

УДК 624.131.37, 624.131.537

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ МІЦНОСТІ ҐРУНТІВ У ЗОНІ ЗСУВУ НА ПРИЛАДІ КРУТІННЯ

А. І. БІЛЕУШ*, О. І. КРИВОНОГ*, В. Ю. ФІЛІМОНОВ* С. Б. ЗАЙЧЕНКО**

* Інститут гідромеханіки НАН України, Київ
03680 Київ – 180, МСП, вул. Желябова, 8/4
imggs@ukr.net

** КАН "ДЕВЕЛОПМЕНТ", Київ
01032 Київ, вул. Льва Толстого, 57, БЦ 101 Tower, 26 эт.
office@kandevlopment.com

Получено 27.04.2014

Експериментальними дослідженнями на приладі крутіння встановлено, що міцність ґрунту природної вологості при дилатансії збільшується, а міцність насиченого водою ґрунту в зоні зсуву – падає. Перехід ґрунту в тиксотропний стан відбувається під впливом динамічних, вібраційних або додаткових навантажень і супроводжується різким зниженням механічної міцності ґрунту. При цьому багато видів ґрунтів при певній щільності в зоні деформування з твердого стану переходять у неньютонівську рідину другої групи, яка міцності на зсув не має.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: дилатансія, тиксотропія ґрунту, зсув, крутіння, міцність ґрунтів

Експериментальними дослідженнями на приборі кручення встановлено, що міцність ґрунту природної вологості при дилатансії збільшується, а міцність насиченого водою ґрунту в зоні зсуву – падає. Перехід ґрунту в тиксотропне состояние происходит под действием динамических, вибрационных или дополнительных нагрузок и сопровождается резким снижением механической прочности ґрунта. При этом многие виды ґрунтов при определенной плотности в зоне деформирования из твердого состояния переходят в неньютоновскую жидкость второй группы, которая прочности на сдвиг не имеет.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дилатансия, тиксотропия ґрунта, сдвиг, кручение, прочность ґрунтов

On the device torsion it is set experimental researches, that strength of soil of natural humidity increases at a dilatancy, and strength of saturated by water soil falls in the area of cut. Go to thixotropies soil condition is influenced by dynamic, vibration and additional loads and is accompanied by a sharp decrease in the mechanical strength of the soil. Thus many types of soils at a certain closeness in the area of deformation from the hard state pass to the non-newtonian liquid of the second group, which strength on a change does not have.

KEY WORDS: dilatancy, thixotropies of soil, shear, torsion, soil strength

ВСТУП

Зсуви, які виникають під дією гравітаційних сил в різних частинах світу, часто завдають великих збитків. При дослідженні зсувів встановлено, що деякі з них рухаються дуже повільно, а інші – швидко. Повільні зсуви можливо розраховувати по відомим законам механіки ґрунтів і вони відповідають рівнянням стійкості. Зсуви, що рухаються швидко, – це складна динамічна структура. Дослідження ініціації і руху швидких зсувів вивчають у багатьох країнах світу. На рис. 1 наведено наслідки дії швидких і повільних зсувів.

Куренівська трагедія в м. Києві сталася 13 березня 1961 р. До її початку, на протязі певного часу, мав місце поганий нагляд за гідротехнічними спорудами (водоскидні колодязі були засмічені) і відвід води через них був недостатній. Внаслідок рясних опадів вільна ємкість за греблею на протязі двох вихідних днів була заповнена, і через дамбу ще вночі почали переливатися струмені води до-

щового стоку. В греблі поверхневий потік почав формувати яр, в який хлинула вода зі створеного водосховища. Від 8 до 9 години ранку на вул. Фрунзе глибина водного потоку була більше метра. З одного і другого боків біля штучної річки накопичились трамваї, тролейбуси, автобуси, повністю забиті людьми. Значний потік промив глибокий яр, в який зсунулись значні маси насиченою водою ґрунту. Внаслідок струсу маси водонасиченого ґрунту перетворились у в'язку рідину. Початкова висота валу з пульпи сягала 14 м. Така рідка маса ґрунтів за лічені секунди ринулась вниз зі швидкістю 5 м/с. О 9.30 пульпа дісталася вул. Фрунзе та залила площу близько 30 га.

В районі вул. Фрунзе висота валу зменшилась вдвічі. Поступово розріджена пульпа ставала твердою. В такому вигляді висота цієї маси досягла 3 м. Трамваї, тролейбуси, автобуси з людьми (деякі з них перевернуло, знесло вниз) були повністю накріті пульпою. Маса людей живими була похована під пульпою. Практично повністю зни-



Рис. 1. Швидкі (верхній ряд) та повільні (нижній ряд) зсуви:
 1 – Куренівська трагедія, м. Київ; 2 – зсув у Минамата, префектура Кумамото, Японія;
 3 – зсув, що розриває дерево і дім, в Тунісі; 4 – повільний зсув, що розриває дім, в м. Києві

щено трамвайне депо ім. Красіна, кілька десятків його працівників загинули. Куренівська катастрофа знищила 22 приватні одноповерхові будинки, 5 двоповерхових, 12 одноповерхових будинків державного фонду, два гуртожитки та вбила сотні людей.

Зсувом в Японії, що перетворився на селевий потік, який показано на рис. 1, знищено 15 будинків, убито 15 чоловік.

Зсуви, які зміщуються з невеликою швидкістю, не створюють загрози життю людей і мають менш катастрофічні наслідки.

Значні досягнення у вивченні фізики руйнування ґрунтів та динаміки зсувів отримані проф. К. Sassa і його колегами в Науково-дослідному інституті по запобіганню лихам при Університеті Кіото, Японія [1]. З 1992 р. до теперішнього часу ними розроблено кілька типів приладів (DPRI – 3, 4, 5, 6, 7) по вивченню зсувів та селевих потоків в Японії. Такі прилади дозволяють моделювати формування зони зрушення і вивчати динаміку швидкого зміщення ґрунту та інші явища, які відбуваються у високошвидкісних зсувах. Дослідження в Японії на приладах DPRI проводять у рамках Міжнародної програми по зсувах M101 та згідно завдань Міжнародного консорціуму по зсувах

(ICL) і Організації Об'єднаних Націй.

При розрахунках стійкості усіх видів ґрунтів в основах споруд, укосах насипів та природних схилах необхідно знати граничні характеристики міцності ґрунтів, які визначаються експериментально з урахуванням впливу порового тиску при зрушенні в приконтактній зоні, що межує з стійкими породами. Такими дослідженнями опору зрушенню ґрунтів у приконтактній зоні широко займаються в Росії, Японії, США та інших країнах.

1. КОРОТКИЙ ОГЛЯД РОБІТ ПО ДОСЛІДЖЕННЮ МІЦНОСТІ ҐРУНТІВ

Ґрунти є складними багатоконпонентними системами, що складаються з трьох фаз: твердої, рідкої і газоподібної. До твердої фази відносяться мінеральні частки ґрунту. До рідкої складової відноситься вода, кількість якої залежить від виду ґрунту, його вологості, температури і засоленості. Газоподібна фаза представлена парами води і газами. Об'ємне співвідношення цих складових для більшості глинистих і піщаних ґрунтів різне. Залежно від виду ґрунту, напруженого стану та його щільності об'ємне співвідношення між фазами мінеральних частинок, води та газу міняється, що істотно впливає на будову і властивості ґрунтів та

їхню міцність.

Механічні властивості ґрунтів обумовлені внутрішніми зв'язками (зчепленням і тертям) між компонентами, що складають ґрунти.

Розрізняють три основні види внутрішніх зв'язків: молекулярні, цементаційні і структурно-текстурні, які визначаються будовою і складанням ґрунтів. Вони обумовлені процесами геологічного формування гірських порід.

Коли в ґрунтах відсутні або зруйновані цементаційні і структурно-текстурні зв'язки, то при дії напружень в них розвивається повзучість. Повзучість – здатність ґрунтів розвивати пластичні деформації при незмінних напруженнях. Явище релаксації полягає в розслабленні напружень у ґрунтах при незмінній деформації.

Реологічні властивості ґрунтів мають вирішальне значення при оцінці їхньої міцності в приконтатній зоні. Пластичні деформації течії і релаксація напруження протікають при тривалій дії зовнішнього навантаження і пов'язані з пластичними деформаціями на контактах мінеральних часток, в'язкою течією води, зрушенням і перерозподілом мінеральних часток.

Залежно від часу дії зовнішнього навантаження розрізняють миттєву і тривалу міцність ґрунтів. *Міцність* – це здатність ґрунтів сприймати навантаження без руйнування і утворення значної залишкової деформації. Під міцністю ґрунтів розуміють їхню властивість у певних умовах сприймати дію зовнішніх зусиль без руйнування. Межа міцності ґрунту – це така межа, при перевищенні якої настає практично повне руйнування ґрунту, і він не може сприймати зусилля, що діють на нього. Межа міцності виражається чисельним значенням дотичного напруження або девіатора напруження і має розмірність напруження. Під терміном "межа міцності" розуміють стан ґрунту, відповідний залишковому рівню напруження. При виникненні великих деформацій (> 3–5 %) визначають міцність ґрунту в позаграничному стані, коли параметри міцності змінюються від пікового значення до залишкових значень.

До теперішнього часу розроблено більше двох десятків умов міцності ґрунтів. Огляд відомих умов міцності приведено у ряді робіт (О.І. Боткін, 1940; В.Г. Федоровський, 1985; М.В. Малишев, 1994 та ін.). Згідно класифікації, запропонованої Chen W.-F. (1984), усі умови міцності розділяють на однопараметричні і двопараметричні моделі. До однопараметричних моделей відносяться умови міцності Треска (1864), Мізеса (1913), Lade-Duncan (1975). До двопараметричних моделей відносяться умови, запропоновані Мором–Кулоном

(1773, 1882). О.І. Боткіним (1940), Drucker–Prager (1952), М.В. Малишевим та ін. Запропоновано також умови міцності або моделі ґрунту, які називають багатопараметричними. Серед них моделі авторів: Rosco et al. (1968); Sandler–DiMaggio (1971, 1976); Vermeer (1978); Desai (1984); Prevost (1982); Ю.К. Зарецького (1983); Dafalias (1985). До найбільш складних з них входить до 10 незалежних параметрів, які визначають на основі дуже складних і дорогих дослідів.

При навантаженні ґрунту в приладі для випробувань за характеристичним порогом ґрунт при певній щільності і величині деформації розширюється. Розширення ґрунту при зрушенні або збільшення його об'єму називають *дилатансією*.

Лабораторні випробування показують, що існує так званий характеристичний поріг, при якому спостерігається перехід від умов стискування зразка ґрунту до його розширення (дилатансії). Додатковий опір зсуву, що має місце при дилатансії, визначають через кут дилатансії ψ . Експериментально кут дилатансії визначити складно, і здебільше його встановлюють через кут внутрішнього тертя φ по залежності між φ і ψ . В роботі [2] додатковий опір зсуву, що виникає за рахунок дилатансії, рекомендується враховувати введенням додаткової величини зчеплення (зачеплення), на чому в свій час наполягав В.А. Флорін [3].

Характер поведінки ґрунтів при складному напруженому стані є багатостороннім, тому велику кількість досліджень було присвячено цим питанням. У класичній механіці ґрунтів проблеми, як правило, вирішуються на основі ідеальної пружної моделі, де деформації і стійкість задано одним значенням характеристик міцності і деформаційних модулів. В основному використовуються критерії Треска і Мізеса. Складніші рішення задач з наближенням до реальних умов отримують при використанні пружно-пластичної моделі.

2. ПРИЛАД ПО ДОСЛІДЖЕННЮ МІЦНОСТІ ҐРУНТІВ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження, основною метою яких було визначення причини, яка спонукає частину зсувів рухатися з катастрофічною швидкістю, проводили на приладі кругіння [4] методом кільцевого зсуву. Загальний вигляд приладу представлено на рис. 2. Його конструкція дозволяє задавати швидкість деформації зсуву в діапазоні 0.0001–25.0 мм/хв., підтримувати її постійною або змінювати під час експерименту. Величина вертикального наванта-

ження підтримується постійною в автоматичному режимі з точністю 0.1 %. Вертикальна деформація зразка ґрунту фіксується датчиком переміщень з точністю 0.01 мм. Величина порового тиску в зразку ґрунту фіксується двома датчиками, один з яких розташований в кільці, а другий – по центру зразка. Задані параметри і показання датчиків до 200 разів за секунду записуються в файл формату txt, а також в режимі реального часу виводяться на екран ПК.

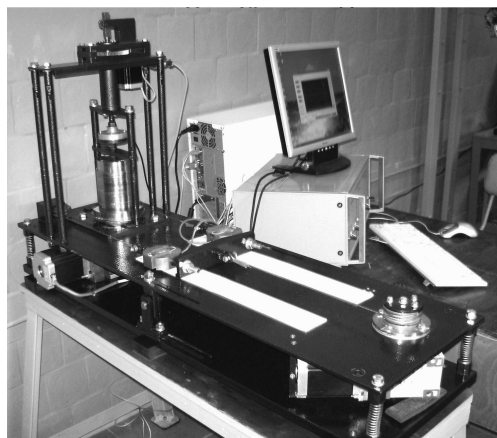


Рис. 2. Прилад крутіння

Після завантаження зразка ґрунту в стакан з кільцею, прикладання і стабілізації вертикальної деформації підключали привід і проводили випробування зразка ґрунту на зсув в умовах кільцевої деформації крутіння. Досягнувши стабілізації зусилля і визначивши величину граничного опору зразка ґрунту при заданому вертикальному навантаженні, відключали привід і приєднували підвіску для гир. Після цього рівномірно навантажували гирі до величини граничного опору зразка ґрунту зсуву і прикладали динамічні навантаження, збільшуючи частоту коливань, чи повільно довантажували підвіску до моменту швидкого зсуву ґрунту. При дослідженні деяких зразків ґрунтів були поодинокі випадки, коли підвіска з гирями, загальна вага яких була меншою за граничний опір ґрунту при зсуві, з прискоренням падала додолу. Однак у більшості дослідів деформації на зсув швидко досягали стабілізації. Процес зсуву також фіксувався на відеокамеру, що надалі дозволяло визначити швидкість зсуву та його прискорення. Після закінчення випробування і розбирання стакану з кільцею проводили фотозйомку зразка з метою визначення товщини зони зсуву δ . На рис. 3 розміщено одну з таких фотографій.

Дослідження проводились для 10 різновидів

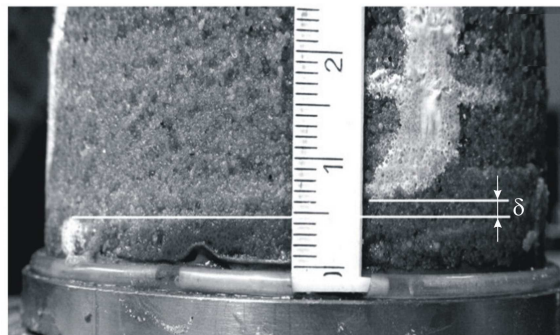


Рис. 3. Вигляд зразка ґрунту після зсуву

ґрунтів при 3–4 величинах вертикальних стискаючих напруженнях P . Для 5 з них, гранулометричний склад яких показано на рис. 4, нижче наведено результати досліджень.

Підготовку зразків ґрунтів, товщина яких складала 34–36 мм, проводили у відповідності до вимог ДСТУ Б В.2.1-4-96 (ГОСТ 12248-96) "ґрунти. Методи лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости" [5]. Перед проведенням випробувань визначали фізичні характеристики ґрунтів по ГОСТ 5180–84.

У випадку випробувань зразків природної щільності і вологості, набір кілець необхідної висоти за допомогою преса задавлювався в моноліт, при цьому використовували спеціальне ріжуче кільце, яке одягалось на нижнє робоче кільце стакану. Поряд з цим з моноліту відбирались зразки для визначення фізичних характеристик ґрунту. Якщо випробували зразок з порушеною структурою, його завантажували в стакан з кільцею і при необхідності ущільнювали. Стакан кільцею разом з ґрунтом зважували, що дозволяло, знаючи вихідну вагу стакану кільцею і висоту зразка, в подальшому визначити його щільність.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Нижче викладено частину результатів випробувань ґрунтів на зсув. На початку наведемо один результат дослідження на зсув крупнозернистого піску природної вологості в приладі крутіння (рис. 5). Більш детально дослідження міцності сипучих ґрунтів наведено в [2].

Коли по площині ковзання величини нерівностей малі та зачеплення відсутні (дилатансії не існує), то величина площі дотику практично не впливає на зусилля тертя. Цим пояснюється висунуте ще Кулоном положення про незалежність сили тертя від площі тертя тіл. Для сипучих ґрунтів



Рис. 4. Гранулометричний склад досліджених ґрунтів

зазначене положення не завжди має місце. З рис. 5 чітко видно, що на опір зсуву впливає зачеплення частинки піску за частинку. При цьому опір зсуву змінюється при переміщенні часток ґрунту в зоні зсуву неупорядковано і неперіодично. Виходячи з цього, слід наголосити, що для сипучих ґрунтів постійно збільшувати опір зсуву на кут дилатансії ψ недоцільно. Визначивши величину опору зсуву сипучого ґрунту, неможливо чітко розділити її на частини, які пов'язані з тертям та дилатансією. За пропозицією Д.Ю. Соколовського [6] частину опору на зсув, яка пов'язана з дилатансією, слід вважати зчепленням.

З рис. 5 видно, що при дилатансії об'єм ґрунту збільшується. Якщо до початку зсуву після стабілізації деформації від вертикального навантаження провести фіксацію верхнього штамп, то при зсуві збільшуються стискуючі напруження внаслідок дилатансії і у зразку ґрунту зростає опір зсуву. Ступінь зростання величини опору на зсув залежить від попереднього вертикального напруження, щільності зразка і гранулометричного складу ґрунту. При цьому опір на зсув крупнозернистого піску зростає на 80–90 %. Гранулометричний і механічний склад ґрунтів істотним чином впливає на характеристики міцності. При зсуві проходить значне ущільнення пухких ґрунтів. Для щільних сипучих ґрунтів на початку крутіння ущільнення невелике, а надалі відбувається зменшення щільності (дилатансія).

Нижче наведено частину результатів досліджень міцності різновидів ґрунтів на приладі крутіння.

На рис. 6 показано результати дослідження на

зсув зразка ґрунту з крупнозернистого піску при $P = 0.1$ МПа. Після прикладання до зразка величини граничного напруження на зсув і стабілізації деформації зсуву включили вібратор. Деформації на зсув активізувались і підвіска з гирями почала набирати прискорення $0.3g$. Опір ґрунту зсуву зменшився на 30 %. На початку активізації зсуву поровий тиск у зразку змінився, датчик по центру зразка показав підвищення порового тиску, а на кільці – його зниження.

На рис. 7 приведено результати дослідження на зсув зразка ґрунту з середньозернистого піску при $P = 0.3$ МПа. Після встановлення гир і забезпечення натягу троса, рівного величині граничного напруження на зсув та стабілізації деформації зсуву, включили вібратор. Деформації швидко активізувались і підвіска з гирями набрала прискорення $0.92g$.

Поровий тиск по двом датчикам зріс в 2.8 рази порівняно з попереднім дослідом, причому два датчики показали підвищення порового тиску. Опір ґрунту на зсув зменшився в 20 разів.

На рис. 8 показано результати дослідження на зсув середньозернистого піску при $P = 0.2$ МПа. Після прикладання до зразка величини граничного напруження на зсув і стабілізації деформації крутіння активізацію деформації зсуву проводили за рахунок збільшення зусиль зсуву за допомогою додаткового підкладання на підвіску гир невеликої ваги. Після зрушення підкладання гир на підвіску призупиняли і вели спостереження за динамікою зсуву. Зсув відбувався з прискоренням $0.90g$. Поровий тиск зріс у датчику, що розташований по центру зразка на меншу величину, чим

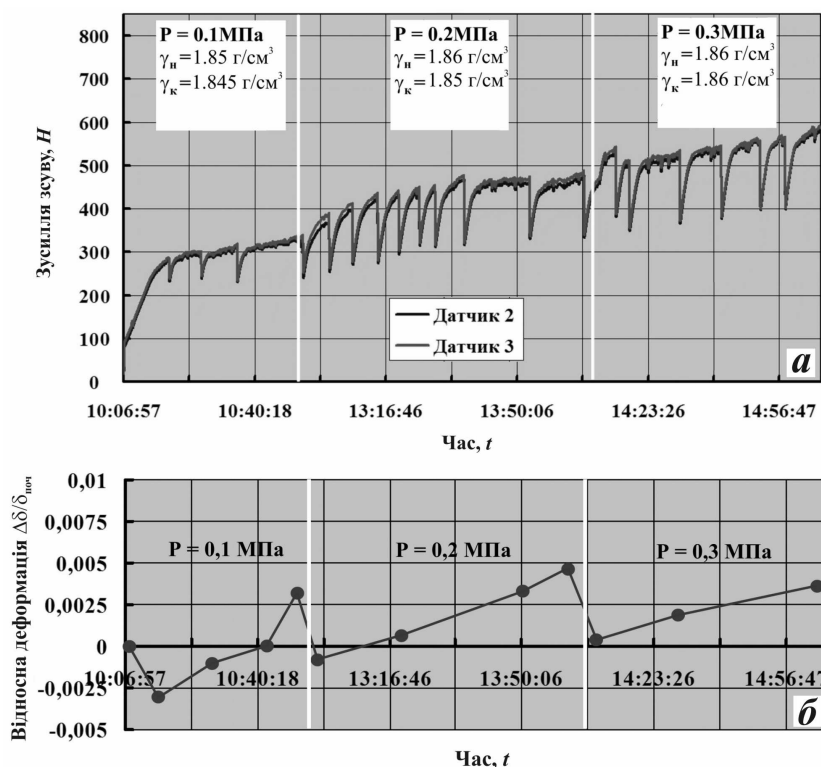


Рис. 5. Приклад дослідження зразка крупнозернистого піску на зсув: а – зусилля зсуву для трьох величин P ; б – відносна деформація; ($\delta_{\text{поч}}$ – початкова висота зразка ґрунту, мм, $\Delta\delta$ – величина вертикальної деформації, мм)

у досліді, показаному на рис. 7. Порівний тиск у датчику, що розташований на кільці, зменшився. Опір ґрунту на зсув зменшився в 12 разів.

Розглянемо далі результати дослідження на зсув дрібного піску, що наведені на рис. 9. Дослід проводився при напруженні стиснення $P = 0.2 \text{ МПа}$. Після прикладання до зразка величини граничного напруження на зсув і стабілізації деформації крутіння, активізацію деформації зсуву проводили за рахунок добавок невеликих за вагою гир на підвіску. Після зрушення зразка підвіска з гирями почала набирати прискорення $0.85 g$. Порівний тиск зріс у датчику, що розташований по центру зразка ґрунту. Збільшення порового тиску у датчику, який розташований в кільці, сталося з запізненням і співпадає з осадкою зразка. Опір ґрунту на зсув зменшився в 17 разів.

Результати дослідження на зсув дрібного піску при $P = 0.1 \text{ МПа}$ показано на рис. 10. Після прикладання до зразка величини граничного напруження на зсув і стабілізації деформації крутіння активізацію деформації зсуву добивались довантаженням додаткових гир. Особливість дослідження, показаного на рис. 10, в тому, що порівний тиск у датчиках виник з запізненням на 0.7 с після початку

активізації деформацій зсуву.

Результати дослідження на зсув сушіску при $P = 0.3 \text{ МПа}$ показано на рис. 11. Після прикладання до зразка величини граничного напруження на зсув і стабілізації деформації крутіння, активізацію деформації зсуву добивались довантаження додаткових гир. Характерною особливістю дослідження є те, що порівний тиск у датчику на кільці збільшився до початку розвитку активної деформації зсуву. Сама інтенсивність зсуву була меншою, ніж у дрібному піску (рис. 9). Опір ґрунту на зсув зменшився в 3 рази.

Наостанок наведемо результати дослідження на зсув глини, які проведено при $P = 0.2 \text{ МПа}$ і показано на рис. 12. Після прикладання до зразка величини граничного напруження на зсув і стабілізації деформації крутіння активізацію деформації зсуву добивались навискою додаткових гир. Після активізації зсуву додання гир було призупинено. Деформація зсуву продовжувалась практично без прискорення. Підвищення або зниження порового тиску в кожному з датчиків на протязі зсуву проходило хаотично, без встановлення певної закономірності. Опір глини на зсув зменшився на 5 %.

Отримані результати досліджень можна пояснити

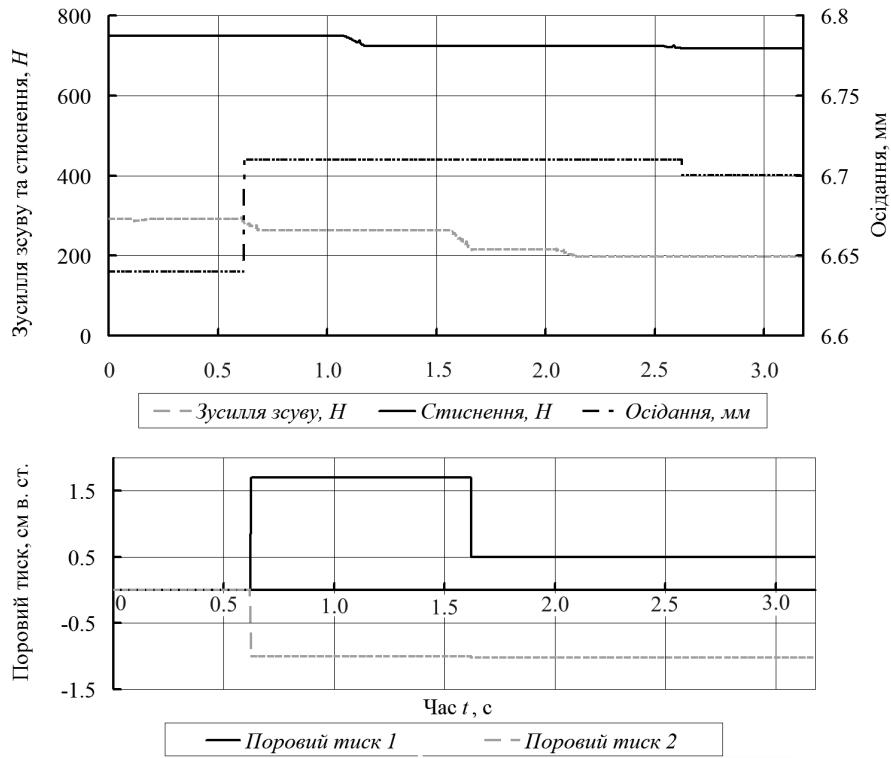


Рис. 6. Результати дослідження на зсув крупнозернистого піску при $P = 0.1$ МПа

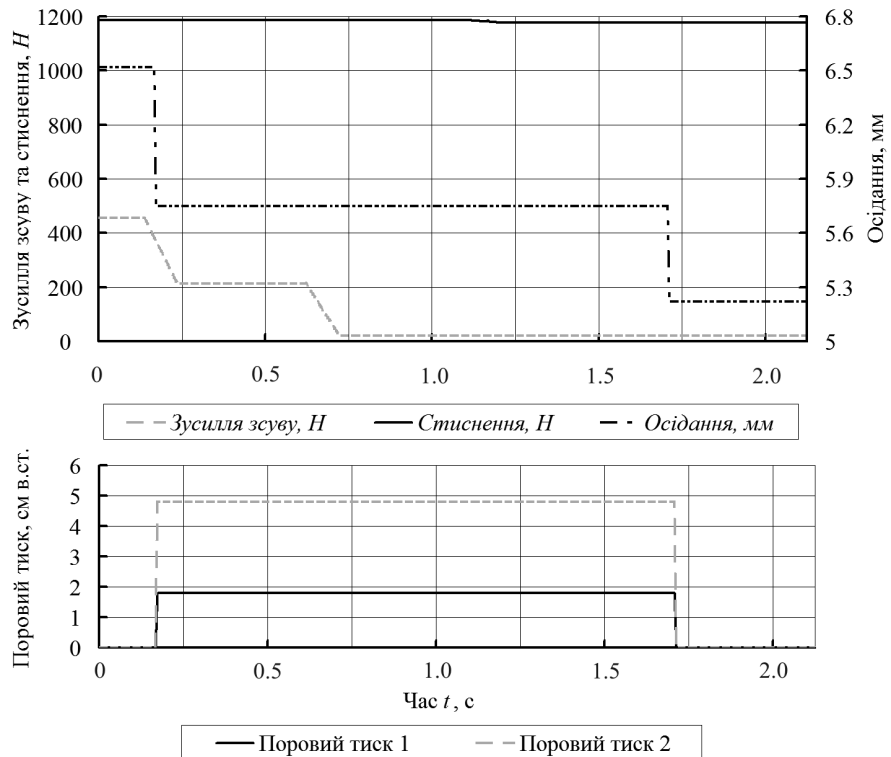


Рис. 7. Результати дослідження на зсув середньозернистого піску при $P = 0.3$ МПа

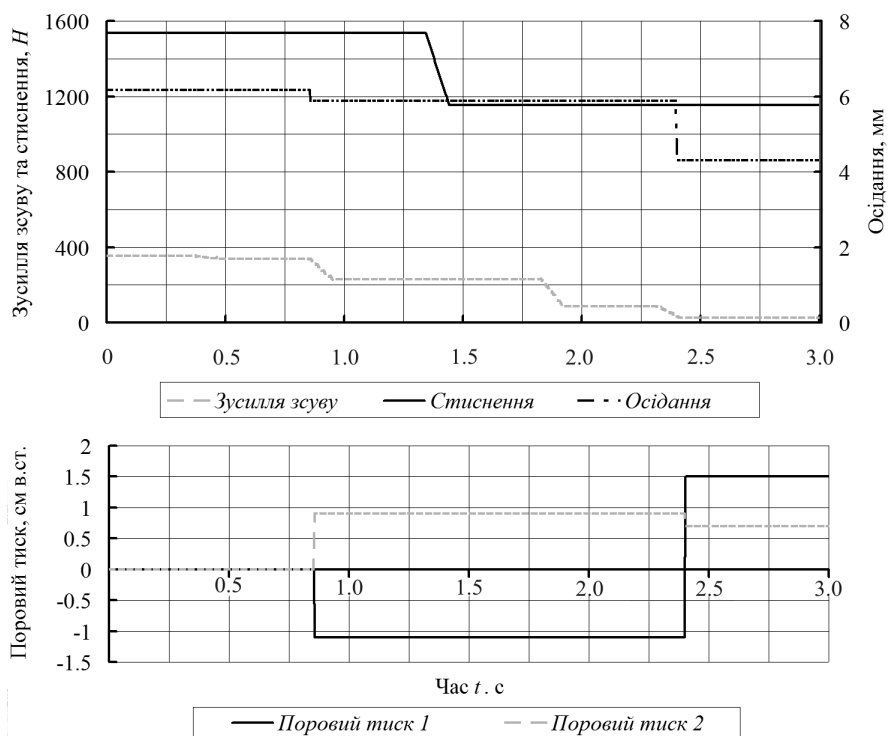


Рис. 8. Результати дослідження на зсув середньозернистого піску при $P = 0.2$ МПа

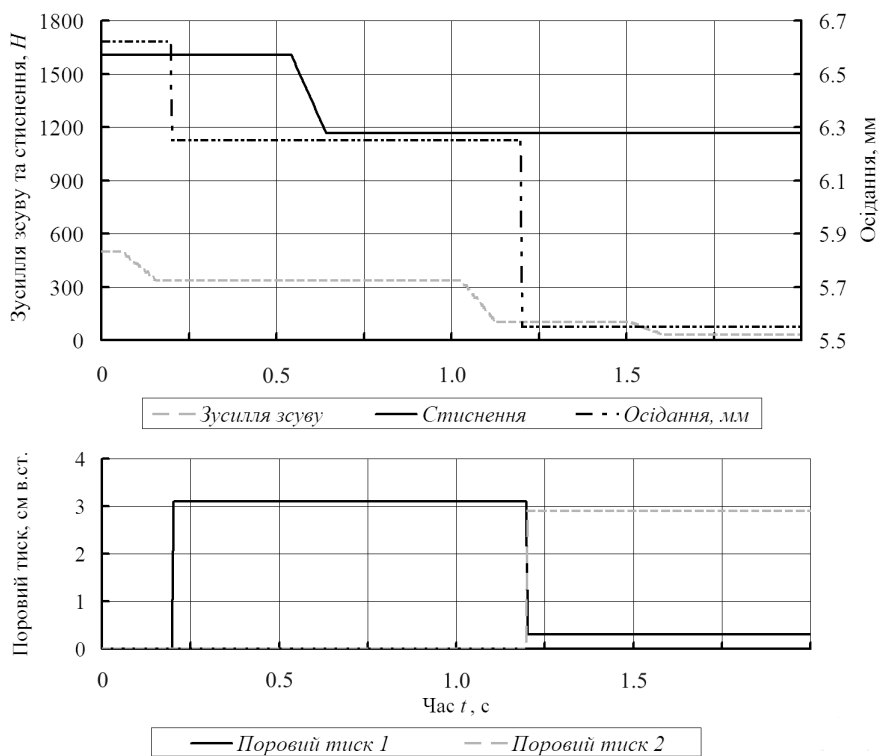


Рис. 9. Результати дослідження на зсув дрібного піску при $P = 0.2$ МПа

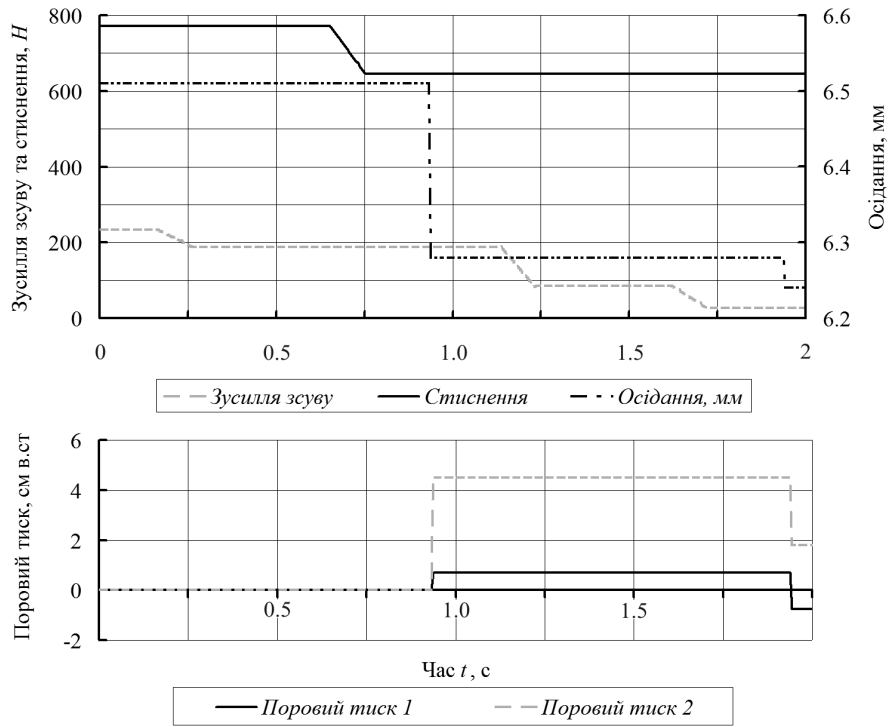


Рис. 10. Результати дослідження на зсув дрібного піску при $P = 0.1$ МПа

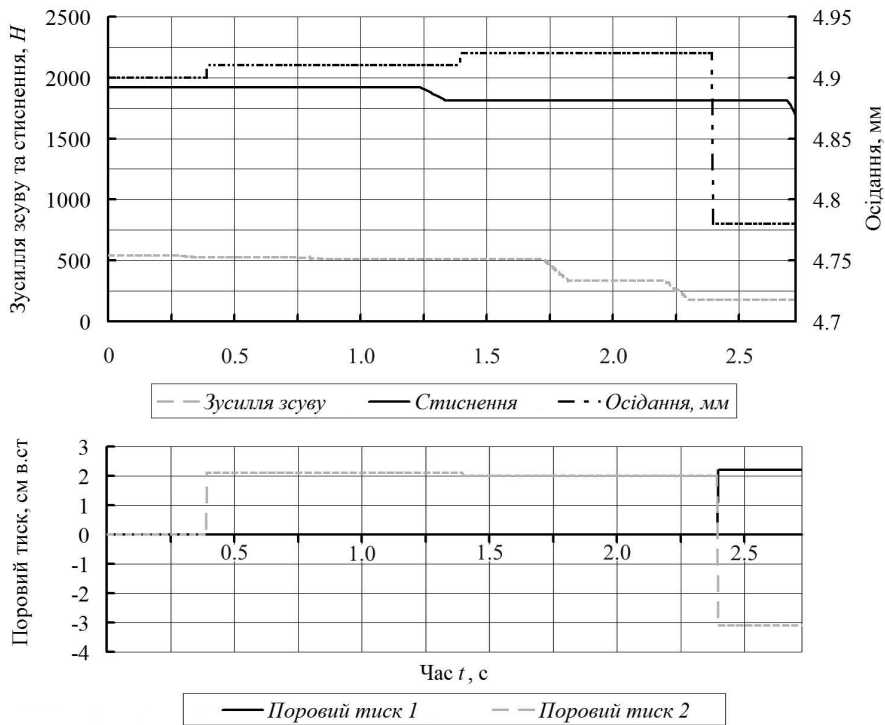


Рис. 11. Результати дослідження на зсув супіску при $P = 0.3$ МПа

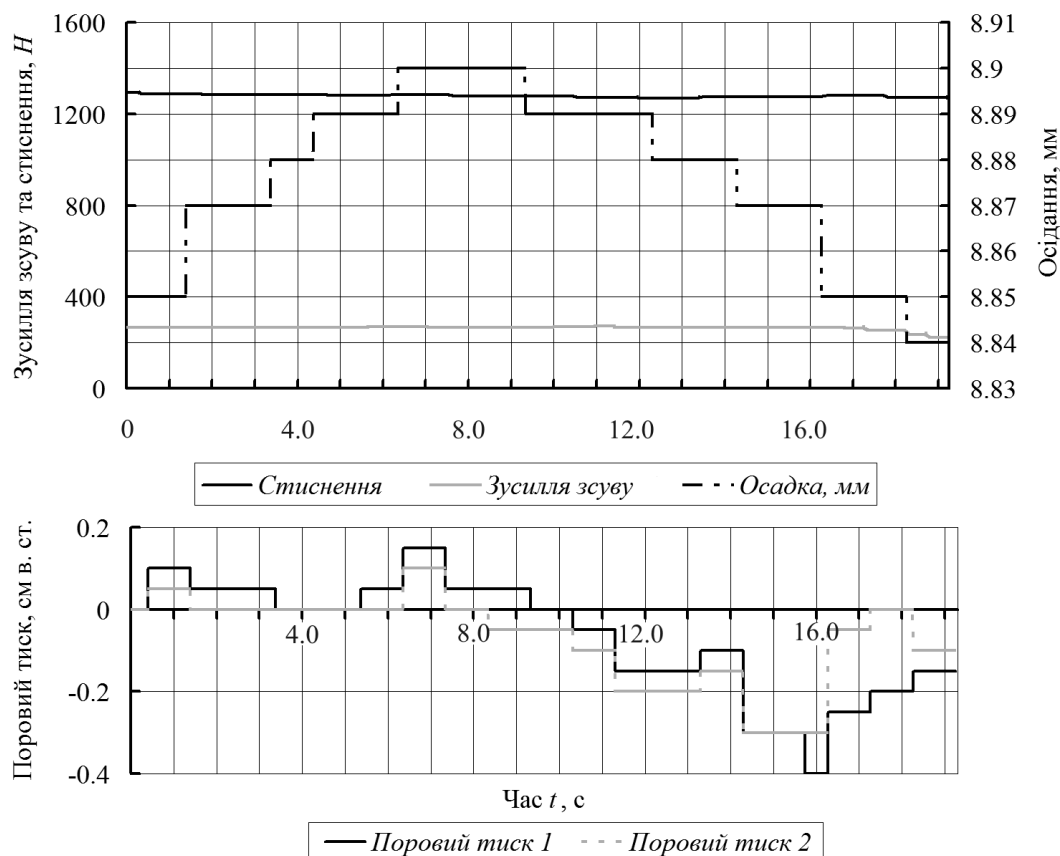


Рис. 12. Результати дослідження на зсув глини при $P = 0.2$ МПа

ти тим, що:

- після додаткового зрушення частинок насичених водою ґрунтів у зоні зсуву, в якій діє граничний напружений стан, виникає розрідження. Таке розрідження подібне явищу тиксотропії, яке виникає при інтенсивному струшуванні або перемішуванні ґрунтів;

- перехід ґрунту в тиксотропний стан відбувається під впливом динамічних, вібраційних або додаткових навантажень і супроводжується різким зниженням механічної міцності ґрунту;

- тиксотропні явища в глинистих ґрунтах виникають під впливом механічної дії, наприклад, струшування, розмішування, вібрації. Подібне явище пояснюється переходом зв'язної води у вільну воду, що супроводжується порушенням внутрішніх зв'язків. При цьому водні оболонки в місцях колишніх контактів різко товщають, внаслідок чого структурні зв'язки між частками порушуються і ґрунти швидко розріджуються. Як видно з наведених дослідів, тиксотропія притаманна дрібнозернистим водонасиченим ґрунтам.

ВИСНОВКИ

За наслідками проведених дослідів сформулюємо наступні загальні висновки:

1. Встановлено, що в зоні зсуву при руйнуванні структури водонасиченого ґрунту останній переходить з твердого стану в стан суміші "ґрунт-вода", яка не має міцності на зсув. Така суміш має характерні властивості неньютонівської рідини другої групи, у якій залежність між напруженням зміщення і коефіцієнтом в'язкості змінюється в часі.

2. Проведеними дослідженнями встановлено, що міцність сипучого ґрунту є функцією умов руйнування і визначається початковою щільністю, крупністю, вологістю, міцністю окремих зерен і початковими стискуючими напруженнями.

3. Теорія міцності Мора-Кулона для сипучих ґрунтів за умови дилатансії не співпадає з даними дослідів.

4. Швидкі зсуви виникають у насичених водою суглинках чи дрібнозернистих ґрунтах, які в зоні зсуву можуть зменшувати міцність ґрунту до ну-

ля. При цьому швидкість зсуву залежить від в'язкості суспензії в зоні розрідження. Повільні зсуви розвиваються у щільних глинистих ґрунтах, які мало змінюють опір зсуву ґрунту в зоні деформування.

1. *Kyoji Sassa, Hiroshi Fukuoka, Gonghui Wang, Naohide Ishikawa* Undrained dynamic – loading ring – shear apparatus and its application to landslide dynamics.– Landslides: 2004.–1. P. 7-19
2. Білеуш А.І., Кривоног А.И., Кривоног В.В., Філімонов В.Ф. Прочность сыпучих грунтов, обладающих дилатансией // Прикладна гідромеханіка.– 2011.– Т. 13 (85), №2.– С. 23-33.
3. *Флорин В.А.* Основы механики грунтов.–Л.: Госстройиздат, 1959–1961.–Т.1. – 357 с.; Т.2.– 543 с.
4. Білеуш А.І., Фрідріхсон В.Л., Кривоног О.І. та ін. Патент України № 68380. Прилад крутіння.– К.: Бюл. N 6, 2012.– 5 с.
5. ДСТУ Б В.2.1-4-96 (ГОСТ 12248-96) Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.– К.: Укрархбудінформ, 1997.– 107 с.
6. *Соколовский Д.Ю.* Прочность и несущая способность дилатантующего грунта.– Минск: Наука и техника, 1994.– 236 с.