МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені І.І. МЕЧНИКОВА

ГЕОЛОГО-ГЕОГРАФІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Д. В. Мелконян

"ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТІВ"

Методичні вказівки
до практичних занять з дисципліни
"Грунтознавство"

для студентів III курсу геолого-географічного факультету
спеціальності 103 "Науки про Землю" спеціалізації
"Інженерна геологія та гідрогеологія"

ОДЕСА
2019

УДК 624.131.4
М47

Рекомендовано до друку Вченою Радою геолого-географічного факультету ОНУ імені І. І. Мечникова

Протокол № 3 від 28 жовтня 2019 р.

Рецензенти:

Є. А. Черкез, *доктор геол.-мін. наук, професор кафедри інженерної геології і гідрогеології Одеського національного університету імені І. І. Мечникова*

В. М. Кадурін, *кандидат геол.-мін. наук, професор кафедри загальної та морської геології Одеського національного університету імені І. І. Мечникова*

Мелконян Д.В.

М47 Фізико-механічні властивості ґрунтів: метод. вказівки до практичних занять з дисципліни "Ґрунтознавство" для студентів ІІІ курсу спец. 103 "Науки про Землю" спеціалізації "Інженерна геологія та гідрогеологія" / Д. В. Мелконян; Одес. нац. ун-т імені І. І. Мечникова, Геолого-географічний ф-т. – *Херсон: Видавничий дім "Гельветика"*, 2019. – 24 с.

У методичних рекомендаціях розкривається зміст основних теоретичних питань та практичних завдань з визначення деформаційних та міцнісних властивості дисперсних ґрунтів. Методичні рекомендації містять приклади задач і алгоритми їх розв'язання.

Розраховано для студентів кафедри інженерної геології і гідрогеології ІІІ курсу бакалаврату спеціальності 103 "Науки про Землю" геолого-географічного факультету ОНУ імені І. І. Мечникова.

УДК 624.131.4

© Мелконян Д.В., 2019
© Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, 2019

ЗМІСТ

ВСТУП.....4

1. Деформаційні властивості дисперсних ґрунтів. Показники деформаційних властивостей ґрунтів.....5

Приклади розрахунку характеристик деформаційних властивостей дисперсних ґрунтів. Розрахунок величин в програмі MS Excel..... 13

2. Міцнісні властивості дисперсних ґрунтів..... 16

Приклади розрахунку характеристик міцнісних властивостей дисперсних ґрунтів. Розрахунок величин в програмі MS Excel..... 20

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ..... 22

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ..... 22

ВСТУП

Методичні вказівки до проведення практичних занять укладені у відповідності до робочої програми дисципліни "Ґрунтознавство" і призначені для студентів спеціальності 103 "Науки про Землю", спеціалізації "Інженерна геологія та гідрогеологія".

Метою методичних вказівок є закріплення теоретичних знань студентів з дисципліни "Ґрунтознавство", вироблення практичних вмінь та навичок дослідження стану і властивостей дисперсних ґрунтів, числової обробки та інтерпретації результатів лабораторних досліджень фізико-механічних властивостей ґрунтів.

Розглянуто основні показники фізико-механічних властивостей дисперсних ґрунтів, надано рекомендації з обробки результатів досліджень, визначено параметри характеристик ґрунтів та їх класифікації.

Наведено приклади розрахунків з аналізованих характеристик ґрунтів та інтерпретації даних, що допоможе студентам при самостійній роботі. Показано послідовність виконання розрахунків і результати розрахункового дослідження. Розрахунки величин і побудова графіків продемонстровані також у програмі MS Excel.

Питання для самоконтролю, наведені у методичних вказівках, покликані допомогти студентам систематизувати набуті знання, вміння та навички.

1. Деформаційні властивості дисперсних ґрунтів. Показники деформаційних властивостей ґрунтів

Фізико-механічні властивості ґрунтів - це характеристики *деформованості і міцності*, що відображають механічні процеси, які відбуваються у ґрунтах внаслідок силових впливів (зовнішніх і внутрішніх, природних і антропогенних).

У догранічному напруженому стані характеристики механічних властивостей ґрунтів називаються *деформаційними*. Ці властивості проявляються при навантаженнях нижче критичних, що не призводять до руйнування. Вони визначають здатність ґрунтів чинити опір розвитку деформацій (осідання, горизонтальних зміщень та ін.). Деформаційні властивості ґрунтів проявляються в зміні форми і об'єму при діянні на ґрунт зовнішніх зусиль, які не призводять до руйнування.

Одним з завдань дослідження деформаційних властивостей дисперсних ґрунтів є вивчення характеру *стисливості*, величини та швидкості цього процесу, отримання величин характеристик, необхідних для розрахунків осідань основ споруд.

Стисливістю ґрунтів називається їх здатність зменшуватися в об'ємі під дією зовнішнього навантаження. Зменшення об'єму ґрунту зумовлено зменшенням об'єму пор внаслідок зміщення частинок відносно одна одної, деформацією самих частинок, витісненням води з пор ґрунту. Стисливість залежить від пористості ґрунтів, гранулометричного і мінералогічного складу, природи внутрішніх структурних зв'язків і характеру навантаження.

Стисливість піщаних ґрунтів невелика і залежить від їх гранулометричного складу, походження і щільності складання. Стиснення піщаних ґрунтів пов'язано з виникненням локальних зміщень і зісковзуванням більш дрібних частинок в пори. При великих зовнішніх тисках в місцях концентрації напружень може спостерігатися дроблення окремих частинок та їх агрегатів на більш дрібні. Стиснення піщаних ґрунтів відбувається швидко і, як правило, не залежить від вологості, оскільки піски є хорошими провідниками води.

Стисливість глинистих ґрунтів залежить від мінералогічного складу, ступеня дисперсності, пористості і умов стиснення. Найбільш гідрофільні монтморилонітові глини відрізняються більшою стисливістю, ніж каолінітові.

Чим більше дисперсність глинистих пор, тим більше їх стисливість при однакових умовах випробувань. Абсолютна величина стиснення, як правило, тим вища, чим більше пористість ґрунтів. Стисливість однієї і тієї ж самої глини може різко розрізнятись в залежності від ступеня порушення природної структури. При рівній початковій пористості і вологості стисливість глини з порушеною структурою буде вище. Значний вплив на стисливість здійснює швидкість наростання навантаження і розміри його ступенів; стиснення глинистих ґрунтів збільшується зі збільшенням швидкості наростання навантажень.

Загальна деформація стиснення ґрунту складається з деформацій, що відновлюються після зняття навантажень (пружних) і не відновлюються (залишкових). Залишкові деформації становлять найбільшу частку в загальній величині деформацій стиснення основи під навантаженням. Їх називають деформаціями ущільнення. Швидкість стиснення ґрунтів до певної міри визначається їх водонепроникністю. При повному водонасиченні ґрунту, малих значеннях коефіцієнта фільтрації і великій потужності шару, що стискається, процес стиснення може тривати багато років. При цьому стиснення відбувається до настання стану гідростатичної рівноваги, тобто коли парова вода не сприймає тиску, і все зовнішнє навантаження передається на скелет ґрунту. Швидкість стиснення повністю водонасиченого ґрунту значно сповільнюється в часі, оскільки в процесі ущільнення розмір пор поступово зменшується і, отже, значно зростає опір руху води з них.

Основними характеристиками стисливості (компресійними характеристиками) є: коефіцієнт стисливості a_0, (МПа$^{-1}$); коефіцієнт відносної стисливості a_v (МПа$^{-1}$); модуль деформації E (МПа); структурна міцність на стиснення $P_{стр}$ (МПа).

Показники, що визначають міру стисливості ґрунтів, визначені в лабораторних умовах шляхом стиснення зразків ґрунту без можливості бокового розширення, називаються *компресійними характеристиками* і визначаються в основному шляхом компресійних випробувань. Це випробування ґрунту в умовах одновісного стиснення без можливості бокового розширення.

Компресійні випробування ґрунтів виконують в *одометрах* – приладах з жорсткими металевими стінками, що перешкоджають бічному розширенню

ґрунту при стисненні його вертикальним навантаженням. При випробуваннях відбувається ущільнення ґрунту за рахунок зменшення об'єму пор і вологості (віджимання води з пор ґрунту). Компресійне стиснення моделює процес ущільнення ґрунту під центром фундаменту. Випробування проводять на зразках природної будови, зі збереженням природної вологості. Вертикальне навантаження подають ступенями, і на кожному ступені навантажування зразка реєструють показання приладів для вимірювання вертикальних деформацій.

За результатами випробування для кожного ступеня обчислюють: абсолютну (Δh, мм) і відносну вертикальну деформацію зразка ґрунту за формулою: $\varepsilon = \frac{\Delta h}{h}$.

Оскільки ущільнення ґрунту відбувається головним чином в результаті зменшення об'єму пор, деформацію стиску ґрунту можна виразити також через зміну коефіцієнта пористості. Визначення коефіцієнта пористості (e) при заданому тиску (P) робиться за величиною відносної зміни висоти зразка ґрунту ($\Delta h/h$) за формулою:

$$e = e_0 - (1 + e_0)\frac{\Delta h}{h}, \qquad (1.1)$$

де Δh – осідання зразка ґрунту при тиску P (мм); h – первісна висота зразка ґрунту (мм); e_0 – початкова величина коефіцієнта пористості ґрунту (до досліду).

В результаті випробувань будуються залежності коефіцієнта пористості (e) від прикладеного тиску (P). Побудована графічно залежність називається *компресійною кривою* (рис. 1.1).

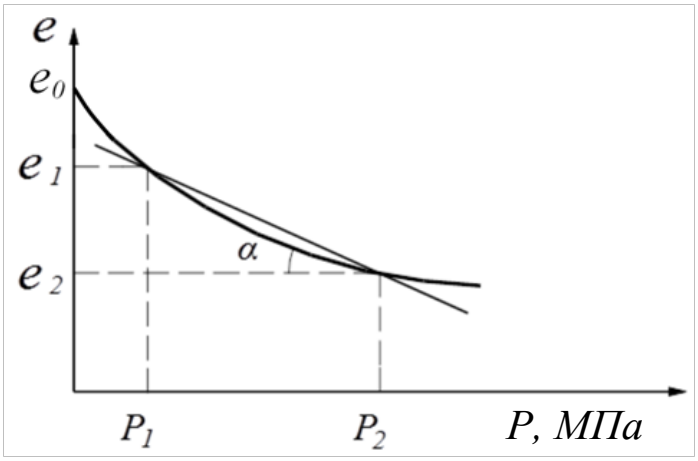


Рис. 1.1. Компресійна крива

Далі обчислюють *коефіцієнт стисливості a*, МПа$^{-1}$ (коефіцієнт ущільнення):

$$a = tg\alpha = \frac{e_1 - e_2}{P_2 - P_1}, \qquad (1.2)$$

де e_1, e_2 – коефіцієнти пористості, які відповідають тискам P_2, P_1.

Отже, коефіцієнт стисливості – найважливіша розрахункова характеристика деформованості ґрунтів, яка використовується при визначенні осідання споруд. Він дає можливість визначити міру стиснення ґрунту і якісно оцінити ґрунт як основу споруд.

Залежно від величини коефіцієнта стисливості можна приблизно схарактеризувати ступінь стисливості ґрунтів, табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Класифікація ґрунтів за ступенем стисливості

Коефіцієнт стисливості a, МПа$^{-1}$	Стисливість ґрунту
<0,01	практично нестискуваний
0,01-0,05	слабостискуваний
0,05-0,1	середньостискуваний
0,1-1,0	підвищенностискуваний
>1,0	сильностискуваний

Наступний показник стисливості ґрунтів – *коефіцієнт відносної стисливості* a_o (відносного ущільнення) визначається так:

$$a_o = \frac{a}{1 + e_0}. \qquad (1.3).$$

Коефіцієнт відносної стисливості іноді представляють як:

$$a_o = \frac{S_i}{hp_i} = \frac{a}{1 + e_0}, \qquad (1.4)$$

де S_i – осідання зразка при тиску p_i.

Ліва частина рівняння (1.4) – відносна деформація ґрунту (віднесена до одиниці тиску), тому права частина рівняння (1.4): $\frac{a}{1+e_0}$ – називається коефіцієнтом відносної стисливості ґрунту.

З урахуванням зовнішніх поперечних деформацій за результатами компресійних випробувань також обчислюють *модуль* (компресійний) деформації ($E_к$, МПа) ґрунту за формулою:

$$E_к = \frac{(1+e_0)}{a}\beta = \frac{\beta}{a_o}, \qquad (1.5)$$

де β – поправка, що враховує відсутність поперечного розширення зразка ґрунту в компресійному приладі, яка визначається за формулою

$$\beta = 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}, \qquad (1.6)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона, який визначається експериментально в приладах трьохвісного стиснення або в компресійних приладах з вимірюванням бокового тиску. При відсутності експериментальних даних допускається приймати β рівним: 0,80 – для пилових і дрібних пісків; 0,74 – для супісків; 0,62 – для суглинків; 0,43 – для глин.

Деякі дисперсні ґрунти при певних видах впливу мають здатність давати значні і порівняно швидкі додаткові осідання. Такі об'ємні деформації ґрунтів викликаються різким зменшенням міцності структурних зв'язків між частинками ґрунту і називаються просадкою. Ґрунти, в яких спостерігається це явище, називаються *просадними*.

Просадочність є характерною для лесів і лесоподібних ґрунтів і супроводжується докорінною зміною структури ґрунту. При зволоженні лесових ґрунтів відбувається розм'якшення і часткове розчинення жорстких кристалізаційних зв'язків, розвивається розклинююча дія плівкової води, знижується міцність водно-колоїдних зв'язків між частинками. Це при деякому тиску призводить до ущільнення ґрунтів, в тому числі за рахунок запливання макропор, що призводить до осідання.

Просадка, як деформація, залежить від мінералогічного і гранулометричного складів ґрунту, його вологості, щільності і напруженого стану. У зв'язку з цим для кожного лесового ґрунту визначають просадочність при тисках, які він буде зазнавати в основі споруди.

Таким чином, *просадочність* – це здатність деяких видів ґрунтів різко зменшувати свій об'єм при замочуванні їх водою під впливом власної ваги або спільного тиску від власної ваги і зовнішнього навантаження.

Основною характеристикою просадочності ґрунтів є величина *відносної просадочності* ε_{sl}, яка являє собою відношення просадки до висоти зразка після ущільнення (тиском P) ґрунту природної структури і вологості (до замочування зразка водою).

Відносну просадочність ґрунту визначають за допомогою компресійних приладів, що забезпечують його стиснення без бокового розширення, за формулою (в частках одиниці):

$$\varepsilon_{sl} = \frac{h_{n,p} - h_{sat.p}}{h_{n,g}}, \qquad (1.7)$$

де $h_{n,p}$ та $h_{sat,p}$ – відповідно, висота зразка природної вологості і вологості після повного водонасичення при тиску *P*, рівному вертикальному напруженню від зовнішнього навантаження (тиск ваги споруди) і власної ваги ґрунту (природний тиск на глибині z): $P = \sigma_{zp} + \sigma_{zg}$; $h_{n,g}$ – висота зразка природної вологості, ущільненого тиском $P = \sigma_{zg}$.

Відповідно до будівельних норм (ДБН) лесові ґрунти підрозділяються на: такі, що мають просадні властивості, у яких $\varepsilon_{sl} > 0{,}01$, і такі, що практично не мають просадні властивості, у яких $\varepsilon_{sl} < 0{,}01$.

Просадні ґрунти підрозділяються на два типи. В ґрунтах I типу можливою є просадка ґрунтів від зовнішнього навантаження, а просадка від власної ваги ґрунту відсутня або не перевищує 5 см. В ґрунтах II типу, крім просадки від зовнішнього навантаження, можливою є просадка ґрунтів від власної ваги, величина якої перевищує 5 см.

Замочування ґрунту може відбуватися зверху талими і дощовими водами, а також внаслідок несправності водопровідних систем. Замочування знизу відбувається при підйомі рівня підземних вод.

Відносна просадочність ґрунту визначається у компресійних приладах *за методом однієї або двох кривих*.

За методом *однієї кривої* (рис. 1.2) випробовують пробу ґрунту природної вологості при заданому тиску.

Після стабілізації осідання ґрунт насичують водою, замірюючи просадку, і випробування продовжують вже для водонасиченого ґрунту. За даними досліду розглядають відносну деформацію або коефіцієнт пористості для кожного ступеня навантаження і будують графік залежності *e, Δh = f*(*P*) та ін.

Відповідно до діючих будівельних норм просадні ґрунти при замочуванні крім відносної просадочності, початкового просадного тиску, характеризуються також початковою просадною вологістю w_{sl} – мінімальною вологістю, при якій виникає просадка, в умовах заданих тисків $\varepsilon_{sl} = 0{,}01$. Її значення залежать від

напруженого стану ґрунту, природної щільності і міцності структурних зв'язків. Зі збільшенням тиску на ґрунт початкова просадна вологість зменшується.

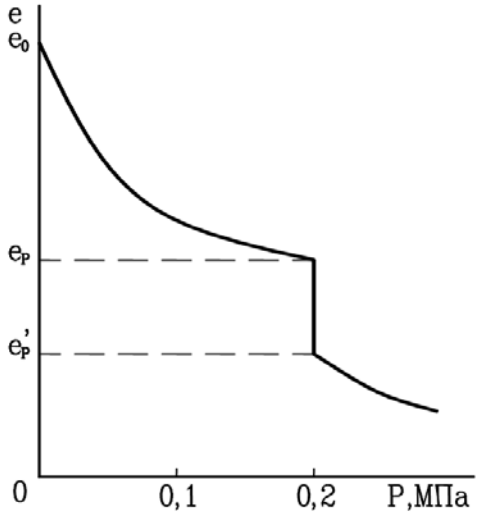


Рис. 1.2. Компресійна крива просадного ґрунту, який випробувався за методом однієї кривої із замочуванням

Якщо провести у компресійних приладах серію випробувань лесового ґрунту із замочуванням зразків при різних навантаженнях, то неважко отримати графік залежності коефіцієнта відносної просадочності ε_{sl} від тиску (рис. 1.3). Такі графіки дозволяють оцінювати *початковий просадний тиск* P_{sl}, при якому ε_{sl} = 0,01, тобто при якому ґрунт вважається просадним. При меншому тиску лесовий ґрунт вважають практично непросадним.

За методом *двох кривих* (рис. 1.4) компресійним випробуванням піддають дві проби ґрунту: одну – при природній вологості, другу – при повному водонасиченні, після чого будують графіки залежності e, $\Delta h = f(P)$.

Розрізняють три зони деформування просадних ґрунтів (рис. 1.5): зону *ab*, яка відповідає тиску ґрунту в непорушеному стані, тобто осідання – деформацію, обумовлену ущільненням ґрунту, що не супроводжується зміною міцності структурних зв'язків між частинками; зону *bc*, яка характеризує просадку ґрунтів, тобто деформацію, обумовлену швидким ущільненням ґрунту, що знаходиться під тиском при зволоженні в результаті різкого зменшення міцності структурних зв'язків, і зону *cd* – післяпросадну деформацію – повільне ущільнення ґрунту внаслідок віджимання води з пор ґрунту, повзучості розм'якшених водою мінеральних часток ґрунту, а при наявності фільтрації води – вимивання розчинних солей з ґрунту.

За кривими e, $\Delta h=f(P)$ просадних ґрунтів безпосередньо визначають

значення зміни коефіцієнта пористості ґрунту, а також відносну просадочність ε_{sl}, за формулою (1.7).

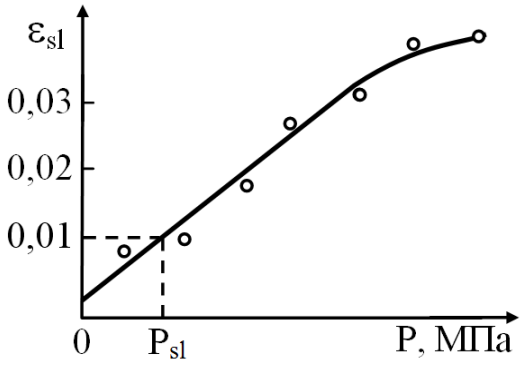


Рис. 1.3. Зміна коефіцієнта відносної просадочності

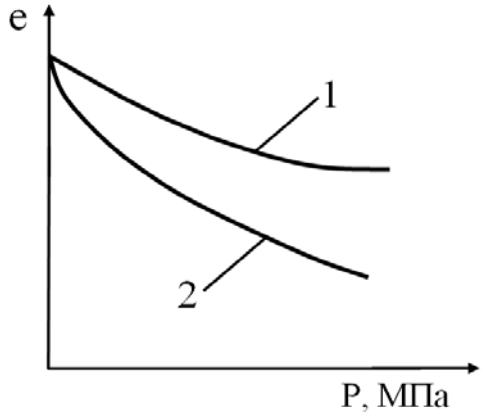


Рис. 1.4. Компресійна крива просадного ґрунту за методом двох кривих: 1 - для ґрунту природної вологості; 2 - для ґрунту, насиченого водою

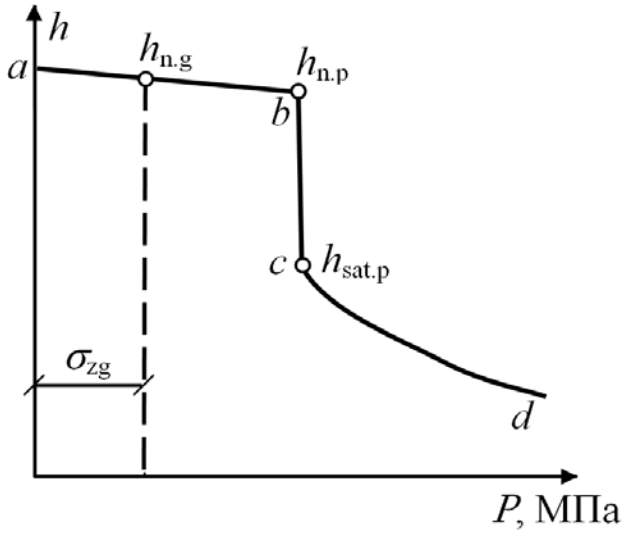


Рис. 1.5. Графік деформації лесового ґрунту при замочуванні (компресійна крива): *ab* - відрізок кривої осадки при природній вологості ґрунту; *bc* - відрізок просадки (після замочування ґрунту водою);*cd* - відрізок післяпросадної деформації

Деформаційні властивості ґрунтів визначають як в лабораторних умовах на зразках з порушеними або непорушеними структурними зв'язками, так і в польових умовах.

Розрахункові характеристики деформаційних властивостей дисперсних ґрунтів (коефіцієнт стисливості *a*, модуль деформації *E,* відносна просадочність та ін.) в *лабораторних умовах* визначаються в основному шляхом компресійних випробувань *одометрами*.

Для визначення характеристик деформаційних властивостей ґрунтів в польових умовах застосовують статичні випробування ґрунтів штампами (або штампові випробування) та *пресіометрами*.

Приклади розрахунку характеристик деформаційних властивостей дисперсних ґрунтів. Розрахунок величин в програмі MS Excel

Приклад 1.1. За результатами компресійних випробувань для твердої глини були отримані такі дані: e_1 = 0,648, p_1 = 0,10 МПа; e_2 = 0,643; p_2 = 0,20 МПа; e_0 = 0,657. Визначити ступінь стисливості і модуль деформації ґрунту.

Розв'язання: Визначимо коефіцієнт стисливості за формулою (1.2)

$$a = \frac{e_1 - e_2}{p_2 - p_1} = \frac{0{,}648 - 0{,}643}{0{,}2 - 0{,}1} = 0{,}05 \text{ МПа}^{-1}.$$

Згідно з табл. 1.1, досліджуваний ґрунт має середню стисливість.

Модуль деформації визначимо за формулою (1.5):

$$E = \beta / a_o,$$

де коефіцієнт β для глин приймає значення β = 0,43.

Коефіцієнт відносної стисливості визначаємо за формулою:

$$a_o = \frac{a}{(1 + e_0)} = \frac{0{,}05}{(1 + 0{,}657)} = 0{,}03 \text{ МПа}^{-1}.$$

Тоді

$$E = \frac{\beta}{a_o} = \frac{0{,}43}{0{,}03} = 14 \text{ МПа}.$$

Приклад 1.2. Однорідний шар ґрунту товщиною 1 м зазнає однорідного стиснення під впливом тиску 90 кПа. Коефіцієнт пористості ґрунту 0,70; коефіцієнт стисливості 0,0002 м^2/кН; коефіцієнт Пуассона 0,35. Визначити осідання шару ґрунту і модуль деформації ґрунту.

Розв'язання (рис. 1.6): Визначимо коефіцієнт відносної стисливості ґрунту за формулою (1.3):

$$a_o = a/(1 + e_0) = 0{,}0002/(1 + 0{,}70) = 0{,}00012 \text{ м}^2/\text{кН}.$$

Для одновимірного компресійного стиснення осідання ґрунту у відповідності до закону ущільнення Терцагі визначається за формулою:

$$S = a_o \, \sigma_z \, h = 0{,}00012 \cdot 90 \cdot 1 = 0{,}011 \text{ м}.$$

Модуль деформації ґрунту визначимо у відповідності до закону Гука за формулою: $E = \beta \sigma_z h / S$. Для цього обчислимо величину β:

$$\beta = 1 - \frac{2 \cdot \nu^2}{1 - \nu} = 1 - \frac{2 \cdot 0{,}35^2}{1 - 0{,}35} = 0{,}623.$$

Тоді

$$E = \beta \cdot \sigma_z \cdot h / S = 0{,}623 \cdot 90 \cdot 1 / 0{,}011 = 5296 \text{ кПа} \approx 5{,}3 \text{ МПа}.$$

Приклад 1.3. Виконати обробку результатів компресійних випробувань лесового суглинку, Одеська область (табл. 1.2), і визначити його деформаційні характеристики: коефіцієнт стисливості (a) і модуль деформації (E).

Таблиця 1.2

Початковий коефіцієнт пористості ґрунту e (част. од.) при p = 0	Коефіцієнт пористості ґрунту e (част.од.) при природній вологості і нормальному тиску p, МПа				
	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5
	0,025	0,050	0,100	0,200	0,300
0,704	0,678	0,661	0,626	0,590	0,567

Розв'язання (рис. 1.7): Коефіцієнт стисливості обчислити за формулою (1.2), наприклад, для інтервалу тисків від 0,1 до 0,2 МПа.

$$a = tg\alpha = \frac{e_3 - e_4}{p_4 - p_3} = \frac{0{,}626 - 0{,}590}{0{,}2 - 0{,}1} = 0{,}360 \text{ МПа}^{-1}.$$

Обчислимо компресійний модуль деформації E за формулою (1.5) для вказаного вище інтервалу тисків; для суглинків $\beta = 0{,}620$:

$$E_к = \frac{(1+e_0)}{a} \cdot \beta = \frac{(1+0{,}704)}{0{,}360} \cdot 0{,}620 = 2{,}93 \text{ МПа}.$$

За ступенем стисливості, згідно з табл. 1.1, в межах навантажень від 0,1 до 0,2 МПа ґрунт підвищенностискуваний.

Розрахунок величин у програмі MS Excel

	A	B	C
2	h	1	
3	σ_z	90	
4	e_0	0,7	
5	a	0,0002	
6	ν	0,35	
7		**Розв'яання**	
8	a_o	= B5/(1 + B4)	
9	S	= B8*B3*B2	
10	β	=1-((2*B6^2)/(1-B6))	
11	E	=B10*B3*B2/B9	

а)

	A	B	C
2	h	1	
3	σ_z	90	
4	e_0	0,7	
5	a	0,0002	
6	ν	0,35	
7		**Результати розв'язання**	
8	a_o	0,00012	
9	S	0,011	
10	β	0,623	
11	E	5296	

б)

Рис. 1.6. Розрахунки для прикладу 1.2:
а) рівняння для розв'язання; *б*) результати розв'язання

Для побудови компресійної кривої на вкладці *Вставка* в групі *Діаграми* вибираємо такі пункти: *"точкова"* → *"точкова з гладкими прямими і маркерами"*. В межах зони діаграми натиснути на ліву кнопку миші і вибрати команду *"вибрати дані"* → *"додати"* (рис. 1.8*а*). Вставити курсор у вікно *"Значення X"* (рис. 1.8*б*) і методом простягання виділити діапазон даних – B3:B8; для вікна *"Значення У"* виділяємо числа у комірках D3:D8.

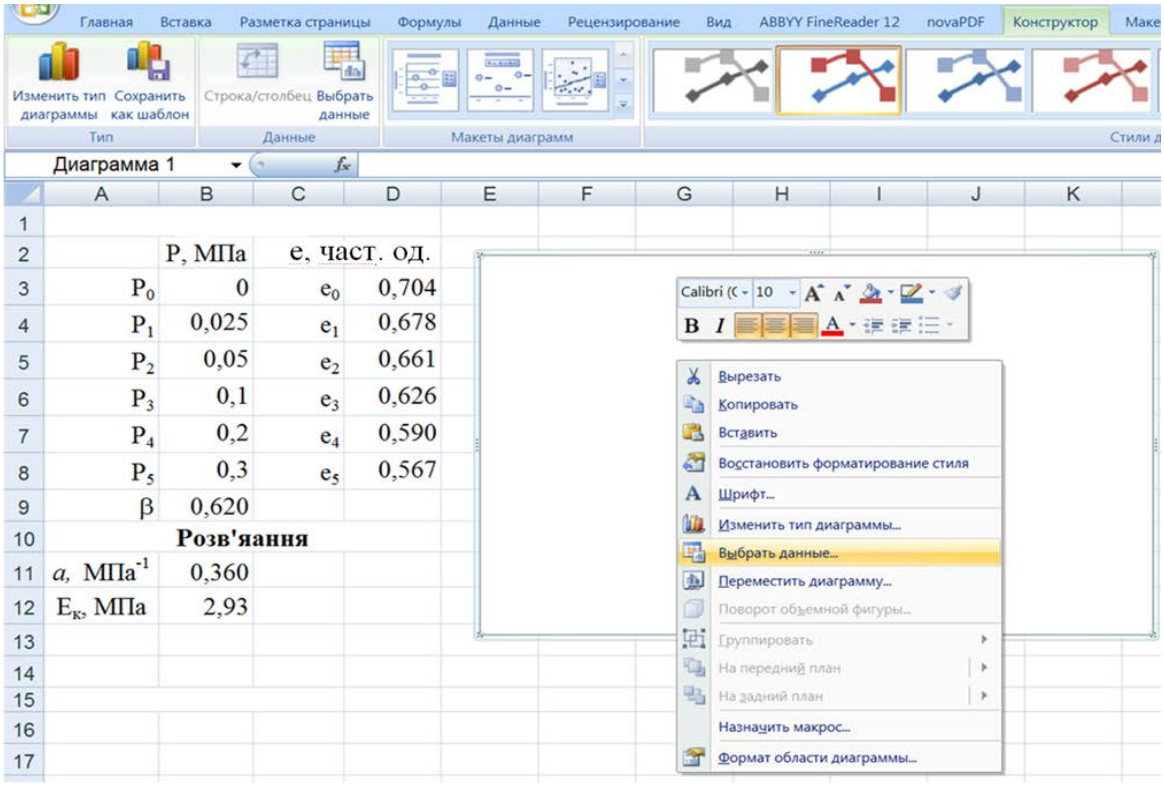
	A	B	C	D
2		P, МПа	e, част. од.	
3	P_0	0	e_0	0,704
4	P_1	0,025	e_1	0,678
5	P_2	0,05	e_2	0,661
6	P_3	0,1	e_3	0,626
7	P_4	0,2	e_4	0,590
8	P_5	0,3	e_5	0,567
9	β	0,620		
10	**Розв'язання**			
11	*a*, $МПа^{-1}$	=(D6-D7)/(B7-B6)		
12	$E_к$, МПа	=((1+D3)/B11)*B9		

а)

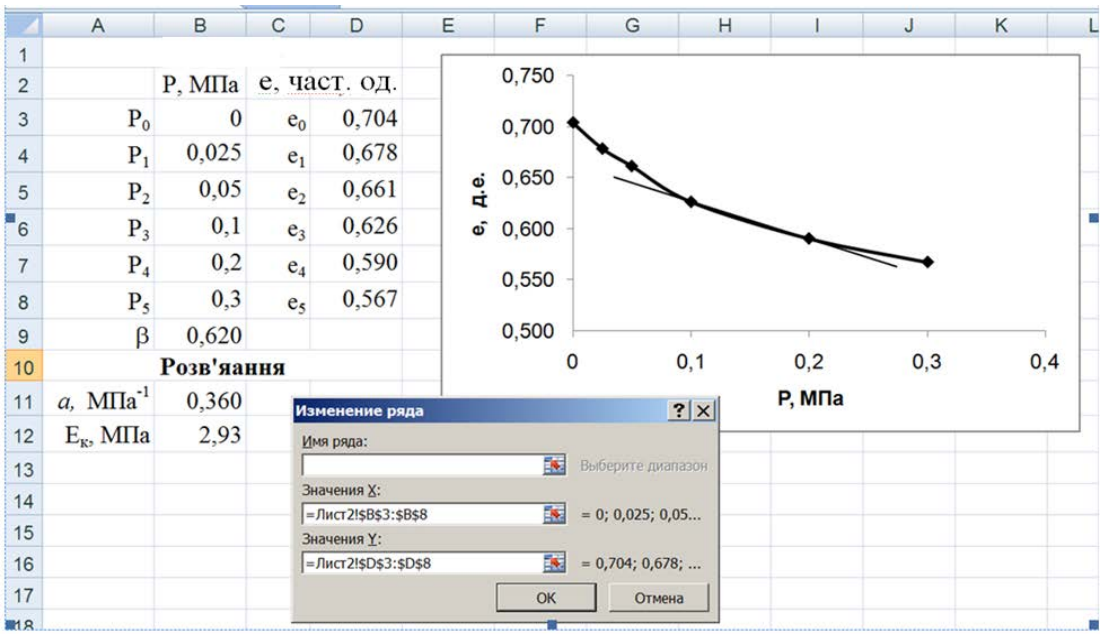
	A	B	C	D
2		P, МПа	e, част. од.	
3	P_0	0	e_0	0,704
4	P_1	0,025	e_1	0,678
5	P_2	0,05	e_2	0,661
6	P_3	0,1	e_3	0,626
7	P_4	0,2	e_4	0,590
8	P_5	0,3	e_5	0,567
9	β	0,620		
10	**Результати розв'язання**			
11	*a*, $МПа^{-1}$	0,360		
12	$E_к$, МПа	2,93		

б)

Рис. 1.7. Розрахунки для прикладу 1.3 для інтервалу тисків від 0,1 до 0,2 МПа: *а*) рівняння для розв'язання; *б*) результати розв'язання



а)



б)

Рис. 1.8. Побудова компресійної кривої (приклад 1.3)

2. Міцнісні властивості дисперсних ґрунтів

Міцність ґрунтів в широкому сенсі – це їх здатність чинити опір руйнуванню. Якщо деформаційні характеристики ґрунтів визначаються при напруженнях, що не призводять до руйнування (тобто до критичних напружень), то параметри міцності ґрунтів відповідають критичним руйнівним напруженням і визначаються при граничних навантаженнях, що викликають або поділ ґрунту на частини (для пружних ґрунтів), або необоротну зміну форми ґрунту в результаті пластичних деформацій (для пластичних ґрунтів). Таким чином, міцнісні властивості проявляються при навантаженнях вище критичних, тобто при навантаженнях, що призводять до руйнування ґрунту.

Визначення граничного навантаження на основи різних фундаментів і величин тиску ґрунту на підпірні стіни, перевірка стійкості укосів земляних насипів, а також вирішення багатьох інших завдань в різних умовах будівництва проводиться на основі залежностей, одержуваних при випробуваннях ґрунтів на зсув. У цих випробуваннях при певній величині дотичних напружень починається зміщення однієї частини ґрунту відносно іншої, що залишається нерухомою. Визначувані при цьому кути внутрішнього тертя і питомі зчеплення є найважливішими характеристиками ґрунтів та називаються *міцнісними*. Міцність ґрунтів оцінюється їх опором дотичним напруженням.

Опір ґрунту зсуву вважається одним з найбільш важливих законів механіки ґрунтів. Вперше цей закон був встановлений Ш. Кулоном у 1773 р. і виражається як:

$$\tau = \sigma_n tg\varphi + C \qquad (2.1)$$

де φ – кут внутрішнього тертя ґрунту (град.), який утворюється при зсуві 0; C – питоме зчеплення (МПа), тобто сила між частинками, необхідна для подолання опору зсуву, який роблять структурні зв'язки; σ_n та τ – нормальні і дотичні напруження (МПа), відповідно, які діють на поверхню руйнування.

В незв'язаних ґрунтах сили зчеплення дуже малі, і їх приймають рівними нулю, тоді рівняння Кулона набуває вигляд:

$$\tau = \sigma_n tg\varphi \qquad (2.2)$$

Опір зсуву одного й того ж самого ґрунту не є постійним і залежить від фізичного стану ґрунту – ступеня порушення природної структури, щільності, вологості, а також від умов проведення випробувань (конструкцій приладу, швидкості зсуву і т. п.).

Граничне дотичне напруження τ (або опір ґрунту зсуву) складається з сил внутрішнього тертя і зчеплення.

У піщаних (незв'язаних) ґрунтах опір зсуву обумовлений виключно силами внутрішнього тертя між частинками ґрунту. На опір зсуву пісків істотно впливає ступінь ущільненості; при більш щільній укладці частинок опір зсуву зростає за рахунок тертя взаємно притиснутих поверхонь і зчеплення частинок.

Опір зсуву зв'язаних ґрунтів (супіски, суглинки, глини) складається з сил внутрішнього тертя і сил зчеплення.

Випробування ґрунтів при визначенні їх характеристик міцності проводяться в лабораторних умовах у приладах різної конструкції: прямого (одноплощинного) зрізу, простого зсуву, трьохвісного тиску і кільцевого зрізу. У практиці найчастіше використовують прилади прямого (одноплощинного) зрізу і рідше – інші.

Випробування ґрунту методом одноплощинного зрізу, згідно з ДСТУ, проводять для визначення опору ґрунту зрізу τ, кута внутрішнього тертя φ, питомого зчеплення C. Їх визначають у зрізних приладах з фіксованою площиною зрізу шляхом зміщення однієї частини зразка відносно іншої. Зсув утворюють зростаючим дотичним (горизонтальним) навантаженням при одночасній дії на зразок постійного навантаження, нормального до площини зрізу.

Опір зрізу визначають як граничне середнє дотичне напруження, при якому зразок ґрунту зрізається по фіксованій площині при заданому нормальному напруженні. Схема випробування зразка ґрунту на зсув в приладі одноплощинного зрізу показана на рис. 2.1. Прилад має нижню нерухому обойму і верхню рухому обойму. Ґрунт, поміщений в жорстку обойму, піддається дії рівномірно розподіленого навантаження. До верхньої частини обойми додається навантаження *P*, яке поступово збільшується. При досягненні деякого критичного значення навантаження *P* відбувається зміщення однієї частини обойми відносно іншої, тобто утворюється зсув.

Визначення опору ґрунтів зрізу проводиться методами: *консолідованого зрізу та неконсолідованого зрізу*.

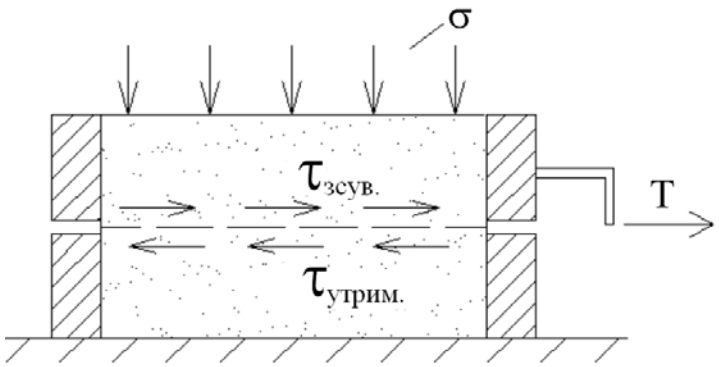


Рис. 2.1. Схема випробування зразка ґрунту на зсув
в приладі одноплощинного зрізу

Метод *консолідованого зрізу* передбачає попереднє ущільнення ґрунту заданим нормальним тиском (завершене ущільнення) і подальше випробування зразка ґрунту при цьому самому нормальному навантаженні. Метод застосовується для визначення опору зрізу пісків і глинистих ґрунтів незалежно від їхнього ступеня вологості в стабілізованому стані.

Опір зсуву в умовах стабілізованого стану являє собою найбільшу величину опору зсуву, яка відповідає кінцевому моменту ущільнення ґрунту під даним навантаженням від споруд.

Метод *неконсолідованого зрізу* передбачає проведення випробувань без попереднього ущільнення і застосовується для визначення показників опору зсуву ґрунтів в нестабілізованому стані. Цим методом випробовують зразки непорушеної будови суглинків і глин, які в природному заляганні знаходяться в водонасиченому стані, а також зразки просадних ґрунтів, замочених до повного водонасичення.

Опір зсуву в умовах незавершеного ущільнення характеризує можливе співвідношення нормальних і граничних дотичних напружень в ґрунті в процесі будування споруд, в моменти передачі пробних технологічних навантажень і в початковий період експлуатації споруд.

Залежно від швидкості прикладання зсувного зусилля в процесі досліду розрізняють швидкий і повільний зсуви. При повільному зсуві зсувальну силу збільшують тільки після досягнення умовної стабілізації деформацій зсуву на попередньому ступені цієї сили. При швидкому зсуві збільшення зсувальної сили здійснюють швидко, не чекаючи стабілізації деформацій. При цьому горизонтальне навантаження створюють відразу ж після застосування вертикального, яке здійснюється за один ступінь.

Для визначення C та φ необхідно провести не менше трьох випробувань при різних значеннях нормального напруження. За виміряними в процесі випробування значеннями обчислюють дотичні τ та нормальні напруження σ. За результатами випробувань ґрунту будують залежність граничного опору ґрунту зсуву від нормального тиску: по осі абсцис відкладають нормальний тиск (σ), а по осі ординат – зсувне зусилля (τ, рис. 2.2). В результаті отримують залежність, яка виражається рівнянням Кулона (2.1). З графіку отримують міцнісні характеристики: кут внутрішнього тертя та питоме зчеплення, які визначають як параметри лінійної залежності τ від σ. При цьому величину C визначають як відрізок, що відсікається прямою $\tau = f(\sigma)$ на осі ординат (рис. 2.2), а тангенс кута нахилу цієї прямої до осі абсцис є тангенсом кута внутрішнього тертя φ. Для піщаних ґрунтів залежність $\tau = f(\sigma)$ зображається прямою, яка проходить через початок координат (рис. 2.3).

Якщо число випробувань ґрунту на зріз $n \geq 3$, то кут внутрішнього тертя φ (град.) і питоме зчеплення C (МПа) обчислюють за формулами:

$$tg\varphi = \frac{n\sum \tau_i \sigma_i - \sum \tau_i \sum \sigma_i}{n\sum (\sigma_i)^2 - (\sum \sigma_i)^2}, \qquad C = \frac{\sum \tau_i \sum \sigma_i^2 - \sum \sigma_i \sum \tau_i \sigma_i}{n\sum (\sigma_i)^2 - (\sum \sigma_i)^2}, \tag{2.3}$$

де τ_i – дослідні значення опору зрізу, визначені при різних значеннях σ_i.

Нормативні і розрахункові значення C та φ встановлюють у відповідності до вимог ДСТУ та ДБН.

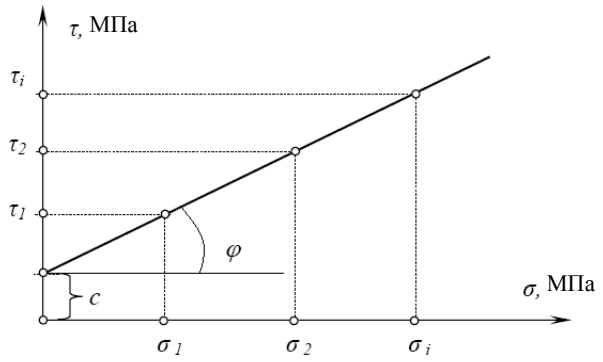


Рис. 2.2. Графік опору зсуву для зв'язаних ґрунтів: τ_1, τ_2, τ_3 – зсувні зусилля; σ_1, σ_2, σ_3 – нормальні тиски; φ – кут внутрішнього тертя

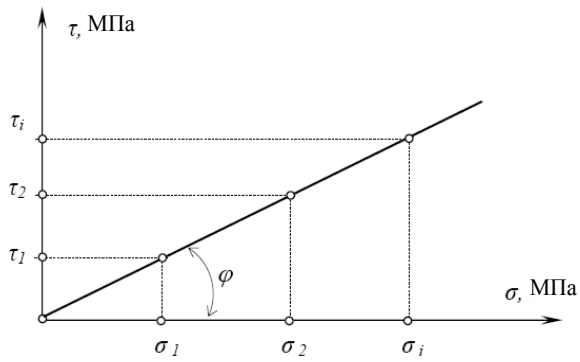


Рис. 2.3. Графік опору зсуву для незв'язаних ґрунтів

Приклади розрахунку характеристик міцнісних властивостей дисперсних ґрунтів. Розрахунок величин в програмі MS Excel

Приклад 2.1. Виконати обробку результатів зсувних випробувань (табл. 2.1) і визначити показники міцнісних властивостей твердої глини. Побудувати графік залежності граничних зсувальних напружень τ від нормальних напружень σ.

Таблиця 2.1

Граничний опір зсуву $\tau_{гран}$ (МПа) при черговому ступені навантаження нормальним тиском p (МПа)			
	$p_1 = 0,10$	$p_2 = 0,15$	$p_3 = 0,20$
У природному стані	0,160	0,180	0,200
При повному водонасиченні	0,095	0,115	0,130

Розв'язання (рис. 2.1): Визначимо коефіцієнт внутрішнього тертя $tg\varphi$ та питоме зчеплення C за формулою (2.1).

У природному стані

$$tg\varphi = (\tau_3 - \tau_1)/(p_3 - p_1) = (0,200 - 0,160)/(0,2 - 0,1) = 0,4;\ \varphi \approx 22°.$$

$$C = \tau_1 - p_1 \cdot tg\varphi = 0,160 - 0,1 \cdot 0,4 = 0,12 \text{ МПа}.$$

При повному водонасиченні

$$tg\varphi = (0,130 - 0,095)/(0,2 - 0,1) = 0,35;\ \varphi \approx 19°.$$

$$C = \tau_1 - p_1 \cdot tg\varphi = 0,095 - 0,1 \cdot 0,35 = 0,06 \text{ МПа}.$$

Розрахунок величин в програмі MS Excel

	A	B	C
2		У природному стані	
3	p	τ	
4	0,10	0,160	
5	0,15	0,180	
6	0,2	0,200	
7		**Розв'язання**	
8	$tg\,\varphi$	=(B6-B4)/(A6-A4)	
9	φ	=ATAN(B8)*180/ПИ()	
10	C	= B4-(A4*B8)	
11			
12		При повному водонасиченні	
13	p	τ	
14	0,10	0,095	
15	0,15	0,115	
16	0,2	0,130	
17		**Розв'язання**	
18	$tg\,\varphi$	=(B16-B14)/(A16-A14)	
19	φ	=ATAN(B18)*180/ПИ()	
20	C	= B14-(A14*B18)	

	A	B	C
2		У природному стані	
3	p	τ	
4	0,10	0,160	
5	0,15	0,180	
6	0,2	0,200	
7		**Результати розв'язання**	
8	$tg\,\varphi$	0,4	
9	φ	21,80	
10	C	0,12	
11			
12		При повному водонасиченні	
13	p	τ	
14	0,10	0,095	
15	0,15	0,115	
16	0,2	0,130	
17		**Результати розв'язання**	
18	$tg\,\varphi$	0,35	
19	φ	19,29	
20	C	0,06	

Рис. 2.4. Розрахунки для прикладу 2.1, для інтервалу тисків від 0,1 до 0,2 МПа: *а*) рівняння для розв'язання; *б*) результати розв'язання

	A	B
2		У природному стані
3	p	τ
4	0,10	0,160
5	0,15	0,180
6	0,2	0,200
7		**Розв'язання**
8	$tg\,\varphi$	0,4
9	φ	21,80
10	C	0,12
11		
12		При повному водонасиченні
13	p	τ
14	0,10	0,095
15	0,15	0,115
16	0,2	0,130
17		**Розв'язання**
18	$tg\,\varphi$	0,35
19	φ	19,29
20	C	0,06

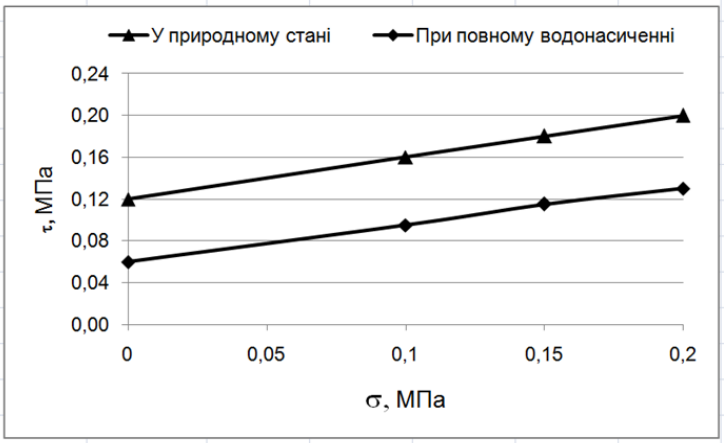


Рис. 2.5. Графік опору зсуву для глинистого ґрунту (приклад 2.1)

Питання для самоконтролю

1. Які існують показники деформаційних властивостей дисперсних ґрунтів?
2. Які існують показники міцнісних властивостей дисперсних ґрунтів.
3. Що називають стисливістю ґрунту і чим характеризується стисливість?
4. Чим обумовлена стисливість ґрунтів і якими випробуваннями її визначають?
5. Що таке просадочність?
6. Для чого служить одометр?
7. Що таке компресійна крива?
8. Як обробляються дані компресійних випробувань і як графічно зображають їхні результати?
9. Як за даними компресійних випробувань визначаються коефіцієнт стисливості ґрунтів і модуль деформації?
10. Як можна судити про ступінь стисливості ґрунту, виходячи з вигляду компресійної кривої?
11. При якому значенні модуля деформації ґрунти вважаються неміцними?
12. При якому значенні відносної просадочності ґрунт вважається просадним?
13. Що називають зчепленням ґрунту?
14. Для чого знаходять зсувне зусилля ґрунту?

Список рекомендованої літератури

1. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов. М., Стройиздат, 1979. 304 с.
2. ГОСТ 23161-78. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик просадочности.
3. ДСТУ Б В.2. 1-8-2001 Ґрунти. Відбирання, упакування, транспортування. і зберігання зразків.
4. ДСТУ Б В.2.1-2-96 (ГОСТ 25100-95). Ґрунти. Класифікація. [Чинний від 1997-01-01]. К.: Мінбуд України, 1997. 45 с.
5. ДСТУ Б В.2.1-4-96 (ГОСТ 12248-96). Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
6. Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований. Л.: Недра, 1990. 328 с.
7. Мангушев Р.А. Механика грунтов. М.: Изд-во АСВ, 2009.
8. Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. М.: Высшая школа, 1982. 512 с.
9. Сергеев Е.М. Грунтоведение / [Е.М. Сергеев, Г.А. Голодковская, Р.С. Зиангиров и др.]: под ред. Е.М. Сергеева. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, 1983. 389 с.
10. Трофимов В.Т. Грунтоведение / [В.Т. Трофимов, В.А. Королев, Е.А. Вознесенский и др.]; под ред. В.Т. Трофимова. – [6-е изд., перераб. и доп.]. М.: Изд-во МГУ, 2005. 1024 с. (Серия "Классический университетский учебник").
11. Ухов С.Б. Механика грунтов, основания и фундаменты: Учеб. пособие / С.Б. Ухов, В.В. Семенов, В.В. Знаменский и др. Под ред. С.Б. Ухова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2002. 556 с.

Навчальне видання

Мелконян Джема Варанцівна

"ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТІВ"

Методичні вказівки
до практичних занять з дисципліни
"ҐРУНТОЗНАВСТВО"

для студентів ІІІ курсу геолого-географічного факультету спеціальності 103 «Науки про Землю» спеціалізації «Інженерна геологія та гідрогеологія»

Підп. до друку 05.11.2019. Формат 60х84 1/16.
Ум.-друк. арк. 0,8. Тираж 50. Зам. № 1981.

Видавництво і друкарня
Видавничий дім «Гельветика»
73034, м. Херсон, вул. Паровозна, 46-а, офіс 105.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 4392 від 20.08.2012 р.
E-mail: mailbox@helvetica.com.ua