягали до зовнішнього боку кільця та стінок склянки. Схему даного приладу наведено нижче (рис. 2).

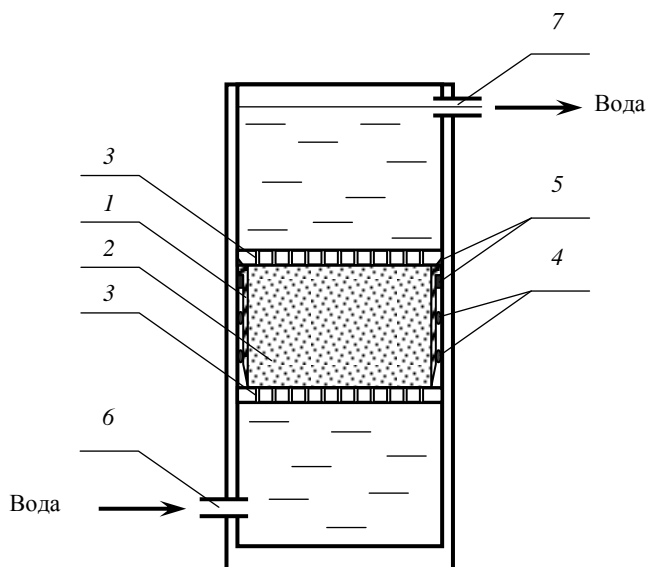


Рис. 2. Схема установки для випробування ґрунту на тривалу дію фільтраційного потоку води:

1 – металеве кільце; 2 – зразок ґрунту; 3 – дірчаті штаmpi; 4 – герметизуючі прокладки; 5 – герметик (епоксидна смола); 6 – отвір для подачі води; 7 – отвір для відведення води

Для вивчення впливу потоку ґрунтових вод на зміни характеристик ґрунту сконструйовано прилад (рис. 3). Через відібрані зразки ґрунту пропускали воду знизу вгору за різних значень напірного градієнта. Гідравлічний, або напірний, гра-

дієнт визначали як відношення різниці рівнів води до і після проходження через зразок до висоти зразка.

Для забезпечення тривалої фільтрації води необхідний запас води зберігали в посудині 1 (рис.3). Постійність напірного градієнта забезпечували підтриманням рівня води в посудині 2 за допомогою поплавцевого клапана 3. Безпосередньо з посудини 2 вода потрапляла в нижню частину приладів для випробування ґрунту на тривалу дію фільтраційного потоку води 4. Після фільтрації через зразок ґрунту 5 вода вільно витікала через отвір 6 у верхній частині приладу. Посудини та прилади для випробування зразків було з'єднано між собою гнучкими трубками для забезпечення постійної фільтрації води за сталого значення напірного градієнта.

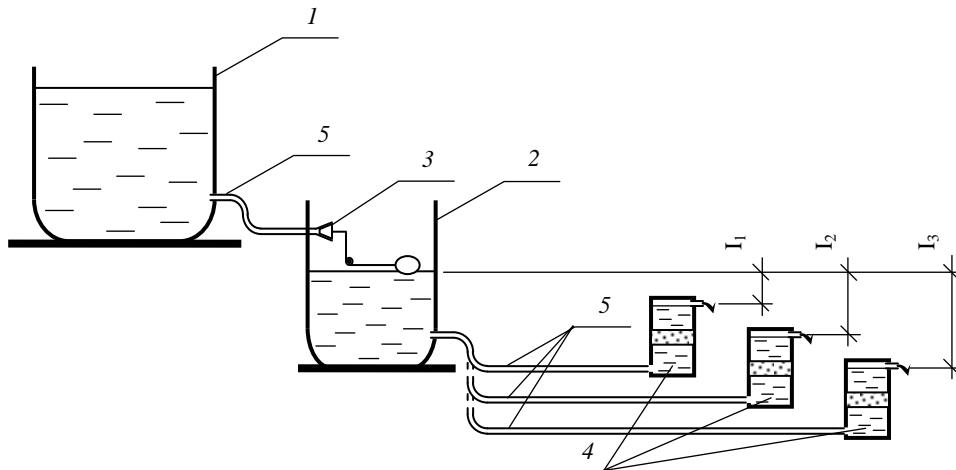


Рис. 3. Схема приладу для визначення впливу фільтраційного потоку на характеристики ґрунту:

1 – бак із водою; 2 – посудина із водою для підтримання постійного напірного градієнта; 3 – клапан поплавцевого типу; 4 – склянка зі зразком ґрунту; 5 – з'єднувальні трубки

Для вивчення впливу напірного градієнта випробовували кілька груп зразків ґрунту, відібраного з одного і того ж зсувного схилу. Випробування кожної групи проводили за різних напірних градієнтів, що мали значення 1, 3 та 5. Високі значення градієнтів обирали для прискорення проведення випробувань у лабораторних умовах. У кожній групі зразки було поділено на серії. Тривалість витримки кожної серії зразків за постійного значення напірного градієнта варіювали в межах від 3 до 18 міс., після чого зразки використовували для визначення механічних характеристик ґрунтів у приладі одноплощинного зрушення.

Для вивчення впливу фільтраційних потоків ґрунтових вод на зміну характеристик ґрунту провели випробування лесового суглинку, відібраного з території зсувонебезпечного схилу на Інститутській горі в Полтаві. У природному стані ґрунт має такі характеристики: щільність ґрунту $\rho=1,595 \text{ т/м}^3$; вологість – $W=0,16$; вологість на межі пластичності – $W_p=0,20$; вологість на межі плинності – $W_L=0,31$; щільність скелета ґрунту – $\rho_d=1,375 \text{ т/м}^3$; коефіцієнт водонасичення – $S_r=0,451$.

Для випробувань відібрали декілька серій зразків, які випробовували за методом одноплощинного зрушення у приладі ПСГ-2М. Кожну серію було поділено на дві частини. Половину зразків використано для визначення характеристик міцності ґрунту за вертикальних тисків відповідно із нормами (за $\sigma=0,1$ МПа, $\sigma=0,2$ МПа та $\sigma=0,3$ МПа). Інші зразки зрушували за вертикальних тисків, значення яких не перевищували природного тиску (за $\sigma=0,025$ МПа, $\sigma=0,05$ МПа та $\sigma=0,075$ МПа). Випробування проводили із застосуванням методу швидкого зрушення. Для визначення характеристик міцності за методом структурного зчеплення ступінь навантаження брали мінімальним. Результати обробляли в логарифмічних координатах.

У першій серії випробовували ґрунт природної вологості. Характерна особливість результатів випробувань такого ґрунту – тривала перша фаза. Водночас третя фаза зрушення проходила дуже різко і виділити її на графіку практично неможливо. Фактично випробувань ґрунту природного стану значення τ_{lim} дорівнювало значенню, яке визначають згідно із нормами (уразі горизонтальної деформації 5 мм). Приклади обробки результатів випробування зразків ґрунту природної вологості подано нижче (рис. 4 – 5).

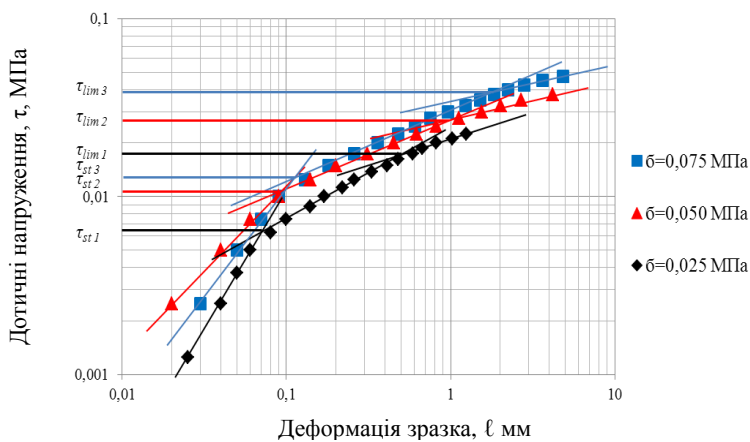


Рис. 4. Результати випробувань водонасиченого ґрунту за $\sigma < \sigma_{пр}$

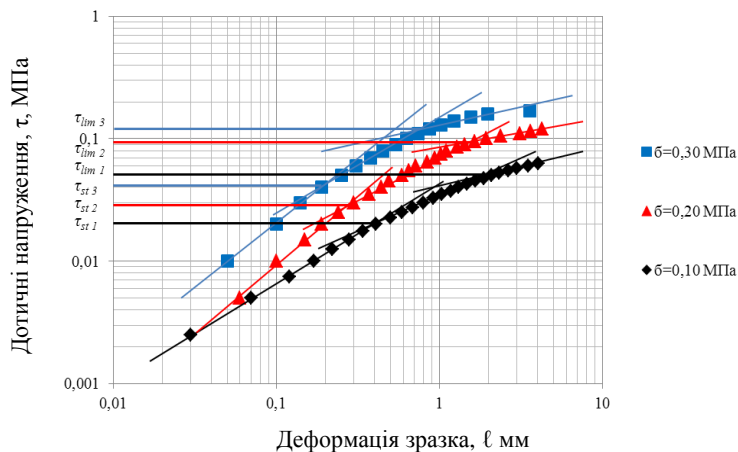


Рис. 5. Результати випробувань водонасиченого ґрунту за $\sigma > \sigma_{пр}$

Насичення ґрунту водою обумовлювало різке зниження значень як τ_{st} , так і τ_{lim} (рис. 4–5). Одночасно зафіксовано появу третьої фази. Це пов'язано з розклинювальною дією води, яка значно послаблює зв'язки між частинками ґрунту.

Наступні серії зразків піддавали дії фільтраційного потоку води зі значенням напірного градієнта 1, 3 і 5. Перші випробування було проведено після 90 діб витримки зразків.

У разі підвищення напірного градієнта до значень 3 і 5 проведення випробувань можливе лише за вертикального тиску, що не перевищує природний, оскільки ґрунт переходить у плинний стан і проведення подальших випробувань за високого вертикального навантаження неможливе.

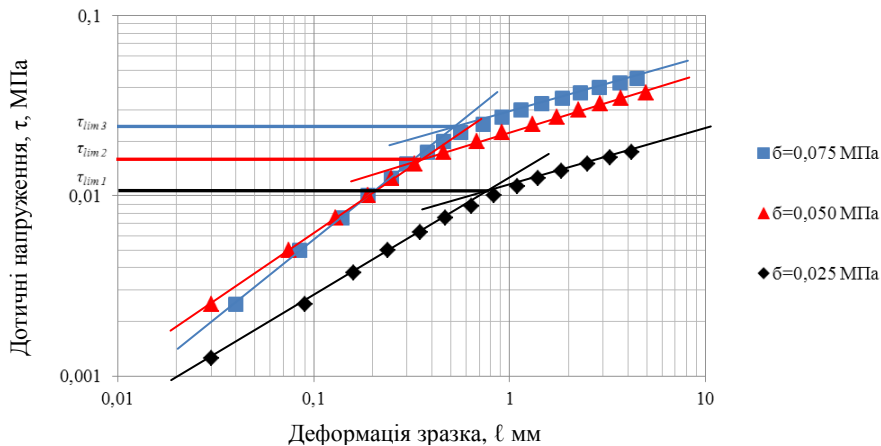


Рис. 6. Результати випробувань ґрунту після фільтрації з напірним градієнтом $I=1$ протягом 540 діб за $\sigma < \sigma_{np}$

У подальшому зразки ґрунту, які були піддані фільтрації протягом визначеного періоду, утратили межу між першою та другою фазами. Фактично тривала фільтрація призвела до втрати структурних зв'язків.

Результати випробування зразків ґрунту на зрушення з більш тривалою витримкою (1,5 року – 540 діб) із напірним градієнтом 1 підтвердили відсутність структурного зчеплення та дали змогу зробити висновок про подальше зменшення довготривалого зчеплення (рис. 6).

Особливо слід відзначити, що зразки, які витримували 180 діб і більше за напірного градієнта $I = 1$, не можна використовувати для випробувань на зрушення за вертикального тиску, більшого за природний, оскільки ґрунт перейшов у плинний стан.

Результати визначення критичних дотичних напружень і характеристик міцності лесового ґрунту подано в табл. 1 – 2.

Аналізуючи результати випробувань, можна виділити декілька характерних моментів. По-перше, обробивши результати випробувань на швидке зрушення відповідно до діючих нормативних документів, ми одержимо значно завищені значення характеристик міцності лесового ґрунту. По-друге, характеристики, одержані в результаті випробувань за вертикальних тисків, що перевищують значення природного тиску, також завищені порівняно зі значеннями характеристик, одержаних за тисків, менших за природний.

Таблиця 1

Результати визначення критичних дотичних напружень

Дотичне напруження τ , МПа	Нормальне напруження σ , МПа					
	$\sigma < \sigma_{пр}$					
	0,025	0,050	0,075	0,10	0,20	0,30
Грунт природної вологості						
Метод структурного зчеплення	0,0200	0,025	0,030	0,045	0,065	0,090
	0,0175	0,025	0,035	0,050	0,060	0,100
Метод довготривалого зчеплення	0,0425	0,055	0,075	0,0825	0,170	0,2125
	0,0475	0,060	0,085	0,0975	0,160	0,2250
За ДСТУ Б В.2.1-4-96	0,0425	0,055	0,075	0,0825	0,170	0,2125
	0,0475	0,060	0,085	0,0975	0,160	0,2250
Водонасичений грунт						
Метод структурного зчеплення	0,0063	0,009	0,0125	0,0175	0,025	0,035
	0,0075	0,010	0,0150	0,0200	0,025	0,035
Дотичне напруження τ , МПа	Нормальне напруження σ , МПа					
	$\sigma < \sigma_{пр}$			$\sigma < \sigma_{пр}$		
	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
1	2	3	4	5	6	7
Метод довготривалого зчеплення	0,0200	0,030	0,0425	0,0525	0,095	0,120
	0,0225	0,0325	0,0475	0,055	0,090	0,130
За ДСТУ Б В.2.1-4-96	0,0255	0,035	0,0475	0,0625	0,120	0,17
	0,0263	0,0375	0,0500	0,0625	0,12	0,17
Грунт після фільтрації протягом 90 діб із напірним градієнтом I=1						
Метод структурного зчеплення	0,005	0,0085	0,012	0,0175	0,028	0,037
	0,005	0,0080	0,0115	0,0175	0,027	0,039
Метод довготривалого зчеплення	0,017	0,028	0,036	0,048	0,085	0,1275
	0,017	0,027	0,037	0,050	0,090	0,1250
За ДСТУ Б В.2.1-4-96	0,0213	0,0363	0,0475	0,0625	0,115	0,1575
	0,0210	0,0350	0,0475	0,0600	0,115	0,1625
Грунт після фільтрації протягом 90 діб із напірним градієнтом I=3						
Метод структурного зчеплення	0,0038	0,0052	0,007	-	-	-
	0,0035	0,0055	0,007	-	-	-
Метод довготривалого зчеплення	0,015	0,022	0,028	-	-	-
	0,014	0,022	0,029	-	-	-
За ДСТУ Б В.2.1-4-96	0,0213	0,0325	0,05			
	0,0210	0,035	0,05			
Грунт після фільтрації протягом 90 діб із напірним градієнтом I=5						
Метод структурного зчеплення	0,003	0,0037	0,005	-	-	-
	0,0028	0,0037	0,0045	-	-	-
Метод довготривалого зчеплення	0,014	0,022	0,028	-	-	-
	0,014	0,021	0,027	-	-	-
За ДСТУ Б В.2.1-4-96	0,0213	0,0375	0,050			
	0,020	0,035	0,050			
Грунт після фільтрації протягом 180 діб із напірним градієнтом I=1						
Метод структурного зчеплення	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
Метод довготривалого зчеплення	0,013	0,024	0,03	-	-	-
	0,012	0,022	0,03	-	-	-
За ДСТУ Б В.2.1-4-96	0,0188	0,0363	0,0475			
	0,0175	0,0338	0,0475			
Грунт після фільтрації протягом 540 діб із напірним градієнтом I=1						
Метод структурного зчеплення	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
Метод довготривалого зчеплення	0,0115	0,0175	0,0250	-	-	-
	0,0105	0,0165	0,0235	-	-	-
За ДСТУ Б В.2.1-4-96	0,0175	0,0338	0,0463			
	0,0175	0,0350	0,0475			

Таблиця 2

Результати визначення характеристик міцності лесового ґрунту

Метод визначення	Характеристика міцності			
	за $\sigma < \sigma_{пр}$		за $\sigma > \sigma_{пр}$	
	ϕ , град	c , кПа	ϕ , град	c , кПа
Ґрунт природної вологості				
Метод структурного зчеплення	15	11,7	13	20,8
Метод довготривалого зчеплення	35	25,8	33	29,2
За ДСТУ Б В.2.1-4-96	35	25,8	33	29,2
Водонасичений ґрунт				
Метод структурного зчеплення	8	3,2	5	10,0
Метод довготривалого зчеплення	25	8,7	20	19,2
За ДСТУ Б В.2.1-4-96	25	14,1	28	11,7
Ґрунт після фільтрації протягом 90 діб із напірним градієнтом I=1				
Метод структурного зчеплення	8	1,6	6	7,2
Метод довготривалого зчеплення	21	7,5	21	10,3
За ДСТУ Б В.2.1-4-96	28	8,4	26	13,3
Метод визначення	Характеристика міцності			
	за $\sigma < \sigma_{пр}$		за $\sigma < \sigma_{пр}$	
	ϕ , град	c , кПа	ϕ , град	c , кПа
Ґрунт після фільтрації протягом 90 діб із напірним градієнтом I=3				
Метод структурного зчеплення	4	2,0		
Метод довготривалого зчеплення	16	7,7		
За ДСТУ Б В.2.1-4-96	30	6,1		
Ґрунт після фільтрації протягом 90 діб із напірним градієнтом I=5				
Метод структурного зчеплення	2	1,9		
Метод довготривалого зчеплення	15	7,5		
За ДСТУ Б В.2.1-4-96	30	6,2		
Ґрунт після фільтрації протягом 180 діб із напірним градієнтом I=1				
Метод структурного зчеплення				
Метод довготривалого зчеплення	19	4,3		
За ДСТУ Б В.2.1-4-96	30	4,2		
Ґрунт після фільтрації протягом 540 діб із напірним градієнтом I=1				
Метод структурного зчеплення				
Метод довготривалого зчеплення	15	4,2		
За ДСТУ Б В.2.1-4-96	30	3,5		

Тривала дія фільтраційного потоку води також призводить до зменшення критичних дотичних напружень, визначених за методом довготривалого зчеплення. У графічному вигляді залежності наведено на рис. 7.

Залежності мають лінійний характер і можуть бути апроксимовані рівняннями вигляду $\tau = At + B$:

$$\text{для } \sigma = 0,025 \text{ МПа } \tau = -0,00001205t + 0,0165 \quad (R=0,933). \quad (3)$$

$$\text{для } \sigma = 0,050 \text{ МПа } \tau = -0,00001665t + 0,0245 \quad (R=0,973). \quad (4)$$

$$\text{для } \sigma = 0,075 \text{ МПа } \tau = -0,00002237t + 0,0331 \quad (R=0,979). \quad (5)$$

У ході порівняння цих залежностей можна чітко прослідкувати їх подібність, тому для виявлення загальної залежності $\tau = f(\sigma, t)$ було вирішено застосувати багатфакторний аналіз, а саме двофакторний.

Для обробки вибрано дані, подані нижче (табл. 3).

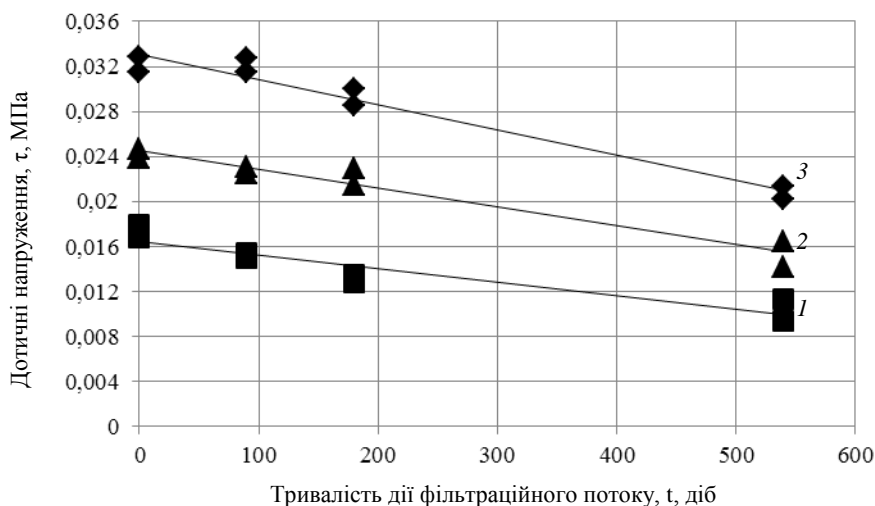


Рис. 7. Залежності критичних дотичних напружень від тривалості дії фільтраційного потоку за різних значень нормальних напружень:
1 – 0,025 МПа; 2 – 0,050 МПа; 3 – 0,075 МПа

Таблиця 3

Значення граничних дотичних напружень
за різних вертикальних тисків і тривалості фільтрації води

Тривалість фільтрації, t, діб	Вертикальний тиск, σ, МПа		
	0,025	0,050	0,075
0	0,0168	0,0239	0,0315
0	0,0179	0,0247	0,0328
90	0,0154	0,0225	0,0327
90	0,0150	0,023	0,0315
180	0,0135	0,0229	0,0285
180	0,0128	0,0215	0,0300
540	0,0113	0,0142	0,0214
540	0,0094	0,0165	0,0202

Обробивши дані, ми одержали залежність

$$\tau = 0,29125 \sigma - 0,000017 \cdot t / t_0 + 0,01013, \quad (6)$$

де t_0 – елементарний відрізок часу; $t_0 = 1$ доба.

Статистичні параметри – коефіцієнт багатofакторної кореляції $R = 0,982$ та критерій Фішера $F = 28,25$ (табличне значення $F = 2,18$).

Таким чином, можна зробити висновок про встановлення функціональної залежності критичних дотичних напружень від тривалості дії фільтраційного потоку та нормального тиску під час проведення випробувань на зрушення.

Висновки. Метод обробки результатів випробувань ґрунту на одноплощинне зрушення в логарифмічних координатах дозволяє точно визначити величину структурного c_{st} та довготривалого (повного) c_{lim} зчеплення, причому визначення цих характеристик за такого способу обробки не залежить від тривалості витримки ступеня навантаження.

Виявлено, що величина характеристик міцності ґрунту, одержаних за результатами випробувань на одноплощинне зрушення, залежить від вертикального тиску у процесі випробувань. Визначення характеристик міцності лесового ґрунту рекомендовано здійснювати за вертикальних тисків, які не перевищують природний, оскільки в іншому разі ми одержимо завищені значення.

Тривалий вплив фільтраційного потоку води на зразки лесового ґрунту призводить до переходу його у плинний стан, за якого визначення механічних характеристик ґрунту за нормального тиску, що перевищує значення природного, практично неможливе. Результати випробувань у випадку меншого тиску дозволяють також зробити висновок про повну втрату лесовим ґрунтом структурної міцності.

Знаючи аналітичну залежність критичних дотичних напружень від тривалості дії фільтраційного потоку, можна спрогнозувати зменшення характеристик міцності лесового ґрунту в часі й забезпечити експлуатацію будівель і споруд чи стійкість схилу.

Бібліографічні посилання

1. **Abelev, Y. M.** Osnovy proektirovaniya i stroitel'stva na prosadochnykh makroporistykh gruntah [Text]: edition / Y. M. Abelev, M. Y. Abelev. – M.: Stroyizdat, 1979. – 271 p.

2. **Bida, S. V.** Pidtoplennja Poltavi ta jogo vpliv na rozvitok zsvnih procesiv. Budivel'ni konstrukcii [Text]: scientific and technical collection / S. V. Bida, Y. J. Velikodnij. – K.: DP NIISK, 2004. – P. 275 – 278.

3. **Bida, S. V.** Osoblivosti viniknennja ta rozvitku zsvnih procesiv na shilah, skladenih лесовими відкладками [Text]: bulletin of the DNU. Geology, Geography / S. V. Bida, O. V. Kuts, K. V. Pidriyko. – D., 2014. – P. 162-167.

4. **Bida, S. V.** Klasyfikacija ulogovyn Poltavs'kogo лесового plato. Resursoekonomni materialy, konstrukcii, budivli ta sporudy [Text]: scientific works / S. V. Bida, Y. J. Velikodnij, A. M. Yagolnik. – Rivne, 2009. – P. 548 – 553.

5. **Demchishin, M. G.** Sovremennaja dinamika sklonov na territorii Ukrainy (inzhenerno-geologicheskie aspekty) [Text]: scientific works /M. G. Demchishin. – K.: Nauk. Dumka, 1992. – 251 p.

6. **Denisov, N. Y.** Stroitel'nye svojstva lessa i lessovidnyh suglinkov [Text] / N. Y. Denisov. –M.: Stroyizdat, 1953. – 253 p.

7. DSTU B V. 2.1-4-96. Ґрунти. Metodi laboratorного визnachennja harakteristik micnosti i reformovanosti [Text]. – K.: MNTKS, 1997. – 55 p.

8. DSTU B V. 2.1-7-2000. Ґрунти. Metodi pol'ovogo визnachennja harakteristik micnosti i deformativnosti [Text]. –K.: MNTKS, 2001. – 54 p.

9. **Gersevanov, N. M.** Teoreticheskie osnovy mehaniki gruntov i ih prakticheskoe primenenie [Text] / N. M. Gersevanov, D. E. Polshyn. – M.: Stroyizdat, 1948. – 248 p.

10. **Gilman, J. D.** Osnovanija i fundamenty na lessovykh prosadochnykh gruntah [Text] / J. D. Gilman. – Rostov n/D: RISI, 1991. – 217 p.

11. Inzhenerna geologija. Mehanika g'runtiv, osnovy i fundamenty [Text]: pidruchnyk / M. L. Zotsenko [et al.]. – Poltava: PNTU, 2004. – 568 p.

12. **Klepikov, S. N.** Raschet sooruzhenij na deformiruemom osnovanii [Text] / S. N. K2lepikov. – K.: NIISK, 1996. – 103 p.

13. **Kraev, V. F.** Inzhenerno-geologicheskaja harakteristika porod lessovoj formacii Ukrainy [Text] / V. F. Kraev. – K.: Nauk. Dumka, 1971. – 228 p.

14. **Konovalov, P. A.** Osnovanija i fundamenty rekonstruiruemyh zdanij [Text] / P. A. Konovalov. – M.: VNIINTPI, 2000. – 320 p.

15. **Luchkyn, M. A.** Issledovanie svojstv glinistyh gruntov dlja geotehnicheskogo modelirovanija osnovanij. Osnovanija i fundamenti [Text] / M. A. Luchkyn, V. M. Ulytskyj. – M.: Stroyizdat, 2006. – P. 7 – 9.

16. **Maslov, N. N.** Osnovy inzhenernoj geologii i mehaniki gruntov [Text] / N. N. Maslov. – M.: Higher School, 1982. – 511 p.

17. Osoblivosti ocinjuvannja stijkosti shiliv Poltavskogo lesovogo plato. Budivel'ni konstrukcii [Text]: scientific and technical collection / M. L. Zotsenko, Y. J. Velikodnij, O. V. Bort, S. V. Bida. – K.: NDIBK, 2008. – № 71(2). – P. 178 – 189.

18. Osoblivosti rozvantazhennja rruntovih vod Poltavskogo plato [Text]: mater. 2-i mizhnar. nauk.-prakt. konf. / Y. J. Velikodnij [et al.]. – K.: Znannja, 2003. – P. 53 – 56.

19. **Sergeev, E. M.** Gruntovedenie [Text] / E. M. Sergeev. – M.: Izdat. Mosk. Univ., 1959. – 387 p.

20. **Velikodnij, Y. I.** Zahyst terytorij vid zsuviv [Text]: navchal'n. Posib. / Y. I. Velikodnij. – P.: LLC «Printing Center» Skaytek, 2006. – 387 p.

21. **Velikodnij, Y. I.** Lozhbiny opolznevyh sklonov Poltavskogo plato i ih raznovidnosti. Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie [Text]: collection of scientific papers / Y. I. Velikodnij, S. V. Bida, A. N. Yagolnik. – D.: PGASA, 2009. – P. 86 – 89.

22. **Yaholnyk, A. M.** Vznachennja strukturnogo zcheplennja zv'jaznogo rruntu metodom obertal'nogo zrizu [Text]: resursoekonomni materiali, konstrukcii, budivli ta sporudi / A. M. Yaholnyk. – Rivne, 2009. – P. 570 – 577.

23. **Yakovlev, A. V.** Osoblyvosti proektuvannja, budivnyctva, ekspluatacii' budivel' i sporud na lesovomu g'runti ta zsvonebezpechnij terytorii' Ukrai'ny [Text] / A. V. Yakovlev, Y. L. Vinnikov. – K.: NMK VO, 1992. – 251 p.

24. **Zaretsky, J. K.** Vjazkoplastichnost' gruntov i raschety sooruzhenij [Text] / J. K. Zaretsky. – M.: Stroyizdat, 1988. – 352 p.

Надійшла до редакції 04.03.2015