

*Д.М. Кіперман, аспірант
В.С. Носенко, к.т.н., доцент
І.П. Бойко, д.т.н., професор*

Київський національний університет будівництва та архітектури

ПИТАННЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ СЛАБКИХ ҐРУНТІВ

Розглянуто різні трактування терміна «слабкий ґрунт», фізичні та механічні властивості слабких ґрунтів, закономірності деформування, структурну міцність.

Ключові слова: *слабкий ґрунт, структурна міцність, сильностисливі ґрунти, багатошарова модель.*

*Д.М. Кіперман, аспірант
В.С. Носенко, к.т.н., доцент
І.П. Бойко, д.т.н., професор*

Київський національний університет будівництва та архітектури

ВОПРОСЫ КЛАССИФИКАЦИИ И СВОЙСТВ СЛАБЫХ ГРУНТОВ

Рассмотрены различные трактовки термина «слабый грунт», физические и механические свойства слабых грунтов, закономерности деформирования, структурная прочность.

Ключевые слова: *слабый грунт, структурная прочность, сильносжатые грунты, многослойная модель.*

*D.M. Kiperman, graduate V.S. Nosenko, PhD
I.P. Boyko, PhD, professor*

Kyiv National University of Construction and Architecture

THE QUESTIONS OF CLASIFICATIONS AND PROPERTIES OF SOFT SOILS

Considered different interpretations of the term «soft ground», physical and mechanical properties of soft soils, regularities of deformation, structural strength.

Keywords: *soft soils, structural strength, highly compressible soils, multi-layer model.*

Вступ. У зв'язку з тим, що більшість сприятливих для будівництва територій є освоєними, актуальним є питання будівництва на ділянках зі слабкими ґрунтами. Слабкі ґрунти охоплюють різні типи органомінеральних дисперсних систем малого ступеня літифікації та займають значні території України.

До слабких (дуже стисливих) ґрунтів належать водонасичені мулисті супіски, суглинки, глини, стрічкові глини, мули, сапропелі, торфи, заторфовані ґрунти й лесові ґрунти після їх водонасичення. Для таких ґрунтів характерна дуже висока стисливість, зумовлена значенням модуля загальної деформації $E_0 < 5$ МПа.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Питанням, які стосуються теоретичних та практичних досліджень зведення будівництва будівель і споруд на слабких водонасичених та неоднорідних основах,

присвячено праці М.Ю. Абелєва, Л.С. Амаряна, В.Н. Ананьєва, Я.Д. Гільмана, А.А. Григорян, В.Н. Голубкова, Б.І. Далматова, П.А. Коновалова, В.І. Крутова, Р.А. Мангушева, Е.А. Сорочана, С.Н. Сотнікова, А.Б. Фадєєва, Н.А. Цитовича, А.Г. Шашкіна й інших учених.

Як зазначав Б.І. Далматов, до слабких глинистих ґрунтів відносять водонасичені сильностиснуті ґрунти. При звичайній швидкості прикладення навантаження на основу ці ґрунти втрачають свою міцність, унаслідок чого зменшується їх опір зсуву і зростає стисливість.

З позиції фізико-хімічної механіки слабкий глинистий ґрунт являє собою дисперсну структуровану систему з коагуляційним типом структурних зв'язків, здатну при їх порушенні переходити з твердоподібного стану в рідиноподібний.

Існує думка, що термін «слабкий ґрунт» уживається при визначенні тиску, який передається на ґрунт, тобто при дуже великих навантаженнях ґрунти твердої консистенції також можуть бути віднесеними до слабких ґрунтів [10].

Згідно з висловлюванням Л.С. Амаряна, до слабких можна відносити тільки слаболітіфіковані біо- та мінералогенні ґрунти, а саме торфи, заторфовані ґрунти, сапропелі та морські мули.

Н.А. Цитович та Б.І. Далматов зазначають, що у слабких ґрунтах умовно виражається міцність, нижча ніж 0,1 МПа, і модуль деформації, менший від 3 – 5 МПа [2].

Згідно з нормативним документом [3, п. 3.4] серед умов будівництва та проявів несприятливих фізико-геологічних чи техногенних процесів розрізняють ділянки, де основи складено ґрунтами з особливими властивостями, деформаційні якості (характеристики) яких збільшують небезпеку виникнення нерівномірних деформацій (структурно-нестійкі лесові, набрякливі, слабкі зв'язні з модулем деформації, меншим ніж 5 МПа, коефіцієнтом водонасичення 0,8 і більшим, у т.ч. біогенні, елювіальні, засолені, здиральні, техногенні насипи, пролювіальні й делювіальні ґрунти та мули тощо).

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. З урахуванням того факту, що навантаження на основи від сучасних будівель зростають, постає питання про можливість використання слабких ґрунтів як природних основ для фундаментів або про розроблення та застосування заходів щодо поліпшення їх властивостей.

Постановка завдання. На основі літературних джерел необхідно дослідити властивості слабких ґрунтів, виявити закономірності деформування та систематизувати їх класифікацію.

Основний матеріал і результати. Раніше було встановлено багатьма дослідженнями, що в глинистих ґрунтах між окремими мінеральними частинками та їх агрегатами існують структурні зв'язки. Такі зв'язки обумовлюють певну структурну міцність стиску p_{str} цих ґрунтів.

Структурні зв'язки проявляються в тому, що при дії тиску, меншого, ніж p_{str} , у досліджуваному зразку ґрунту після зняття навантаження відсутні залишкові деформації. Структурна міцність може бути достатньо вираженою у шарах ґрунтів, які залягають на великій глибині та сприймають значний тиск.

Ураховуючи вищезазначені властивості глинистих ґрунтів, Н.А. Цитович запропонував знаходити глибину стисливої зони H_c за умови, що на межі $z = H_c$ [13]

$$\sigma_{zp} \leq p_{str}, \quad (1)$$

де σ_{zp} – стискне напруження від зовнішнього навантаження (є припущення, що мали на увазі додаткове вертикальне нормальне напруження на вказаній глибині); p_{str} – структурна міцність стиску чи залишкова структурна міцність стиску структурно-нестійких ґрунтів.

За умовою (1) визначалася потужність стиснутої зони у розробленому Б.І. Далматовим та В.І. Чикишевим (1984) методі розрахунку осідань фундаментів площею до 20 м^2 на слабких глинистих ґрунтах. В експериментах із жорсткими штампами площею $0,5$; 1 та 4 м^2 на слабких глинистих ґрунтах ми встановили, що на глибинах, де $\sigma_{zp} \leq p_{str}$, після розвантаження штампів залишкові деформації ґрунту не спостерігались.

Методика, яка ґрунтується на замірах деформацій у середній частині зразка [13] як при тривісному, так і при компресійному стиску, дозволяє визначити p_{str} з достатньо високою точністю. Немає єдиної думки про причини виникнення горизонтальної ділянки компресійної кривої. Можливі помилки, пов'язані з появою завищених значень p_{str} у вищерозміщеному шарі ґрунту при збереженні більш низьких значень у підстилаючих шарах. Але, незважаючи на вищесказане, можливість використання умови (1) є допустимою.

Е.К. Кузахметова [6] запропонувала новий критерій визначення відтиснення порової води та зміни пористості ґрунту під навантаженням від ваги будівлі. Виявлено складний механізм консолідації зв'язних ґрунтів порівняно з традиційними підходами й запропоновано параметри консолідації, які уточнюють розрахунок осідання.

Ці дослідження та розрахунки підтверджують те, що залежність осідання від пористості необхідно враховувати при прогнозуванні можливих деформацій конструкцій, притому, що ця різниця тим більша, чим значніша різниця в «геометричній» та «активній» пористості ґрунту.

Авторка мала на увазі під «активною» пористістю «робочу» пористість, яка змінюється в процесі деформування ґрунту, а «геометричну» представлено замкнутими порами з міцно зв'язаною водою. Проведені дослідження дозволили авторці уточнити природу фізико-механічних процесів при ущільненні слабких ґрунтів. Виявити

закономірності деформування слабких ґрунтів і привести у вигляді, прийнятому для практичного використання.

Було також розглянуто нашарування різних основ, а саме: дво-, три- та багат шарових основ, де шари менш міцні (сильностискувані) й більш міцні (слабостискувані) можуть чергуватися в різному порядку. У межах стиснутої товщі міцність та стискуваність ґрунтів можуть змінюватися безперервно чи стрибкоподібно від шару до шару. За наявності двох чітко виражених шарів більш стискуваний шар може розміщуватися безпосередньо під подошвою фундаменту на шарі менш стискуваного ґрунту чи на деякій глибині z від подошви фундаменту при заляганні безпосередньо під подошвою малостискуваного ґрунту. Щільність ґрунтів може зростати або спадати з глибиною поступово.

Також потрібно зробити акцент на врахування неоднорідності в моделях пружного півпростору з наявністю слабкого підстилаючого шару.

При розрахунку осідань основ фундаментів неоднорідність (нашаруватість) стиснутої товщі враховується за рахунок:

– додавання значень осідань окремих шарів ґрунту, що складають цю товщу, які були знайдені з урахуванням характеристик деформативності кожного із шарів ґрунту;

– використання середніх у межах стисливої зони характеристик деформативності ґрунту \bar{E} та ν ;

– вибір таких розмірів фундаменту, щоб за наявності на глибині z нижче його подошви менш міцного ґрунту, ніж шари, що розміщуються вище, виконувалась умова

$$\sigma_z = (\sigma_{zp} - \sigma_{zy}) + \sigma_{zg} \leq R_z, \quad (2)$$

де $\sigma_{zp}, \sigma_{zy}, \sigma_{zg}$ – вертикальні напруження в ґрунті на глибині z від подошви фундаменту, відповідно від зовнішнього навантаження, від власної ваги ґрунту, вибраного при розробці котловану, та власної ваги ґрунту до початку будівництва; R_z – розрахунковий опір ґрунту зниженої міцності на глибині z для умовного фундаменту шириною b_z , для прямокутного фундаменту

$$b_z = \frac{b}{2} \left[\sqrt{\frac{4N}{\sigma_{zp} b^2} + (\eta - 1)^2} - (\eta - 1) \right], \quad (3)$$

де N – вертикальне навантаження на основу від фундаменту; $\eta = l/b$ – співвідношення довжини проєктованого фундаменту до його ширини.

У моделі багат шарових основ ураховують неоднорідність ґрунтової товщі, виходячи з підходу, який описано вище, не приймається до уваги вплив зміни жорсткості ґрунту з глибиною та нашаруванням (за винятком моделі кінцевого шару) на розподільну здатність і напруженого стану основи.

Модель двошарової основи, де верхній міцний (жорсткий) шар товщиною h підстиляється менш міцним (сильностискуваним) шаром, котрий простирається до нескінченності, стосовно моделі лінійно деформованого півпростору дає зниження напружень на покрівлі менш міцного шару.

На цій моделі засновані рішення, при яких зменшуються напруження σ_{zp} на межі шарів порівняно з моделлю однорідної основи тим більше, чим більший параметр

$$n_0 = \frac{E_1(1-\nu^2)}{E_2(1-\nu^2)} \approx \frac{E_1}{E_2}, (4)$$

де $n_0 > 1$; E_1, ν_1, E_2, ν_2 – модуль деформації та коефіцієнт Пуассона відповідно верхнього та нижнього шарів.

Такі рішення зменшують осьові напруження σ_{zp} на межі шарів, отримані для гнучких фундаментів:

- стрічкового при $\tau = 0$ на межі шарів [4];
- круглого при повному налипання шарів і $\nu_1 = \nu_2 = 0,3$ [6];
- прямокутного з різним співвідношенням сторін при наближеному врахуванні тертя на границі шарів за рахунок уведення корегуючих коефіцієнтів [8].

У працях авторів (Бурмістер, Б.І. Коган, П.А. Коновалов та Л.Ф. Сальников) визначаються переміщення поверхні під центром круглого фундаменту. Указано, що чим більша жорсткість верхнього шару по відношенню до підстиляючого (чим більше n_0), тим менше вертикальне переміщення на межі шарів порівняно з аналогічними переміщеннями на тій самій глибині в однорідному чи ізотропному пружному півпросторі.

І, навпаки, якщо верхній, менш жорсткий, шар спирається на шар більшої жорсткості ($n_0 < 1$, за Я.Д. Гільманом та ін.), на осі навантаження на контакт шарів, як і в моделі скінченного шару, напруження σ_{zp} концентруються [9].

Як зазначалося багатьма дослідниками, при визначенні модуля деформації на основі компресійних випробувань, його значення інколи виявляється завищеним унаслідок наявності тертя між зразками ґрунту та жорсткою обоймою одометра.

Нові зразки компресійних пристроїв, які було створено в Полтавському національному технічному університеті ім. Ю. Кондратюка для досліджень зв'язних ґрунтів, позбавлені цих недоліків. У них жорстку обойму замінено обоймами, які складаються по висоті з жорстких кілець, між якими виконані еластичні гумові прокладки, забезпечуючи однакові деформації обойми та зразка ґрунту. За рахунок виключення тертя з роботи передане на зразок зусилля не зменшиться, що знижує значення E для глинистих ґрунтів у середньому на 25% стосовно досліджень у звичайних одометрах [5].

Прилади, які виключають передачу тертя на досліджуваній ґрунт, краще використовувати при компресійних випробуваннях слабких ґрунтів, тому що за спостереженнями С.Н. Сотникова (1987, 1992), М.Л. Зоценка та Ю.Л. Винникова (1995, 1998) результати досліджень таких ґрунтів не потребують введення коректувальних підвищуючих коефіцієнтів.

Найбільш повне уявлення про деформативність та міцність ґрунтів можна отримати при їх випробуваннях у тривісних приладах при складному напружено-деформованому стані.

Важливими особливостями тривісного випробування слабких ґрунтів стабілометрами є:

1) слабка міцність, нестійкість зразка і значні зменшення його висоти при осьовому навантаженні у зв'язку з високою стисливістю при наявному збільшенні діаметра чи площі зразка, що спотворює результати досліду за рахунок збільшення тертя по торцях зразку;

2) відсутність можливості визначення поперечних деформацій і бічного тиску при недренованому досліді у зв'язку з відтисканням порової рідини зі зразка в просторі між його поверхнею і гумовою оболонкою. В останньому випадку всі види тривісного випробування повинні виконуватися при всебічному тиску, який перевищує поровий чи при дренованих випробуваннях з відсутністю надлишкових напружень у поровій рідині.

У дослідженнях Г.В. Сорокіної [10] було розглянуто методи визначення міцності та деформативності ґрунтів в умовах повзучості при тривісному стиску. Запропоновано й обґрунтовано для ґрунтів від текучої до твердої консистенції кінематичний метод визначення їх міцності та деформативності за неконсолідовано-недренованою схемою. Було показано, що результати експериментальних досліджень може бути подано у вигляді узагальненої моделі Кельвіна – Фойхта та Шведова – Бінгама – нелінійно-пружно-в'язке деформування ґрунтів у неконсолідованому стані.

Виконані дослідження дозволили встановити, що швидкість навантаження (швидкість зсуву) істотно впливає на міцнісні характеристики: зі зменшенням швидкості зсуву опір слабких водонасичених глинистих ґрунтів збільшується. Подібні результати було отримано при аналогічних випробуваннях ґрунтів у пристроях різної конструкції.

На практиці було вивчено осідання слабких ґрунтів Санкт-Петербурга [11], дослідження виконали А.Б. Фадєєв, В.К. Іноземцев, В.А. Лукін.

Об'єкт дослідження являла собою семиповерхова будівля, зведена в 1984 році впритул до раніше побудованої шестиповерхової будівлі, яка мала стрічкові бутівні фундаменти. Ґрунтами основи слугували м'яко- та текучопластичні морські, дельтові й озерно-льодовикові суглинки та мілкі пілуваті піски потужністю шару 24 м з модулем деформації 5...10 МПа. Вони підстилися щільною мореною з модулем деформації 25 МПа. Фундамент прибудованої споруди був виконаний у вигляді залізобетонної плити товщиною 0,8 м.

Результати геодезичних спостережень показали, що осідання будівлі склало 11...37 мм, що в 5 – 18 разів менше, ніж очікували проектувальники.

Висновки. Дано оцінку основним критеріям визначення терміна «слабкий ґрунт», що враховують генезис та деформаційні властивості.

Результат аналізу дозволив підтвердити класифікацію та властивості слабких ґрунтів, запропоновані різними дослідниками.

Дано оцінку інженерного методу рішення врахування черговості залягання ґрунтів різної стисливості при розрахунку напружено-деформованого стану основ.

Для здійснення будівництва на слабких ґрунтах рекомендовано виконувати дослідження їх властивостей та особливих закономірностей деформування на стиск і зріз у польових та лабораторних випробуваннях.

Література

1. Абелев, М.Ю. *Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах* / М.Ю. Абелев. – М.: Стройиздат, 1983. – 248 с.
2. Амарян, Л.С. *Свойства слабых грунтов и методы их изучения* / Л.С. Амарян. – М.: Недра, 1990. – 224 с.
3. Егоров, К.Е. *Распределение напряжений и перемещений в двухслойном основании ленточного фундамента* / К.Е. Егоров // Сб. трудов НИИОСП № 10 «Свайные и естественные основания». – М.: Стройиздат, 1939.
4. *Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти* / М.Л. Зоценко, В.І. Коваленко, А.В. Яковлев, О.О. Петраков, В.Б. Швець, С.В. Біда, Ю.Л. Винников. – Полтава, 2004. – 562 с.
5. Jelinek, R. *Berechnung der Spannungsverteilung in einem Zweischichtensystem* / R. Jelinek, A. Ranke // *Die Bautechnik*. – H/2. – Berlin, 1970. – P. 48 – 57.
6. Кузахметова, Э.К. *Усовершенствование методологии прогноза осадки системы «сооружение – слабое основание»* / Э.К. Кузахметова // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2011. – № 6. – С. 16 – 21.
7. Кулагин, А.А. *Исследование напряженно-деформированного состояния двухслойного основания прямоугольного фундамента* / А.А. Кулагин // *Тр. НИИОСП*. – 1982. – Вып. 78. – С. 129 – 138.
8. Кушнер, С.Г. *Расчет деформаций оснований зданий и сооружений* / С.Г. Кушнер. – Запорожье: ООО «ИПО Запорожье», 2008. – 67 ил., 496 с.
9. Сорокина, Г.В. *Методы исследования деформационных и прочностных свойств глинистых грунтов в условиях ползучести* / Г.В. Сорокина // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 1996. – № 1. – С. 26 – 28.
10. Сорокина Г.В. *Строительные свойства слабых грунтов в основании сооружений* / Г.В. Сорокина. – М.: Стройиздат, 1996. – 224 с.
11. Фадеев, А.Б. *Осадки зданий на слабых грунтах Санкт-Петербурга* / А.Б. Фадеев, В.К. Иноземцев, В.А. Лукин // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2001. – № 5. – С. 7 – 10.
12. Цытович, Н.А. *Инженерный метод прогноза осадок фундаментов* / Н.А. Цытович. – М.: Стройиздат, 1988. – 118 с.
13. Широков, В.Н. *Расчет осадок оснований с учетом структурной прочности грунтов* / В.Н. Широков, А.К. Мурашов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 1988. – № 5. – С. 21 – 23.

Надійшла до редакції 03.10.2013

© Д.М. Кіперман, В.С. Носенко, І.П. Бойко