



ГРУНТЫ

ГЛАВА ОБЩЕСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ ГРУНТОВ СОУТА ПРИГЛАШАЕТ СТУДЕНТОК СИОРИ И АМИ ПРИНЯТЬ УЧАСТИЕ В РАБОТЕ ЕГО ФАКУЛЬТАТИВА. ДЕВОЧКАМ ПРЕДСТОИТ УЗНАТЬ, ЧТО ТАКОЕ МЕХАНИКА ГРУНТОВ, И ПОНЯТЬ, НАСКОЛЬКО ЭТА НАУКА ВАЖНА В СТРОИТЕЛЬНОМ ДЕЛЕ. ПОД РУКОВОДСТВОМ СВОЕГО СТАРШЕГО НАСТАВНИКА СТУДЕНТКИ ЗНАКОМЯТСЯ СО СВОЙСТВАМИ ПОЧВ, УЧАТСЯ РАССЧИТЫВАТЬ НАПРЯЖЕНИЕ ГРУНТА ПОД ЕГО СОБСТВЕННЫМ ВЕСОМ И ПОД НАГРУЗКОЙ, ОПРЕДЕЛЯТЬ ЕГО ПРОЧНОСТЬ И ПРОГНОЗИРОВАТЬ ПРОСЕДАНИЕ.

ЗНАНИЕ ОСНОВ МЕХАНИКИ ГРУНТОВ ПОЗВОЛЯЕТ ПОДХОДИТЬ К СЛОЖНЫМ ЯВЛЕНИЯМ С РАЗНЫХ ПОЗИЦИЙ: ОНО ПРЕДПОЛАГАЕТ И ВЗГЛЯД НА ЗЕМЛЮ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПТИЦЫ В ПОЛЁТЕ, И ВЗГЛЯД НА ЧАСТИЦЫ ПОЧВЫ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ МУРАВЬЯ.

МАНГА ПОНРАВИТСЯ ЧИТАТЕЛЯМ ЛЮБОГО ВОЗРАСТА, ИНТЕРЕСУЮЩИМСЯ ГЕОЛОГИЕЙ, ПОЧВОВЕДЕНИЕМ И ОСНОВАМИ СТРОИТЕЛЬСТВА.

Интернет-магазин:
www.dmkpress.com

Оптовая продажа:
КТК «Галактика»
books@aliens-kniga.ru

DMK
издательство
www.dmk.ru

ISBN 978-5-97060-893-7



9 785970 608937 >

ГРУНТЫ

Каноу Ёсуке
Курохати

ЗАНИМАТЕЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО
ГРУНТЫ



Каноу Ёсуке
Курохати
G-grade, Ltd.



DMK
издательство

Ohmsha

Занимательная манга

Занимательное строительство

Грунты

マンガでわかる

土質力学

加納 陽輔／著

黒八／作画

ジーグレイブ／制作




Ohmsha

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ МАНГА

.....

ЗАНИМАТЕЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

ГРУНТЫ

Каноу Ёсуке

Художник Курохати

Перевод

С. Л. Плехановой



ДМК
ПРЕСС
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Москва
ДМК Пресс, 2021

УДК 624.131.4

ББК 38.581.1

K19

Каноу Ёсуке

K19 Занимательное строительство. Грунты / Каноу Ёсуке (автор), Курохати (худ.); пер. с яп. С. Л. Плехановой. — М.: ДМК Пресс, 2021. — 288 с. : ил. — (Серия «Образовательная манга»). — Доп. тит. л. яп.

ISBN 978-5-97060-893-7

Глава Общества исследования грунтов Соута Домон приглашает студенток Сиори и Ами принять участие в работе его факультатива. Девочкам предстоит узнать, что такое механика грунтов, и понять, насколько эта наука важна в строительном деле. Под руководством своего старшего наставника студентки ознакомятся со свойствами почв, научатся рассчитывать напряжение грунта под его собственным весом и под нагрузкой, определять его прочность и прогнозировать проседание.

Знание основ механики грунтов позволяет подходить к сложным явлениям с разных позиций: оно предполагает и взгляд на землю с точки зрения птицы в полёте, и взгляд на частицы почвы с точки зрения муравья. Вместе с героями манги читателю предстоит освоить этот комплексный подход и научиться моделировать явления, происходящие в почвах.

В приложениях к книге изложенная информация представлена в обобщённом виде, с примерами и пояснениями.

Манга заинтересует старших школьников и студентов, интересующихся геологией, почвоведением и основами строительства.

УДК 624.131.4

ББК 38.581.1

Copyright Manga de waku: Doshitsu-rikigaku (Manga Guide: Soil Mechanics)

By Kansy Esuke (Author), Illustration by Kurohati. Office sawa, Ltd. (Producer)

Published by Ohmsha, Ltd.

Russian language edition copyright © 2021 by ДМК Пресс

Все права защищены. Никакая часть этого издания не может быть воспроизведена в любой форме или любыми средствами, электронными или механическими, включая фотографирование, ксерокопирование или иные средства копирования или сохранения информации, без письменного разрешения издательства.

ISBN 978-4-274-06849-2 (яп.)

ISBN 978-5-97060-893-7 (рус.)

Copyright © 2018 by and Office sawa, Ltd.

© Издание, перевод, ДМК Пресс, 2021

ПРЕДИСЛОВИЕ

Об этой книге

Раз уж вы обратили внимание на эту книгу, то, вероятно, у вас есть к данной теме интерес или вопросы, не так ли? Возможно, вы спрашивали себя: «Что это за штука такая – механика грунтов?» Такие мысли помогают мне и сегодня ощущать твердую почву под ногами.

Данная книга для тех, кто думает, например:

- «Я хотел бы изучить механику грунтов, но...»;
- «Я уже изучал механику грунтов, однако...»;
- «В манге всякие сложные дисциплины преподносятся в понятной форме...» и т. д.

Кроме того, я писал эту книгу с надеждой, что по мере обучения понятие «почва» будет становиться читателям все ближе. Движущей силой книги был вопрос «Что это за штука такая – механика грунтов?» Роль этой книги я вижу в том, чтобы, используя преимущества манги, дать наглядное общее представление о механике грунтов. В манге представлены материалы для начинающих знакомство с предметом и для продолжающих изучение данной темы.

Каждая глава книги состоит из:

- объяснения, что такое механика грунтов на знакомых нам примерах (собственно манга);
- более углубленного дополнительного материала (текстовая часть);
- обобщения изложенной информации с примерами и пояснениями (приложение).

Книга состоит из 7 глав, в которых рассматриваются вопросы от повседневных до инженерных. Если читать даже только эту мангу, общее представление о предмете будет получено, но чтение дополнительных материалов позволит углубить знания. Содержание каждой главы ориентировано на читателей, желающих систематически изучать механику грунтов, и написано в соответствии с учебниками по этой теме. Для тех же, кто хочет получить более глубокие знания, я рекомендую читать эту мангу параллельно с другими специализированными книгами.

О механике грунтов

Грунт представляет собой смесь твердых, жидких и газообразных тел. Кроме того, как природное вещество он подвергается воздействию различных условий, поэтому существует множество видов грунтов. И поэтому трудно представить почву в одной последовательной теории. Механика грунтов же является наукой, систематизирующей знания и опыт в решении проблем путем упрощения и моделирования (см. «Грунтовые очки») явлений, происходящих в почвах. И ещё остаются области, вызывающие интерес и вопросы (см. «Задача от Терцаги»). Для изучения такой непростой дисциплины, как механика грунтов, необходимы и взгляд на землю с точки зрения птицы в полёте, и взгляд на частицы почвы с точки зрения муравья. В этой книге мы попытаемся взгля-

нать на поведение грунтов с обеих точек зрения, для чего будем опираться и на знакомые всем явления, и на интуитивное «чувство почвы», накладывая их на опыт и представления читателей. Знание основ механики грунтов, поддерживающей фундамент общества, полезно не только потому, что отвечает на интересные вопросы или помогает в сдаче экзаменов, оно также является хорошим инструментом для тренировки подхода к сложным явлениям с разных точек зрения (птицы и муравья). И я буду счастлив, если эта книга хоть немного поможет заложить основы такого подхода.

При написании данной книги я опирался на многочисленные работы, перечисленные в приведенном в конце списке литературы. Я пытался сделать книгу дружественной и понятной для тех, кто впервые сталкивается с этой темой, однако из-за природы почв или, пожалуй, скорее из-за моей натуры история Соуты получилась довольно длинной. Не могу отрицать, что особенно во второй половине книги я слишком увлекся. Но благодаря сотрудникам Ohmsha, G-grape и художнику Курохати получилась гармоничная и лёгкая для чтения книга с использованием уникальных возможностей манги. Кроме того, с момента планирования данной книги до её научного редактирования множеством советов помогали профессора Университета Нихон Нисио Синья и Акиба Сёти. Выражаю всем глубочайшую благодарность.

Апрель 2016 года

Каноу Ёсуке

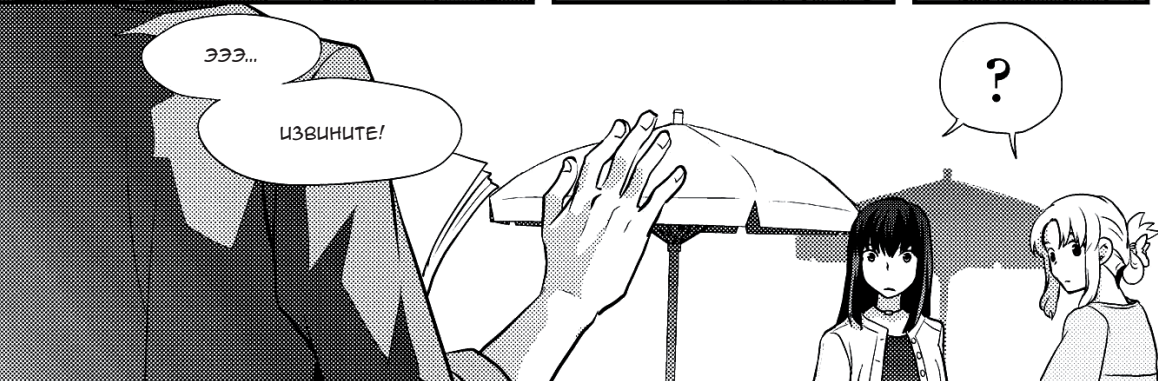
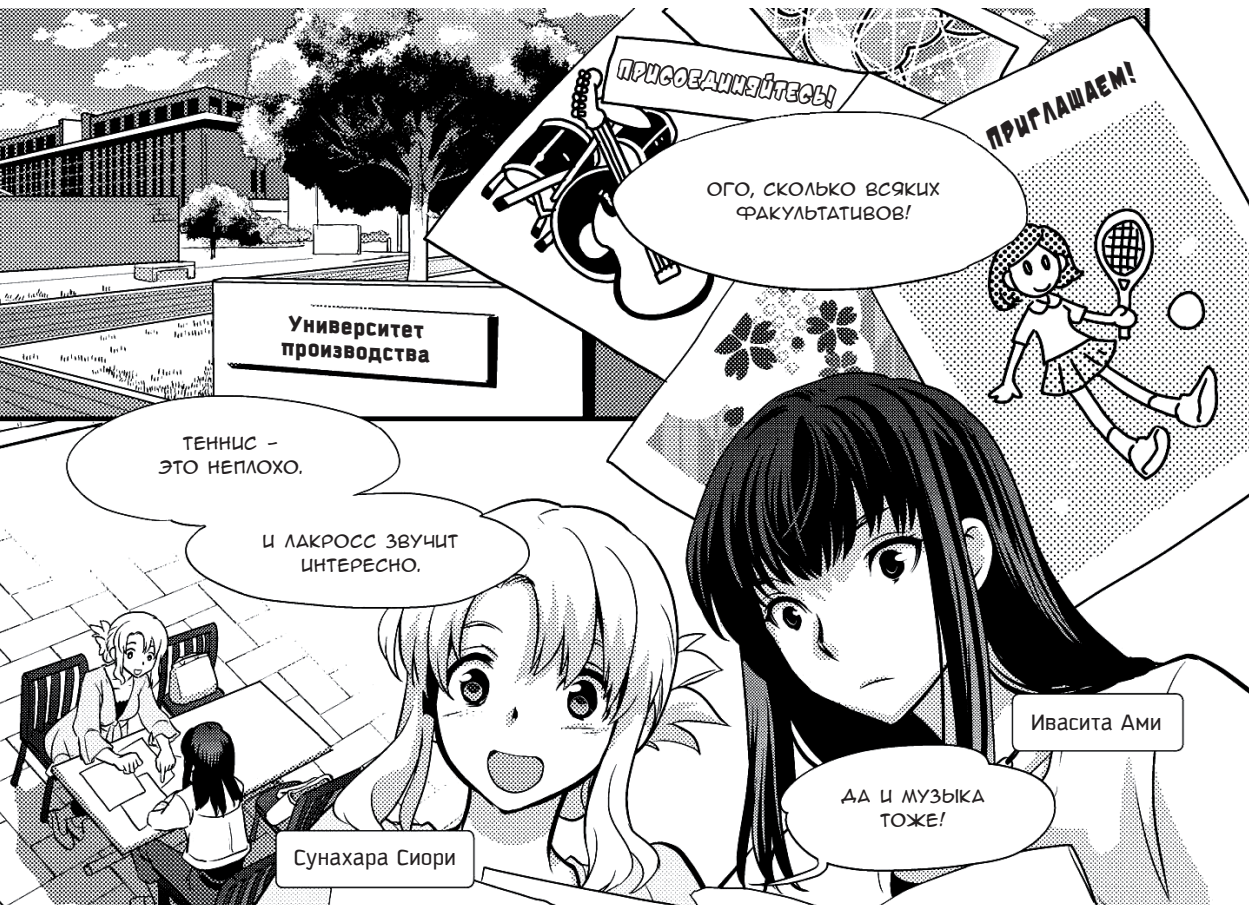
СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	V
ПРОЛОГ	1
 Глава 1. ПОЧВА? ОТПОРНЫЙ СЛОЙ?	11
1.1. Что такое механика грунтов	13
1.2. История возникновения почвы	16
1.3. Возникновение грунта	21
1.4. Исследование грунта	27
Дополнительный материал.....	32
 Глава 2. КАКАЯ ПОЧВА?	37
2.1. Что такое почва в механике грунтов?	41
2.2. Состояние почвы	45
2.3. Свойства почв	52
2.4. Виды почв	56
Дополнительный материал.....	66
 Глава 3. ВОДА В ПОЧВЕ?	75
3.1. Давление воды в грунтах	79
3.2. Течение подземных вод	82
3.3. Водопроницаемость почвы	89
3.4. Определение расхода воды	94
Дополнительный материал.....	100
 Глава 4. ВНУТРЕННЯЯ СИЛА ГРУНТА?	107
4.1. Скрытые в земле ответы.....	112
4.2. Напряжение грунта под собственным весом.....	117
4.3. Напряжение грунта под нагрузкой	124
4.4. Напряжение грунта из-за фильтрационного потока	132
Дополнительный материал.....	143

Глава 5. КОНСОЛИДАЦИЯ ГРУНТА	149
5.1. Что такое консолидация грунта?	152
5.2. Процесс консолидации.....	156
5.3. Уравнение консолидации	163
5.4. Прогноз проседания уплотнённого грунта	170
Дополнительный материал.....	177
Глава 6. ПРОЧНОСТЬ ГРУНТА.....	185
6.1. Что такое прочность грунта	190
6.2. Критерий прочности грунта.....	196
6.3. Испытание грунта на сдвиг	202
6.4. Виды грунта и особенности сдвига.....	207
Дополнительный материал.....	212
Глава 7. ПРОБЛЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ И ПОДДЕРЖКИ ГРУНТОВ	219
7.1. Что такое давление грунта на подпорную стену	222
7.2. Теория давления грунта Кулона и Ранкина.....	230
7.3. Устойчивость склона	233
7.4. Анализ устойчивости склона.....	239
7.5. Несущая способность фундамента	246
7.6. Определение несущей способности	254
Дополнительный материал.....	264
ЭПИЛОГ	275

ПРОЛОГ





НЕ МОГЛИ БЫ ВЫ
СЕЙЧАС ЗАПОЛНИТЬ
НЕБОЛЬШУЮ АНКЕТУ?

СРЕДИ ТЕХ, КТО ОТВЕТИТ
НА ВОПРОСЫ АНКЕТЫ, БУДЕТ
ПРОВЕДЕНА ЛОТЕРЕЯ, И МОЖНО
ВЫИГРАТЬ БРАСЛЕТ ИЗ БИРЮЗЫ.

ЧТО СКАЖЕТЕ?

Домон Соута

ВЫГЛЯДИТ
ДОРОГО... ЧТО-ТО
ПОДОЗРИТЕЛЬНО
ЭТО ВСЁ.

СИОРИ,
УХОДИМ.

ДА, ДА, ДА!
Я УЧАСТВУЮ!

ВСЁ-ТАКИ
В УНИВЕРСИТЕТЕ
ТАК ЗАДОРОВО!

КАК ХОРОШО,
ЧТО Я СЮДА ПОСТУПИЛА.

.....

ПРОЛОГ



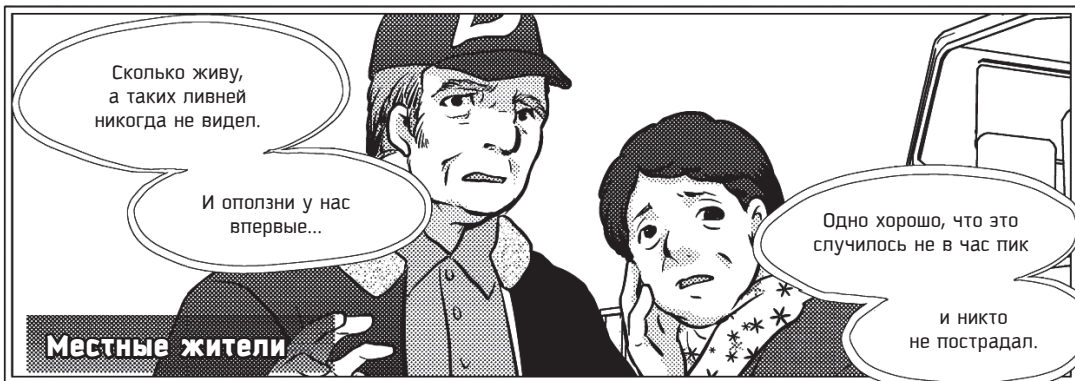
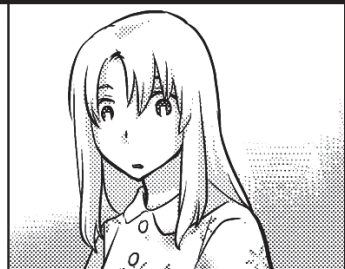
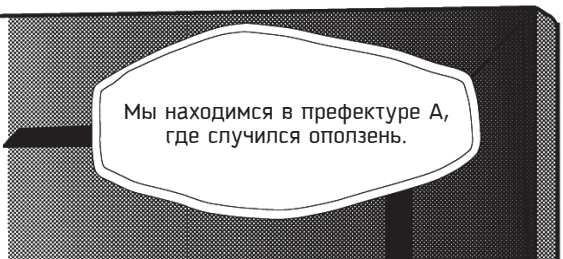
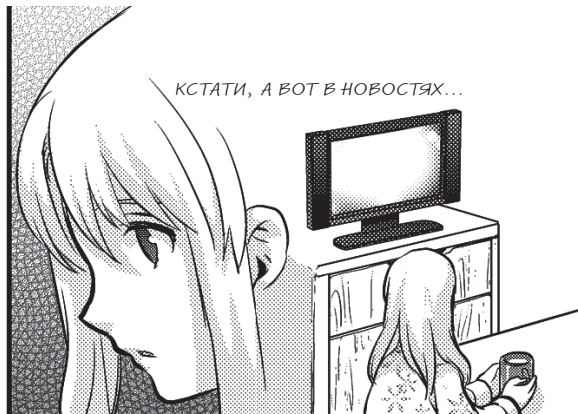
Исследовательская группа грунтов
представляет:
Весенний университетский опрос

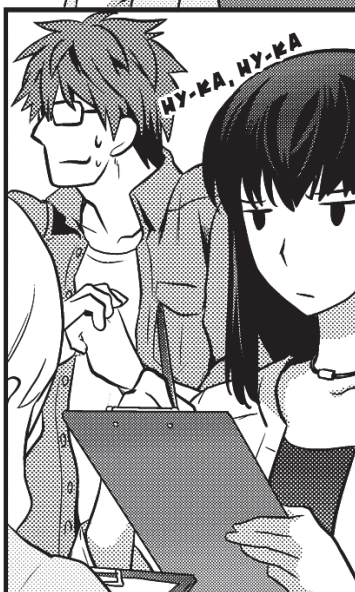
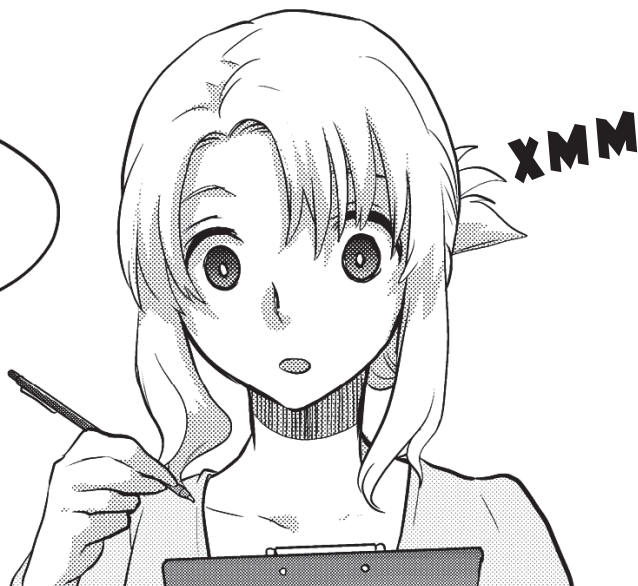
Совместно с заявкой
на вступление
в исследовательское
общество грунтов

1. Интересует ли вас почва? (да, нет)
2. Знаете ли вы о замечательных свойствах грунтов? (да, нет)
3. Хотите ли вы больше узнать о грунтах? (да, нет)
4. Интересуют ли вас проблемы грунтов? (да, нет)
5. Знаете ли вы о причинах оползней? (да, нет)
6. Если вы ответили «нет» на предыдущий вопрос, то хотели бы узнать о причинах оползней? (да, нет)

Студенческий номер:
Имя:







ская группа грунтов
дставляет:
университетский опрос

Совместно с заявкой
на вступление
в исследовательское
общество грунтов

интересует ли вас почва?

(да, ~~нет~~)

Знаете ли вы о замечательных
свойствах грунтов?

(да, ~~нет~~)

3. Хотите ли вы больше узнать
о грунтах?

(да, ~~нет~~)

4. Интересуют ли вас проблемы
грунтов?

(да, ~~нет~~)

Знаете ли вы о причинах оползней?

(да, ~~нет~~)

ВОТ ТУТ!
ТУТ НАПИСАНО "С ЗАЯВКОЙ
НА ВСТУПЛЕНИЕ В ИССЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ
ОБЩЕСТВО ГРУНТОВ"!

НУ...
ЭТО...

ЧТО ЭТО
ВООБЩЕ ТАКОЕ?

ОБЪЯСНИ
КАК СЛЕДУЕТ!



СКАЗАТЬ
ПО ПРАВЕ...

Я ГЛАВА
ИССЛЕДОВАТЕЛЬНОГО
ОБЩЕСТВА ГРУНТОВ.



В СЛЕДУЮЩЕМ ГОДУ
ОБЩЕСТВУ ИССЛЕДОВАНИЯ
ГРУНТОВ ИСПОЛНЯЕТСЯ 50 ЛЕТ,
А В НЁМ СЕЙЧАС НИКОГО,
КРОМЕ МЕНЯ, НЕТ.

НЕПОПУЛЯРНАЯ
НЫНЧЕ ТЕМА...

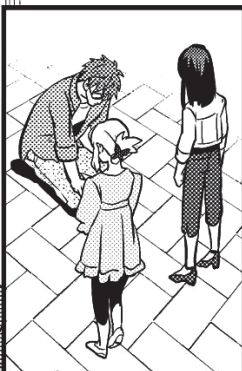
ВОТ И Я УЖЕ
ЧЕТВЕРОКУРСНИК...



И ЕСЛИ СЕЙЧАС НЕ ПОЯВЯТСЯ
НОВЫЕ ЧЛЕНЫ ОБЩЕСТВА,
ТО ЕГО ИСТОРИЯ ЗАКОНЧИТСЯ
49 ГОДАМИ... ПОЭТОМУ...

Я ПОНИМАЮ,
ЧТО НЕЛЬЗЯ ТАК БЫЛО
ДЕЛАТЬ, НО У МЕНЯ НЕТ
ДРУГОГО ВЫХОДА.

ПРОШУ
ПРОЩЕНИЯ!



ВОТ КАК! ПОНИМАЮ.

ВОТ ЕЩЁ!
ТЫ РАЗВЕ НЕ ПОНИМАЕШЬ,
ЧТО ТОЛЬКО ЧТО НАС ЧУТЬ
НЕ ОБМАНУЛИ?!



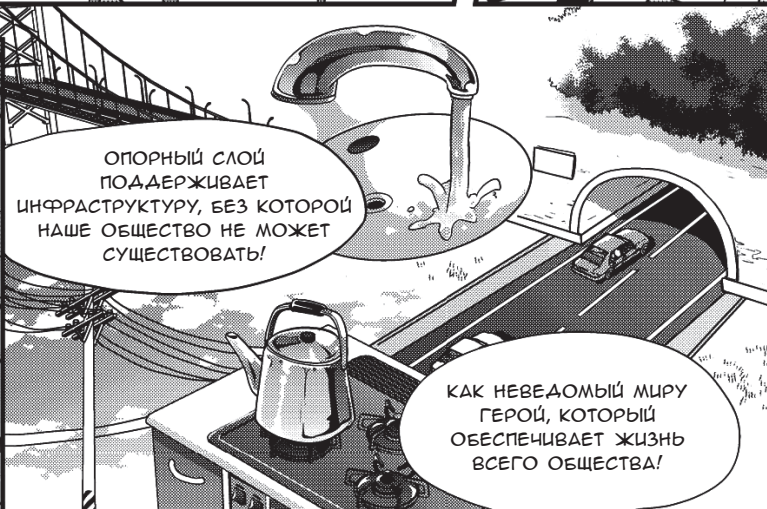
НУ, ПОШЛИ.

ПОДОЖДИТЕ
НЕМНОГО!



ЕСЛИ ВЫ
ВСТУПИТЕ В
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ
ГРУППУ
ГРУНТОВ...

...ТО ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЙ
МОЖНО БУДЕТ
СКОЛЬКО УГОДНО
ЕЗДИТЬ НА МОРЕ
И В ГОРЫ...





А ЕСЛИ ИССЛЕДОВАНИЕМ
ГРУНТОВ ЗАНИМАЕТСЯ ДЕВОЧКА,
ЭТО ВООООЩЕ КРУТО!



СЛУШАЙ, АМИ.
Я... ПОЖАЛУЙ,
ПОПРОБУЮ ВСТУПИТЬ
В ЭТУ ГРУППУ.

ЧТО?

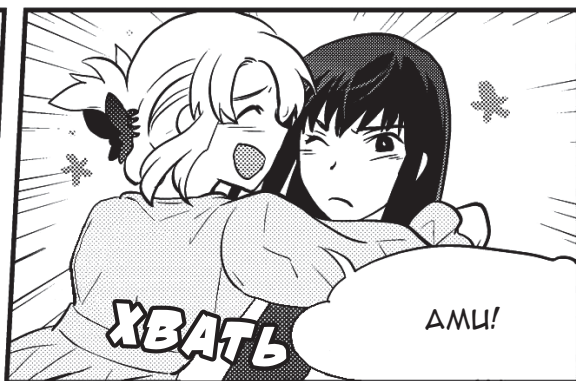


КАК Я РАД!
ТЕПЕРЬ ГРУППА
ИССЛЕДОВАНИЙ ГРУНТОВ
СМОЖЕТ ВСТРЕТИТЬ
ПЯТИДЕСЯТИЛЕТИЕ!



ЭХ, ЧТО Ж.
НИЧЕГО НЕ ПОДЕЛАЕШЬ.
Я ТОЖЕ ВСТУПАЮ!

НЕ МОГУ ОСТАВИТЬ
СЮРИ ОАДУ С ЭТИМ
МОШЕННИКОМ!



ХВАТЬ

АМИ!



НО УЧТИ, ЕСЛИ ЕЩЁ РАЗ
ВЫКИНЕШЬ ЧТО-НИБУДЬ ТАКОЕ,
Я СООБЕЩУ В УНИВЕРСИТЕТ,
И ТВОЙ ФАКУЛЬТАТИВ
СРАЗУ ЗАКРЮТ!

ЗЫРК



!!!

ХОРОШО.

ГЛАВА 1

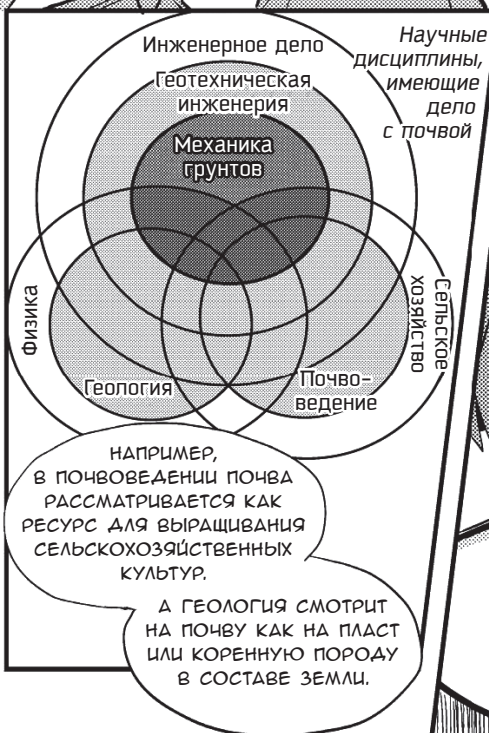
ПОЧВА? ОПОРНЫЙ СЛОЙ?

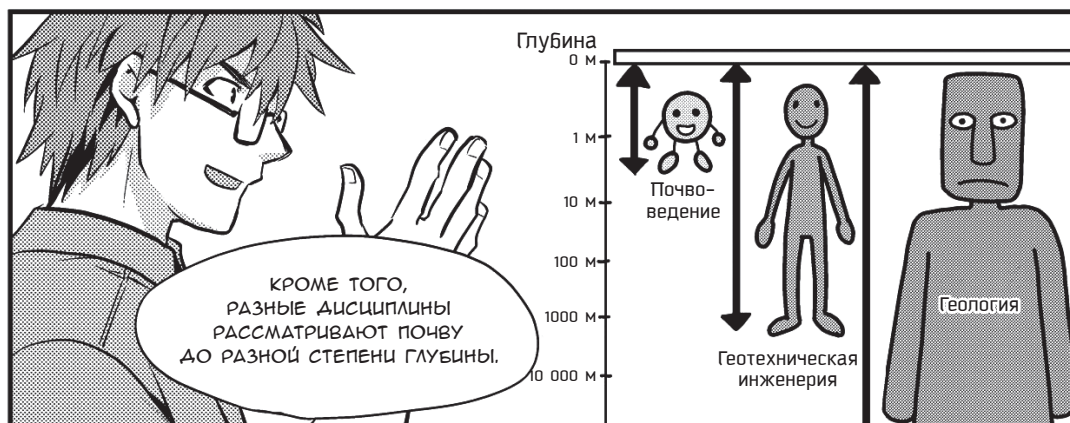






1.1. ЧТО ТАКОЕ МЕХАНИКА ГРУНТОВ

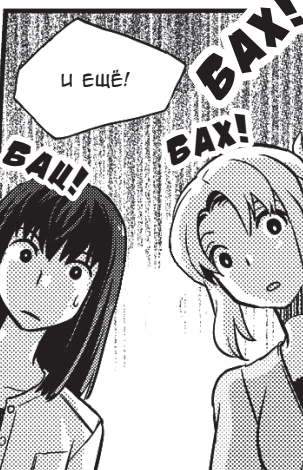
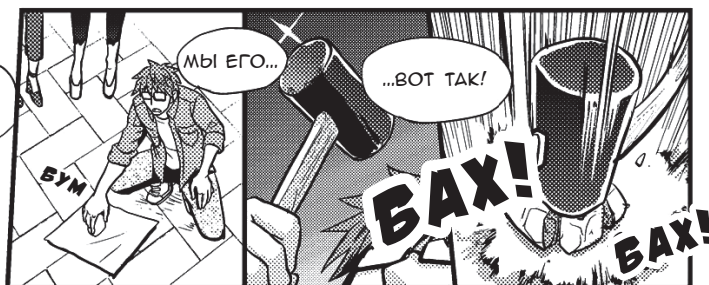


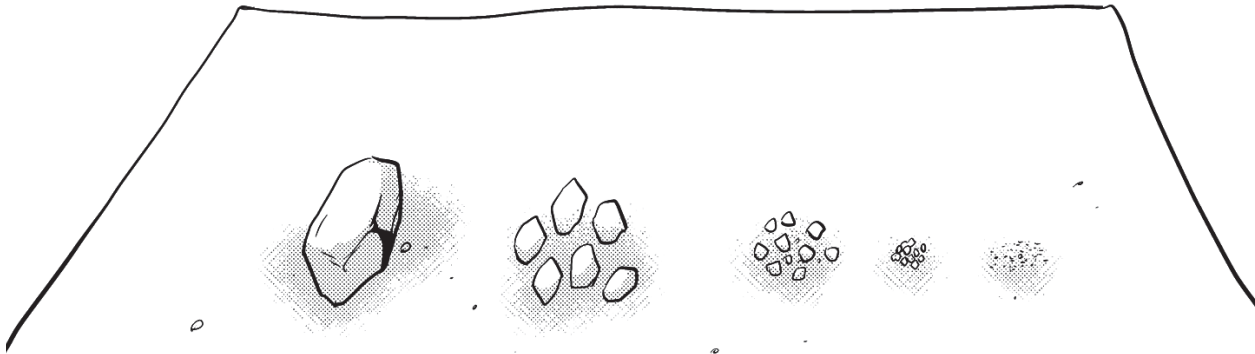




¹ Научная дисциплина, которая решает инженерные задачи и проблемы, связанные с грунтами, опираясь на такие дисциплины, как механика почв, теория упругости, теория пластичности, гидравлика и другие (Геотехническое общество).

1.2. ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЧВЫ





КАК ОБРАЗУЕТСЯ
ПОЧВА, ТЕПЕРЬ
ПОНЯТНО...

...НО КАК ТОГДА
ОБРАЗУЮТСЯ ГОРНЫЕ
ПОРОДЫ, ИЗ КОТОРЫХ
ПОТОМ ПОЛУЧАЕТСЯ
ПОЧВА?

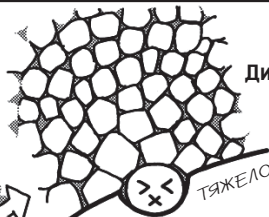
ХОРОШИЙ
ВОПРОС!

ПРЕЖДЕ ВСЕГО ЕСТЬ
МАГМАТИЧЕСКИЕ ГОРНЫЕ
ПОРОДЫ, КОТОРЫЕ
ОБРАЗУЮТСЯ ИЗ ЗАСТЫВШЕЙ
И ЗАТВЕРДЕВШЕЙ МАГМЫ.

Магматические горные породы	Вулканические породы	Горные породы, образованные вследствие быстрого остывания и затвердевания магмы на поверхности земли или около её поверхности. Минеральные зёрна мелкие
	Плутонические породы	Горные породы, образованные вследствие медленного остывания и затвердевания магмы глубоко под землёй. Минеральные зёрна крупные

ПО ТИПУ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ
ОНИ ПОДРАЗДЕЛЯЮТСЯ
НА ДВА ВИДА.

ЗАТЕМ ЧАСТИЦЫ ПОЧВЫ
ЗАПОЛНЯЮТ ЩЕЛИ И ЯМКИ
НА ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗОВАВШЕЙСЯ
ПОРОДЫ, ФОРМИРУЯ НОВЫЙ СЛОЙ
ЗЕМЛИ.



Диagenез



ПО МЕРЕ ОСАЖИВАНИЯ
СЛОЙ СТАНОВИТСЯ ВСЁ ТОЛЩЕ, И ИЗ-ЗА
ДАВЛЕНИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ (СМ. ГЛ. 4)
И ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ ОН НАЧИНАЕТ
ЗАТВЕРДЕВАТЬ, ПРЕВРАЩАЯСЬ
В ОСАДОЧНУЮ ГОРНУЮ
ПОРОДУ.

ДАННЫЙ ПРОЦЕСС
НАЗЫВАЕТСЯ
ДИАГЕНЕЗОМ.

Образуются так называемые осадки разного рода

ЗАТЕМ МАГМАТИЧЕСКИЕ
И ОСАДОЧНЫЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ
ПОДВЕРГАЮТСЯ ВОЗДЕЙСТВИЮ
ТЕМПЕРАТУРЫ, ДАВЛЕНИЯ И ПРОЧИХ
ФАКТОРОВ, ВСЛЕДСТВИЕ ЧЕГО В НИХ
ПРОИСХОДЯТ МИНЕРАЛЬНЫЕ
И СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ.

ТАКИЕ ПОРОДЫ
НАЗЫВАЮТСЯ
МЕТАМОРФИЧЕСКИМИ
ГОРНЫМИ
ПОРОДАМИ.

ХММ

ТАКИМ ОБРАЗОМ,
ЕСЛИ ГОВОРИТЬ УПРОЩЁННО,
ТО ГОРНЫЕ ПОРОДЫ МОЖНО
РАЗДЕЛИТЬ НА ТРИ ВИДА
ПО ТИПУ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ.

Я ко всему
остыл

И я тоже
прошёл
все эти
стадии

Метамор-
фические

Магмати-
ческие

Осадочные

Такое большое
давление извне



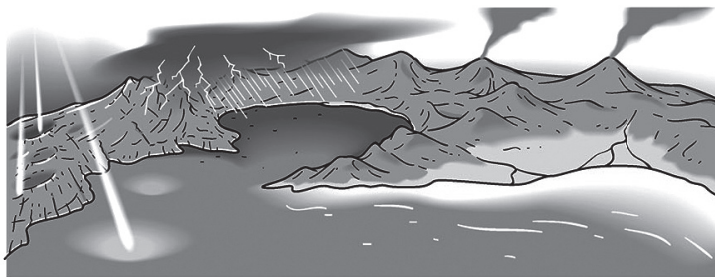
Представьте себе, когда только образовалась земная кора, ещё не существовало ни почвы, ни какой-либо жизни на Земле, были только вода, атмосфера и магматические горные породы. Затем на Земле происходили масштабные извержения вулканов, образования гор, поверхность Земли то поднималась, то опускалась, многократно повторялось выветривание и осаживание пород, и так получилась Земля, какой мы её знаем сейчас. Как вам? Здорово, правда?



Да!



Да, да.



Вид Земли в пору образования земной коры



Геологические явления, вызываемые разнообразными воздействиями природы, называются **агентами**. Эндогенные агенты возникают из-за вулканической деятельности, сейсмического движения и тому подобных явлений. А экзогенные возникают под воздействием воды, воздуха, солнечного света, живых существ и т. д.



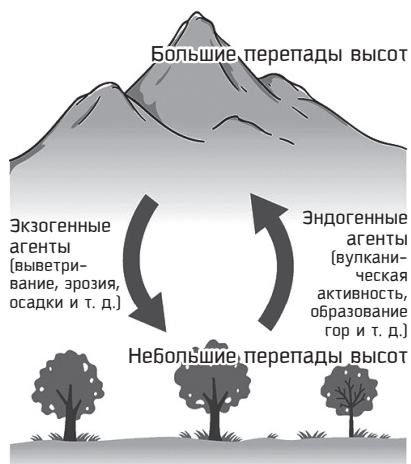
Земной коре потребовалось несколько десятков тысяч лет, чтобы эндогенные агенты сформировали такие большие перепады высот. В то же время под воздействием экзогенных агентов горные породы, находящиеся близко к поверхности земли, постоянно выветриваются и разрушаются, постепенно превращаясь в почву и меняя свой внешний вид. Здорово, правда?



Ага!



...



Под воздействием эндогенных и экзогенных агентов меняется вид Земли



Теперь понятно, как образуется почва?



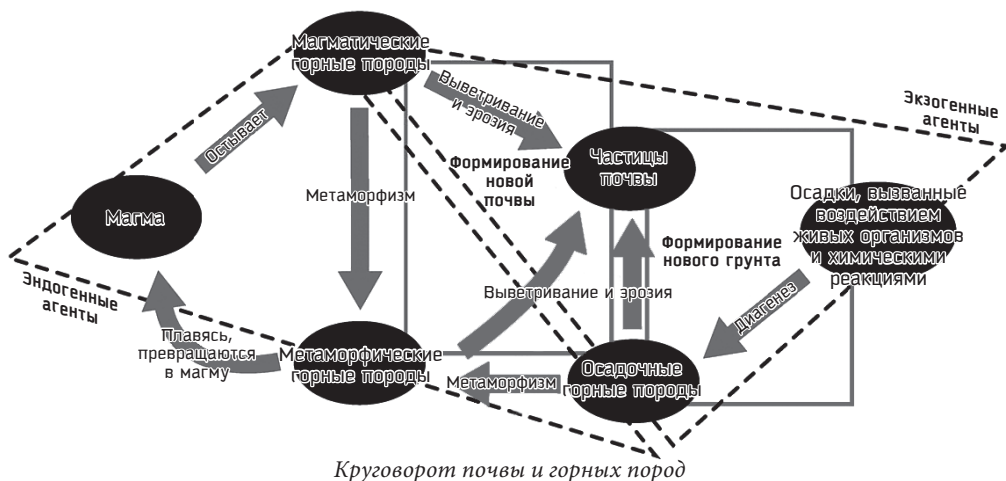
Почва образуется в результате выветривания и эрозии горных пород, верно?



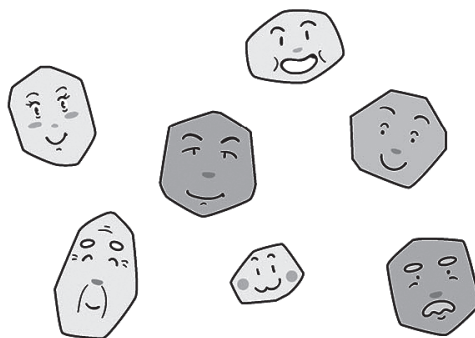
Но в конце концов и горные породы образуются из почвы...



Такой круговорот получается!



Да, именно! И почвы определяются не только степенью выветривания и эрозии, но также они обретают разные характеристики в зависимости от первоначальной горной породы и от места, где находятся. Другими словами, характеры почв, как и у людей, различаются в зависимости от их личной истории.



Почвы с разными характерами

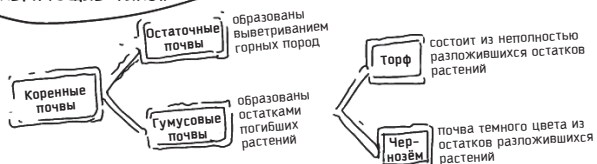
1.3. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ГРУНТА



ПРЕЖДЕ ВСЕГО ПЛАСТЫ ПОДРАЗДЕЛЯЮТСЯ НА **КОРЕННЫЕ ПОЧВЫ**, ТО ЕСТЬ ПОЧВЫ, ОБРАЗОВАННЫЕ ОСАДКАМИ В ТОМ ЖЕ МЕСТЕ, ГДЕ ПРОИСХОДИЛО

ВЫВЕТРИВАНИЕ И ЭРОЗИЯ, И НА **ДРЕЙФУЮЩИЕ ПОЧВЫ**, ТО ЕСТЬ ПОЧВЫ, ОБРАЗОВАННЫЕ ОСАДКАМИ, ПЕРЕНЕСЕННЫМИ В ДРУГОЕ МЕСТО.

КРОМЕ ТОГО, КОРЕННЫЕ ПОЧВЫ МОЖНО ЕЩЕ ПОДРАЗДЕЛИТЬ НА СЛЕДУЮЩИЕ ТИПЫ.



В ЯПОНИИ ОСТАТОЧНЫЕ ПОЧВЫ ОБРАЗОВАНЫ ИЗ ГРАНИТНЫХ ПОРОД И НАЗЫВАЮТСЯ **ДЕКОМПОЗИРОВАННЫМ ГРАНИТОМ**.

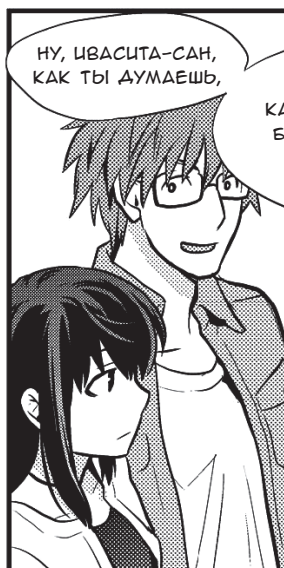
Способ переноса	Тип дрейфующей почвы	Отличительные особенности
Гравитация	Коллювиальные почвы	Почвы, перемещенные на небольшие расстояния под влиянием силы тяжести При образовании вследствие выветривания горных пород называются осыпями
Водные потоки	Аллювиальные почвы	Почвы, переносимые потоками воды и осаждаемые на равнинах и в эстуариях В зависимости от мест осадков бывают морские отложения и озерные отложения
Ветер	Золовые почвы	Отложения, принесённые ветром Типичным представителем является китайский желтозём
Вулкан	Вулканогенно-осадочные породы	Образуются вследствие отложений вулканического песка, вулканического пепла и т. д. после извержения вулканов Подразделяются на вулканогенные крупнозернистые почвы и на вулканогенные мелкозернистые почвы
Ледник	Ледниковые почвы	Породы, переносимые ледниками и оседающие на суше или в море Примером такой породы, осевшей в море, являются быстрые глины

ДРЕЙФУЮЩИЕ ЖЕ ПОЧВЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПОСОБА ПЕРЕНОСА ПОДРАЗДЕЛЯЮТСЯ СЛЕДУЮЩИМ ОБРАЗОМ.

ОГО-ГО, СКОЛЬКО ИХ...

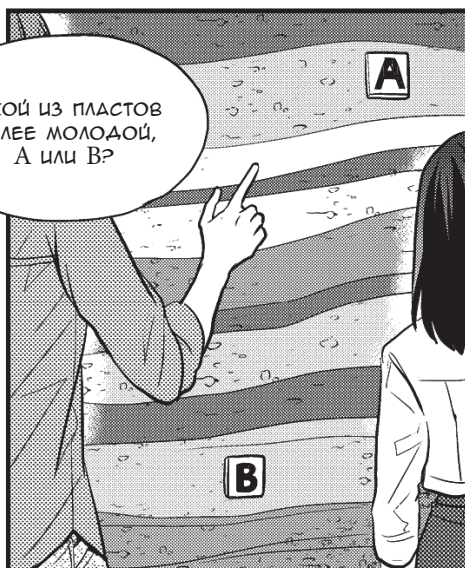
ДЕЙСТВИТЕЛЬНО, ВИДОВ ДРЕЙФУЮЩИХ ПОЧВ, РАЗЛИЧАЮЩИХСЯ ПО СПОСОБАМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ, ДОВОЛЬНО МНОГО.

КСТАТИ ГОВОРЯ, МНОГИЕ ИЗ КРУПНЫХ ЯПОНСКИХ ГОРОДОВ НАХОДЯТСЯ НА АЛЛЮВИАЛЬНЫХ РАВНИНАХ, ОБРАЗОВАННЫХ ИЗ ПЛАСТОВ АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ПОЧВ.



НУ, ИВАСИТА-САН,
КАК ТЫ ДУМАЕШЬ,

КАКОЙ ИЗ ПЛАСТОВ
БОЛЕЕ МОЛОДОЙ,
А ИЛИ В?



НУ, ВЦАИМО,
КОТОРЫЙ ВЫШЕ,
ТО ЕСТЬ А, ТАК?



ВЕРНО.

ПЛАСТЫ НАКЛАДЫВАЮТСЯ
ДРУГ НА ДРУГА СНИЗУ ВВЕРХ,
ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ ПРИНЦИПОМ
СУПЕРПОЗИЦИИ.



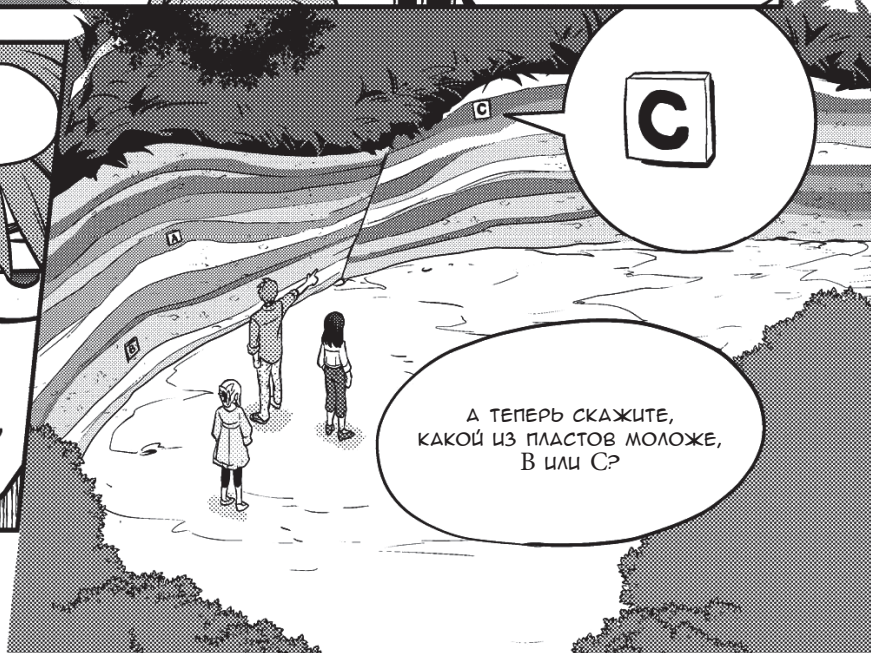
ПОРЯДОК ПЛАСТОВ
НАЗЫВАЮТ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ
СТРАТ.



ГЛЯДЯ НА ТАКУЮ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ
СТРАТ, МОЖНО ПОНЯТЬ,
КАКОЙ СЛОЙ
СФОРМИРОВАЛСЯ ПОЗЖЕ.

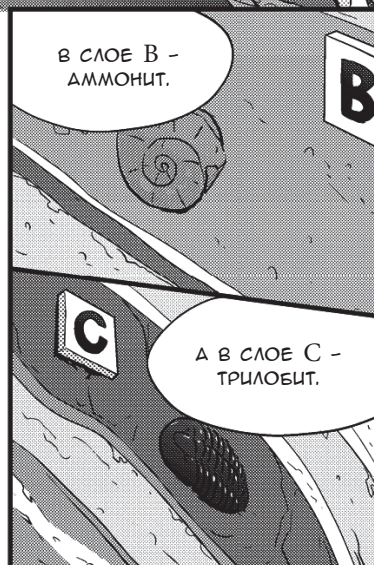
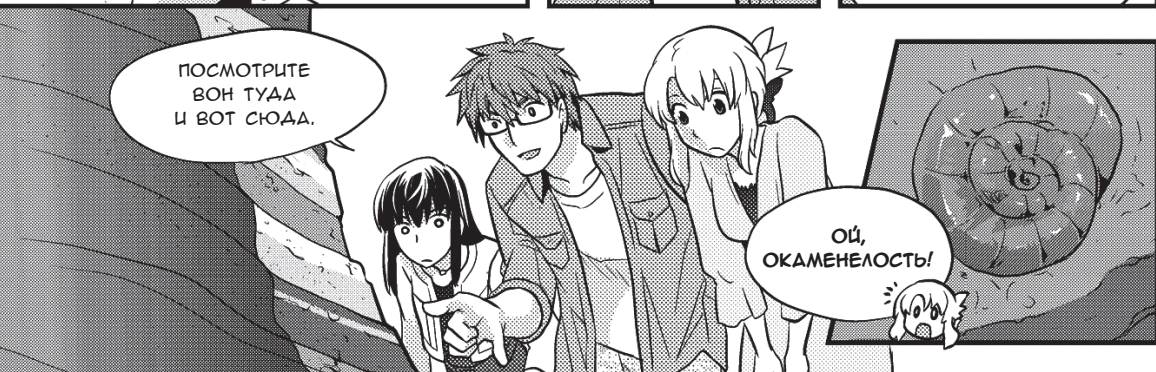


ХИ-ХИ-ХИ



C

А ТЕПЕРЬ СКАЖИТЕ,
КАКОЙ ИЗ ПЛАСТОВ МОЛОЖЕ,
В ИЛИ С?



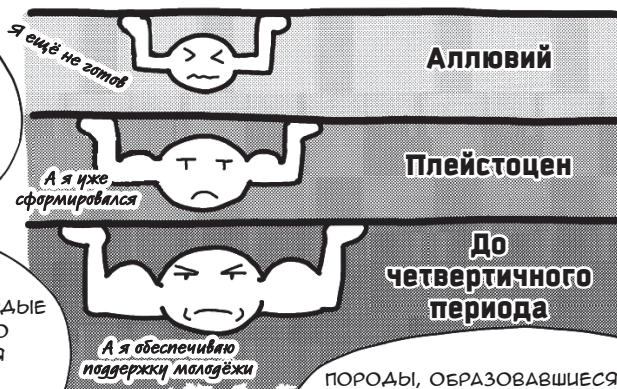


Эра	Период	Эпоха	Век	Млн лет назад
Кайнозой	Четвертичный	Голоцен		0,0117
		Плейстоцен	поздний	[0,126]
			средний	[0,78]
			ранний	2,58
	Неоген	Плиоцен	поздний	3,60
			ранний	5,33
		Миоцен		23,0
	Палеоген	Олигоцен		33,9
		Эоцен		55,8
		Палеоцен		65,5



ПЛАСТЫ, СФОРМИРОВАННЫЕ ПОСЛЕ КОНЕЧНОГО ПЕРИОДА ПЛЕЙСТОЦЕНА (10–20 ТЫС. ЛЕТ НАЗАД), НАЗЫВАЮТСЯ АЛЛЮВИЕМ И СЧИТАЮТСЯ МОЛОДЫМИ И МЯГКИМИ.

А УЖЕ СФОРМИРОВАВШИЕСЯ ТВЁРДЫЕ ПЛАСТЫ ЧЕТВЕРТИЧНОГО ПЕРИОДА НАЗЫВАЮТСЯ ПЛЕЙСТОЦЕНОВЫМИ, И ИМЕННО ОНИ ИСПОЛЗУЮТСЯ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ КОНСТРУКЦИЙ.



ПОРОДЫ, ОБРАЗОВАВШИЕСЯ ЕЩЁ РАНЬШЕ, В НЕОГЕНЕ И ПАЛЕОГЕНЕ, ОЧЕНЬ ТВЁРДЫЕ. ОДНАКО ОНИ НАХОДЯТСЯ СЛИШКОМ ГЛУБОКО, ПОЭТОМУ НАПРЯМУЮ С НИМИ СОПРИКАСАТЬСЯ ПРИХОДИТСЯ ДОВОЛЬНО РЕДКО.



1.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ГРУНТА



Многие из крупных городов в Японии находятся на аллювиальных равнинах, то есть они располагаются на мягких грунтах. Поэтому для безопасного социального строительства очень важно понимать свойства таких грунтов. Как думаете, что для этого можно предпринять?



Ну... может, как-то прямо у грунта спросить?



Вроде того. Исследование грунта делится на предварительное – для чернового варианта проекта, и основное – для детального проекта и плана строительства. Основное исследование, в свою очередь, подразделяется на полевое, которое проводится непосредственно на месте предполагаемого строительства, и лабораторное, когда материалы увозятся с места и подвергаются тестированию в лаборатории.



Схема исследований грунта с момента планирования до момента строительства



Само собой, время и финансы не безграничны, поэтому важно выбрать наиболее подходящий способ исследований и испытаний.



Кстати, Ивасита-сан, ты знаешь, что такое бурение?



Это когда в земле сверлят отверстия, вроде так?



И это знает... При бурении в грунте делается скважина диаметром около 10 см, и проводится наблюдение за уровнем грунтовых вод и состоянием грунта.

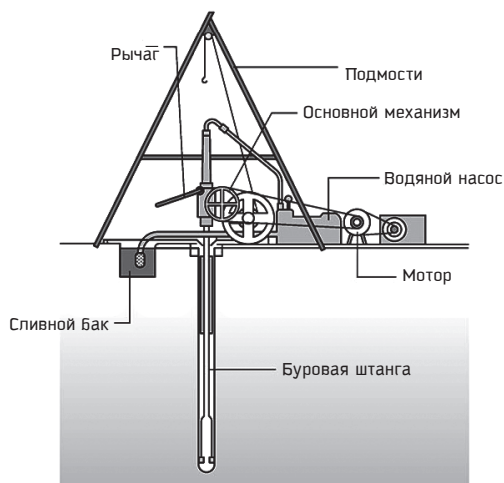


Схема буровой установки



Через скважину, сделанную буровой установкой, проводят исследования грунта, которые подразделяются на следующие виды.



Обзор полевых исследований



А до какой глубины обычно бурят?



Это зависит от задачи, бывает, что исследования проводят на глубине более 1000 метров.



1000 метров?!



Удивительно, правда? Затем во время выемки грунта в скважину закачивается вода под давлением. Это необходимо для того, чтобы на поверхность всплыли обломки пород и куски почв, а кроме того, давление воды поддерживает стены скважины, предотвращая скважину от обрушения.

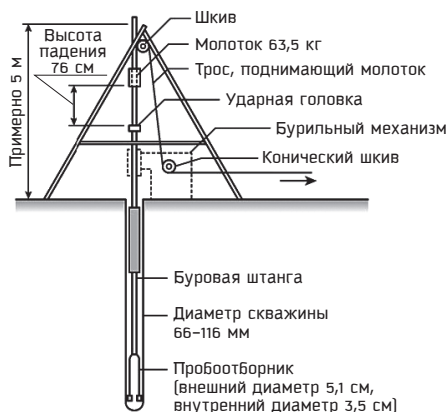


А что такое зондирование?



Зондирование часто используется на этапе предварительных исследований как метод определения относительной прочности грунта. Его используют на глубине, где трудно провести непосредственное наблюдение, а принцип действия немного похож на прослушивание стетоскопом².

Метод состоит в том, что наконечник буровой штанги снабжается резистором, измеряющим сопротивление. Зонд постепенно погружают, вращают и тянут на разной глубине, делая замеры показателей сопротивления грунта (см. стр. 34).



Стандартный тест на проникновение – это один из видов полевых испытаний, который часто проводится в ходе предварительных изысканий. Пробоотборник устанавливается в скважину, пробуренную на заданную глубину. Специальный молоток весом 63,51 кг свободно опускается с высоты 76 см, и замеряется количество падений молотка (N), необходимое для того, чтобы пробоотборник погрузился на 30 см. Кроме того, во время стандартного теста на проникновение одновременно с таким зондированием можно взять образцы грунта в целевых участках и, сопоставляя их со значением N, определить свойства грунта.

Схема стандартного теста на проникновение

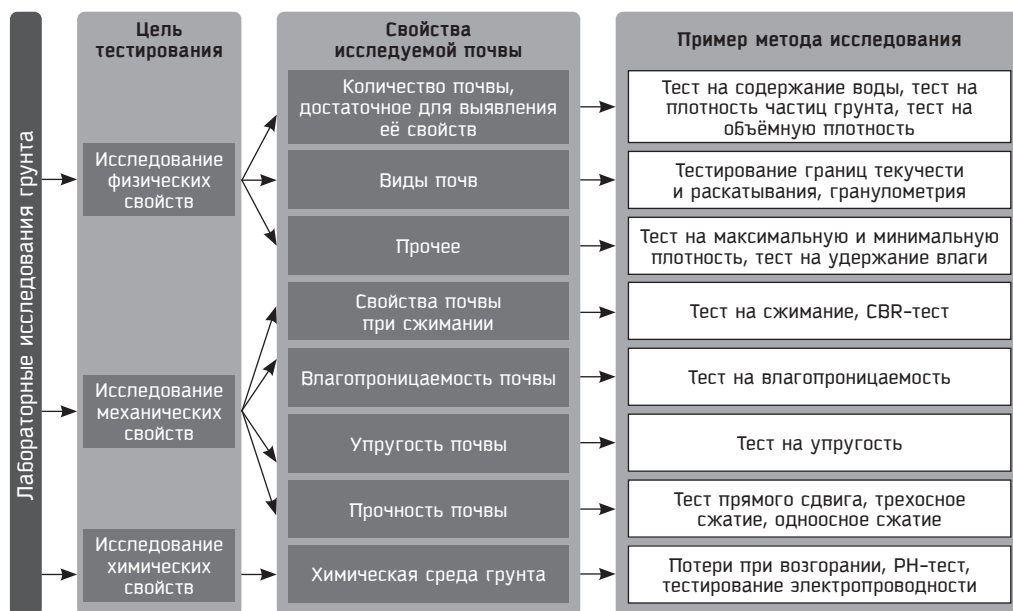
² Примерами такого тестирования являются стандартный тест на проникновение, конусное проникновение, шведский метод зондирования и другие.



А как проводят исследования грунта в лабораториях?



Прежде всего после бурения до нужной глубины происходит взятие проб, то есть отбор грунта для анализа с интересующих участков. Эти пробы забирают в лабораторию, где и проводятся лабораторные исследования грунта. В зависимости от цели тестирования и от свойств исследуемой почвы лабораторные исследования подразделяются на следующие виды.



Обзор лабораторных исследований грунта



Ой, сколько их!



Так как много разных видов почв и их свойств, то и методов их исследования много. В нашей исследовательской группе грунтов мы можем провести все эти тесты!



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Социальная инфраструктура

Социальная инфраструктура включает в себя широкий спектр структур и объектов, таких как дороги, порты, аэропорты, водоснабжение, канализация, электросети, газовое снабжение, медицинское обслуживание, пожаротушение, полиция, административные службы и т. д. Однако в данной книге мы будем иметь дело с объектами гражданского строительства, а именно с транспортной инфраструктурой (дороги, порты, аэропорты) и с жизнеобеспечивающей инфраструктурой (водоснабжение, канализация, электросети и газообеспечение).

Бурение и взятие проб

Буровые исследования

В заранее определённой точке проводится бурение цилиндрического отверстия (в общем случае размером 66 на 86 на 116 мм), из которого извлекаются пробы грунта и проводятся полевые исследования с целью изучения свойств грунта, важных для инженерных работ.

Взятие проб

Взятие проб означает отбор материала из места исследования, который будет использоваться для испытаний грунта. Метод взятия проб и пробоотборник выбираются исходя из целей исследования, типа и состояния почвы. Ниже приведены примеры пробоотборников для отбора проб ненарушенного грунта (образцы, структура и механические свойства которых близки к исходному состоянию грунта).

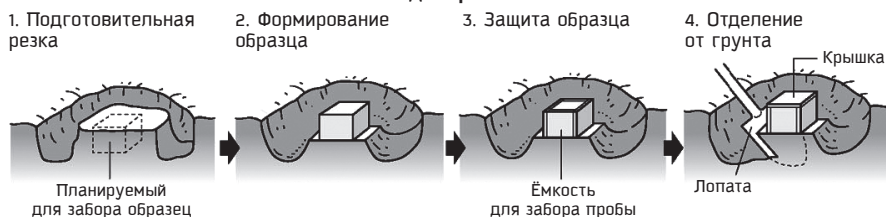
Методы отбора проб, подходящие для определённых видов грунта

Типы пробоотборников			Структура	Диаметр пробы (мм)	Виды грунтов																		
					Глинистая почва			Песчаная почва			Смешанная с гравием		Коренная порода										
					мягкая	средняя	жёсткая	жёсткая	средняя	плотная	жёсткая	плотная	Мягкая горная порода	Горная порода средней твёрдости	Твёрдая горная порода								
																Значение N							
																0–4	4–8	> 8	< 10	10–30	> 30	< 30	> 30
Общепраспространённое применение	Тонкостенный пробоотборник с фиксированным поршнем	с удлинённой штангой	1	75	⊙	○	–	○	–	–	–	–	–	–	–								
		гидравлический	1	75	⊙	⊙	○	○	–	–	–	–	–	–	–								
	Отбор проб с ненарушенной структурой (блочный)		–	любой	⊙	⊙	⊙	○	○	⊙	–	○	○	–	–								
	Вращающийся пробоотборник с двойной трубкой (Denison)		2	75	–	⊙	○	–	–	–	–	–	–	–	–								
	Вращающийся пробоотборник с тройной трубкой		3	83	–	⊙	⊙	○	⊙	⊙	–	○	–	–	–								
Когда нужно более высокое качество	Взятие проб с помощью заморозки (колонковое бурение)		–	50–300	–	–	–	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	–	–	–								
	Пробоотборник GP (gel-push)		1	100–300	–	○	○	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	–	–	–								

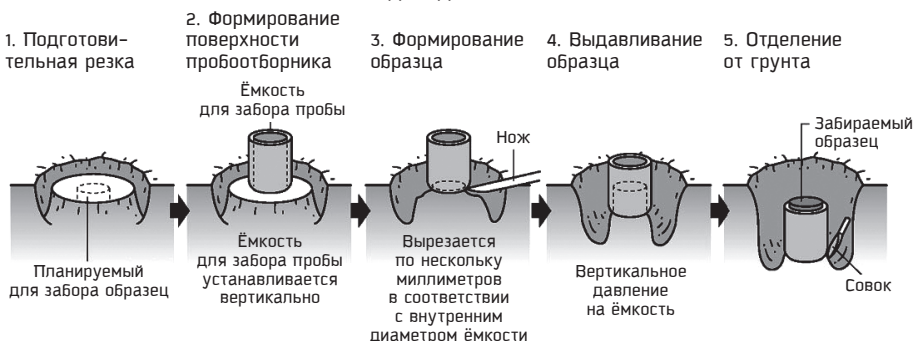
Условные обозначения: 1 – простая трубка; 2 – двойная трубка; 3 – тройная трубка; ⊙ – отлично подходит; ○ – подходит. Взято из методов полевых исследований Геотехнического общества.

- Отбор проб с ненарушенной структурой (блочный) (JGS 1231³).** Данный способ применяется на песчаных грунтах рядом с поверхностью земли или в местах, не достигающих до уровня грунтовых вод. Он состоит в непосредственном вырезании блока грунта и выкапывании его посредством лопаты или совка. Бывает двух типов: метод вырезания и метод выдавливания.

Метод вырезания

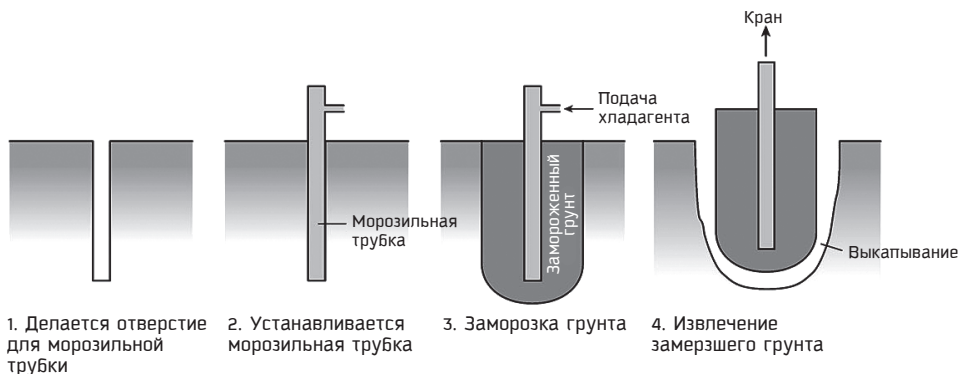


Метод выдавливания



- Пробоотборник с тонкими стенками (пробоотборник с фиксированным поршнем) (JGS 1221).** Используется в основном для забора образцов мягкого глинистого грунта. Пробы берутся путём статического вдавливания трубки пробоотборника в грунт.
- Вращающийся пробоотборник с двойной трубкой (пробоотборник Denison) (JGS 1222).** Используется для взятия образцов глинистого грунта средней твердости и твёрдого. Наружная трубка с насадкой на конце вращается и режет грунт, а неподвижная внутренняя трубка проталкивается в грунт для сбора образца.
- Вращающийся пробоотборник с тройной трубкой (JGS 1223).** Используется в основном для взятия образцов песчаного грунта. Наружная трубка с насадкой на конце вращается и режет грунт, неподвижная внутренняя трубка проталкивается в грунт для сбора образца в ещё одну внутреннюю трубку.
- Взятие проб с помощью заморозки.** Используется для песчаных грунтов с небольшим количеством мелких частиц и для грунтов, смешанных с гравием, которые трудно собирать обычными методами. Земля замораживается, например, жидким азотом, и затем образец извлекается в виде керна.

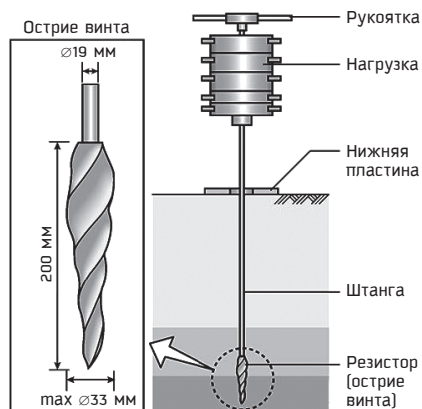
³ Стандартный номер, установленный Геотехническим обществом (JGS – Japanese Geotechnical Society).



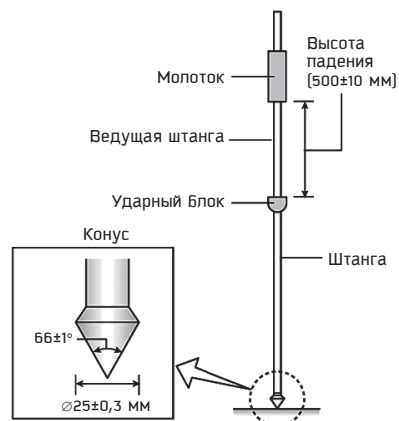
6. **Пробоотборник GP (gel-push).** Пробоотборник с одной трубкой заполняется концентрированной смазкой, взятие пробы осуществляется вращением и резкой. Поскольку в этом методе не используется подача воды, то поверхность образца не размывается, и таким образом можно получить образцы высокого качества, как и при методе заморозки.

7. **Зондирование.** Зондирование – это исследование прочности и стабильности грунта посредством прикрепления резистора на конце штанги. По мере погружения зонда в грунт измеряется уровень сопротивления проникновению, вращению и вытаскиванию зонда. Ниже приведены типичные примеры зондирования:

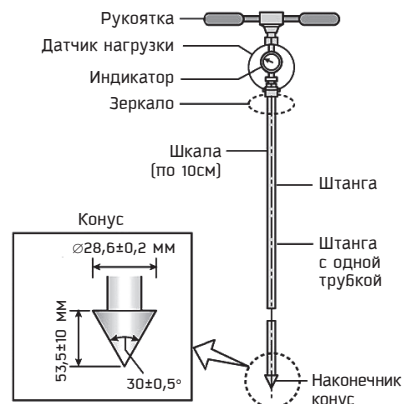
1) **шведский тип зондирования** – используется в полевых испытаниях с целью определения твёрдости грунта и толщины слоя мягкого грунта. Проводится испытание на проникновение под нагрузкой и на проникновение при вращении. При этом методе используется простое оборудование, также метод обладает хорошей проникающей способностью, поэтому его часто используют для предварительных исследований на глубине не более 10 м;



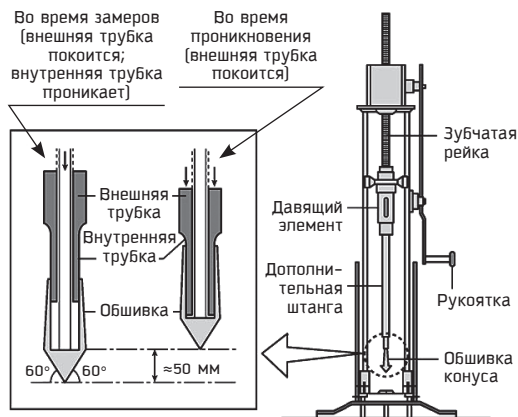
- 2) *простой динамический тест на проникновение конуса* – это вид полевого испытания на сопротивление проникновению, проводится с помощью свободно падающего (с высоты 50 см) молотка (весом 5 кг). Оборудование для такого тестирования требуется небольшое и лёгкое, поэтому этот метод часто используют на крутых склонах и в узких местах. Так, с помощью данного метода определяют степень выветривания на крутых горных склонах. Кроме того, значение N_d , рассчитанное с помощью этого метода, коррелирует со значением N и другими значениями прочих методов зондирования;



- 3) *портативный тест на проникновение конуса* позволяет непрерывно определять сопротивление на разной глубине посредством статического проникновения конуса на конце штанги. Поскольку оборудование для такого зондирования портативное, его часто используют на наклонных участках и в горных районах. Однако применять его можно только в мягких глинистых почвах, когда для проникновения достаточно человеческой силы. Кроме того, на основе данного теста можно рассчитать прочность глинистой почвы при одноосном сжатии из значения q_c сопротивления проникновению конуса.



- 4) *голландский тест на проникновение конуса с двойной трубкой* может применяться на твердых грунтах (до значения $N = 30$), поскольку стержень выполнен в виде двойной трубки для устранения трения на внешней поверхности. Однако так как это устройство относительно велико, оно в основном используется для детальных исследований. Кроме того, значение сопротивления проникновению конуса q_c , полученное в этом исследовании, связано с силой сцепления c и значением N , и так можно оценить точную прочность грунта, удалив очень мягкий глинистый слой.



Название греческих букв

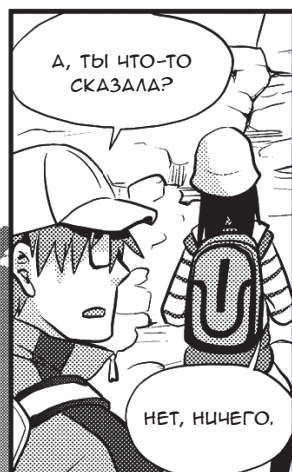
α	альфа	β	бета	γ	гамма	δ (Δ)	дельта
ϵ	эпсилон	ζ	дзета	η	эта	θ	тета
ι	йота	κ	каппа	λ	лямбда	μ	мю
ν	ню	ξ	кси	$\omicron$	омикрон	π	пи
ρ	ро	σ (Σ)	сигма	τ	тау	υ	ипсилон
φ	фи	χ	хи	ψ	пси	ω (Ω)	омега

(В скобках указаны заглавные буквы)

ГЛАВА 2

КАКАЯ ПОЧВА?





КАКОЙ ПРЕКРАСНЫЙ ВИД,
ПРАВДА?!

НАСТОЯЩЕЕ ПРОИЗВЕДЕНИЕ
ИСКУССТВА, СОЗДАННОЕ
СИЛОЙ ЗЕМЛИ...

ЭЙ, ВЫ МЕНЯ
СЛУШАЕТЕ ВООБЩЕ?

Можно,
наконец,
перекричать!

А,

ПРОСТИТЕ.

АА НЕТ, ЭТО ВЫ ПРОСТИТЕ,
ЧТО Я ТУТ ПОВЫСИЛ
ГОЛОС...

ПРОСТО РАЗ УЖ МЫ ПРИШЛИ
В ТАКОЕ МЕСТО, ГДЕ МНОГО
ГРУНТА, ТО НУЖНО УЗНАТЬ
ЧТО-ТО НОВОЕ.

ИЛИ ЭТО БУДЕТ
НАПРАСНОЙ ТРАТОЙ ВРЕМЕНИ,
РАЗВЕ НЕТ?

БУДЕТ НАПРАСНОЙ ТРАТОЙ
ВРЕМЕНИ, ЕСЛИ МЫ
В ТАКОМ КРАСИВОМ МЕСТЕ
НЕ ПОБЕЖДАЕМ!

НО... ОДНО
ДРУГОМУ ЖЕ
НЕ МЕШАЕТ...

АЛЯ НАЧАЛА СКАЖИТЕ-КА,
КАК ДУМАЕТЕ, ПОЧВА -
ЭТО ТВЁРДОЕ ТЕЛО,
ЖИДКОСТЬ ИЛИ ГАЗ?

РАЗВЕ НЕ ОЧЕВИДНО,
ЧТО ТВЁРДОЕ ТЕЛО?

В САМОМ ДЕЛЕ,
ЕСЛИ СМОТРЕТЬ НА ПОЧВУ
ОБЫЧНЫМИ ГЛАЗАМИ,
ТО ОНА КАЖЕТСЯ
ТВЁРДОЙ.

ОДНАКО...

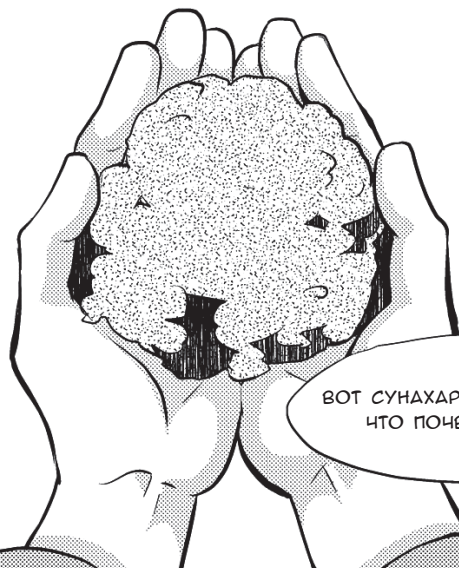
ЕСЛИ ПОСМОТРЕТЬ
ГРУНТОВЫМ ВЗГЛЯДОМ,

ТО ПОЧВА
ВЫГЛЯДИТ ВОТ КАК!

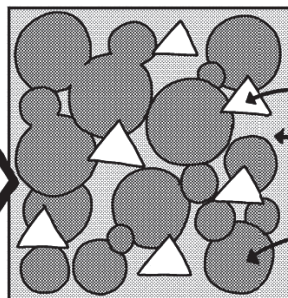
ТА-
ДАМ!

ой!

ох!



Грунтовый
взгляд



Воздух

Вода

Частицы
почвы
(твёрдые)

ВОТ СУНАХАРА-САН СКАЗАЛА,
ЧТО ПОЧВА ТВЁРАЯ.

ОДНАКО ПОЧВА
СОДЕРЖИТ И ВОДУ, И ВОЗДУХ.
В МЕХАНИКЕ ГРУНТОВ ПОЧВА
РАССМАТРИВАЕТСЯ КАК СОСТОЯЩАЯ
ИЗ ТРЁХ ФАЗ¹: ТВЁРДОЙ (ЧАСТИЦЫ
ПОЧВЫ), ЖИДКОЙ (ВОДЫ)
И ГАЗООБРАЗНОЙ (ВОЗДУХА).

И ЕСЛИ НАУЧИТЬСЯ СМОТРЕТЬ
НА ПОЧВУ ТАКИМ ГРУНТОВЫМ
ВЗГЛЯДОМ, ТО МОЖНО УВИДЕТЬ
ЕЁ ТРЁХФАЗНЫЙ СОСТАВ.

ХОТЕЛОСЬ БЫ,
ЧТОБЫ ВЫ ОБЕ ТОЖЕ
ПОСКОРЕЕ ОСВОИЛИ
ГРУНТОВЫЙ ВЗГЛЯД.

ВОТ УЖ МНЕ
ТАКОГО НЕ НАДО.

¹ Соответственно трём состояниям веществ – твёрдому, жидкому и газообразному – существуют так называемые твёрдая, жидкая и газообразная фазы. Здесь речь идёт об объединении трёх фаз, поэтому почва называется трёхфазной.

2.1. ЧТО ТАКОЕ ПОЧВА В МЕХАНИКЕ ГРУНТОВ?





Однако восприятие степени рыхлости, сухости, гладкости и вязкости для каждого человека индивидуально. Поэтому когда почва рассматривается как материал или грунт, важно количественно определить число зазоров между гранулами и содержание воды.



Например, когда речь идёт об искусственных материалах вроде бетона или стали, то их качество можно выбирать в зависимости от целей использования. В случае же с природным материалом, почвой это невозможно.

Прежде всего рассмотрим понятие плотность, касающееся частиц почвы.



Плотность – это то, что мы в школе проходили? «Масса вещества на единицу объёма тела», так?



Разделив массу на объём, можно понять, насколько тело плотное, да?



Именно. Если обозначить массу твёрдой фазы почвы за m_s (г), объём за V_s (см³), то плотность почвы ρ_s можно будет выразить так²:

Плотность почвы: $\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \text{ г/см}^3$.



Ну, это понятно.



Это значение выражает отношение средней массы твёрдой фазы на единицу объёма и вычисляется на основе реальных испытаний почвы на плотность. Кстати, плотность почвы, образованной выветриванием горных пород, составляет 2,6–2,7 г/см³, а плотность почвы, содержащей много органических веществ вроде торфа, составляет 1,2–2 г/см³ (см. стр. 66).



А теперь скажите, каков, по вашему мнению, диаметр почвенных гранул, например, у песка?



Около 1 мм, наверное?



Э-э... думаю, поменьше. 0,1 мм, может?

² Здесь обозначение V – это объём (Volume), m – масса (Mass), маленькая s означает твёрдое тело (solid), маленькая a означает воздух (air), а маленькая w – воду (water). Кроме того, маленькая v означает пустоту (void).



Вы обе правы! Гранулы почвы классифицируются по размеру от крупных к мелким – камни, гравий, песок, ил и глина.

Классификация гранул почвы в зависимости от их диаметра

Диаметр (мм)	0,005 0,075 0,025 0,85 2 4,75 19 75 300									
Название	Глины	Ил	Тонкий песок	Средний песок	Крупный песок	Мелкий гравий	Средний гравий	Крупный гравий	Крупные камни	Мега- литы
			Песок			Гравий			Камень	
Группа	Мелкозернистые		Крупнозернистые						Каменистые	



Но почва редко состоит из гранул одного размера, среди частиц одной почвы могут быть и каменные размером больше 75 мм, и крупнозернистые размером от 0,075 до 75 мм, и мелкозернистые размером менее 0,075 мм.

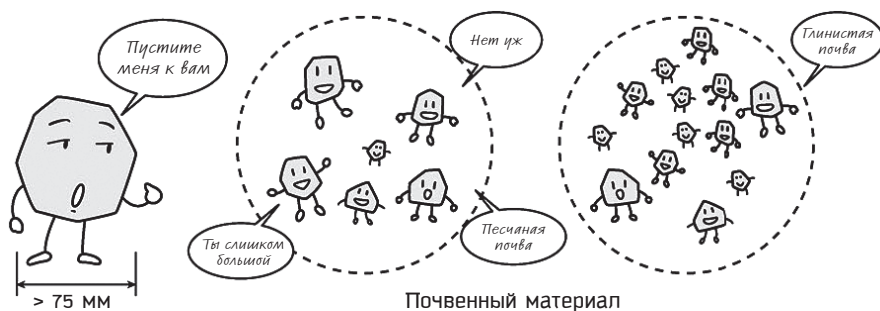
Кроме того, частицы почвы отличаются по форме. Почти все гранулы размером большие, чем гранулы ила, имеют угловатую или округлую форму. А частицы глинистой почвы похожи на хлопья и пластины.



Но раз частицы каменной группы бывают такие большие, как-то странно относить их к почвам...



Верное замечание. На самом деле непосредственно к почвенному материалу относятся только почвы, гранулы которых меньше 75 мм, а если почва содержит каменные частицы большего размера, то её относят или к почвенному материалу, смешанному с каменным, или к каменному материалу.



Почва с большим количеством крупных гранул называется крупнозернистой, с большим количеством гравия – гравийной, а с большим количеством песка – песчаной. Почвы же с большим количеством мелких частиц называются мелкозернистыми, а почвы с большим содержанием глины, которые в зависимости от количества воды имеют свойство становиться вязкими, называют глинистыми.



Сколько, оказывается, есть видов почв!



Почва представляет собой смесь частиц разного размера. Относительное содержание в почве частиц различных размеров, то есть сколько частиц и какого размера в ней содержится, называется гранулометрическим составом почвы и определяется на основе исследований (см. стр. 68).



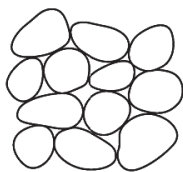
Это похоже на распределение учеников класса по росту, да?



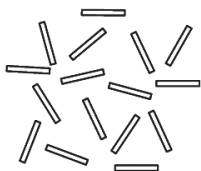
Именно. Кроме того, понимание гранулометрического состава почвы важно для определения типа почвы.



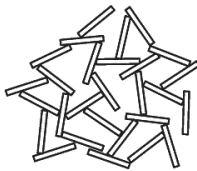
Частицы почвы формируют своеобразный почвенный скелет, называемый структурой почвы. Эта базовая структура делится на четыре типа.



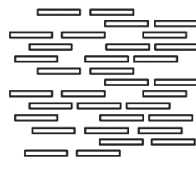
Гранулярная
структура



Хаотичная
структура



Хлопьевидная
структура



Ориентированная
структура



А каким образом частицы почвы соединяются друг с другом?

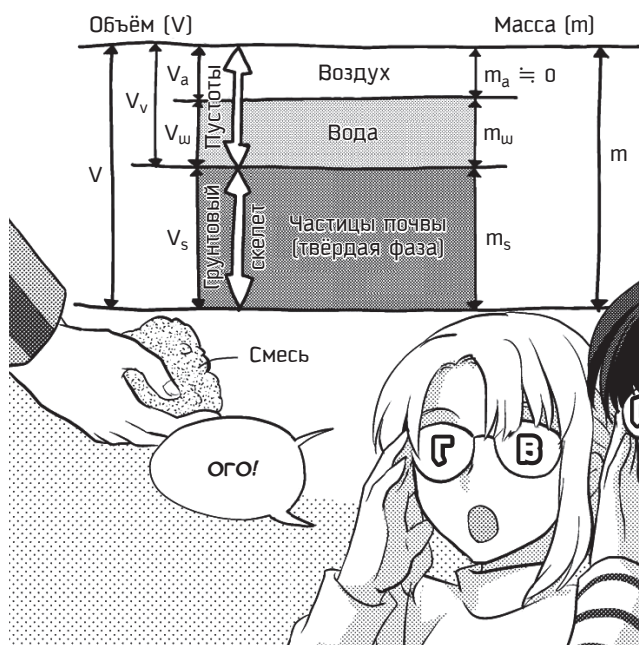


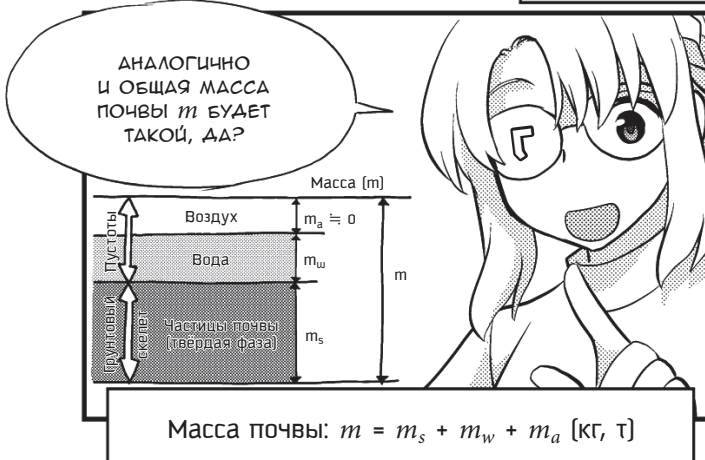
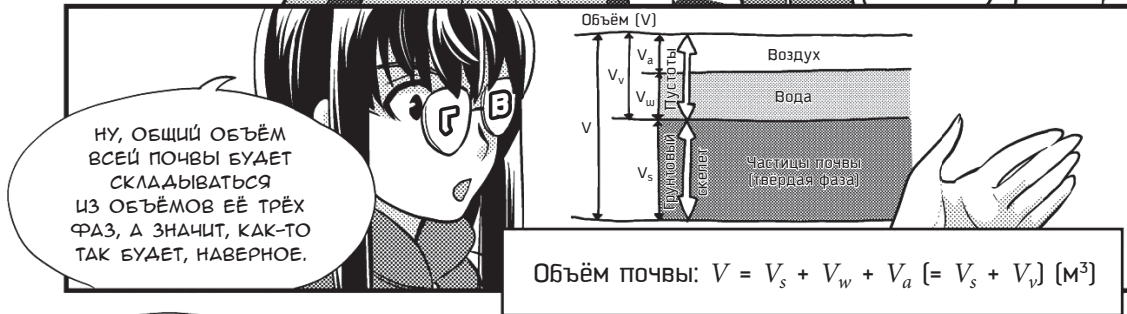
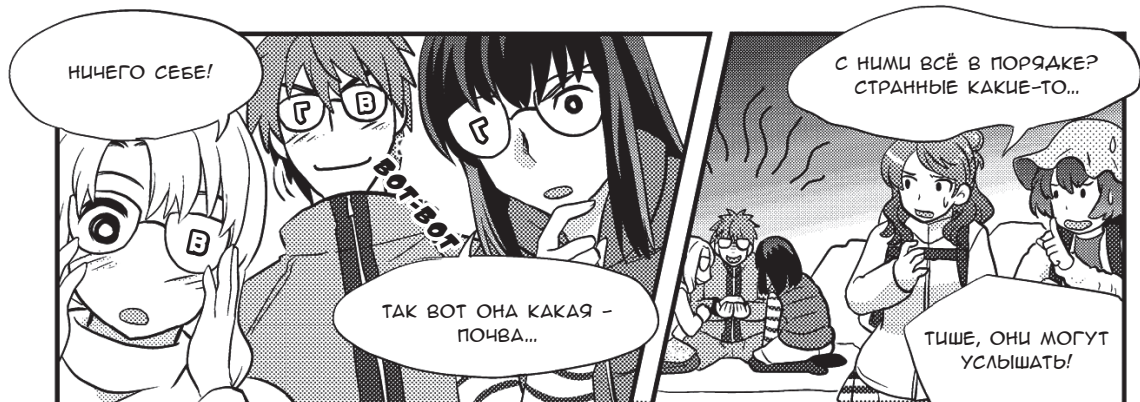
Хороший вопрос. Частицы крупнозернистого грунта соединяются посредством силы тяжести, а в глинистых почвах частицы соединяются благодаря электрохимическим свойствам. Однако, так как частицы не могут подходить друг к другу идеально, как в пазле, то между ними остаются небольшие пространства, называемые пустотами.



И эти пустоты заполняются водой и воздухом, да? И в зависимости от количества пустот и содержания воды и воздуха почвы бывают гладкими, вязкими, рыхлыми или сухими, правда?

2.2. СОСТОЯНИЕ ПОЧВЫ





А СЕЙЧАС ДАВАЙТЕ РАССМОТРИМ ПОВЕЛИЖЕ ВОН ТУ СУХУЮ ПОЧВУ ПОД ПАЛЯЩИМ СОЛНЦЕМ.

ЧТО? В НЕЙ НЕТ ВОДЫ!

АГА. В ПРИРОДЕ ТАКОЕ, КОНЕЧНО, НЕВОЗМОЖНО, НО В ПОЛНОСТЬЮ ВЫСОХШЕЙ ПОЧВЕ ПУСТОТЫ ЗАПОЛНЕНЫ ТОЛЬКО ВОЗДУХОМ,

И ТАКОЕ СОСТОЯНИЕ НАЗЫВАЕТСЯ ВОЗДУШНО-СУХИМ СОСТОЯНИЕМ.

Схематический состав сухой почвы

Объём [V]		Масса [m]
V_v	V_a	$m_a \approx 0$
Воздух		
V_s		m_s
Частицы почвы		
V		m

А ТЕПЕРЬ ПОСМОТРИТЕ НА ПОЧВУ НА ДНЕ ВОН ТОЙ ЛУЖИ.

ТЕПЕРЬ ОТСУТСТВУЕТ ВОЗДУХ.

АГА. ПУСТОТЫ ЗАПОЛНЕНЫ ТОЛЬКО ВОДОЙ, И ТАКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВЫ НАЗЫВАЕТСЯ ВОДОНАСЫЩЕННЫМ.

В ПРОТИВОПОЛОЖНОСТЬ ЭТОМУ СОСТОЯНИЮ ПОЧВЫ, КОГДА В ПУСТОТАХ ЕСТЬ ХОТЬ НЕМНОГО ВОЗДУХА, НАЗЫВАЮТ НЕНАСЫЩЕННЫМ.

Схематический состав водонасыщенной почвы

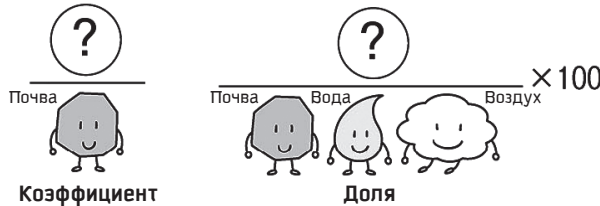
Объём [V]		Масса [m]
V_v	V_w	m_w
Вода		
V_s		m_s
Частицы почвы		
V		m

ТАКИМ ОБРАЗОМ, ОПЕРИРУЯ ОБЪЕМОМ И МАССОЙ ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ ПОЧВЫ ГРАНУЛ, ВОДЫ И ВОЗДУХА...

МОЖНО КОЛИЧЕСТВЕННО РАССЧИТАТЬ СОСТОЯНИЕ ПОЧВЫ!



Когда речь идёт о соотношении трёх фаз в составе почвы, есть одно базовое правило. Когда говорится о *коэффициенте*, имеется в виду количество относительно твёрдой фазы грунта. Когда же говорится о *доле*, имеется в виду процент от общего объема (%).



А теперь подумайте о количестве пустот в почве. Как считаете, его нужно измерять в объёме или в массе?



Ну раз пустоты – это пространства между частицами почвы, то количество пространства, наверное, будет соответствовать размеру, а не массе?



В пустотах этих вода и воздух... если говорить о воздухе, то нужно, пожалуй, измерить его объём, так?



Неплохо. Количество пустот выражается двумя показателями: коэффициентом пустотности e и процентным показателем – пористостью n . Оба описывают объём. А теперь вспомните правило, о котором я рассказывал, и сперва попробуйте вывести коэффициент пустотности e .



Значит так. Если мы рассматриваем объём пустот, а коэффициент означает отношение к количеству твёрдой фазы, то нужно объём пустот V_v разделить на объём твёрдой фазы грунта V_s :

$$\text{Коэффициент пустотности: } e = \frac{V_v}{V_s}.$$

Так будет?



Именно так. Коэффициент пустотности показывает степень сжимаемости грунта. Для хорошо уплотнённой песчаной или гравийной почвы он составляет 0,1–0,2, а для очень рыхлой почвы его значение равно 0,7–1. Для глинистой почвы коэффициент принимает значения от 1 до 4, а для торфа он бывает равен от 5 и аж до 20.



Так, теперь пористость n ... Так как снова имеем дело с объёмами, то аналогично получаем, что процентное содержание пустот находится так:

$$\text{Пористость: } n = \frac{V_v}{V} \times 100 \, \%.$$



Отлично! Вы уже обе настоящие «грунтовые принцессы»!



Ну, это уж слишком...



В механике грунтов чаще используется коэффициент пустотности e . Чем он больше, тем слабее механические свойства грунта.



Ну, грунтовые принцессы, теперь подумайте о содержании воды. В случае с пустотами мы соотносили объёмы, а как быть с водой? Что выберете, объём или массу?



Для воды, наверное, лучше не размер, а вес...



Раз концентрацию солевого раствора рассчитывают по массе, то и тут, наверное, нужно брать массу.



Вы обе прям на лету схватываете! Или, скорее, это я так хорошо объясняю?!



...



Показатели содержания воды в грунте – это влажность грунта w и доля влажности в грунте w_m . Оба рассчитываются на основе соотношения масс. Итак, попробуем их вывести.



Если мы берем массы, то коэффициент отношения массы воды к массе твёрдой фазы будет равен m_w/m_s , верно?



Хотел бы я сказать, что правильно, но... В таком случае значения получаемых коэффициентов будут очень незначительными, поэтому обычно влажность грунта выражают в процентах (%).

Влажность грунта: $w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \%$.

Влажность почвы w в природной среде называется естественной влажностью w_n . Обычно для песчаных почв она составляет меньше 20 %, для глинистых от 40 до 60 %, а для торфа бывает от 300 до 1000 %. Влажность почвы рассчитывается на основании измерений в процессе реальных исследований. Она различается в зависимости от вида почвы (см. стр. 71).



Так, а что насчет доли влажности w_m ?



Ну, доля влажности, значит, будет определяться процентным отношением к общей массе почвы. То есть вот так, да?

Доля влажности: $w_m = \frac{m_w}{m} \times 100 \%$.



Верно! Всё-таки я прекрасный учитель!



...



Содержание воды, другими словами вязкость почвы, в большой степени определяет её свойства и состояние. Поэтому там, где почва используется в качестве ресурса, эти показатели очень важны.

Кроме того, есть показатель, устанавливающий связь между количеством пустот и содержанием воды. Это *водонасыщенность* S_r , которая показывает, насколько пустоты почвы наполнены водой.



Раз содержание воздуха в пустотах определялось объёмом V_v , то водонасыщенность, наверное, – это отношение объёма воды V_w к объёму воздуха?

Водонасыщенность: $S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \%$.



Именно! А теперь скажите, какова будет водонасыщенность почвы, полностью насыщенной влагой, и сухой почвы, не содержащей влаги?



Водонасыщенность почвы, в которой все пустоты заполнены водой, будет... 100 %!



А водонасыщенность сухой почвы, наоборот, будет 0 %!



Точно! Я так счастлив, что у меня такие отличные последовательницы! Теперь вы понимаете, что у влажной почвы влагонасыщенность будет больше 0 % и меньше 100 %.

И НАПОСЛЕДОК ПОДУМАЙТЕ,
КАК НАЙТИ ВОЗДУХОЁМКОСТЬ v_a ,
ТО ЕСТЬ СОДЕРЖАНИЕ ВОЗДУХА
В ПУСТОТАХ?

ЭТОТ ПОКАЗАТЕЛЬ ОПРЕДЕЛЯЕТ
СТЕПЕНЬ РЫХЛОСТИ ГРУНТА.

НУЖНО ВЫЧИСЛИТЬ ДОЛЮ
ОБЪЁМА ВОЗДУХА К ОБЩЕМУ
ОБЪЁМУ ГРУНТА В ПРОЦЕНТАХ...
ТО ЕСТЬ ПОЛУЧАЕТСЯ:

$$\text{Воздухоёмкость: } v_a = \frac{V_a}{V_v} \times 100 \%.$$

ВОТ ТАК!

ОГО, ЭТО ДЛЯ ВАС УЖЕ
СОВСЕМ ПРОСТО!

НО СТОЛЬКО
ВСЕГО НОВОГО, ЧТО Я
НЕ МОГУ ЗАПОМНИТЬ!

РАССУЖДАЯ ПОДОБНЫМ
ОБРАЗОМ, МОЖНО ВЫВЕСТИ
РАЗЛИЧНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ
СОСТОЯНИЯ ГРУНТА,
ОПИРАЯСЬ ТОЛЬКО НА МАССУ
И ОБЪЁМ ТРЁХ ФАЗ.

ПОЭТОМУ КУДА ВАЖНЕЕ
ПОНЯТЬ, ЧТО И КАК МЫ
ДЕЛАЛИ, ЧЕМ ЗАПОМНИТЬ
ФОРМУЛЫ.

НУ, ЛАНЧ МЫ УЖЕ СЪЕЛИ,
НЕ ПОРА ЛИ НАЧАТЬ
СПУСКАТЬСЯ?

ОЙ, УЖЕ
ТАК МНОГО
ВРЕМЕНИ!

КАК ТОЛЬКО НАЧИНАЕМ
ГОВОРИТЬ О ГРУНТАХ,
МЫ СОВСЕМ ЗАБЫВАЕМ
О ВРЕМЕНИ!

МЫ?..

АМИ, БЫСТРЕЕ!
НЕ ОТСТАВАЙ!

2.3. СВОЙСТВА ПОЧВ

А КОГДА ВЫ БЫЛИ ДЕТЬМИ
И ИГРАЛИ В ПЕСОЧНИЦЕ,

ТО ЧТО ВЫ ПРЕДПРИНИМАЛИ,
КОГДА ХОТЕЛИ СЛЕПИТЬ ПЛОТНЫЙ ШАРИК
ИЗ ПЕСКА?

НУ, Я СМЕШИВАЛА С ЗЕМЛЁЙ
И ДОБАВЛЯЛА ВОДУ...

КОГДА ПОЧВА ИСПОЛЬЗУЕТСЯ
В КАЧЕСТВЕ ОСНОВЫ ДЛЯ
СТРОИТЕЛЬСТВА, ТО ВАЖНО
УЛУЧШИТЬ ЕЁ ИНЖЕНЕРНЫЕ
СВОЙСТВА, ЧТО ОСУЩЕСТВЛЯЮТ
ПОСРЕДСТВОМ УПЛОТНЕНИЯ
ГРУНТА.

А ВЫ ОБЕ, ОКАЗЫВАЕТСЯ,
УЖЕ С ДЕТСТВА ОБЛАДАЛИ
НАВЫКАМИ СПЕЦИАЛИСТОВ!

ОПЯТЬ РАЗГОВОРЫ
О ПОЧВЕ...
Я ПРОСТО ПОКРЕПЧЕ
СЖИМАЛА ПЕСЧАНЫЙ ШАРИК.

ХИ-ХИ.

ТОЛЬКО ОБ ОДНОМ
И МОЖЕТ ДУМАТЬ...

НА УПЛОТНЁННОСТЬ ПОЧВЫ
ВЛИЯЮТ РАЗМЕР ГРАНУЛ
ГРУНТА,

КОЭФФИЦИЕНТ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ
И ЭНЕРГИЯ УПЛОТНЕНИЯ.

СВОЙСТВА РАЗНЫХ ВИДОВ ПОЧВ,
ОТНОСЯЩИЕСЯ К УПЛОТНЯЕМОСТИ,
НАЗЫВАЮТСЯ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
УПЛОТНЕНИЯ ПОЧВЫ.



* Онигири – рисовые колобки с разными начинками или без них, популярное в Японии блюдо. – Прим. перев.



³ Нижний индекс t означает total (целое), а под плотностью грунта ρ_t обычно подразумевают увлажнённый грунт.



Плотность – это же деление массы на объём, да? Тогда получается:

$$\text{Плотность с учётом влаги: } \rho_t = \frac{m}{V} \left(= \frac{m_s + m_w}{V} \right) \text{ (г/см}^3\text{)}.$$

Так, да?



Верно. Плотность ρ_t с учётом влаги для обычных почв составляет 1,4–2,0 г/см³. Однако для почв с высоким содержанием органических веществ и воды, вроде торфа, плотность составляет 0,95–1,2 г/см³, а значение плотности воды ρ_w в таких почвах приближается к 1 г/см³.

Кроме того, из показателей, описывающих состояние почвы, непосредственно на основе испытаний можно определить только плотность с учётом влаги ρ_t , влажность грунта w и плотность твёрдой фазы ρ_s . Остальные показатели рассчитываются на основе этих трёх (см. стр. 71).



Ох, предчувствую адские вычисления...



А теперь выведем формулу для плотности сухой почвы ρ_d , то есть для почвы, в пустотах которой нет воды. Такая почва состоит только из почвенных гранул и воздуха. Формула будет такой:

$$\text{Плотность сухой почвы: } \rho_d = \frac{m_s}{V} \text{ (г/см}^3\text{)}.$$

Индекс d в показателе плотности сухой почвы ρ_d означает dry (сухой), но он больше показывает не плотность сухой почвы, а уплотняемость почвы.



Я так понимаю, что плотность сухой почвы нельзя получить прямо на основе испытаний, то есть её нужно вычислить?



Для этого посмотрим, как плотность сухой почвы связана с получаемыми на основе испытаний показателями плотности почвы с учётом влаги ρ_t и влажности грунта w .

$$\text{Плотность с учётом влаги: } \rho_t = \frac{m}{V} = \frac{(m_s + m_w)}{V} = \frac{m_s \left(1 + \frac{m_w}{m_s} \right)}{V} = \rho_d \left(1 + \frac{w}{100} \right) \text{ (г/см}^3\text{)}.$$

$$\text{Плотность сухой почвы: } \rho_d = \frac{\rho_t}{\left(1 + \frac{w}{100} \right)} \text{ (г/см}^3\text{)}.$$

⁴ Здесь масса воздуха $m_a = 0$, поэтому масса увлажнённой почвы m равна сумме массы твёрдой фазы m_s и массы воды m_w .

⁵ Здесь масса воздуха $m_a = 0$ и масса воды $m_w = 0$, поэтому масса сухой почвы m равна массе твёрдой фазы m_s .



Кстати, хотя уплотняемость почвы обычно определяется плотностью сухой почвы ρ_d , иногда она может определяться и воздухоёмкостью v_a или водонасыщенностью S_r , которые зависят от размера гранул и влажности. Вот Сунахара-сан сказала, что в детстве добавляла в песок воду. Ну и какой становилась почва при добавлении большего или меньшего количества воды?



Если воды было много, песок становился жидким, а если мало, то всё разваливалось. И в том, и в другом случае лепилось плохо.



Наверное, количество воды, подходящее для уплотнения почвы, разное для разных видов почв?



Конечно! Для каждого вида почвы существует наиболее подходящий уровень влажности, и он у каждой почвы свой. Если построить график зависимости влажности w и плотности сухой почвы ρ_d , уплотнённой в результате трамбования, то получится выпуклая кривая уплотнения (см. стр. 71).



Вершина графика означает самую большую уплотнённость почвы, при максимальной плотности сухой почвы $\rho_{d\max}$, да?



И что, из такого графика можно узнать оптимальный уровень влажности w для уплотнения почвы?



Точно! Максимальное значение плотности сухой почвы называется максимальной сухой плотностью $\rho_{d\max}$, а выявленный таким образом уровень влажности называется оптимальной влажностью w_{opt} , и эти значения используются в качестве базисных при планировании строительства. На строительной площадке для уплотнения почвы необходимо подобрать подходящую человеческую или машинную силу, как при игре в песочнице (см. стр. 71). Кроме того, и при проектировании, и в самом строительстве, когда говорят о весе грунта, подразумевают не массу m , а вес W на единицу объёма, то есть удельный вес γ .

Удельный вес влажного грунта: $\gamma_t = \frac{W}{V} = \frac{m_g}{V} = \rho_t g \text{ (Н/м}^3, \text{кН/м}^3\text{)}.$

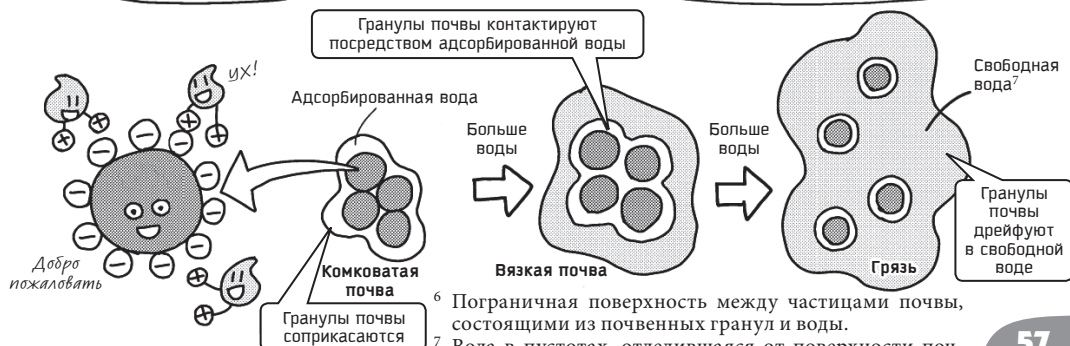
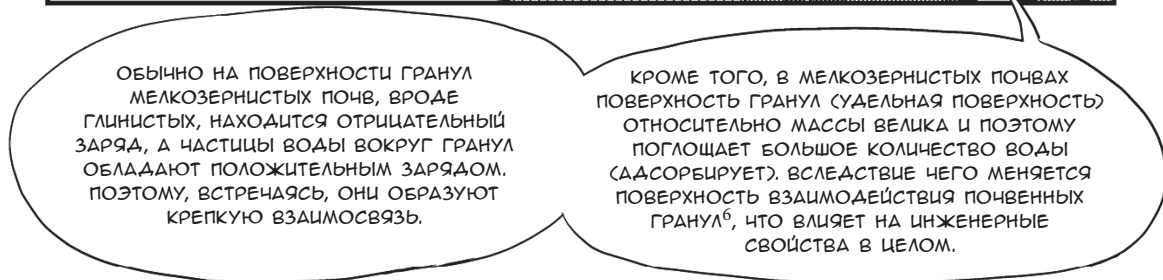
Удельный вес сухого грунта: $\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{m_s g}{V} = \rho_d g \text{ (Н/м}^3, \text{кН/м}^3\text{)}.$

Кроме того, удельный вес подземных вод γ' (γ_{sub}), находящихся ниже уровня грунтовых (см. главу 3), получается посредством вычитания удельного веса воды γ_w из удельной водонасыщенности γ_{sat} с учетом взвешивающего действия воды.



2.4. ВИДЫ ПОЧВ

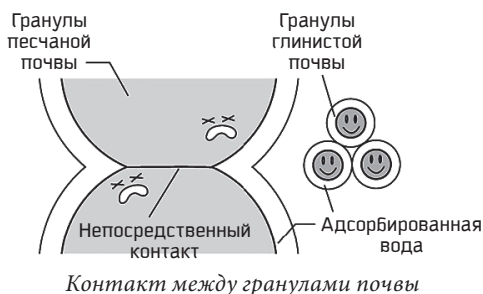




⁶ Пограничная поверхность между частицами почвы, состоящими из почвенных гранул и воды.

⁷ Вода в пустотах, отделившаяся от поверхности почвенных гранул и свободно перемещающаяся.

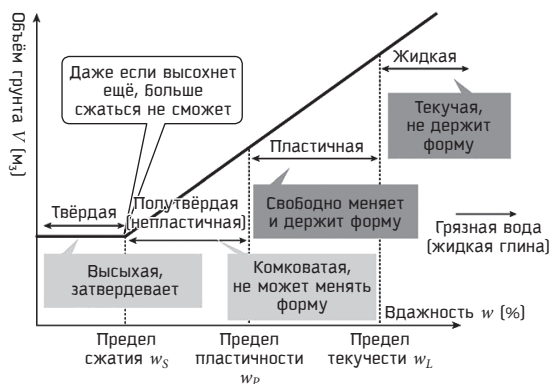
Таким образом, гранулы мелкозернистых почв, среди которых много глинистых частиц, контактируют друг с другом посредством адсорбированной воды, что придаёт им вязкость. Такие грунты называют связными. С другой стороны, гранулы песчаных почв в десятки раз больше гранул глинистых почв, и хотя они тоже адсорбируют воду⁸, по сравнению с размером гранул мембрана воды очень тонкая, и поэтому она рвётся, вследствие чего гранулы контактируют друг с другом непосредственно. Поэтому содержащий воду песок становится комковатым и рассыпчатым. Его небольшая вязкость обусловлена поверхностным натяжением свободной воды.



Вязкость и липкость не являются свойствами самих частиц почвы, а проявляются вследствие воздействия адсорбированной воды.

Конечно, глинистая почва в зависимости от содержания воды может быть ломкой и сухой или вязкой и липкой, но причиной этого является разная консистенция.

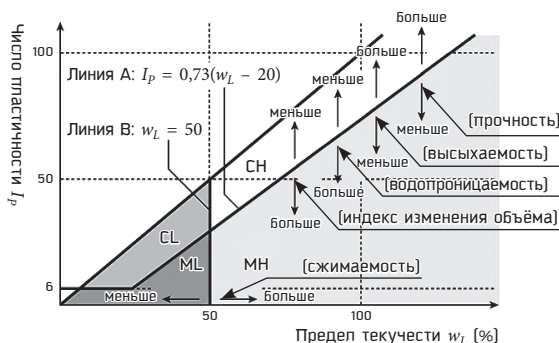
На графике ниже представлены три границы (предела) изменения состояния связного грунта. По горизонтальной оси отмечена влажность w , по вертикальной оси – объём связного грунта V . Связный грунт, содержащий вдобавок к адсорбированной воде много свободной воды, превращается в грязную жидкую субстанцию, где частицы почвы плавают в воде. Если затем уменьшить количество свободной воды, то частицы почвы начнут контактировать посредством адсорбированной воды, что приведёт к образованию пластичности. Если ещё больше уменьшить влажность, то слой адсорбированной воды станет тоньше, и почва превратится в комковатую и наполовину затвердеет. А в конце концов она высохнет и станет совсем твёрдой.



Это немного похоже на состояния кипения и плавления льда. Уровень влажности, при котором состояние почвы меняется с жидкого на пластичное, называется пределом текучести w_L (%), с пластичного на полутвёрдое – пределом пластичности w_p (%), а когда с полутвёрдого на твёрдое – пределом сжатия w_s (%).

⁸ Водяная плёнка закрепляется на границе раздела частиц почвы.

- Общеупотребимое название таких предельных значений – пределы консистенции⁹. Состояние воды меняется от жидкого к твёрдому из-за изменения температуры, а связных грунтов – из-за влажности и.
- Более того, хотя мы и говорим о связных грунтах, но среди них, кроме илистых грунтов, также есть почвы с разными видами почвенных гранул, содержащихся в разных пропорциях. И предел консистенции для разных подвидов связных грунтов будет разным. В общем случае у почв с большим содержанием глинистых частиц малого диаметра предел текучести w_L высокий, а у почв с большим содержанием илистых или песчаных частиц большого диаметра предел текучести w_L низкий. Кроме того, чем меньше содержание глинистых частиц в грунте, тем ближе друг к другу становятся значения предела текучести w_L и предела пластичности w_p и интервал влажностей между этими значениями, показывающий пластичность грунта, сужается.
- То есть если промежуток между пределом текучести и пределом пластичности большой, то почва пластичная и интервал влажности широкий.
- Кстати говоря, этот интервал называется числом пластичности I_p (число пластичности I_p = предел текучести w_L – предел пластичности w_p), и его большое значение показывает, что почва хорошо удерживает воду и устойчива к перепадам влажности. Отношения предела текучести и числа пластичности показаны на графике пластичности ниже, эти отношения оказывают влияние на классификацию мелкозернистых почв (см. стр. 69).



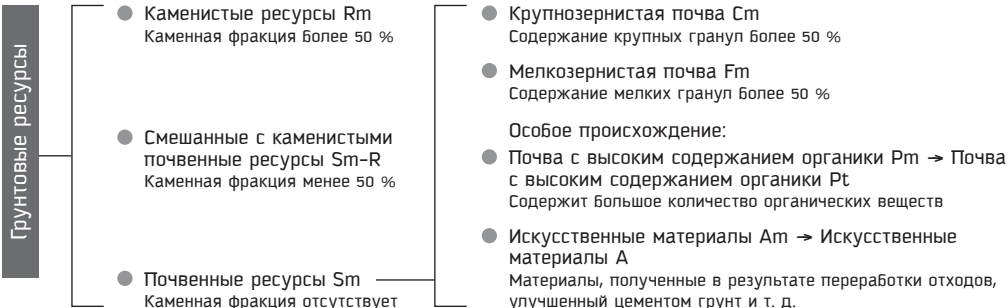
Виды связного грунта и их свойства

- Например, если рассматриваются почвы на участках СН и МЛ на графике пластичности, то, классифицируя их как глинистую почву с высоким пределом текучести и илистую почву с низким пределом текучести, можно сделать вывод, что так как в общем случае сжимаемость глинистой почвы растёт пропорционально пределу текучести, то сжимаемость почвы из участка СН будет высокой.

⁹ Открыл эти пределы Аттерберг, поэтому их называют ещё **пределы Аттерберга**.



Итак, переходим к классификации грунтов. Подразделение грунтовых ресурсов на крупнозернистые и мелкозернистые выглядит следующим образом.



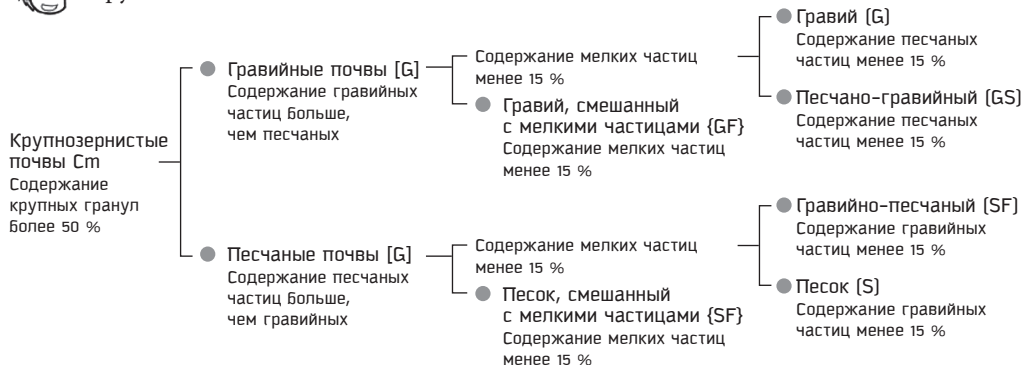
Классификация грунтовых ресурсов как крупнозернистых и мелкозернистых



Прежде всего грунтовые ресурсы подразделяют по количеству содержания в них каменных фракций (размером более 75 мм) на каменистые ресурсы Rm, смешанные с каменистыми почвенные ресурсы Sm-R и на почвенные ресурсы Sm. Не содержащие каменных фракций почвенные ресурсы Sm подразделяются дальше по размеру гранул (выявляется посредством экспериментов) и в зависимости от происхождения (выявляется наблюдением) на крупнозернистые почвы Cm, мелкозернистые почвы Fm, почвы с высоким содержанием органики Rm и искусственные почвы Am.



Перейдём к дальнейшей классификации крупнозернистых и мелкозернистых грунтов.



Классификация крупнозернистых почв¹⁰



Сначала крупнозернистые почвы подразделяют по содержанию песчаных частиц (0,075–2 мм) и гравийных частиц (2–75 мм) на гравийные почвы [G] и песчаные почвы [S]. Вторичная и третичная классификация производится на основании количественного содержания в почвах мелких (менее 0,075 мм), песчаных и гравийных частиц.

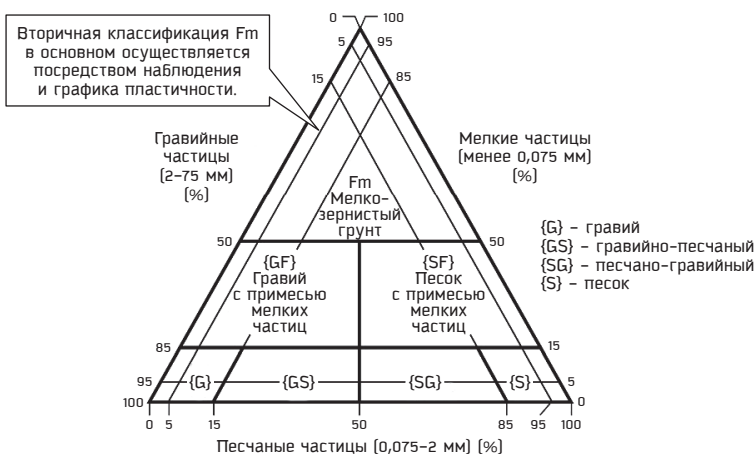


Эта классификация основана на размерах гранул, потому что размер гранул влияет на инженерные свойства крупнозернистых грунтов, верно?

¹⁰ Классифицированные образцы почвы обозначаются следующими символами: [] – для основной классификации, {} – для второстепенной классификации, () – для третейственной классификации.



Также существует метод вторичной и третичной классификации крупнозернистых грунтов и детальной классификации мелкозернистых грунтов с использованием треугольной системы координат, которая основывается на содержании крупнозернистых, песчаных и гравийных частиц.



Вторичная классификация в треугольной системе координат



Далее, мелкозернистые грунты в первую очередь подразделяются в зависимости от содержания мелких частиц и цветового оттенка на связные грунты [Cs], органические [O] и связные грунты с вулканическим пеплом [V]. Эта классификация производится на основе наблюдения и геологической истории. Вторичная и третичная классификации основываются на графике пластичности и пределах консистенции (предел текучести w_L , предел пластичности w_p).



Классификация мелкозернистых грунтов



Это потому, что инженерные свойства мелкозернистых грунтов зависят не только от размера гранул, но и от происхождения почвы, её физических и химических свойств. Поэтому классификация основывается и на размерах частиц, и на наблюдении за грунтами, и на их консистенции. Правильно?



Совершенно верно. Инженеры-строители, для которых природные почвы являются материалом и базисом для строительства, используют подобную классификацию на этапах исследований, проектирования и строительства. Таким образом, строительные работы могут осуществляться, основываясь на знаниях инженерных свойств каждого из видов грунтов. Итак, теперь вы получили знания о классификации почв, так что прикрепите эту табличку на холодильник и попробуйте выучить!

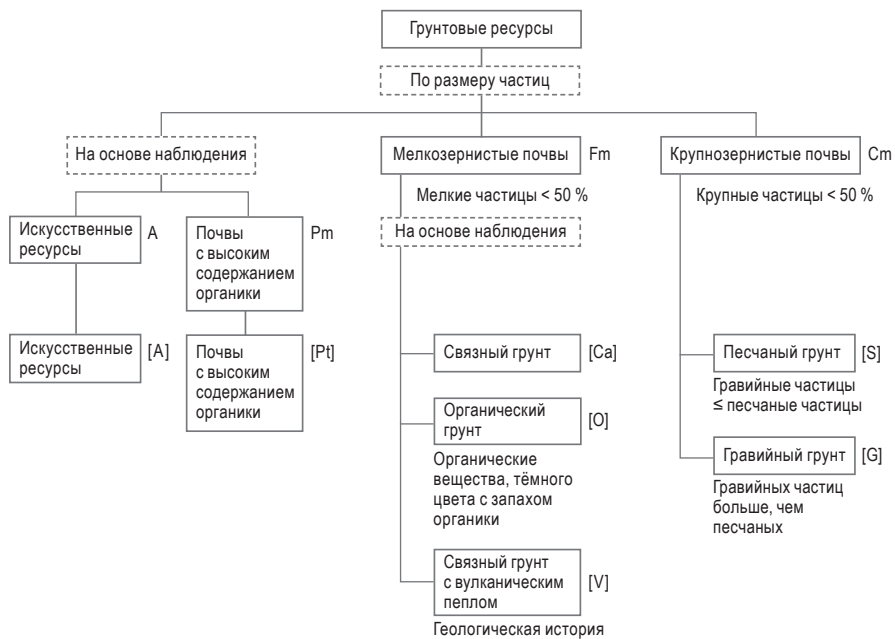


Что?!!

Основная классификация

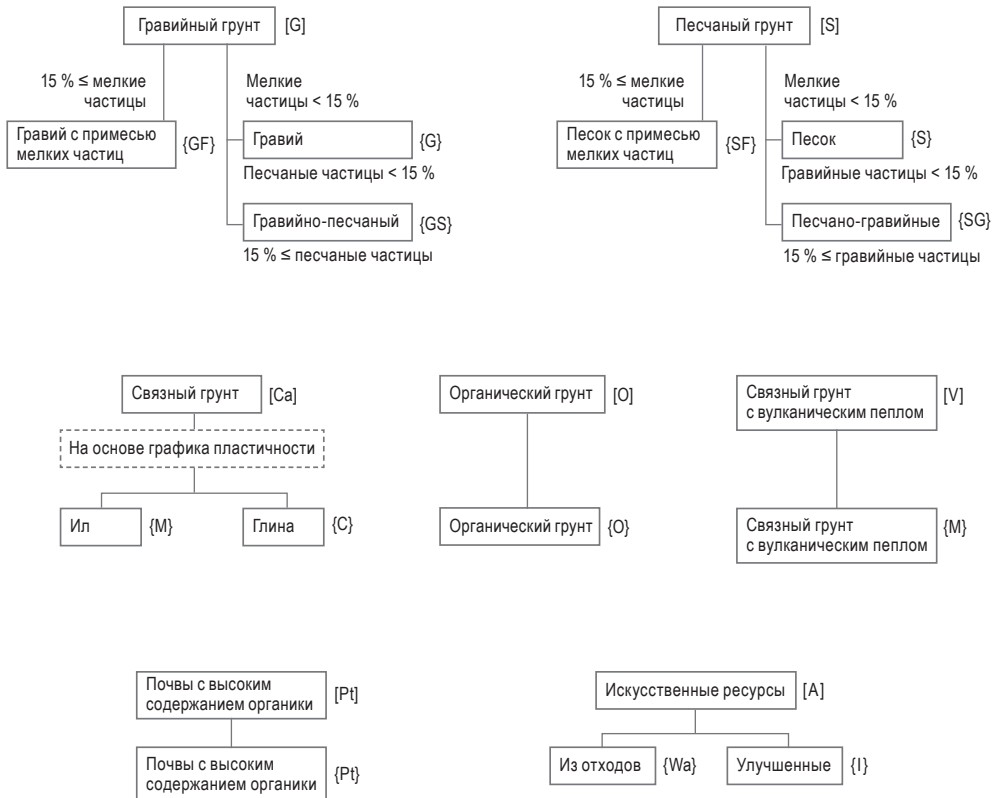
Классификация
грунтовых ресурсов

Классификация грунтов



Вторичная классификация

Классификация на основе наблюдений или графика пластичности



Третьичная классификация

Классификация по треугольной системе координат или на основе наблюдений, предела текучести и т. д.

Гравий	{G}	Мелкие частицы < 5 %	Песчаные частицы < 5 %	Гравий	(G)
			5 % ≤ песчаные частицы < 15 %	Гравий с примесью песка	(G-S)
			Песчаные частицы < 5 %	Гравий с примесью мелких частиц	(G-F)
		5 % ≤ мелкие частицы < 15 %	5 % ≤ песчаные частицы < 15 %	Гравий с примесью мелких частиц и песка	(G-FS)
Гравийно-песчаный	{GS}		Мелкие частицы < 5 %	Гравийно-песчаные	(GS)
			5 % ≤ мелкие частицы < 15 %	Гравийно-песчаные с примесью мелких частиц	(GS-F)
			Песчаные частицы < 5 %	Мелкозернисто-гравийные	(GF)
			5 % ≤ песчаные частицы < 15 %	Мелкозернисто-гравийные с примесью песка	(GF-S)
Гравий с примесью мелких частиц	{GF}		15 % ≤ песчаные частицы	Мелкозернистые гравийно-песчаные	(GFS)
		Мелкие частицы < 5 %	Гравийные частицы < 5 %	Песок	(S)
			5 % ≤ гравийные частицы < 15 %	Песок с примесью гравия	(S-G)
			Гравийные частицы < 5 %	Песок с примесью мелких частиц	(S-F)
Песок	{S}	5 % ≤ мелкие частицы < 15 %	5 % ≤ гравийные частицы < 15 %	Песок с примесью мелкозернистых гравийных частиц	(SF-G)
			Мелкие частицы < 5 %	Песчано-гравийные	(SG)
			5 % ≤ мелкие частицы < 15 %	Песчано-гравийные с примесью мелких частиц	(SG-F)
			Гравийные частицы < 5 %	Мелкозернисто-песчаные	(SF)
Песчано-гравийные	{SG}		5 % ≤ гравийные частицы < 15 %	Мелкозернисто-песчаный с примесью гравия	(SF-G)
			15 % ≤ гравийные частицы	Мелкозернистые песчано-гравийные	(SFG)
			Гравийные частицы < 5 %	Мелкозернисто-песчаные	(SF)
			5 % ≤ гравийные частицы < 15 %	Мелкозернисто-песчаный с примесью гравия	(SF-G)
Песок с примесью мелких частиц	{SF}		15 % ≤ гравийные частицы	Мелкозернистые песчано-гравийные	(SFG)
			Ил	Ил (высокий предел текучести)	(ML)
			$w_L \geq 50 \%$	Ил (низкий предел текучести)	(MH)
			Глина	Глина (низкий предел текучести)	(CL)
Ил	{M}		$w_L \geq 50 \%$	Глина (высокий предел текучести)	(CH)
			Органический грунт	Органическая почва (низкий предел текучести)	(OL)
			$w_L < 50 \%$	Органическая почва (высокий предел текучести)	(OH)
			$w_L \geq 50 \%$	Органические с вулканическим пеплом	(OV)
Глина	{C}		Органический грунт	Органические с вулканическим пеплом	(OV)
			$w_L < 50 \%$	Связный грунт с вулканическим пеплом (низкий предел текучести)	(VL)
			$50 \% \leq w_L < 80 \%$	Связный грунт с вулканическим пеплом (I тип)	(VH ₁)
			$w_L \geq 80 \%$	Связный грунт с вулканическим пеплом (II тип)	(VH ₂)
Органический грунт	{O}		Связный грунт с вулканическим пеплом	Связный грунт с вулканическим пеплом (I тип)	(VH ₁)
			$w_L < 50 \%$	Связный грунт с вулканическим пеплом (II тип)	(VH ₂)
			$50 \% \leq w_L < 80 \%$	Связный грунт с вулканическим пеплом (I тип)	(VH ₁)
			$w_L \geq 80 \%$	Связный грунт с вулканическим пеплом (II тип)	(VH ₂)
Связный грунт с вулканическим пеплом	{M}		Почвы с высоким содержанием органики	Торф	(Pt)
			Неполностью разложившиеся ткани	Чернозём	(Mk)
			Продукт разложения чёрного цвета	Чернозём	(Mk)
			Почвы с высоким содержанием органики	Торф	(Pt)
Почвы с высоким содержанием органики	{Pt}		Из отходов	Из отходов	(Wa)
			Улучшенные	Улучшенные	(I)
			Из отходов	Из отходов	(Wa)
			Улучшенные	Улучшенные	(I)



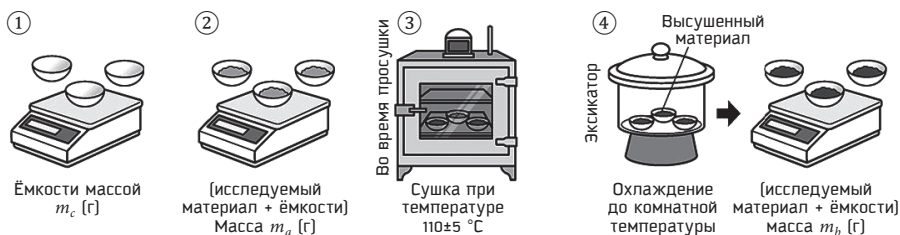
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Исследования влажности почвы (JIS A 1203¹¹, JGS 0121)

1. Цель и описание исследования

Во время исследования на влажность почвы замеряется изменение массы грунта до и после высушивания в духовом шкафу (при температуре 110 ± 5 °C) или в микроволновой печи. После чего влажность w (%) рассчитывается по формуле $w = m_w / m_s \times 100$.

2. Оборудование для исследования и процедура



- ① Измеряем вес m_c (г) ёмкостей, в которых будет происходить сушка материала.
- ② Измеряем вес исследуемого материала в ёмкостях m_a (г).
- ③ Все ёмкости с материалом помещаются в духовой шкаф или в микроволновую печь и высушиваются, пока масса не достигнет определённого значения.
- ④ Материал помещают в эксикатор и охлаждают до комнатной температуры, после чего измеряют вес высушенного материала в ёмкостях m_b (г).

3. Результат исследования

$$w = \frac{m_a - m_b}{m_b - m_c} \times 100 \%$$

Инженерные свойства природных почв сильно изменяются в зависимости от содержания в них влаги. Поэтому влажность является одним из базовых показателей, характеризующих состояние почвы, и для определения условий строительства земляных сооружений этот показатель также необходим.

Исследование плотности почвенных частиц (JIS A 1202, JGS 0111)

1. Цель и описание исследования

В исследовании на плотность частиц почвы масса почвенных частиц m_s рассчитывается на основе их сухой массы, путём замены на массу воды тем же объёмом, что и объём почвенных частиц V_s . Затем плотность почвенных частиц ρ_s (г/см³) рассчитывается по формуле $\rho_s = m_s / V_s$.

¹¹ Номер стандарта установлен Японскими промышленными стандартами.

2. Оборудование для исследования и процедура



- Поместите пробу в пикнометр до уровня не более чем 1/4 сосуда. До уровня 2/3 заполните дистиллированной водой.
- Нагревая пикнометр, время от времени встряхивайте его, чтобы выпустить пузырьки воздуха. Затем оставьте остывать до комнатной температуры.
- Добавив в пикнометр дистиллированной воды, измерьте общую массу m_b (г) и температуру содержимого T (°C).
- Вылейте содержимое в ёмкость для сушки и высушите в духовом шкафу (при 110 ± 5 °C) до определённой массы.
- После сушки поместите материал в эксикатор, чтобы он остыл там до комнатной температуры. Затем измерьте сухую массу m_s (г).

3. Результат исследования

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_s + (m_a - m_b)} \times \rho_w(T)$$

Масса воды того же объёма, что и почвенные частицы

m_a – масса пикнометра, дозаполненного дистиллированной водой при T (°C), г.
 $\rho_w(T)$ – плотность дистиллированной воды при T (°C), г/см³.

Знаменатель представляет собой массу воды того же объёма, что и почвенные частицы. Если это значение разделить на плотность дистиллированной воды $\rho_w(T)$ при T (°C), то получится объём почвенных частиц V_s .

Исследование объёмной плотности почвы (JIS A 1225, JGS 0191)

1. Цель и описание исследования

Для исследования объёмной плотности почвы сначала напрямую измеряются общая масса m и объём V почвы, затем по формуле $\rho_t = m/V$ рассчитывается объёмная плотность ρ_t (г/см³). Объём можно измерить двумя способами: с помощью штангенциркуля и с помощью парафина. Здесь объясняется способ измерения посредством штангенциркуля.

2. Оборудование для исследования и процедура

- ① Из ненарушенного грунта формируется образец и измеряется его масса m (г).
- ② Измеряется средний диаметр D (см) и средняя высота H (см) образца.



- ③ Собираются образовавшиеся при формировании образца частички грунта, и измеряется их влажность w (%).

3. Результат исследования

По формуле ниже вычисляется объём V (см³), на основании чего затем рассчитывается объёмная плотность ρ_t (г/см³):

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 H.$$

Рассчитав объёмную плотность ρ_t , на основании влажности w образца можно также вычислить сухую плотность ρ_d , а на основании плотности почвенных частиц ρ_s можно вычислить коэффициент пустотности e и водонасыщенность S_r .

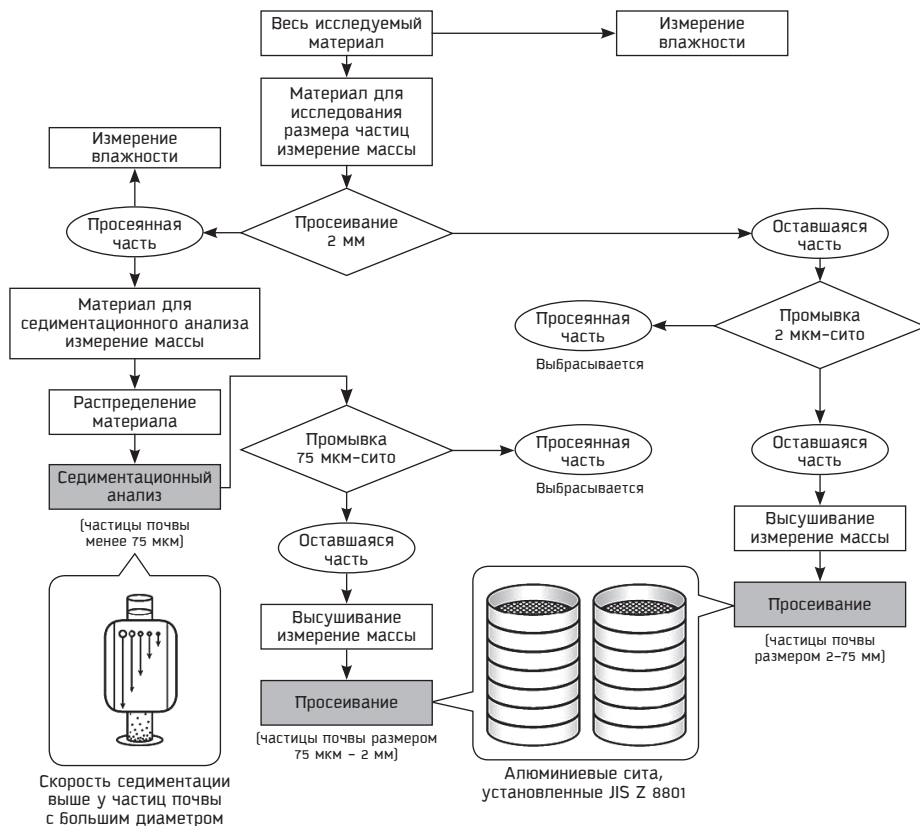
Определение размера почвенных гранул (JIS A 1204, JGS 0131)

1. Цель и описание исследования

Определение соотношения частиц почвы по их размеру производится посредством построения кумулятивной кривой гранулометрического состава. Если частицы менее 75 мм в диаметре, то для мелкозернистых частиц применяют седиментационный анализ, а для крупнозернистых – ситовой.

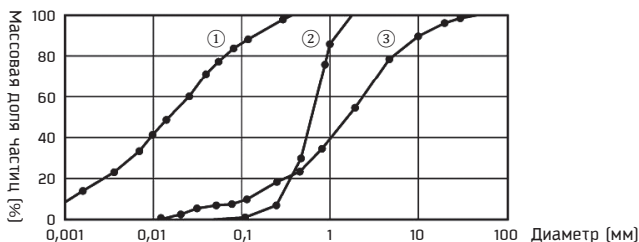
2. Оборудование для исследования и процедура

Исследование размера частиц почвы осуществляется по приведенной ниже схеме. При седиментационном анализе диаметр частиц определяется по закону Стокса, по которому скорость седиментации зависит от диаметра сферической частицы. А массовая доля проходящих частиц (в %) определяется посредством ареометра.



3. Результат исследования

Строится график кумулятивной кривой гранулометрического состава в полулогарифмическом масштабе, где по вертикальной оси откладывается массовая доля частиц нарастающим итогом (%), а по горизонтальной оси – логарифм диаметра частиц (мм). По кумулятивной кривой можно легко определить диапазон распределения частиц почвы по размеру. Например, на основании кривой ① можно сделать вывод, что эта почва преимущественно мелкозернистая, кривая ② говорит о почве с небольшим диапазоном распределения частиц и плохой уплотнённостью, а график ③ представляет почву с широким распределением частиц и хорошей уплотнённостью.



Примеры кумулятивных кривых гранулометрического состава

Исследование пределов текучести и пластичности (JIS A 1205, JGS 0141)

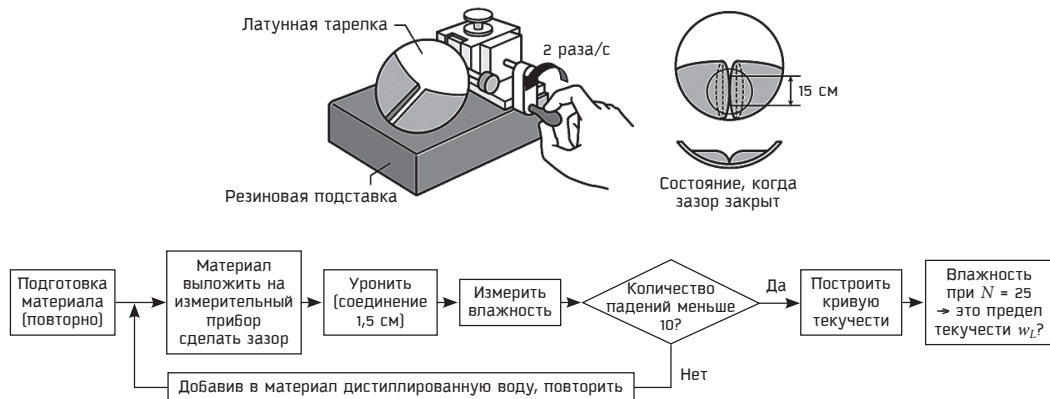
1. Цель и описание исследования

В рамках данного исследования определяются предел текучести w_L и предел пластичности w_P . А также вычисляется число пластичности I_P , показывающее диапазон влажности, при котором почва остаётся пластичной.

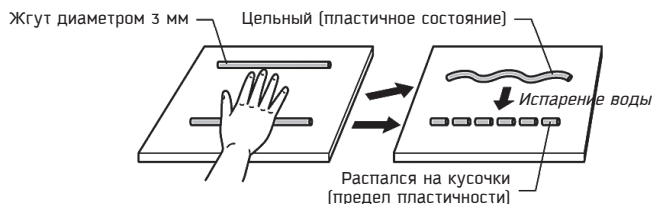


2. Оборудование для исследования и процедура

Исследование предела текучести: исследуемый материал положите на латунную тарелку и дайте ему свободно упасть (с высоты 1 см). Когда разделённый на две части материал соединится после 25 падений, измерьте его влажность w .



Исследование предела пластичности: возьмите часть материала от использованного в исследовании на предел текучести и раскатайте в ладони в жгут диаметром 3 мм. Если жгут распадается на кусочки, измерьте влажность w .





3. Результат исследования

В результате данного исследования на основе графика пластичности классифицируются мелкозернистые почвы и определяются их физические свойства. Для связных грунтов оцениваются их механические свойства и определяется возможность использования таких грунтов для насыпей или дорожного полотна.

Исследование уплотнения почвы посредством трамбовки (JIS A 1210, JGS 0711)

1. Цель и описание исследования

При исследовании уплотнения почвы посредством трамбовки проводят трамбовку при одинаковых условиях, меняя влажность почвы. Получив максимальную сухую плотность (ρ_{dmax}), измеряют соответствующую этой плотности влажность (w_{opt}). Во время работ по уплотнению почвы определяют характеристики уплотнения, которые используются при проектировании и строительстве.

2. Оборудование для исследования и процедура



Уплотнение почвы посредством трамбовки осуществляется по приведённой схеме. Способы исследований подразделяются на 5 типов, от А до Е, в зависимости от размеров трамбовки и формы, а также по количеству производимых действий трамбования. Подготовка материалов также бывает трех видов, от а до с. И исследования проводятся путём комбинирования наиболее подходящего способа трамбовки и материала, в зависимости от типа почвы, размера почвенных гранул и т. д.

3. Результаты исследования

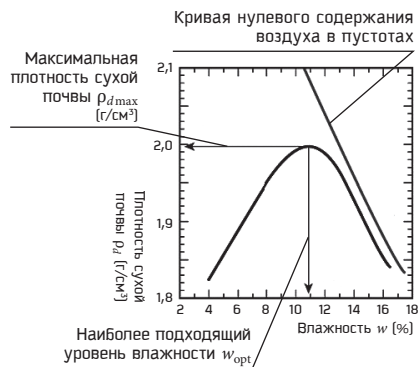
В результате этого исследования наряду с установлением характеристик уплотнения почвы на месте строительства определяется уровень влажности, а также устанавливается базовая для строительства плотность.

Способы уплотнения почвы

При строительстве дорожного полотна, насыпей, речных и прибрежных дамб, при засыпке и отсыпке грунта обязательно осуществляется его уплотнение. В результате увеличивается прочность, снижается сжимаемость и повышается устойчивость. Существуют разные способы уплотнения грунта на месте, уплотнение может производиться вручную, с помощью небольших механизмов или больших машин. А характеристики уплотнения зависят не только

от вида почвы, но и от энергии уплотнения (динамической, статической) и её величины, а также от влажности во время уплотнения.

Обычно если энергия уплотнения маленькая, то трудно получить нужный результат, и могут возникнуть проблемы в свойствах материала, однако и слишком высокая энергия тоже может привести к нежелательным последствиям. Так, при уплотнении связных почв с высокой влажностью при повторяющихся действиях может произойти сдвиг почвы и её разрушение, ведущие к снижению прочности. Такое явление называется чрезмерным уплотнением.



Кривая уплотнения грунта



Вибрационный каток



Комбинированный каток



Макадамский каток



Пневмоколесный каток

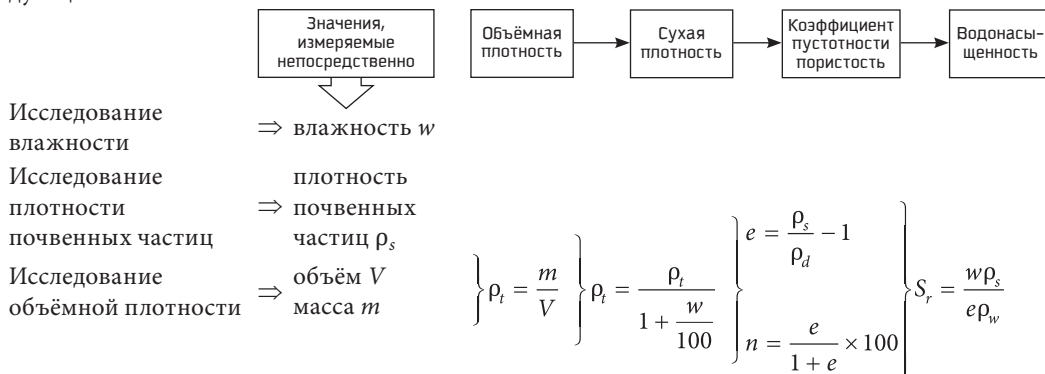
(Фотография предоставлена Kaneko corporation)

Показатели, описывающие состояние почвы

Задание

Для одного и того же почвенного материала было произведено исследование объёмной плотности, объём исследуемого материала V был определен как $70,65 \text{ см}^3$, масса M – $125,93 \text{ г}$, а сухая масса (m_s) – $98,35 \text{ г}$. Кроме того, исследование на плотность почвенных частиц показало значение $\rho_s = 2,670 \text{ г/см}^3$. Требуется найти влажность почвенного материала w , его объёмную плотность ρ_t , сухую плотность ρ_d , коэффициент пустотности e , пористость n и водонасыщенность S_r .

Рассуждения. Описывающие состояние почвы показатели обычно рассчитываются по следующей схеме.



Исследования грунта дают возможность непосредственно измерить влажность w , плотность почвенных частиц ρ_s и объёмную плотность ρ_t . На основании этих трёх показателей остальные рассчитываются с использованием разных формул.

Решение

$$\text{Влажность: } w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 = \frac{m - m_s}{m_s} \times 100 = \frac{125,93 - 98,35}{98,35} \times 100 = 28,0 \, \%$$

$$\text{Объёмная плотность: } \rho_t = \frac{m}{V} = \frac{125,93}{70,65} = 1,782 \, \text{г/см}^3.$$

$$\text{Сухая плотность: } \rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{98,35}{70,65} = 1,392 \, \text{г/см}^3$$

$$(\text{или, исходя из влажности } w \text{ и объёмной плотности } \rho_t: \rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{w}{100}} = \frac{1,7821}{1 + \frac{28,0}{100}} = 1,392 \, \text{г/см}^3).$$

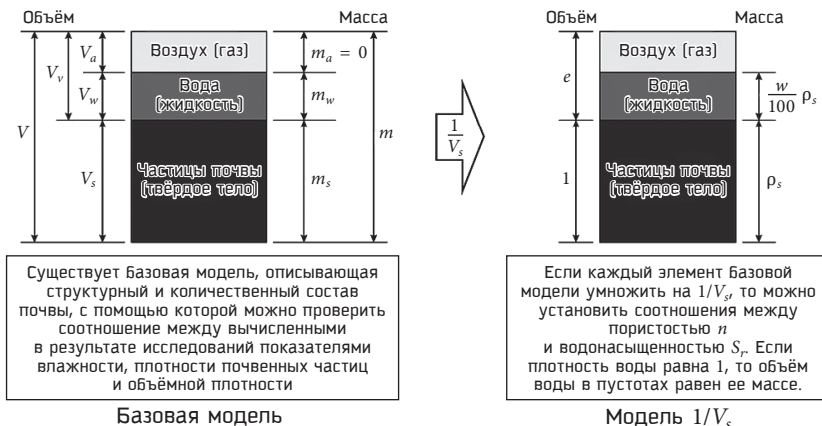
$$\text{Коэффициент пустотности: } e = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{V}{V_s} - 1 = \frac{V}{\frac{m_s}{\rho_s}} - 1 = \frac{\rho_s}{\frac{m_s}{V}} - 1 = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 = \frac{2,670}{1,3920} - 1 = 0,918.$$

$$\text{Пористость: } n = \frac{V_v}{V_s + V_v} \times 100 = \frac{\frac{V_v}{V_s}}{1 + \frac{V_v}{V_s}} \times 100 = \frac{e}{1 + e} \times 100 = \frac{0,918}{1 + 0,918} \times 100 = 47,9 \, \%.$$

$$\text{Водонасыщенность: } S_r = \frac{\frac{V_w}{V_s}}{\frac{V_v}{V_s}} \times 100 = \frac{\frac{m_w / m_s}{\rho_w \rho_s}}{e} \times 100 = \frac{\frac{m_w}{m_s}}{e \rho_w} \times 100 = \frac{w \rho_s}{e \rho_w} = \frac{28,0 \times 2,670}{0,918 \times 1} = 81,4 \, \%.$$

Справка

В этом задании для установления взаимосвязи между пористостью n и водонасыщенностью S_r удобно использовать модель $1/V_s$.



ГЛАВА 3

ВОДА В ПОЧВЕ?



МОРЕ!

ТАКОЕ ХОРОШЕЕ МЕСТО,
А ЛЮДЕЙ МАЛО! ПРЯМО
ЗАТЕРЯННЫЙ РАЙ!

АГА,
Я ЕГО СЛУЧАЙНО
НАШЁЛ, КОГДА
ЗАНИМАЛСЯ
ИССЛЕДОВАНИЯМИ
ПОЧВ.

И ОТ ПОЧВЕННЫХ
МАНЬЯКОВ БЫВАЕТ
ИНОГДА ПОЛЬЗА!
ХИ-ХИ.

ПОДОЖДАТЕ
НЕМНОГО!

Э?

КАК ВЫ ДУМАЕТЕ,
ЗАЧЕМ Я ХОТЕЛ
ПРИЕХАТЬ НА
МОРЕ?

ЧТОБЫ
НА ДЕВУШЕК
В КУПАЛЬНИКАХ
ПОСМОТРЕТЬ?

АА, ПЕРЕД
ТЕМ КАК ЗАЙТИ
В МОРЕ, НАДО
ВНИМАТЕЛЬНО
ПОСМОТРЕТЬ...

ЧТО?!
АА НЕТ ЖЕ!

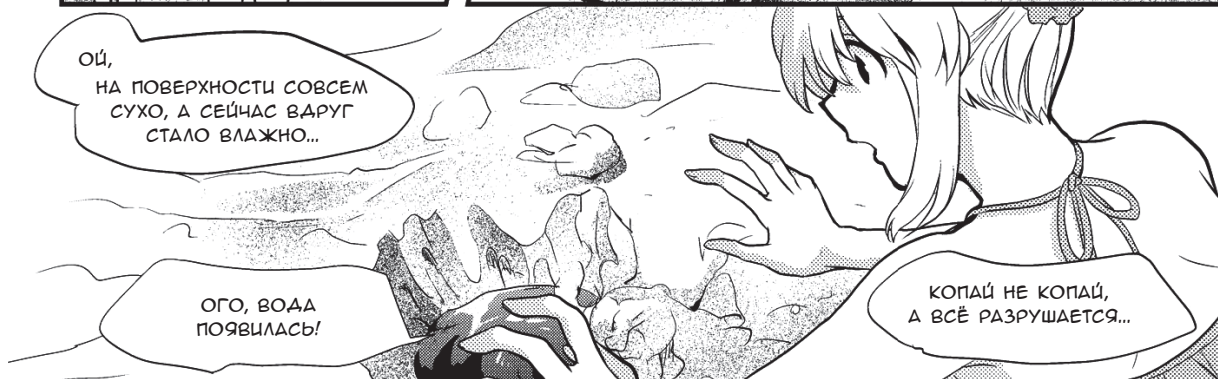
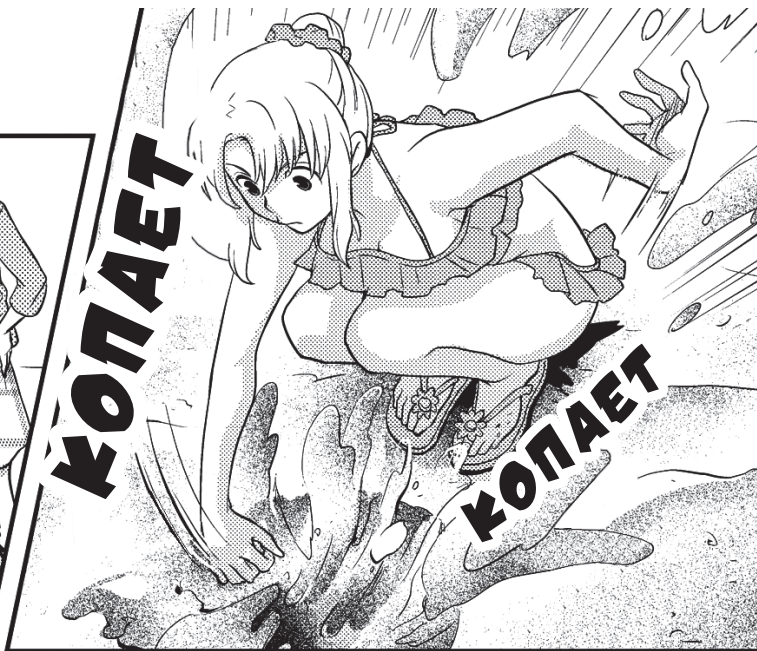
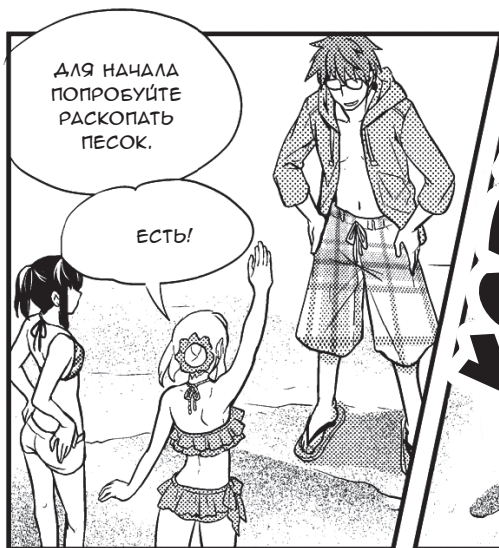
ЧТОБЫ ОБЪЯСНИТЬ
ВАМ ПРО ПРИБЕРЕЖНЫЕ
ПОЧВЫ!

А ПОПЛАВАТЬ ВЫ
СМОЖЕТЕ И ПОТОМ.

РАЗ УЖ МЫ В ТАКОМ МЕСТЕ,
ГДЕ ПОЛНО ПЕСКА,

НЕЛЬЗЯ УПУСКАТЬ
ТАКУЮ ВОЗМОЖНОСТЬ.

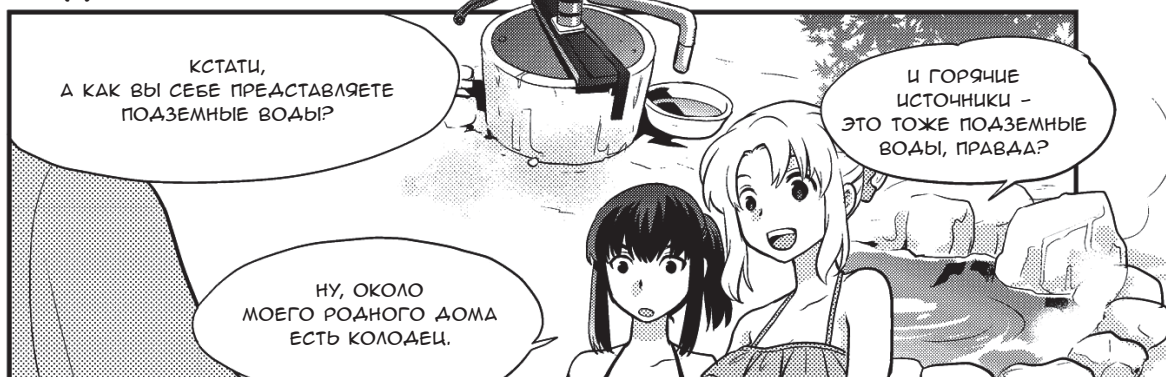
ОПЯТЬ ОН
ЗА СВОЁ...

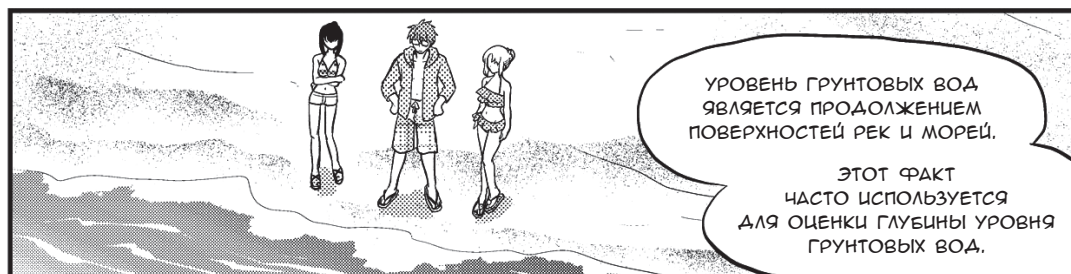
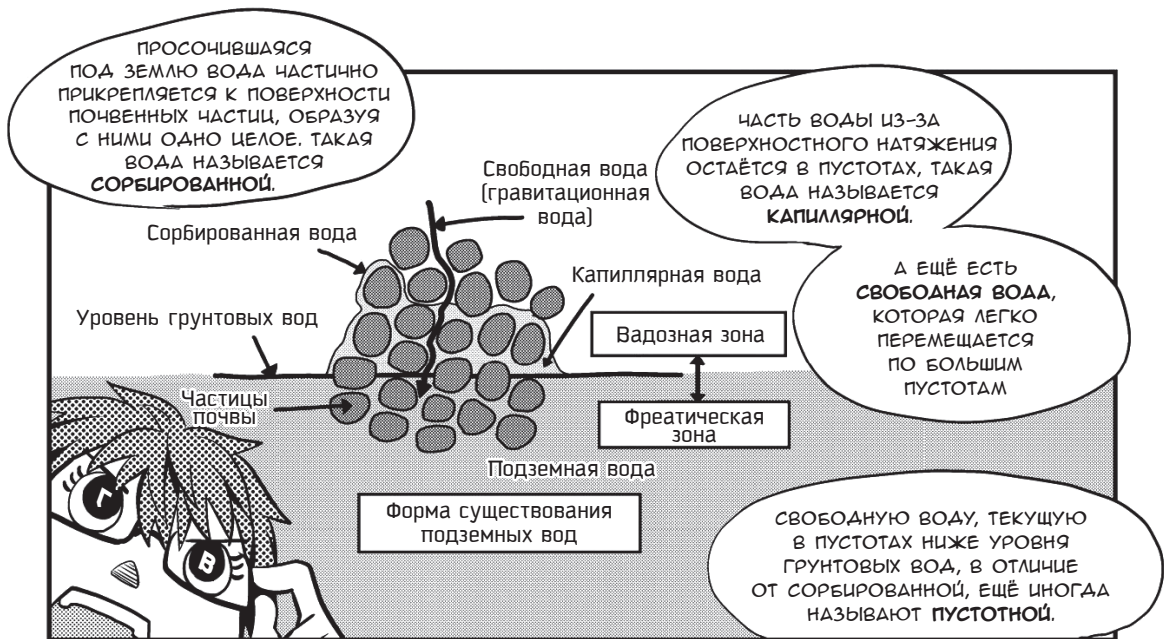




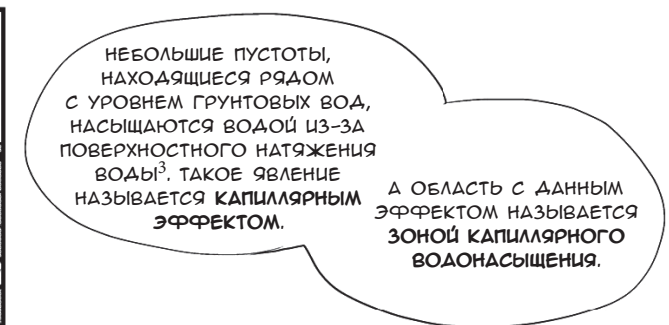
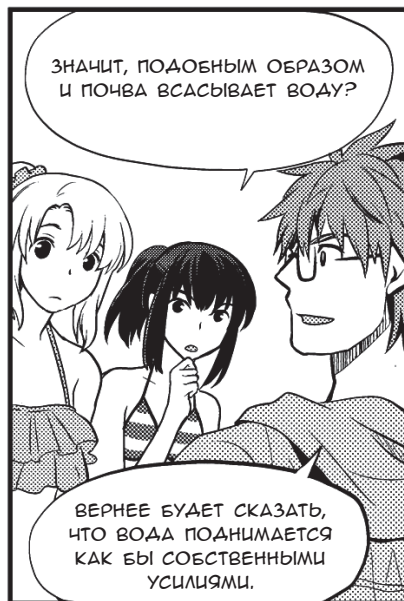
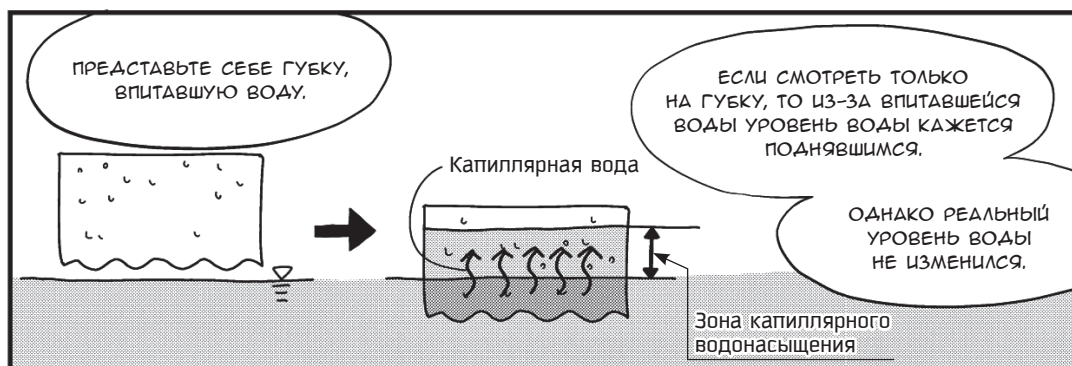
¹ Увеличение запаса подземных вод, например вследствие просачивания дождевой воды, называется пополнением.

3.1. ДАВЛЕНИЕ ВОДЫ В ГРУНТАХ





² Глубина уровня грунтовых вод определяется от базовой поверхности, она связана с накопленной энергией подземных вод.



³ Энергия поверхности раздела на единицу длины, направленная на втягивание частиц с поверхности внутрь для уменьшения площади поверхности жидкости.

3.2. ТЕЧЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД





Верно. Способность почвы пропускать воду называется водопроницаемостью, и это очень важное свойство, связанное с проблемами оползней, проседаний и провалов. Как вы думаете, что из себя представляет почва с высокой водопроницаемостью?



Ну вот у песка размер частиц больше, чем у почвы в горах...



Внутри почвы вода течет по пустотам... Наверное, в такой почве должны быть большие пустоты?



Правильно мыслите! Почва с большим диаметром частиц и с большим количеством крупных пустот будет иметь высокую водопроницаемость. В зависимости от водопроницаемости слои почвы делятся на три категории.

Водонепроницаемый слой	Полупроницаемый слой	Водопроницаемый слой
Не пропускающий воду слой, состоящий из плотных магматических и метаморфических пород без трещин	Глинистые, сланцевые слои, слои суглинка и т. п., которые при рассмотрении в долгосрочной перспективе или на большой территории вносят свой вклад в пополнение грунтовых вод	Неуплотнённые слои гравия и песка с хорошей водопроницаемостью, а также вулканические породы с трещинами



Кроме того, область водонасыщенного водопроницаемого слоя называется водоносный горизонт. Водоносный горизонт, в свою очередь, в зависимости от давления бывает безнапорным, напорным и протекающим.

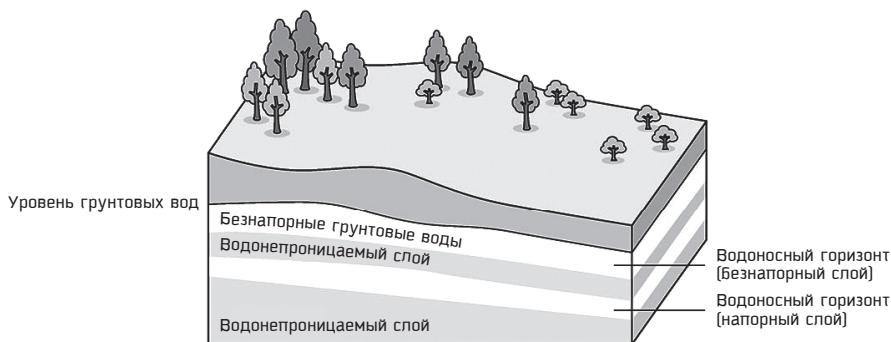


Опять куча новых терминов! Я не успеваю всё усваивать.



Ну, здесь важно, какое давление...

Например, если предположить, что слои просто чередуются друг с другом, сверху вниз идут: водоносный горизонт – водонепроницаемый слой – водоносный горизонт – водонепроницаемый слой и т. д., то...



Подземная структура (водоносный горизонт и водонепроницаемый слой)



(Водопроницаемость на этой схеме напоминает чередование хлеба и ветчины в сэндвиче...)



Тогда самым верхним оказывается водоносный горизонт, в котором находится уровень грунтовых вод. Он сообщается с атмосферой через вадозный слой, поэтому давление в нём практически равно атмосферному. Так что водоносный горизонт, в котором давление не меняется, называется безнапорным слоем, а проходящая в нём вода называется безнапорной грунтовой водой.



Более того, так как безнапорный слой подпитывается напрямую просачивающейся водой, то его толщина меняется в соответствии с уровнем грунтовых вод. Водный уровень в таком случае называется свободным водным уровнем, а подземные воды – свободными грунтовыми водами.



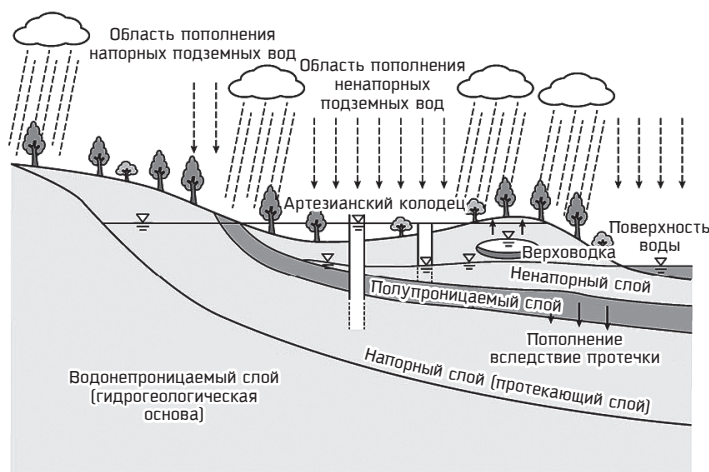
С другой стороны, зажатый между водонепроницаемыми слоями более глубокий водоносный горизонт не имеет уровня грунтовых вод и, подобно водопроводной трубе, находится под давлением. Называется он в таком случае напорным слоем, а протекающие через него воды – напорными подземными водами.



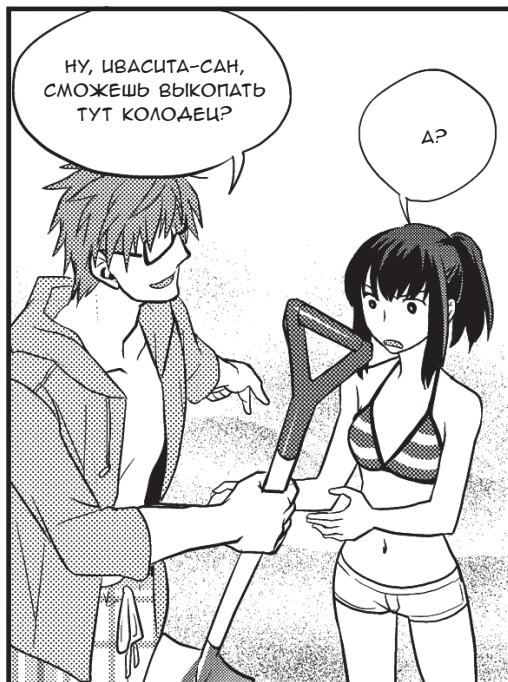
Если водоносный горизонт в зависимости от давления делится на напорный и безнапорный, то что же тогда такое протекающий слой?



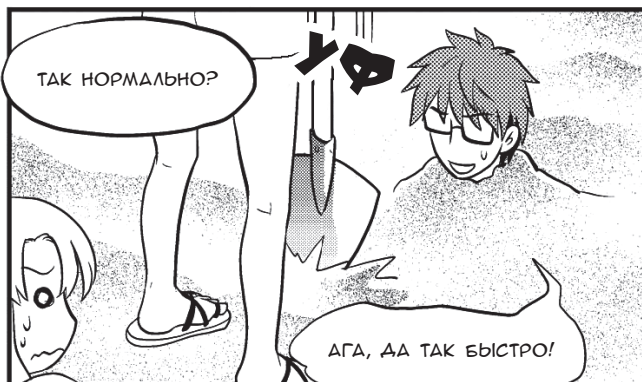
Протекающий слой водоносного горизонта образуется вследствие протекания напорной воды через трещины в водонепроницаемом слое в другие слои. В зависимости от состояния такого протекания меняется окружающее давление.



Пополнение и просачивание подземных вод, состояние водоносного горизонта



Через 5 минут





ЭЭЭ... МОЖЕТ,
ВЫ МЕНЯ УЖЕ
ВЫТАЩИТЕ?



ХОТЯ НЕТ, ДАВАЙТЕ
ПОКА ПОДУМАЙТЕ
ПРО УРОВЕНЬ ВОДЫ
В ГЛУБОКОМ КОЛОДЦЕ.



НАПОРНЫЙ ВОДОНОСНЫЙ
СЛОЙ ЗАЖАТ МЕЖАУ
ВОДОНЕПРОНИЦАЕМЫМИ
СЛОЯМИ И НАХОДИТСЯ ПОД
ДАВЛЕНИЕМ, ПОЭТОМУ...



ПОХОЖЕ НА ТО, КОГДА
В БУМАЖНУЮ КОРОБКУ
С СОКОМ ВТЫКАЮТ
СОЛОМИНКУ, ДА?



В ГЛУБОКОМ КОЛОДЦЕ
УРОВЕНЬ ВОДЫ БУДЕТ
НАХОДИТЬСЯ ВЫШЕ, ЧЕМ
ВЕРХНЯЯ ГРАНИЦА НАПОРНОГО
ВОДОНОСНОГО СЛОЯ.

А ЕСЛИ ДАВЛЕНИЕ
ОСОБЕННО БОЛЬШОЕ,
ТО ПОДЗЕМНАЯ ВОДА
МОЖЕТ ДАЖЕ
ФОНТАНИРОВАТЬ
ИЗ ЗЕМЛИ НАРУЖУ.

ТАКОЙ КОЛОДЕЦ
НАЗЫВАЮТ
АРТЕЗИАНСКИМ.



ВРОДЕ ТОГО.



ЗНАЧИТ, ТЕКУЩИЕ СЕБЕ
СПОКОЙНО ПОДЗЕМНЫЕ
ВОДЫ ПОЛУЧАЮТ ТАКУЮ
МАССУ ЭНЕРГИИ ИЗ-ЗА
ДАВЛЕНИЯ В ВОДОНОСНОМ
ГОРИЗОНТЕ?



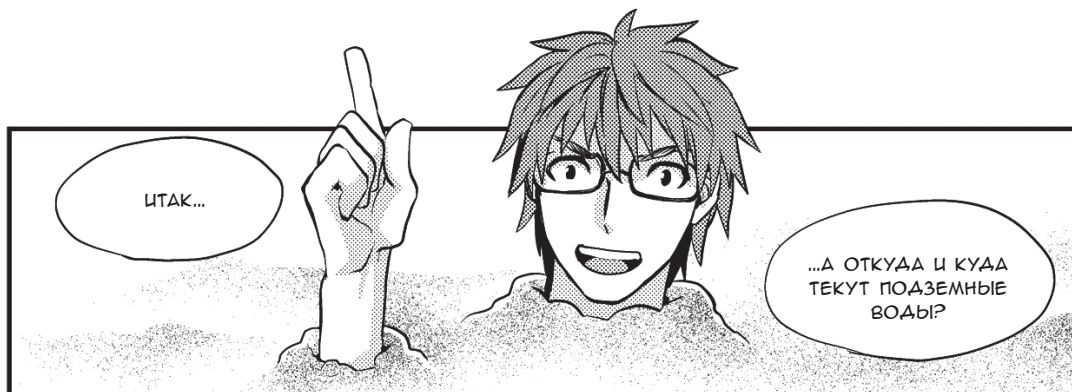
ИМЕННО!
МЫ НЕ МОЖЕМ
НЕПОСРЕДСТВЕННО УВИДЕТЬ
ТЕЧЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД,
И ДЛЯ ИХ ОБНАРУЖЕНИЯ
ОЧЕНЬ ВАЖНО ПОНЯТЬ,
КАКАЯ ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ⁴
В НИХ НАКОПЛЕНА.



...Я ВАМ ТОЖЕ СЕЙЧАС
ПРОДЕМОНСТРИРУЮ СВОЙ
ПОНЕТИЩАЛ И ВЫБЕРУСЬ
НАРУЖУ...

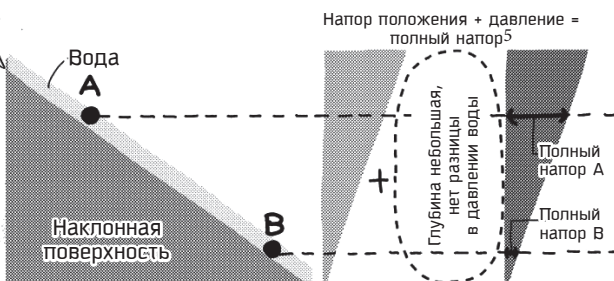
НУ, ПО КРАЙНЕЙ
МЕРЕ, ВЫТАЩУ
РУКУ...

⁴ Энергетическое состояние подземных вод в определенной точке называется **потенциалом подземных вод**. В механике грунтов различают два вида потенциальной энергии (полный напор): энергию положения (напор положения) и энергию давления (давление). В гидравлике полный напор называют **пьезометрическим напором**.



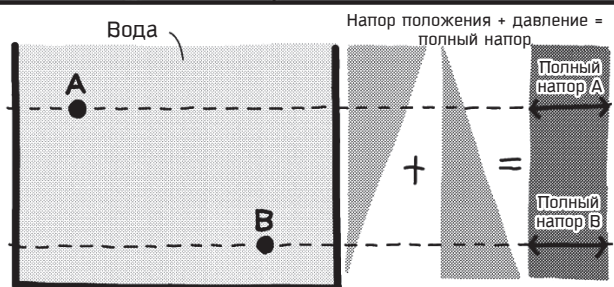
ДАВАЙТЕ РАССМОТРИМ
ЭТО НА РЕАЛЬНОМ
ПРИМЕРЕ.

ЕСЛИ, КАК ПОКАЗАНО
НА РИСУНКЕ, МЕЖУ ТОЧКАМИ
А И В ЕСТЬ РАЗНИЦА В ВЫСОТЕ
ПОЛОЖЕНИЯ, НО НЕТ РАЗНИЦЫ
В ДАВЛЕНИИ ВОДЫ, ТО ВОДА БУДЕТ
ТЕЧЬ ИЗ БОЛЕЕ ВЫСОКОЙ ТОЧКИ А
В БОЛЕЕ НИЗКУЮ ТОЧКУ В.



РАЗНИЦА В НАПОРЕ
ПОЛОЖЕНИЙ БУДЕТ РАВНА
РАЗНИЦЕ ПОЛНЫХ НАПОРОВ,
АД?

А ЧТО БУДЕТ,
ЕСЛИ ИЗ-ЗА БОЛЬШЕЙ
ГЛУБИНЫ ВОЗРАСТЁТ
ДАВЛЕНИЕ, КОТОРОЕ
УЖЕ НЕЛЬЗЯ БУДЕТ
ИГНОРИРОВАТЬ?



ЕСЛИ ВОТКНУТЬ СОЛОМИНКУ
В ТОЧКУ А И ТОЧКУ В,
УРОВЕНЬ ВОДЫ БУДЕТ
НА ОДНОЙ ВЫСОТЕ?

ПОЛУЧАЕТСЯ,
ЧТО В ТОЧКЕ А ВЫСОКИЙ
НАПОР ПОЛОЖЕНИЯ,
А В ТОЧКЕ В ВЫСОКОЕ
ДАВЛЕНИЕ....

В РЕЗУЛЬТАТЕ ИХ ОБЩИЙ НАПОР
УРАВНОВЕСИТСЯ, И ТОГДА ЧТО,
ВОДА ПРОСТО НЕ ПОТЕЧЁТ?

КРУТЬ-ВЕРТЬ

ИМЕННО!

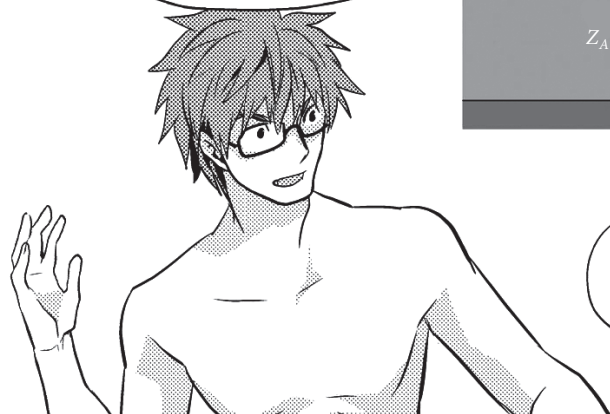
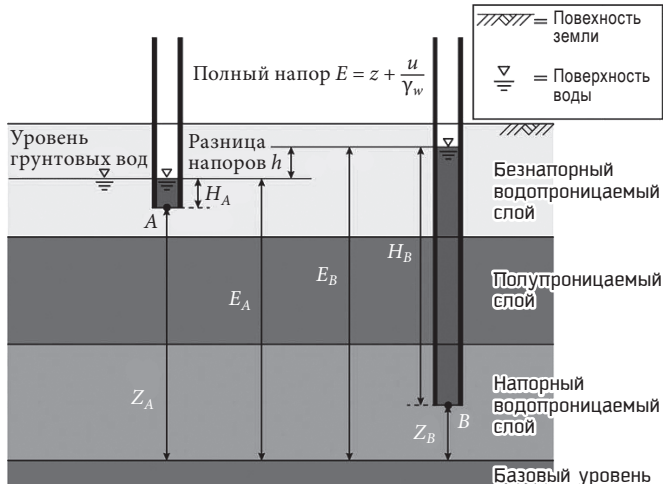
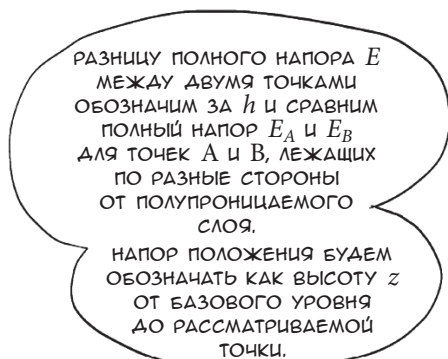
ТЕЧЕНИЕ ВОДЫ
ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ НЕ ПОЛНЫМ
НАПОРОМ В ОДНОЙ ТОЧКЕ,

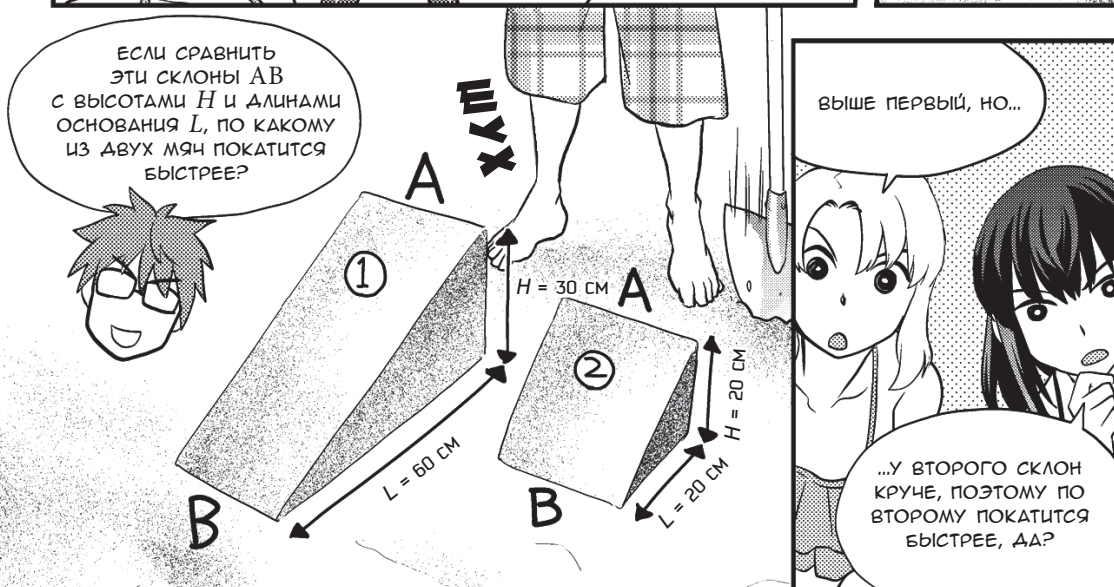
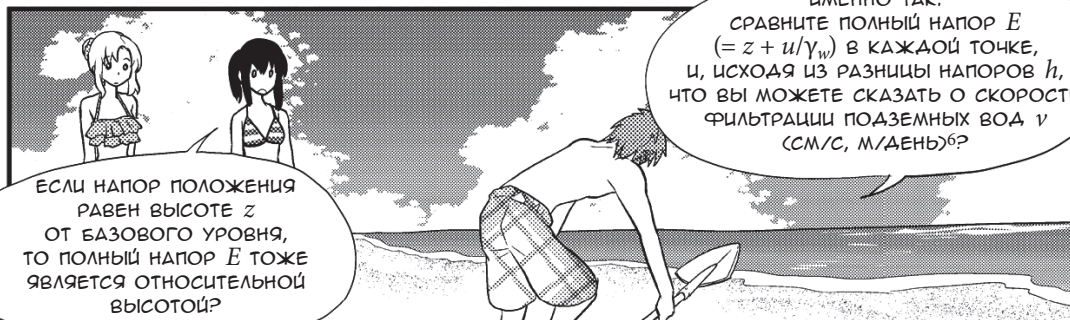
А РАЗНИЦЕЙ В ПОЛНЫХ
НАПОРАХ МЕЖУ ТОЧКАМИ!

...НУ, РАЗ ВЫ ВСЁ
ПОНЯЛИ, МОЖЕТ, УЖЕ
ВЫТАЩИТЕ МЕНЯ?

⁵ Здесь не учитывается скоростной напор, давление принимается за статическое.

3.3. ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОЧВЫ





⁶ Скорость просачивания подземных вод в грунте.



Правильно. На поток грунтовых вод также влияет разница напора h относительно длины пути L . Такой уклон скорости фильтрации v называется градиент напора i . Обратите внимание, что длина L здесь означает не расстояние между двумя точками, а длину пути фильтрации подземных вод в почве.



Значит, уклон, по которому движется вода, называется градиент напора i ?



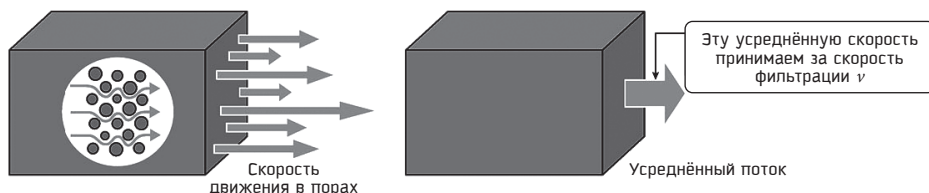
Ага. Ещё его называют гидравлическим градиентом.



...А чему обычно равна скорость фильтрации подземных вод?



В день вода может пройти от нескольких сантиметров до нескольких сот метров, в среднем, наверное, где-то около 1 м/д. Однако подземные воды текут разными путями и проходят через пустоты разных размеров, поэтому поперечное сечение почвы представляет собой смесь фильтрационных потоков с разными скоростями (движения в порах). Таким образом, это очень сложное явление, и невозможно разобраться в движении потоков по отдельности. Поэтому рассматривают воображаемый усреднённый поток движения через пустоты поперечного сечения почвы.



А как находят эту усреднённую скорость фильтрации v ?



Был такой учёный Дарси (Darcy), который открыл закон, что скорость фильтрации подземных вод v , проходящих через почву с коэффициентом фильтрации k , пропорциональна градиенту напора i .

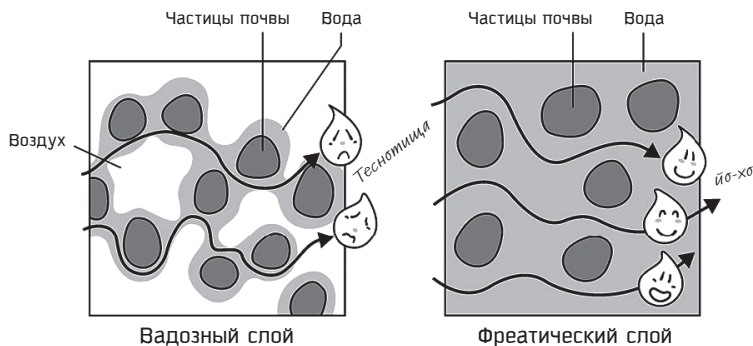
Скорость фильтрации $v = \text{коэффициент фильтрации } k \times \text{градиент напора } i$ (см/с, м/д) (закон Дарси).



А что это ещё за коэффициент фильтрации k ?



А чтобы это выяснить, давайте попробуем посмотреть на пути подземных вод грунтовым взглядом.



Подземные воды, избегая частицы почвы, проходят через пустоты, да?



Получается, что в вадозном слое перемещению воды мешает также воздух в пустотах?



Так и есть. А во фреатическом слое водопроницаемость максимальна, так как максимальна площадь проникновения.

Коэффициент фильтрации k (м/с) – это константа, показывающая степень водопроницаемости для конкретного типа почвы. Его примерные значения для разных типов почвы представлены в таблице ниже.

Коэффициент фильтрации k (м/с)	10^{-11}	10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^0
	Практически водонепроницаемые		Очень низкий		Низкий		Средний		Высокий			
Связные грунты			Мелкий песок, ил, почвы, представляющие смесь песка, ила и связных грунтов				Песок с гравием			Чистый гравий		



Ничего себе разброс значений, от 10 в степени 0 для гравия до 10 в степени -11 для глины?!



Да! И в зависимости от значений коэффициента фильтрации k и разброс значений скорости фильтрации v ($= k \times i$) будет очень большим.

Коэффициент фильтрации k прямо пропорционален плотности воды γ_w и обратно пропорционален коэффициенту вязкости μ ⁷. Также он зависит от плотности почвы, коэффициента пустотности, водонасыщенности, а ещё от формы и расположения пустот.

⁷ Коэффициент, показывающий степень вязкости, меняющуюся в зависимости от температуры воды.



Так как же рассчитывают этот коэффициент фильтрации?



Коэффициент фильтрации k получают прямыми измерениями во время лабораторных и полевых тестов на водопроницаемость (см. стр. 100).



Но раз известны значения коэффициентов фильтрации для разных типов почв, то, значит, можно определить этот коэффициент, зная диаметр почвенных частиц?



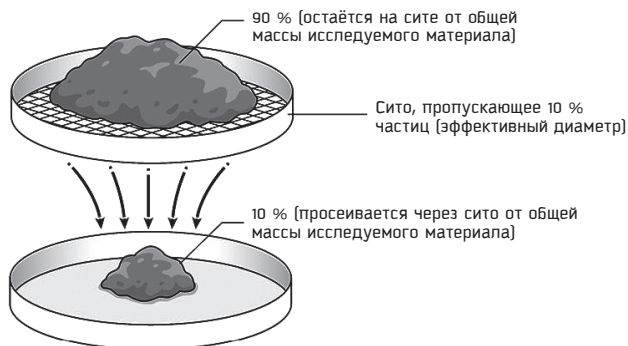
Верно! Формулу взаимосвязи коэффициента фильтрации k и эффективного диаметра D_{10} ⁸ вывел Хазен (Hazen):

Коэффициент фильтрации $k = C \times D_{10}^2 \times 10^{-2}$ (м/с) (формула Хазена).



Здесь C – это коэффициент пропорциональности Хазена, выражающий уплотнённость песка и диаметр его частиц. Для рыхлого песка он равен 120, для хорошо уплотнённого – примерно 70, но часто его значение принимают равным 100.

Что касается эффективного диаметра D_{10} , то его значение соответствует размеру ячеек сита, через которое просеивается 10 % массовой доли частиц (см. график кумулятивных кривых гранулометрического состава на стр. 69). При таком диаметре частиц можно говорить об эффективной скорости фильтрации воды, поэтому это значение и называется эффективным диаметром D_{10} .



Массовая доля проходящих частиц и эффективный диаметр D_{10}

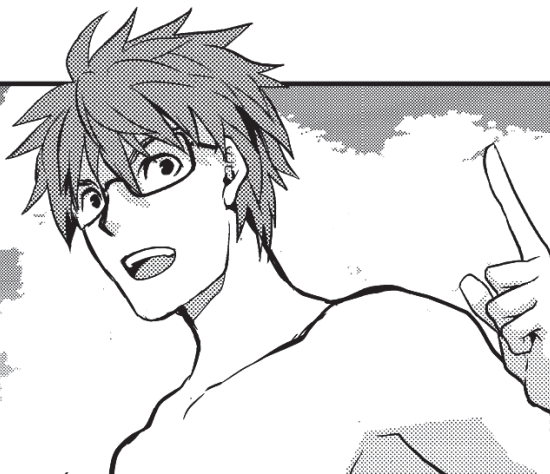


А! Получается, чем больше эффективный диаметр, тем больше пустоты, по которым текут подземные воды, а значит, тем легче воде просачиваться, так?

⁸ Если сито пропускает 10 % от массы земли, то величина его ячеек соответствует эффективному диаметру D_{10} (см. гл. 2).

3.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ВОДЫ

А ТЕПЕРЬ ДАВАЙТЕ РАЗБЕРЁМ, КАКИМ БУДЕТ РАСХОД ВОДЫ Q^9 ($\text{см}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{д}$) ПРИ СКОРОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ v , ЕСЛИ ПЛОЩАДЬ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ A .



НУ... РАЗ ЭТО КОЛИЧЕСТВО ПОДЗЕМНОЙ ВОДЫ, ПРОХОДЯЩЕЙ ЧЕРЕЗ ПОПЕРЕЧНОЕ СЕЧЕНИЕ ЗЕМЛИ В ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ, ТО...

РАСХОД ВОДЫ Q = ПЛОЩАДЬ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ A $\times$ СКОРОСТЬ ФИЛЬТРАЦИИ v , ТАК?

ОТЛИЧНО!

А ТЕПЕРЬ, ИСПОЛЬЗУЯ ЗАКОН ДАРСИ ($v = k \times i$), МОЖНО ВЫВЕСТИ СЛЕДУЮЩУЮ ФОРМУЛУ:

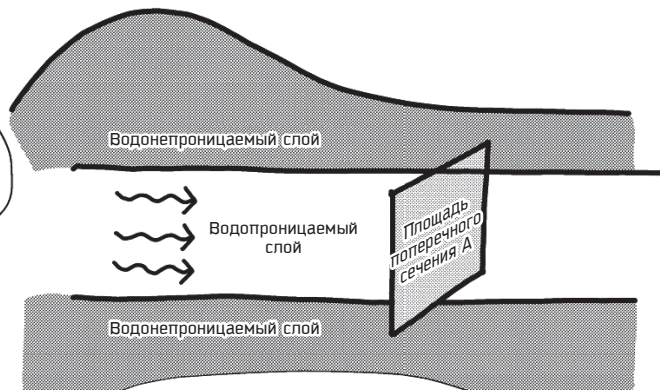
$$\text{Расход воды } Q = A \times v = A \times k \times i = A \times k \times (h/L) \text{ (см}^3/\text{с, м}^3/\text{в)}$$

РАСХОД ВОДЫ Q ЗАВИСИТ ОТ СКОРОСТИ v , СЛЕДОВАТЕЛЬНО, ОН ЗАВИСИТ И ОТ КОЭФФИЦИЕНТА ФИЛЬТРАЦИИ k , И ОТ ГРАДИЕНТА НАПОРА i ...

А КАК ОПРЕДЕЛЯЮТ ПЛОЩАДЬ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ A ?

⁹ Объём воды, проходящей через заданное поперечное сечение в единицу времени. Иногда называют просто количеством воды.

ЕСЛИ ВОДОПРОНИЦАЕМЫЙ СЛОЙ ЗАЖАТ МЕЖДУ ВОДОНЕПРОНИЦАЕМЫМИ СЛОЯМИ, ТО ПЛОЩАДЬ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА А БУДЕТ ПРАКТИЧЕСКИ ПОСТОЯННОЙ, И ЕЁ МОЖНО ИЗМЕРИТЬ НЕПОСРЕДСТВЕННО...

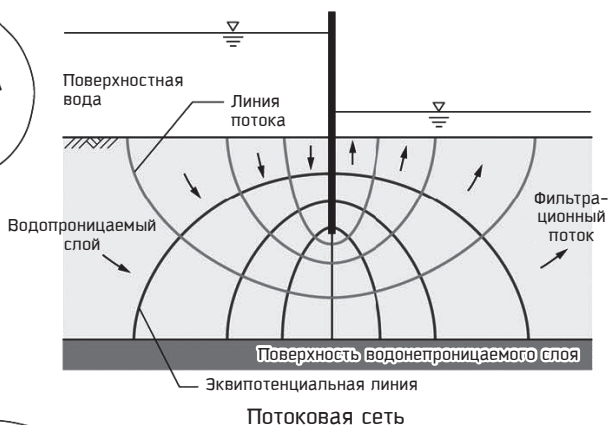


ОДНАКО ЕСЛИ В ЗЕМЛЕ НАХОДЯТСЯ КАКИЕ-ЛИБО КОНСТРУКЦИИ ИЛИ БЛОКИРУЮЩАЯ ВОДУ СТЕНА, ТО ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ БУДУТ УЛТИ В ОБОХА ПРЕГРАДЫ, И ТОГДА ПЛОЩАДЬ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА А БУДЕТ МЕНЯТЬСЯ. В ТАКОМ СЛУЧАЕ НЕЛЬЗЯ ПРОСТО ТАК ВОСПОЛЬЗОВАТЬСЯ ФОРМУЛОЙ РАСХОДА ВОДЫ Q .

ТОГДА ИСПОЛЬЗУЕТСЯ МЕТОД ПОТОКОВОЙ СЕТИ (FLOWNET).

ПОТОКОВОЙ СЕТИ?

МЕТОД ПОТОКОВОЙ СЕТИ ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ ГРАФИК, ГДЕ ИЗОБРАЖЕНЫ ЛИНИИ ПОТОКА, ПОКАЗЫВАЮЩИЕ ПУТЬ ВОДЫ. НА ЭТИХ ЛИНИЯХ ОТМЕЧЕНЫ ТОЧКИ С ОДИНАКОВЫМ ПОЛНЫМ НАПОРОМ И ПРОВЕДЕННЫ СОЕДИНЯЮЩИЕ ЭТИ ТОЧКИ ЛИНИИ, НАЗЫВАЕМЫЕ **ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫМИ**. ТАКОЙ ГРАФИК НАПОМИНАЕТ СЕТЬ.



ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ЛИНИИ?..

3.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ВОДЫ



Чтобы лучше представить эквипотенциальные линии, подумайте об изолиниях. Как относительно изолиний потечёт вода с вершины горы к её подножию?



С высокого места к более низкому... потечёт, не обтекая изолинии, а пересекая их.



Верно. Дождь, пролившийся на вершине горы, будет пересекаться с изолиниями под прямым углом. Другими словами, потоки воды будут течь по кратчайшему пути между двумя перепадами высот.



И на потоковой сети эквипотенциальные линии будут вести себя так же относительно линий потока.

Есть три способа построения потоковой сети: методом решения математических уравнений в ходе наблюдения за модельным экспериментом и методом рисования от руки.



Если можно, то без математики, пожалуйста...

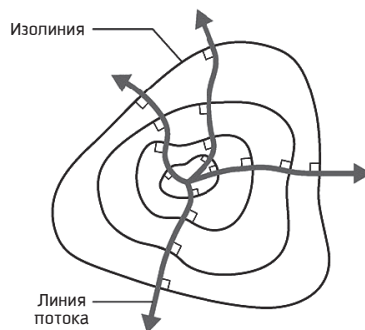


Математический способ предполагает построение уравнений и их анализ, при соответствующих граничных условиях. Этот способ не очень практичный. А модельный эксперимент является довольно масштабным и затратным.



Поэтому широко используется графическое построение методом рисования от руки, которое опирается на прошлые результаты, в ходе которых выявляются особенности потоковой сети (см. стр. 104).

В любом случае при построении потоковой сети и её использовании следует учитывать следующие отличительные черты.



Потоки воды, перпендикулярно пересекающие изолинии

Отличительные черты потоковой сети

- Граница раздела между поверхностной водой и опорным слоем представляет собой эквипотенциальную линию, и группа линий потока ей перпендикулярна.
- Граница раздела между поверхностью водонепроницаемого слоя и опорного слоя представляет собой линию потока, и группа эквипотенциальных линий ей перпендикулярна.
- Уровень грунтовых вод в опорном слое и почвенных структурах представляет собой линию потока, и полный напор равен напору положения.
- В каждой ячейке сети, делящей одну полосу между двумя линиями потока (трубка потока), количество потока одинаково.
- В каждой трубке потока количество потока одинаково.
- В каждой ячейке сети, образованной разделением трубки потока эквипотенциальными линиями, потерянный напор одинаковый.



Теперь, когда мы представили потоковую сеть, как думаете, если пространство между эквипотенциальными линиями и длина потока L большие, какими будут градиент напора i ($= h/L$) и скорость фильтрации v ($= ki$)?



Эээ... если длина потока L большая, то градиент напора i будет маленьким, а тогда... скорость фильтрации v будет низкой?



О, эквипотенциальные линии похожи на линии на карте атмосферного давления!

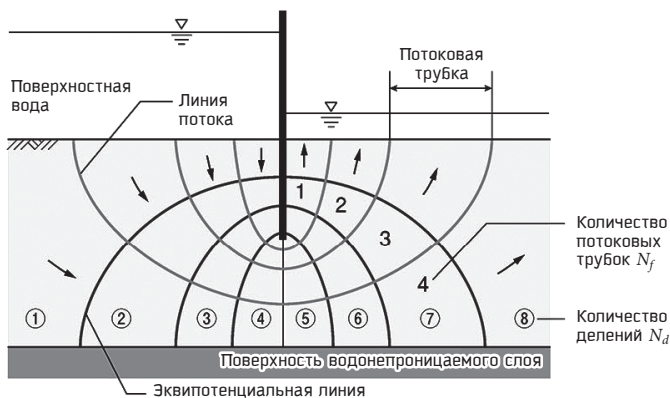


Верно! Если смотреть с точки зрения энергии, то изолинии показывают потенциальную энергию, а на карте распределения атмосферного давления изолинии соединяют точки с одинаковой энергией давления. А что касается эквипотенциальных линий, то можно сказать, что это изолинии, которые объединяют и потенциал, и давление. Поэтому на потоковой сети чем меньше ячейка сети, тем выше скорость фильтрации v , а чем больше ячейка, тем скорость фильтрации v ниже. Так можно примерно оценить состояние фильтрационного потока, взглянув на потоковую сеть.



Итак, основываясь на отличительных чертах потоковой сети, попробуем найти расход фильтрационного потока Q для случая, когда площадь поперечного сечения опорного грунта A не постоянна.

Прежде всего на графике потоковой сети обозначим количество полос между линиями потока (количество потоковых трубок) за N_f , а количество делений потоковых трубок эквипотенциальными линиями обозначим как N_d . В нашем случае $N_f = 4$, $N_d = 8$. N_f и N_d называются факторами формы и считаются непосредственно из графика потоковой сети.



Считанные N_f и N_d из графика потоковой сети



Продолжим. Предположим, что каждая ячейка сети имеет форму квадрата. Тогда рассмотрим градиент напора i ($i = h/L$) и расход воды $Q = A \times k \times (h/L)$ для одной ячейки, опираясь на характеристики потоковой сети. При прохождении через каждую ячейку напор воды теряется. Так как при общей напорной разнице h поток проходит слева направо через N_d делений, то потерянный напор на одну ячейку будет равен h/N_d .

Далее, если сторона ячейки равна a , то при длине потока L градиент напора i для каждой ячейки будет равен $i = (h/N_d)/a$. А расход воды одной ячейки q на единицу ширины (глубины), то есть при площади поперечного сечения $A = a \times 1$, будет равен:

$$q = Aki = Ak \frac{h}{L} = k \frac{h}{N_d} \times \frac{1}{a} \times a \times 1 = k \frac{h}{N_d}.$$

Более того, так как расход воды q – это количество потока в одной потоковой трубке, то общий расход воды Q будет равен расходу воды в одной потоковой трубке q , умноженному на количество потоковых трубок N_f :

$$Q = q \times N_f = kh \frac{N_f}{N_d}.$$



Следовательно, для однородного грунта, измерив коэффициент фильтрации k , разницу напоров h и узнав из потоковой сети значения N_f и N_d , можно подставить все эти данные в формулу и рассчитать расход воды Q (см. стр. 108).



Да, потоковая сеть – удобная штука. Но насколько она точная?



Действительно, методы графического анализа вроде метода потоковой сети эффективны для получения общей визуальной картины, однако при этом неизбежны ошибки построения графиков и интерпретации данных по ним. Поэтому, пользуясь подобными методами, необходимо учитывать возможность таких ошибок.



Для начала надо самим хотя бы попробовать нарисовать такой график!



Точно! Даже имея небольшой опыт и сложные граничные условия, можно нарисовать упрощенную потоковую сеть. И тогда даже при таком приближённом методе можно получить достаточно точный расчёт.

...НА ЭТОМ СЕГОДНЯШНЕЕ
ЗАНЯТИЕ ОКОНЧЕНО!
НУ, ДАВАЙТЕ ЖЕ ПЛАВАТЬ!

хлоп



...Э...
ЧТО?

Эй! МЕНЯ ПОЛОЖАЙТЕ!



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Исследование почвы на водопроницаемость

1. Цель и описание исследования

В ходе исследования почвы на водопроницаемость количественно оценивают, насколько легко перемещается вода в пустотах почвы (свободная вода). Для этого либо берут образец почвы в лабораторию и проводят там тест на водопроницаемость, либо проводят оценку на месте. В результате любого из тестов находят коэффициент фильтрации k (м/с), представленный в формуле $v = k \times i$. Водопроницаемость почвы зависит от типа почвы, её плотности, водонасыщенности, температуры воды и т. д., поэтому подходящий способ исследования выбирают, исходя из целей и условий на месте.

2. Оборудование для исследования и процедура

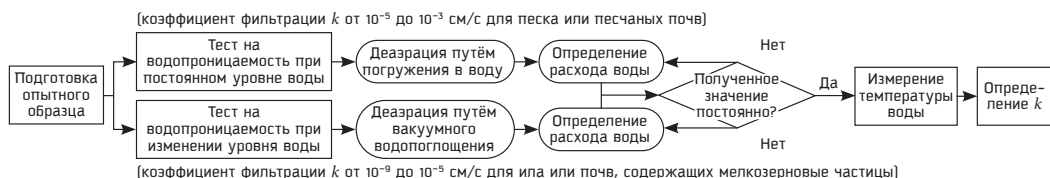
1. Лабораторный тест на водопроницаемость (стандарты: JIS A 1218, JGS 0311)

**Водопроницаемость почвы и подходящие способы исследования
(Геотехническое общество Японии)**

Коэффициент фильтрации, м/с	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁰
Водопроницаемость	Практически водонепроницаемая		Очень низкая			Низкая		Средняя		Высокая		
Соответствующий тип почвы	Связные грунты		Мелкий песок, ил, почвы, представляю- щие смесь песка, ила и связных грунтов				Песок с гравием				Чистый гравий	
Способ непосредственного оценивания коэффициента фильтрации	Специальный тест на водопроницае- мость при измене- нии уровня воды		Тест на водопроницаемость при изменении уровня воды				Тест на водопроницаемость при постоянном уровне воды		Специальный тест на водопроницаемость при изменении уровня воды			
Способ непрямого вычисления коэффициента фильтрации	Вычисление по результатам теста на уплотнение			Нет			Вычисление на основе диаметра частиц и коэффициента пустотности для чистого песка или гравия					

Как показано в таблице выше, при лабораторных испытаниях на водопроницаемость для почв с высокой проницаемостью используют тест на водопроницаемость при постоянном уровне воды, а для почв с низкой проницаемостью – тест при изменении уровня воды. Для проведения тестов берут уплотнённые ненарушенные образцы почвы и, следуя приведённой ниже схеме, определяют коэффициент фильтрации k в водонасыщенном состоянии. Коэффициент фильтрации обычно обозначается с индексом, означающим температуру воды. Так, для температуры воды 15°C коэффициент фильтрации будет обозначаться как k_{15} . Значение коэффициента фильтрации k_T при температуре воды T ($^\circ\text{C}$) корректируется в зависимости от температуры и вязкости воды. Найдём коэффициент фильтрации k_{15} .

Лабораторный тест на водопроницаемость

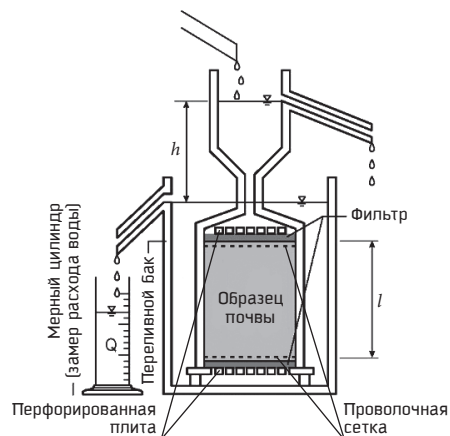


* Перед измерением важно увеличить водонасыщенность образца!

Тест на водопроницаемость при постоянном уровне воды: поддерживая постоянную разницу уровней воды между верхним и нижним переливными баками, измеряют расход воды Q (см³), прошедшей через образец почвы длиной l (см) за время t (с). Затем по приведённой ниже формуле вычисляют коэффициент фильтрации k :

$$k = \frac{Q \cdot l}{A \cdot t \cdot h} \times \frac{1}{100} \text{ (м/с)}.$$

Здесь A – площадь поперечного сечения образца (см²).

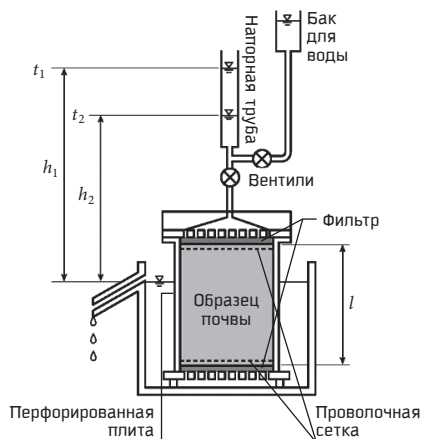


Тест на водопроницаемость при постоянном уровне воды

Тест на водопроницаемость при изменении уровня воды: измеряют изменение перепада уровней воды с h_1 (см) в момент времени t_1 (с) до h_2 (см) в момент времени t_2 (с). Затем по приведённой ниже формуле вычисляют коэффициент фильтрации k :

$$k = \frac{2,303 \cdot a \cdot l}{A \cdot (t_2 - t_1)} \times \log_{10} \frac{h_1}{h_2} \times \frac{1}{100} \text{ (м/с)}.$$

Здесь a – площадь поперечного сечения напорной трубы (см²).



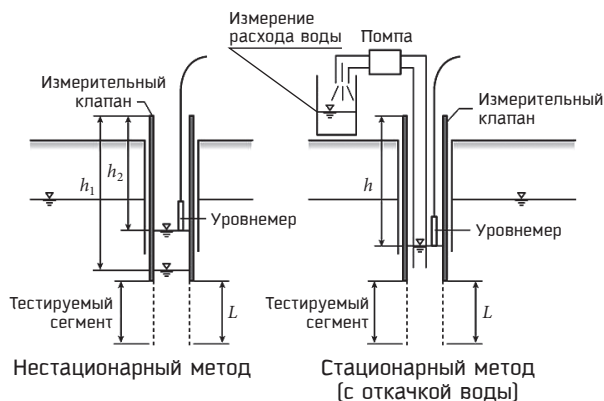
Тест на водопроницаемость при изменении уровня воды

2. Полевое исследование водопроницаемости почвы (стандарт: JGS 1314)

При полевых исследованиях водопроницаемости почвы непосредственно на месте измеряют коэффициент фильтрации k , используя буровую скважину или колодец. В зависимости от степени водопроницаемости почвы используют либо нестационарный, либо стационарный метод.

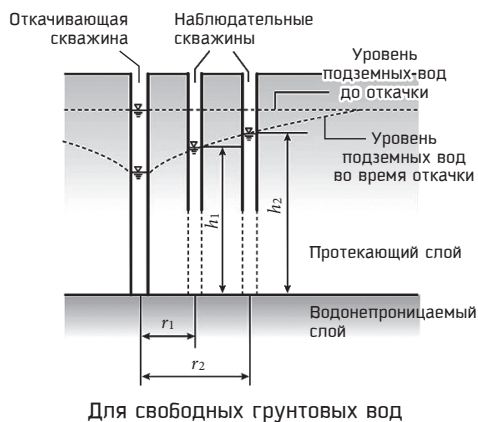
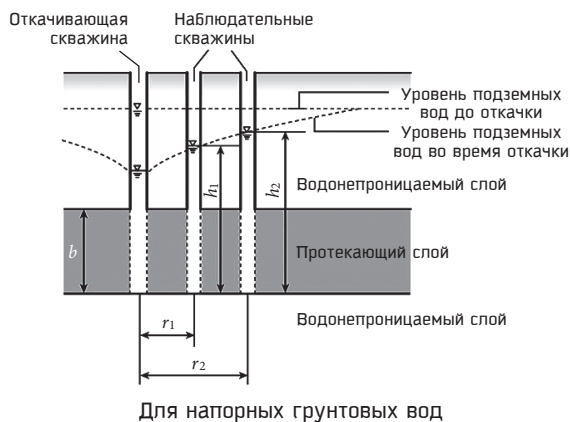
Нестационарный метод: для почв с коэффициентом фильтрации меньше 10^{-4} м/с временно понижают или повышают уровень воды в измерительной трубке, а затем, измеряя изменение уровня воды с течением времени до возвращения в равновесное состояние, определяют коэффициент фильтрации k .

Стационарный метод: для песчано-гравийных почв с коэффициентом фильтрации больше 10^{-5} м/с измеряют расход воды, при котором уровень воды в измерительной трубке остаётся постоянным при откачке или впрыскивании воды, после чего определяют коэффициент фильтрации k .



(Справка) Метод откачки (стандарт: JGS 1315)

Метод откачки представляет собой исследование водопроницаемости почвы с использованием одной откачивающей скважины и нескольких наблюдательных. По сравнению с методом полевого исследования водопроницаемости с одной скважиной данный метод позволяет получить более широкий диапазон гидрогеологических постоянных (коэффициента водопроводимости T и коэффициента водоотдачи S). Когда речь идёт о средней водопроницаемости водоносного горизонта естественного грунта, то коэффициент фильтрации k рассчитывается по приведённой ниже формуле.



Для напорных грунтовых вод:

$$k = \frac{2,303 \cdot q}{2\pi b \cdot (h_2 - h_1)} \times \log_{10} \frac{r_2}{r_1} \times \frac{1}{100} \text{ (м/с)}.$$

Здесь: b – толщина напорного водоносного слоя (см);

q – расход откачиваемой воды в единицу времени (см³/с);

r_1, r_2 – расстояния от откачивающей скважины до наблюдательных скважин (см);

h_1, h_2 – уровень подземных вод в наблюдательных скважинах, находящихся на расстояниях r_1, r_2 от откачивающей скважины (см).

Для свободных грунтовых вод:

$$k = \frac{2,303 \cdot q}{\pi \cdot (h_2^2 - h_1^2)} \times \log_{10} \frac{r_2}{r_1} \times \frac{1}{100} \text{ (м/с)}.$$

3. Результаты исследования

Знание коэффициента фильтрации k необходимо для производства ряда строительных работ. Он используется:

- для расчёта расхода откачиваемой воды из скважины;
- при оценке протечек насыпных дамб, речных и прибрежных насыпей и прочих грунтовых укреплений;
- для расчёта количества родниковой воды при выемке грунта ниже уровня подземных вод (для выявления необходимости водозащитных барьеров);
- при исследовании влияния фильтрационного потока на устойчивость склонов;
- для расчёта количества откачиваемой воды при понижении уровня подземных вод.

Результаты лабораторных исследований водопроницаемости часто используются для определения физических свойств почвы как материала для засыпки или для земляных укреплений, а также для оценки локальной водопроницаемости грунта. Когда же требуется решить вопросы водопроницаемости на месте, например если надо найти коэффициент фильтрации k и расход фильтрационной воды Q , то часто используют результаты полевых исследований водопроницаемости.

Измерение порового давления воды

Поровое давление воды обычно измеряется с помощью манометра. Манометры, используемые для измерения порового давления, бывают закрытого и открытого типов. Пример простого устройства с манометром для измерения порового давления воды (закрытого типа) схематически представлен на следующей странице.

Процедура измерения порового давления воды с помощью манометра (закрытого типа)

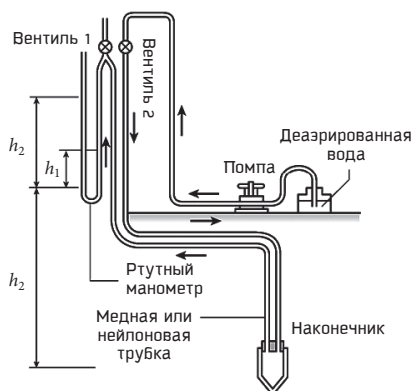
- ① Открыть вентили 1 и 2, посредством помпы выкачать деаэрированную воду в трубу. Воздух в трубе вместе с водой выпустить через отверстие деаэрации.
- ② Закрыть вентили 1 и 2, удостовериться, что в манометре и в трубе отсутствует воздух. Эту операцию нужно проводить быстро, чтобы не нарушить водный баланс в почве.
- ③ Измерить разницу уровней h_1, h_2 относительно нулевого значения манометра. Используя глубину наконечника H от нулевого значения, по следующим формулам найти поровое давление воды u и избыточное поровое давление воды Δu :

$$u = 13,6 \times (h_2 - h_1) + h_1 + H \text{ (г/см}^2\text{)};$$

$$\Delta u = u - (D - z) \text{ (г/см}^2\text{)}.$$

Здесь: D – глубина уровня подземных вод (см);

z – высота наконечника (см).

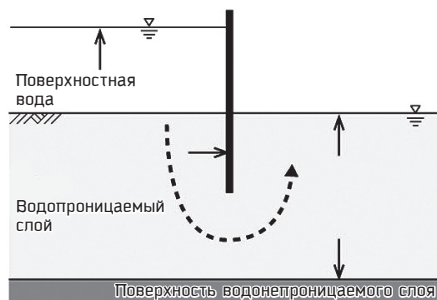


Измерение порового давления воды

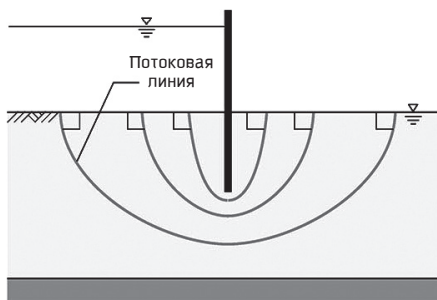
Способ рисования потоковой сети (графическое представление)

Чтобы нарисовать потоковую сеть, повторяйте следующие действия, каждый раз всё больше приближая ячейки по форме к квадрату.

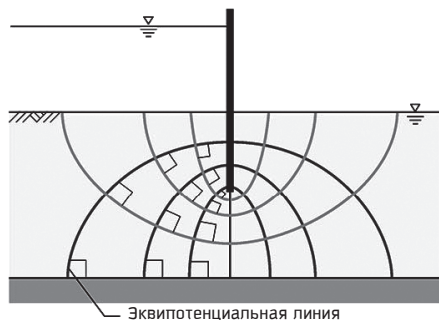
- Посмотрите на целевую область целиком и определите граничные условия, такие как поверхность земли, граничная поверхность водонепроницаемого слоя, поверхность свободной воды и т. д.



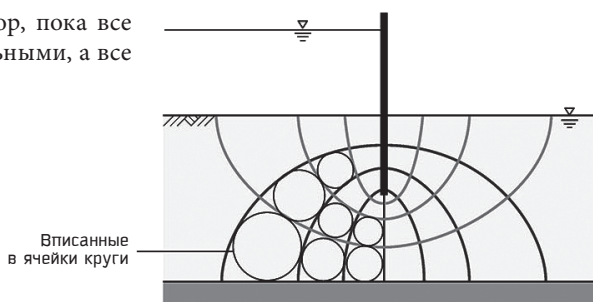
- Нарисуйте образец потоковой линии, идущей в обход преграды перпендикулярно поверхности проникновения фильтрационного потока.



- ③ Нарисуйте эквипотенциальные линии, пересекающие под прямым углом потоковые линии, чтобы образуящие ячейки четырёхугольники были равными по длине и ширине.



- ④ Корректируйте чертёж до тех пор, пока все пересечения не будут ортогональными, а все ячейки не станут квадратными.

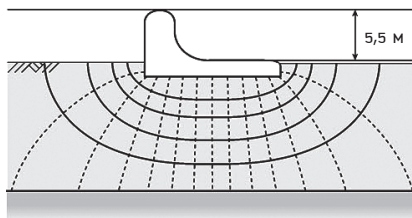


Давление и скорость фильтрационных потоков меняются под воздействием различных пограничных поверхностей, поэтому расстояние между эквипотенциальными линиями не постоянно. При рисовании потоковой сети довольно трудно представить ячейки в виде квадратов, и в этом может помочь представление вписываемых в ячейки кругов. Кроме потоковой сети, к графическим методам решения в области геотехники относятся, например, анализ устойчивости склонов и крути Моры.

Вычисление расхода воды по потоковой сети (графический метод)

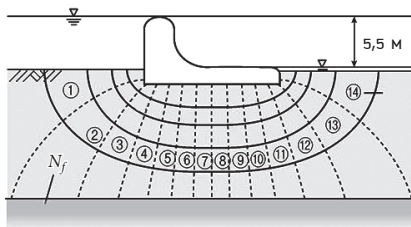
Задача

На водопроницаемом грунте построена бетонная дамба, относительно которой на графике изображена потоковая сеть. Представленный грунт однороден, с коэффициентом фильтрации $k = 2,0 \cdot 10^{-5}$ м/с, разницей напоров $h = 5,5$ м, глубиной блока 1 м. Чему равен расход воды Q (м³/д·м) за 1 день?



Рассуждение

Количество участков между потоковыми линиями равно N_f , а количество участков между эквипотенциальными линиями равно N_d . Посчитайте их значения по потоковой сети, обращая внимание на направление счёта и граничные условия. Есть много способов расчёта расхода фильтрационной воды в течение 1 дня, в данном случае, зная коэффициент фильтрации k и разницу напоров h , просто подставим их в формулу расхода воды Q .



Решение

На основании потоковой сети $N_f = 5$, $N_d = 14$.

Из условий задачи: $k = 2,0 \times 10^{-5} \text{ м/с} = 1,728 \text{ м/день}$, $h = 5,5 \text{ м}$.

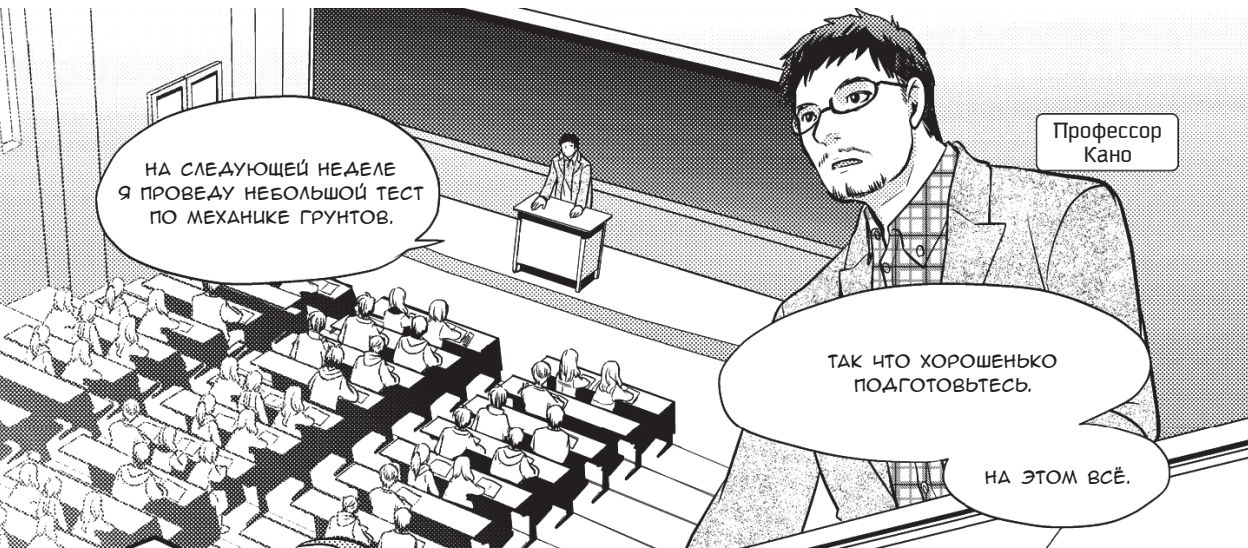
Подставив эти значения в формулу расхода воды Q , получаем:

$$Q = k \cdot h \cdot \frac{N_f}{N_d} = 1,728 \times 5,5 \times \frac{5}{14} = 3,39 \text{ м}^3/\text{день} \cdot \text{м}.$$

ГЛАВА 4

ВНУТРЕННЯЯ СИЛА ГРУНТА?





Профессор
Кано

НА СЛЕДУЮЩЕЙ НЕДЕЛЕ
Я ПРОВЕДУ НЕБОЛЬШОЙ ТЕСТ
ПО МЕХАНИКЕ ГРУНТОВ.

ТАК ЧТО ХОРОШЕНЬКО
ПОДГОТОВЬТЕСЬ.

НА ЭТОМ ВСЁ.



ЧЁРТ!

Кида Нацуми

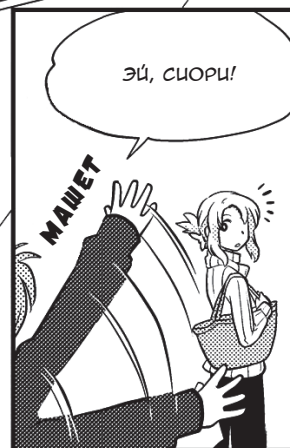
ЧЁРТ!
ЧЁРТ!!!



Я МЕХАНИКУ
ГРУНТОВ ВООБЩЕ
НЕ ПОНИМАЮ!
А ТЫ, ХАРУ?

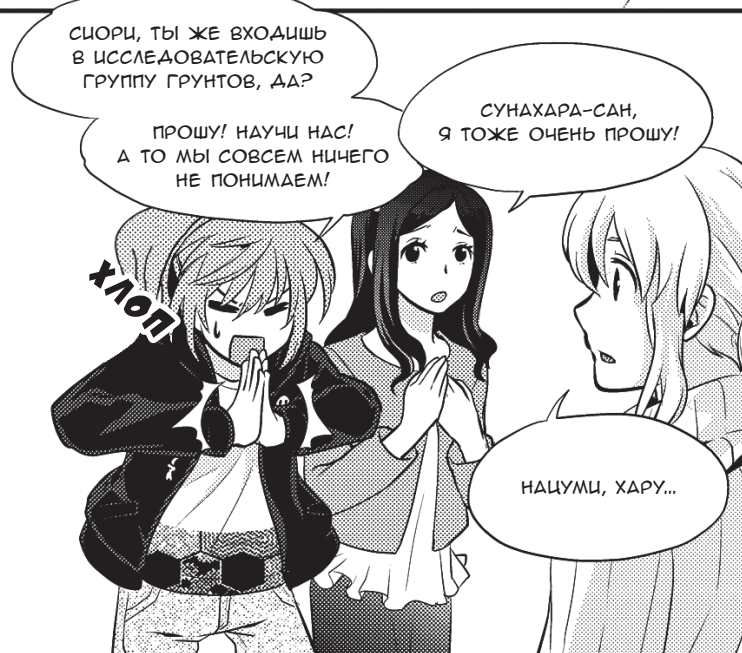
Мидзутани
Хару

Я ТОЖЕ.
ЧТО ЖЕ ДЕЛАТЬ?



Эй, сюрри!

МАШЕТ



СЮРРИ, ТЫ ЖЕ ВХОДИШЬ
В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ
ГРУППУ ГРУНТОВ, ДА?

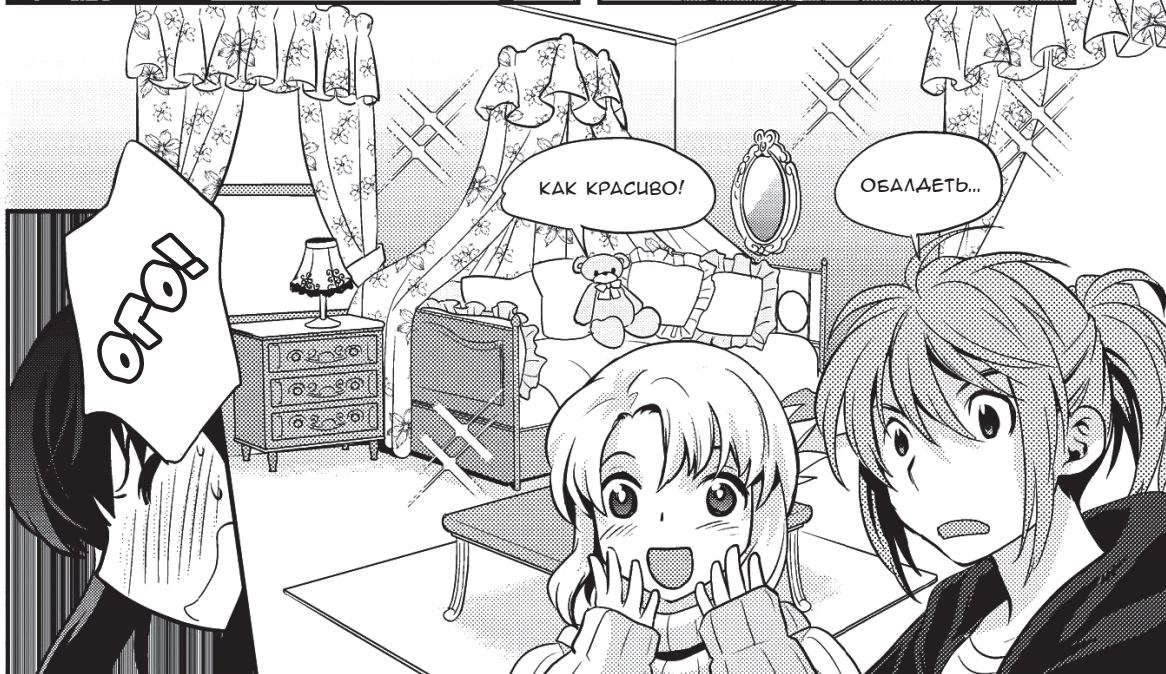
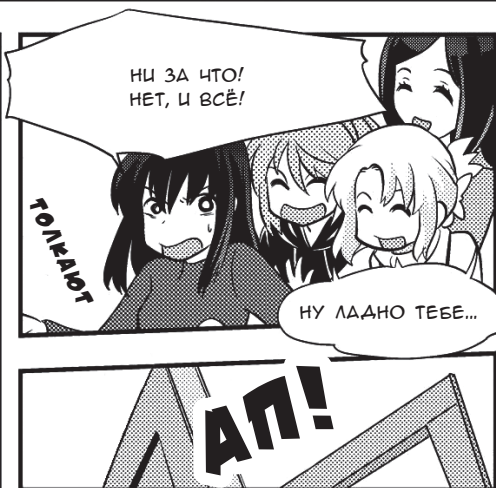
ПРОШУ! НАУЧИ НАС!
А ТО МЫ СОВСЕМ НИЧЕГО
НЕ ПОНИМАЕМ!

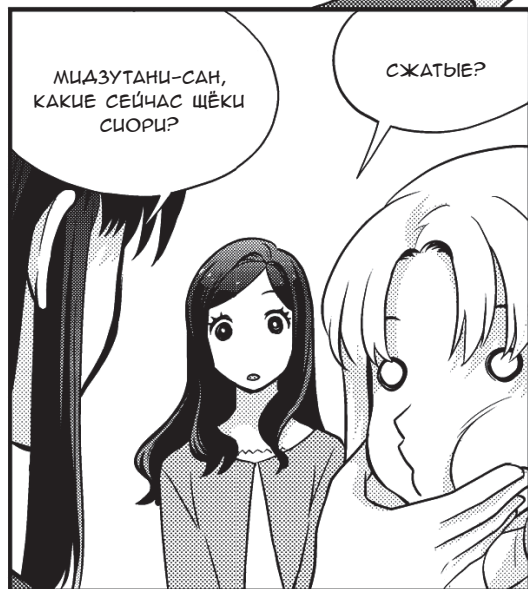
СУНАХАРА-САН,
Я ТОЖЕ ОЧЕНЬ ПРОШУ!

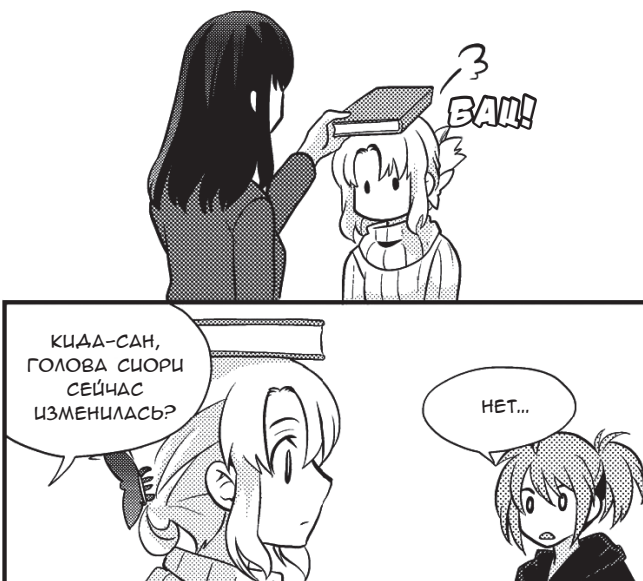
НАЦУМИ, ХАРУ...



ХОРОШО!
НЕ ВОЛНУЙТЕСЬ,
Я ПОМОГУ!







4.1. СКРЫТЫЕ В ЗЕМЛЕ ОТВЕТЫ



Если обращать внимание не только на поверхностные изменения объекта, но и на механическое напряжение внутри него, то можно понять, что на самом деле происходит с объектом.



Кстати говоря, механическое напряжение бывает двух видов: состояние напряжения под собственным весом и напряжение в результате дополнительной нагрузки. Это легко понять на примере ножек стула.



Когда пустой стул стоит сам по себе – он находится под собственным весом, а когда на него садится человек – это будет дополнительная нагрузка, да?



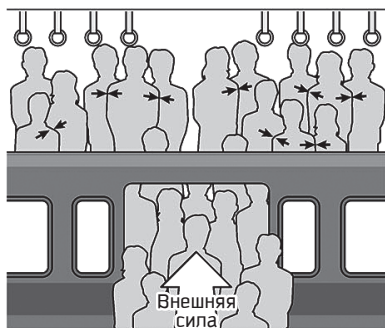
То же самое с грунтом, да? В почве есть механическое напряжение из-за собственного веса, а если на ней что-то построено, то почва получает дополнительное напряжение из-за нагрузки, верно?



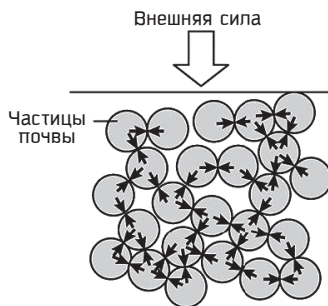
Давайте представим, как сжимается грунт под воздействием внешних сил! Грунтовый слой состоит из почвенных частиц и пустот между частицами, заполненных водой и воздухом. Сейчас рассмотрим только, что происходит с почвенными частицами. Представьте, например, что в полную электричку заходят ещё люди, как себя будут чувствовать пассажиры внутри?



Ну, все будут толкать друг друга, и станет очень тесно...



Переполненная электричка



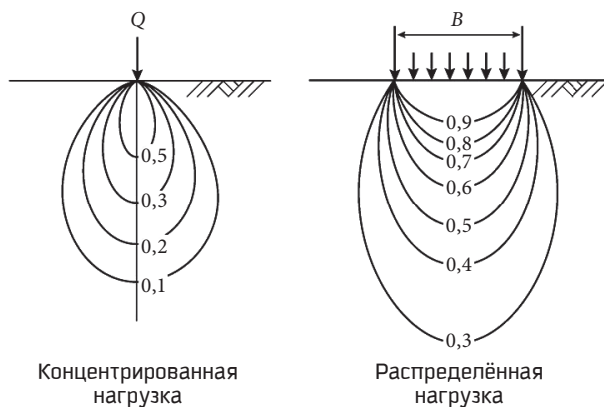
Внутри грунта



Ага, то же самое происходит и в грунте. Под воздействием внешней силы частицы грунта будут толкать друг друга, передавая энергию, и, не останавливаясь на месте, будут менять положение и направление относительно друг друга.



Посмотрим теперь на эту ситуацию шире. Если соединить точки с одинаковым механическим напряжением (изострессы), возникающим в грунте под воздействием нагрузки, то получится примерно такая картинка.



На репчатый лук похоже.



В переполненной электричке тоже чем дальше от двери отойдёшь, тем меньше на тебя напирают.



Так и есть. Так как рисунок изостресс напоминает луковицу растений, то его иногда так и называют – «луковица напряжений».



А теперь рассмотрим водонасыщенный грунт, у которого пустоты заполнены водой. Если снова взять для примера переполненную электричку, то представьте, что пространство между людьми заполнено багажом.



Если люди уплотняются, когда заходят новые пассажиры, то и багаж будет сжиматься, да?



Тогда и в водонасыщенном грунте при воздействии внешней силы сжиматься будут не только почвенные частицы, но и вода в пустотах, да?



Конечно. Вы обе молодцы!



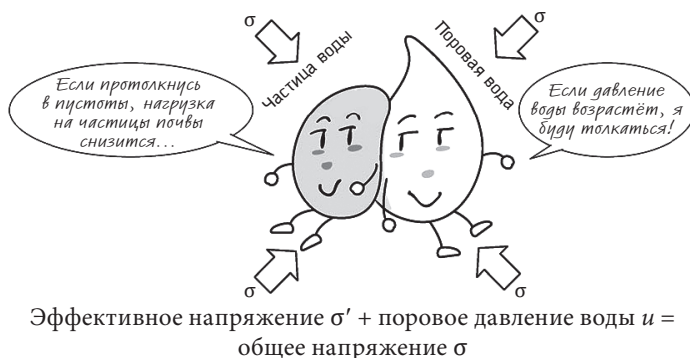
Другими словами, так как в водонасыщенном грунте механическое напряжение возникает и в поровой воде, то общее механическое напряжение грунта представляет собой сумму механического напряжения почвенных частиц и давления поровой воды.



Таким образом, различают напряжение, возникающее в почвенных частицах (в скелете грунта), которое называется эффективным напряжением σ' , напряжение в поровой воде, которое называется поровым давлением воды u , и суммарное напряжение, которое называется общим напряжением σ .



Значит, общее напряжение $\sigma = \text{эффективное напряжение } \sigma' + \text{поровое давление воды } u$.



Кстати, а почему эффективное напряжение так называется?



Хороший вопрос! Дело в том, что такие механические свойства почвы, как плотность (см. гл. 5) или сопротивление сдвигу (см. стр. 189), зависят от эффективного σ' , а не от общего напряжения σ . То есть смысл названия «эффективное напряжение» в том, что это напряжение эффективно влияет на механические свойства грунта.



Другими словами, это та «тяжесть», которую испытывают на себе частицы почвы.



Кстати говоря, непосредственно измерить эффективное напряжение σ' невозможно, но можно вычислить общее напряжение σ и непосредственно измерить давление поровой воды u . И тут нам пригодится формула, которую уже озвучила Нацуми.



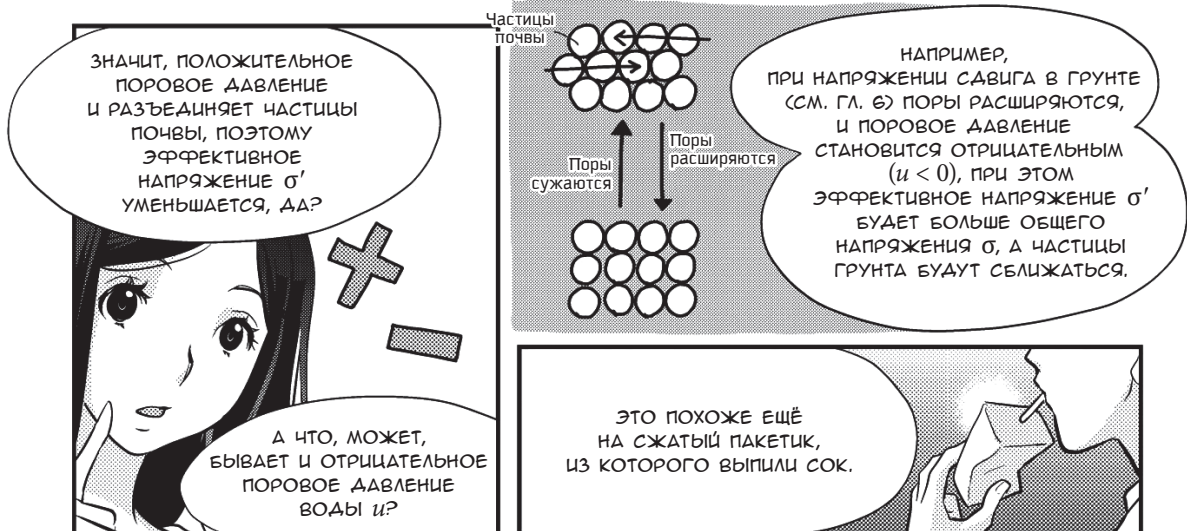
Общее напряжение $\sigma = \text{эффективное напряжение } \sigma' + \text{поровое давление воды } u$.



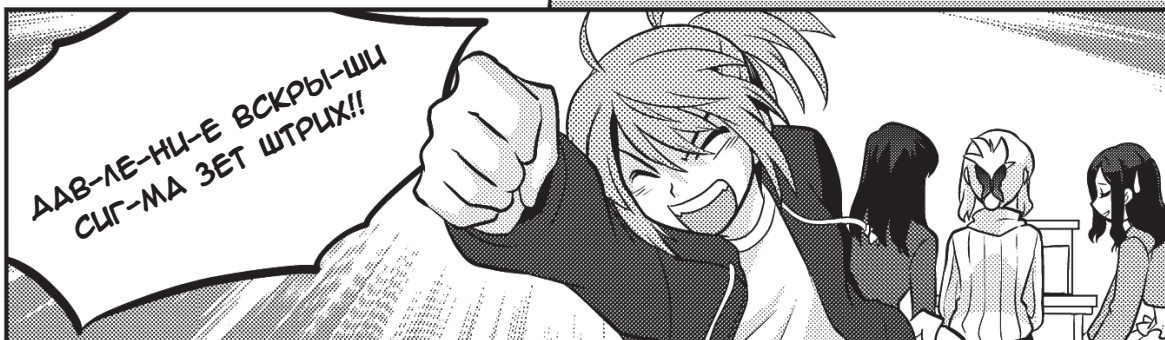
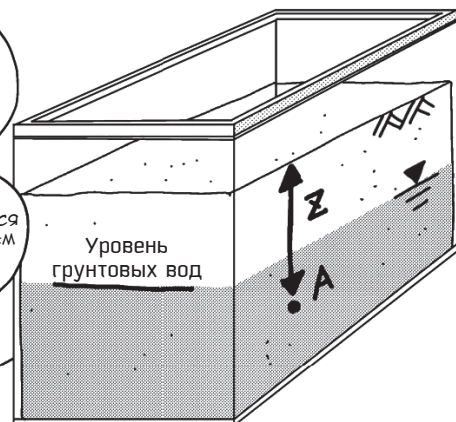
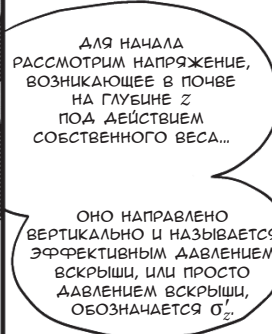
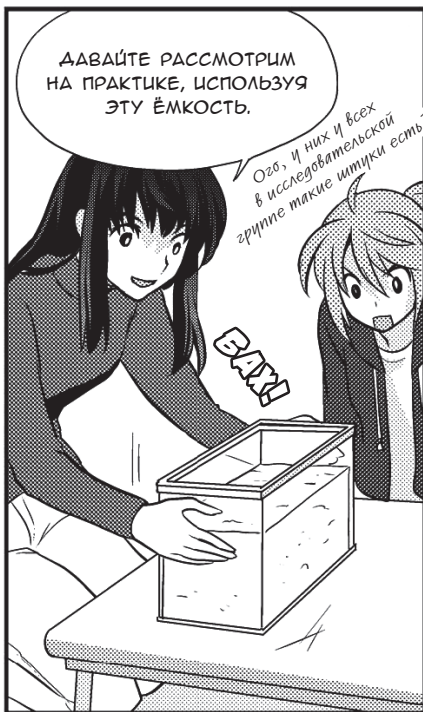
Ага. Преобразуя эту формулу, можно вычислить эффективное напряжение как эффективное напряжение $\sigma' = \text{общее напряжение } \sigma - \text{поровое давление воды } u$ (формула эффективного напряжения Терцаги).



¹ Сила, возникающая под тяжестью самой воды в состоянии покоя, действующая на единицу площади. Является произведением удельного веса воды γ_w на глубину.



4.2. НАПРЯЖЕНИЕ ГРУНТА ПОД СОБСТВЕННЫМ ВЕСОМ



КСТАТИ, В КАЧЕСТВЕ ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ ДАВЛЕНИЯ ВСКРЫШИ σ'_z ОБЫЧНО ИСПОЛЗУЮТСЯ КПа (СИЛИ КН/М²)².

ПАСКАЛЯМИ ЕЩЁ ТАЙФУНЫ ИЗМЕРЯЮТ, АА?

АА, ПАСКАЛЬ - ЭТО ЕДИНИЦА ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ. И ВОТ ТАК ПАСКАЛЬ СООТНОСИТСЯ С ДРУГОЙ ЕДИНИЦЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ - НЬЮТОНОМ:
 $\text{Па} = \text{Н/М}^2$ (кПа = кН/М²).

ПОЛУЧАЕТСЯ, ЧТО ДАВЛЕНИЕ ВСКРЫШИ σ'_z - ЭТО СИЛА, С КОТОРОЙ ГРУНТОВЫЙ СКЕЛЕТ ПРИНИМАЕТ НА СЕБЯ ДАВЛЕНИЕ СОБСТВЕННОГО ВЕСА?

ДЛЯ НАЧАЛА РАССМОТРИМ ОДНОРОДНЫЙ ГРУНТ НА ГЛУБИНЕ z . И НАЙДЕМ ОБЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ σ_z , ДАВЛЕНИЕ ПОРОВОЙ ВОДЫ u_z И ДАВЛЕНИЕ ВСКРЫШИ σ'_z ДЛЯ ТОЧКИ А, НАХОДЯЩЕЙСЯ НИЖЕ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД.

ТАК, ОБЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ σ_z В ТОЧКЕ А СООТВЕТСТВУЕТ ВЕСУ ГРУНТА НА ЗАДАННОЙ ГЛУБИНЕ НА ЕДИНИЦУ ПЛОЩАДИ...

Общее напряжение σ_z (кПа) =
удельный вес влажного грунта γ_t (кН/М³) × глубина z_1 (М) + удельный вес водонасыщенного грунта γ_{sat} (кН/М³) × глубина z_2 (М).

γ_t - ЭТО ДАВЛЕНИЕ ВСКРЫШИ НА УЧАСТКЕ ГЛУБИНОЙ z_1 , А γ_{sat} - ЭТО ДАВЛЕНИЕ ВСКРЫШИ НА УЧАСТКЕ ГЛУБИНОЙ z_2 , ПОЭТОМУ... ВОТ ТАК БУДЕТ!



ВЕРНО!
А КАК НАСЧЕТ ДАВЛЕНИЯ ПОРОВОЙ ВОДЫ u_z ?

² В данной главе речь идёт о довольно сильном давлении, поэтому используются кПа.

КОГДА ОТСУТСТВУЕТ ИЗБЫТОЧНОЕ ПОРОВОЕ ДАВЛЕНИЕ Δu , ТО ПОРОВОЕ ДАВЛЕНИЕ ВОДЫ u_z РАВНО ГИДРОСТАТИЧЕСКОМУ ДАВЛЕНИЮ, И ЕГО МОЖНО НАЙТИ КАК ПРОИЗВЕДЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ВЕСА ВОДЫ НА ГЛУБИНУ.

ТОГДА, РАЗ УДЕЛЬНЫЙ ВЕС ВОДЫ РАВЕН γ_w , А ГЛУБИНА ОТ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД ДО ТОЧКИ А РАВНА z_2 , ВОТ ТАК ПОЛУЧАЕТСЯ:

$$\text{Давление поровой воды } u_z \text{ (кПа)} = \text{удельный вес воды } \gamma_w \text{ (кН/м}^3\text{)} \times \text{глубина } z_2 \text{ (м)}$$

ХОРОШО.

И НАКОНЕЦ, ПОПРОБУЙТЕ НАЙТИ ДАВЛЕНИЕ ВСКРЫШИ σ'_z , ЗНАЯ ОБЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ σ_z И ДАВЛЕНИЕ ПОРОВОЙ ВОДЫ u_z .

ТАК КАК ОБЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ $\sigma =$ ЭФФЕКТИВНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ $\sigma' +$ ДАВЛЕНИЕ ПОРОВОЙ ВОДЫ u , ТО ДАВЛЕНИЕ ВСКРЫШИ $\sigma'_z =$ ОБЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ $\sigma_z -$ ДАВЛЕНИЕ ПОРОВОЙ ВОДЫ u_z !

$$\text{Давление вскрыши } \sigma'_z \text{ (кПа)} = \text{удельный вес влажного грунта } \gamma_t \text{ (кН/м}^3\text{)} \times \text{глубина } z_1 \text{ (м)} + \text{удельный вес водонасыщенного грунта } \gamma_{\text{sat}} \text{ (кН/м}^3\text{)} \times \text{глубина } z_2 \text{ (м)} - \text{удельный вес воды } \gamma_w \text{ (кН/м}^3\text{)} \times \text{глубина } z_2 \text{ (м)}$$

ОТЛИЧНО!

ТО ЕСТЬ В НАШЕМ СЛУЧАЕ ПОЛУЧАЕТСЯ:

$$\text{Давление вскрыши } \sigma'_z = \underbrace{\gamma_t \times z_1 + \gamma_{\text{sat}} \times z_2}_{\text{Общее напряжение } \sigma_z} - \underbrace{\gamma_w \times z_2}_{\text{Давление поровой воды } u_z} = \gamma_t \times z_1 + (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) \times z_2$$



Кажется, я где-то уже видела выражение $(\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w)$...



Это же из формулы соотношения удельного веса подземных вод (плавучести) γ' , удельного веса воды γ_w и удельной водонасыщенности γ_{sat} ($\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$) (см. стр. 55).

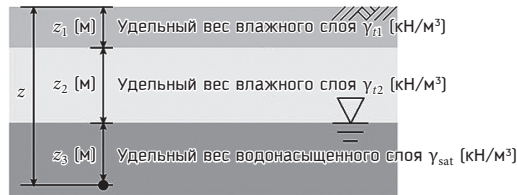


Таким образом, при отсутствии избыточного давления поровой воды давление вскрыши можно рассматривать как напряжение с добавлением плавучести, действующее на частицы почвы ниже уровня подземных вод:

Давление вскрыши $\sigma'_z = \gamma_t \times z_1 + \gamma' \times z_2$.



А теперь рассмотрим ситуацию, когда грунт неоднородный и сверху одного вида почвы находится другой. Принцип действий будет точно таким же, но надо помнить, что у всех слоёв разный удельный вес и толщина, поэтому будьте внимательны.



В таком случае получается: общее напряжение $\sigma_z = \gamma_{t1} \times z_1 + \gamma_{t2} \times z_2 + \gamma_{\text{sat}} \times z_3$, а давление поровой воды $u_z = \gamma_w \times z_3$, поэтому давление вскрыши:

$$\begin{aligned}\sigma'_z &= \gamma_{t1} \times z_1 + \gamma_{t2} \times z_2 + \gamma_{\text{sat}} \times z_3 - \gamma_w \times z_3 \\ &= \gamma_{t1} \times z_1 + \gamma_{t2} \times z_2 + (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) \times z_3.\end{aligned}$$

Получилось!



А если удельный вес подземных вод равен γ' ?



Тогда давление вскрыши будет $\sigma'_z = \gamma_{t1} \times z_1 + \gamma_{t2} \times z_2 + \gamma' \times z_3$, верно?



Ага, вы обе молодцы!



Ура!



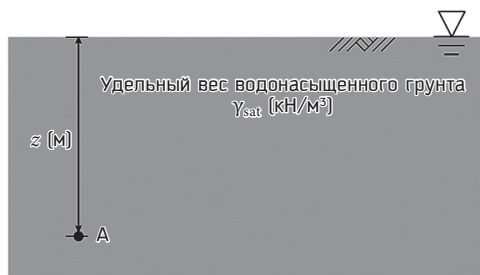
Как мы только что убедились, полное напряжение σ_z , давление поровой воды u_z и давление вскрыши σ'_z описываются линейными уравнениями относительно глубины z . Поэтому можно нарисовать такие графики, где по вертикали будет отложено на глубину z , а по горизонтали – общее напряжение σ_z .



А теперь изменим уровень подземных вод и сравним давление вскрыши σ'_z (кПа) в точке А.



Убираем подсыпанный ранее слой другой почвы и добавляем воду. Возьмём для начала однородный грунт, где уровень подземных вод совпадает с уровнем земной поверхности.

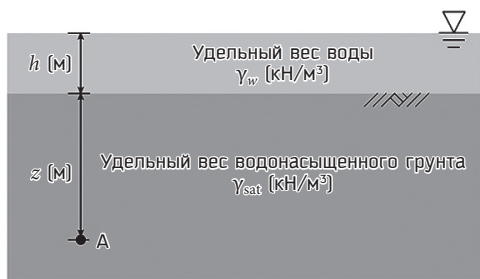


В точке А общее напряжение σ_z будет равно удельному весу водонасыщенного грунта γ_{sat} , умноженному на глубину z , а если вычесть из общего напряжения давление поровой воды u_z ... то можно записать формулу давления вскрыши γ'_z через удельный вес подземных вод γ' :

$$\text{Давление вскрыши } \sigma'_z = \gamma_{sat} \times z - \gamma_w \times z = \gamma' \times z.$$



Ага, правильно. А теперь подумайте, что будет, если мы ещё добавим воды, так что уровень воды станет выше уровня поверхности земли?



Так... Прежде всего, чтобы найти общее напряжение σ_z , надо умножить удельный вес воды γ_w на глубину h , потом добавить удельный вес водонасыщенного грунта γ_{sat} , умноженного на глубину z . А давление поровой воды u_z будет общим на всей глубине $(h + z)$, поэтому получается:

$$\begin{aligned} \text{Давление вскрыши } \sigma'_z &= \gamma_w \times h + \gamma_{sat} \times z - w(h + z) \\ &= \gamma_{sat} \times z - \gamma_w \times z = \gamma' \times z. \end{aligned}$$



Ой, так то же самое давление вскрыши выходит!



Верно! А теперь нарисуем два графика и сравним.



Как видно из этих графиков, когда уровень воды выше уровня земли, то общее напряжение σ_z хоть и возрастает, но и давление поровой воды u_z будет возрастать, поэтому в результате разница уровней воды не будет оказывать влияния на давление вскрыши σ'_z .



Однако когда уровень воды ниже поверхности земли, то чем он ниже, тем меньше давление поровой воды u_z , и плавучесть перестаёт действовать на почву над уровнем грунтовых вод. В результате чем ниже уровень грунтовых вод, тем больше давление вскрыши σ'_z .



А изменение напряжения внутри грунта может привести к его просадке. Поэтому очень важно соблюдать осторожность при откачке грунтовых вод во время строительных работ.

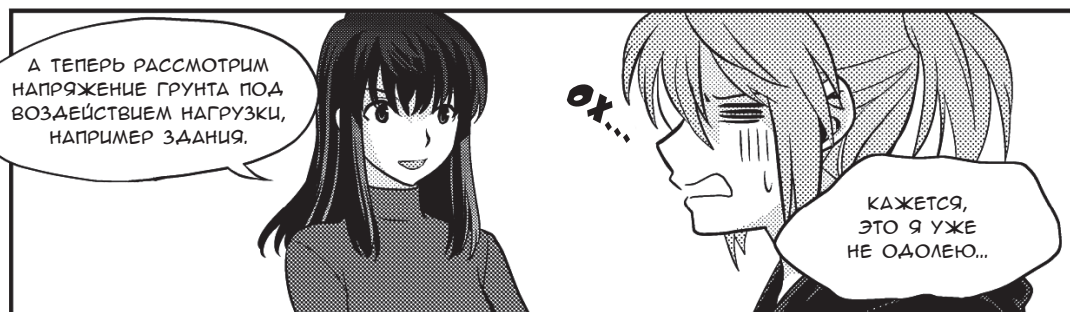


Помогите! У меня уже голова кругом!

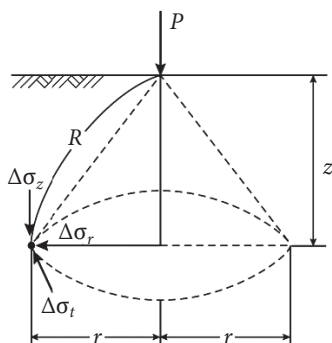


Нацуми?..

4.3. НАПРЯЖЕНИЕ ГРУНТА ПОД НАГРУЗКОЙ



³ Величина деформации на единицу напряжения.



СНАЧАЛА
РАССМОТРИМ СИТУАЦИЮ
С КОНЦЕНТРИРОВАННОЙ
НАГРУЗКОЙ⁴ P. ФРАНЦУЗСКИЙ
МАТЕМАТИК БУССИНЕСК ВЫВЕЛ
СЛЕДУЮЩИЕ ФОРМУЛЫ,
ОПИСЫВАЮЩИЕ УВЕЛИЧЕНИЕ
НАПРЯЖЕНИЙ В ТОЧКЕ,
НАХОДЯЩЕЙСЯ НА ГЛУБИНЕ z
И УДАЛЁННОЙ ОТ НАГРУЗКИ НА
РАССТОЯНИЕ R.

Формулы напряжений Буссинеска (Boussinesq)

Увеличение вертикально
направленного напряжения:
$$\Delta\sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi R^5} \quad [1]$$

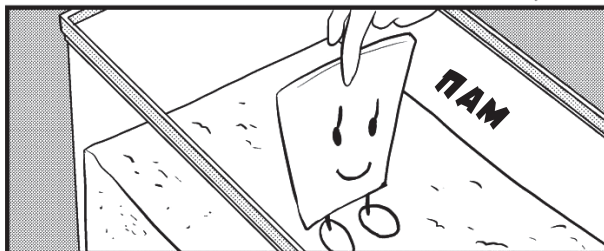
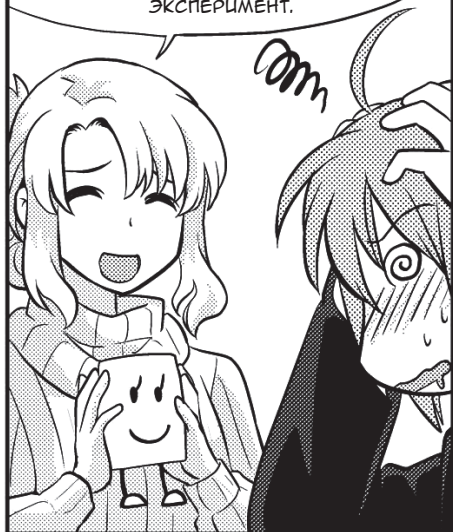
Увеличение напряжения
в радиальном направлении:
$$\Delta\sigma_r = \frac{P}{2\pi R^2} \left(\frac{3r^2z}{R^3} - \frac{(1-2r)R}{R+z} \right) \quad [2]$$

Увеличение напряжения,
направленного по касательной:
$$\Delta\sigma_t = \frac{(1-2r)P}{2\pi R^2} \left(\frac{R}{R+z} - \frac{z}{R} \right) \quad [3]$$

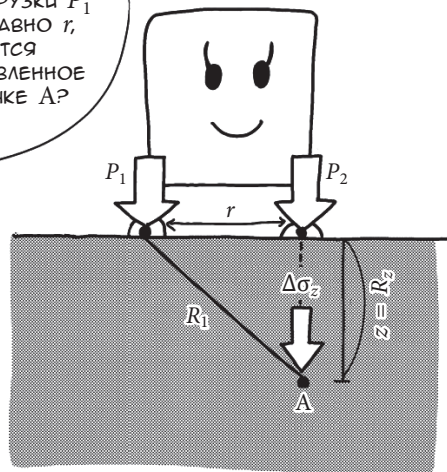


ХА-ХА.

ИЗ ЭТИХ ТРЁХ ФОРМУЛ
ОСОБЕННО ВАЖНОЕ ЗНАЧЕНИЕ
ИМЕЕТ УВЕЛИЧЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНО
НАПРАВЛЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ, ТАК
КАК ОНО ВЛИЯЕТ НА ВОЗМОЖНОСТЬ
ПРОСАДКИ ГРУНТА (СМ. ГЛ. 5).
ДАВАЙТЕ ПРОВЕДЁМ
ЭКСПЕРИМЕНТ.



ЕСЛИ ТОЧКА А РАСПОЛОЖЕНА
ТОЧНО ПОД ТОЧКОЙ НАГРУЗКИ
P₂ НА ГЛУБИНЕ z, А МЕЖДУ
ДВУМЯ ТОЧКАМИ НАГРУЗКИ P₁
И P₂ РАССТОЯНИЕ РАВНО r,
ТО КАК УВЕЛИЧИТСЯ
ВЕРТИКАЛЬНО НАПРАВЛЕННОЕ
НАПРЯЖЕНИЕ В ТОЧКЕ А?



⁴ Нагрузка, прилагаемая к одной точке.



НО ТУТ
ОДНОВРЕМЕННО ВОЗДЕЙСТВУЮТ
ДВЕ КОНЦЕНТРИРОВАННЫЕ
НАГРУЗКИ В ТОЧКАХ P_1 И P_2 ...

КОГДА ОДНОВРЕМЕННО ИМЕЕТСЯ
НЕСКОЛЬКО КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ
НАГРУЗОК, ТО ПО ПРИНЦИПУ
СУПЕРПОЗИЦИИ МОЖНО
ПРОСТО СЛОЖИТЬ
РАЗНИЦУ НАПРЯЖЕНИЙ
ОТ КАЖДОЙ
ИЗ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ
НАГРУЗОК.



ТОГДА ДЛЯ $\Delta\sigma_{z1}$ РАССТОЯНИЕ R_1
ОТ ТОЧКИ P_1 МОЖНО НАЙТИ
ПО ТЕОРЕМЕ ПИФАГОРА
КАК $R_1 = \sqrt{r^2 + z^2}$.

А ДЛЯ $\Delta\sigma_{z2}$ ПОЛУЧАЕТСЯ,
ЧТО $r = 0$, $R_2 = z$. ВЕРНО?

ДАЛЬНЕЙШЕЕ РЕШЕНИЕ
ПРЕДОСТАВЛЯЮ НАЦУМИ.



НУ, ЕСЛИ ВЗЯТЬ ПЕРВУЮ
ИЗ ФОРМУЛ БУССИНЕСКА
И СЛОЖИТЬ УВЕЛИЧЕНИЯ
ВЕРТИКАЛЬНО НАПРАВЛЕННЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ, ТО ВОТ ТАК,
ЧТО ЛИ, БУДЕТ?

$$\Delta\sigma_z = \Delta\sigma_{z1} + \Delta\sigma_{z2}$$
$$= \frac{3P_1 z^3}{2\pi(\sqrt{r^2 + z^2})^5} + \frac{3P_2 z^3}{2\pi z^5} \text{ (кПа)}$$

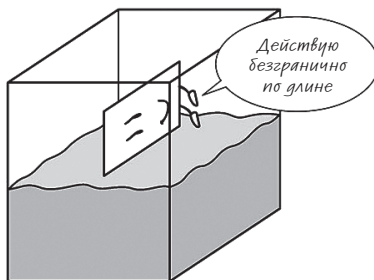


АГА, ВЕРНО!

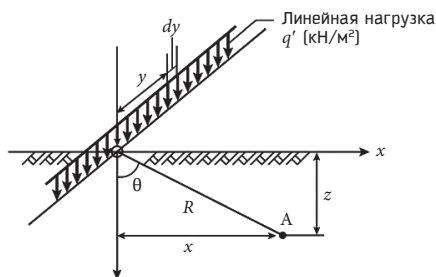
ПОАСТАВИВ
В ЭТУ ФОРМУЛУ ФАКТИЧЕСКИЕ
ЗНАЧЕНИЯ, МОЖНО РАССЧИТАТЬ
РЕАЛЬНОЕ УВЕЛИЧЕНИЕ
ВЕРТИКАЛЬНО НАПРАВЛЕННОГО
НАПРЯЖЕНИЯ.



Так, а теперь рассмотрим ситуацию, когда имеется равномерно распределённая безграничная по длине линейная нагрузка q'^5 (кН/м²).



Безграничная?



Увеличение напряжения из-за линейной нагрузки



При линейной нагрузке q' (кН/м²) нагрузка на точку А небольшого отрезка длиной dy (м) будет равна $q'dy$ (кН), поэтому, как и в случае с несколькими концентрированными нагрузками, можно представить линейную нагрузку как бесконечную сумму. Другими словами, в первую формулу Буссинеска подставим $P = q'dy$ и $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ и проинтегрируем по y от $-\infty$ до $+\infty$.



...Так, что ли? (Формула увеличения напряжения $\Delta\sigma_z$ при линейной нагрузке)

$$\Delta\sigma_z = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{3q'}{2\pi} \cdot \frac{z^3}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} dy = \frac{2q'}{\pi} \cdot \frac{z^3}{(x^2 + z^2)^2}.$$



Нацуми, какая ты умница! Просто эксперт в вычислениях!

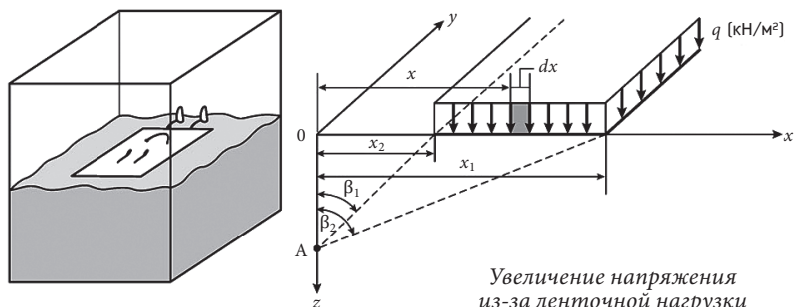


Да ещё всё в уме посчитала!

⁵ Двумерная равномерно распределённая нагрузка, не имеющая ширины.



Сразу перейдём к следующему примеру. Теперь рассмотрим бесконечную ленточную нагрузку, когда у нагрузки имеется ширина.



Увеличение напряжения из-за ленточной нагрузки



Способ решения похож на случай с линейной нагрузкой, но теперь у нас есть ширина, поэтому добавится ещё интегрирование по x от x_1 до x_2 .



Угу. Тогда вот так будет (формула увеличения напряжения $\Delta\sigma_z$ при ленточной нагрузке):

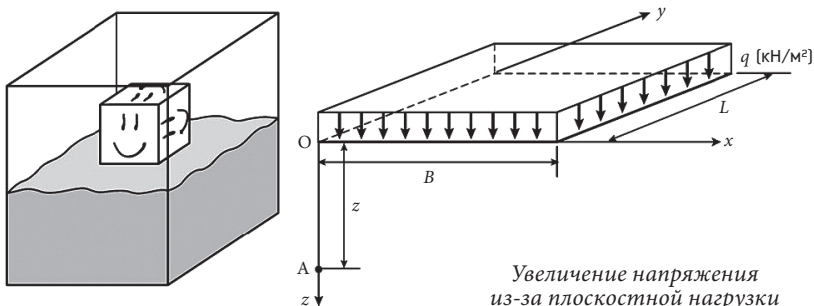
$$\Delta\sigma_z = \int_{x_1}^{x_2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{3q}{2\pi} \cdot \frac{z^3}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} dy dx = \frac{q}{\pi} (\alpha + \sin \alpha \cos \theta).$$



Как быстро!.. Здесь $\alpha = \beta_2 - \beta_1$ (рад), а $\theta = \beta_2 + \beta_1$ (рад).



Постепенно усложняем задачу. Рассмотрим плоскостную нагрузку q с шириной B и длиной L на точку A , находящуюся прямо под углом этой плоскости⁶ (точка O) на глубине z . Каким будет увеличение напряжения $\Delta\sigma_z$ в данном случае?



Увеличение напряжения из-за плоскостной нагрузки



Можно же применять тот же подход, что в предыдущих задачах, да? Тогда вот так будет, наверное (формула увеличения напряжения $\Delta\sigma_z$ при плоскостной нагрузке):

$$\Delta\sigma_z = \int_0^L \int_0^B \frac{3q}{2\pi} \cdot \frac{z^3}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} dx dy.$$

⁶ Угол сооружения.



Но разве можно запомнить эти формулы или тем более вывести на экзамене?!



В самом деле. Но учёный Ньюмарк (Newmark) представил увеличение нагрузки вот такой формулой: $\Delta\sigma_z = I_\sigma \cdot q$, где I_σ – значение влияния нагрузки, рассчитывается по нижеприведенной формуле, где $m (= B/z)$ и $n (= L/z)$, B – ширина, L – длина плоскости, а z – глубина:

$$I_\sigma = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + 1 + m^2n^2} \times \frac{m^2 + n^2 + 2}{m^2 + n^2 + 1} + \tan^{-1} \frac{mn}{\sqrt{m^2 + n^2 + 1}} \right).$$



Всё... кажется, мне пора на покой...



Успокойся, Нацуми! Значение влияния I_σ как функцию $f_B(m, n)$ от m и n можно найти по диаграмме Ньюмарка:

$$\Delta\sigma_z = I_\sigma \cdot q = f_B(m, n) \cdot q.$$

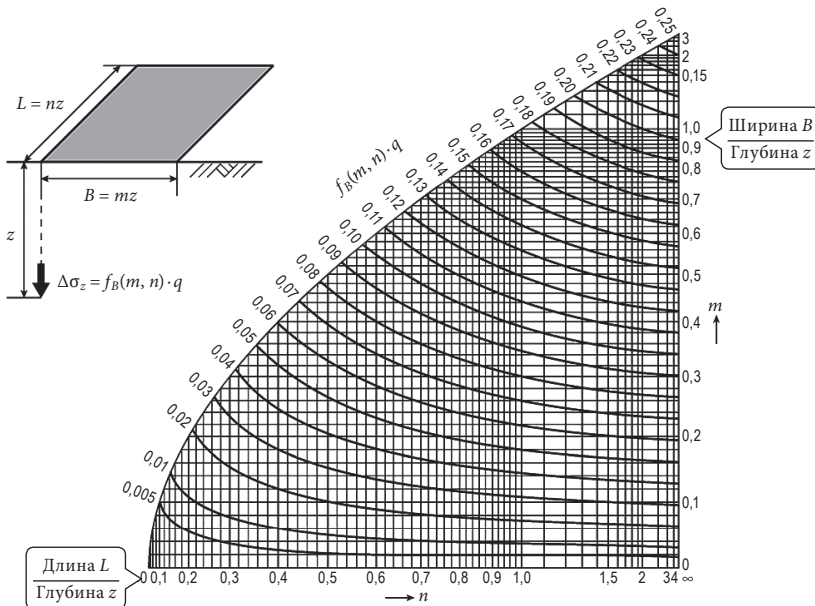


График значения влияния $I_\sigma (f_B(m, n))$
при плоскостной нагрузке (диаграмма Ньюмарка)



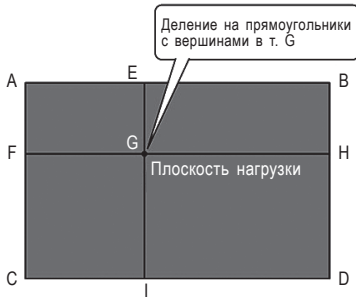
О! Это куда лучше!



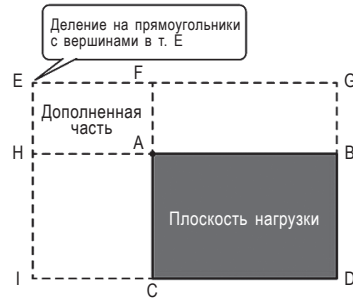
Кстати, а как насчёт неугловых точек?



В таком случае надо разделить плоскость на прямоугольники так, чтобы точка стала угловой. И найти искомое значение посредством сложения и вычитания увеличений напряжений для каждого из полученных прямоугольников (метод прямоугольного деления Ньюмарка) (см. стр. 145).



Увеличение напряжения $\Delta\sigma_z$ для точки, находящейся прямо под т. G на глубине z



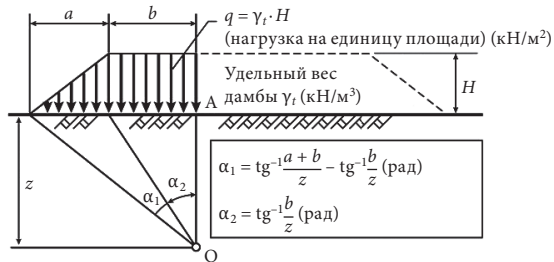
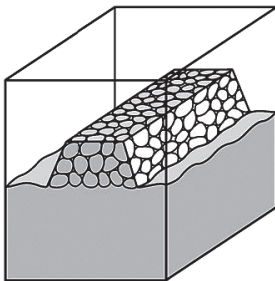
Увеличение напряжения $\Delta\sigma_z$ для точки, находящейся прямо под т. E на глубине z



Мы разобрались с ситуацией, когда плоскостная нагрузка равномерно передаётся на грунт. А что будет, если конструкция в поперечном сечении трапециевидная, как у дорожного полотна или речной дамбы?



Нагрузка на грунт тоже будет неравномерной... Может, она будет распределяться в соответствии с проекцией поперечного сечения конструкции в грунте?



Ага, верно. Состоящая из грунта нагрузка (дамба) часто воздействует как трапециевидная ленточная нагрузка. И увеличение напряжения $\Delta\sigma_z$ в таком случае вычисляется по формуле Остенберга (Osterberg) (см. стр. 144):

$$\Delta\sigma_z = \frac{1}{\pi} \left\{ \left(\frac{a+b}{a} \right) (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{b}{a} \alpha_2 \right\} q.$$



Для точки О, находящейся прямо под т. А на глубине z , сначала надо найти увеличение напряжения вследствие нагрузки дамбы $\Delta\sigma$ слева от т. А, а затем вычислить увеличение напряжения вследствие нагрузки дамбы $\Delta\sigma$ справа от т. А, и, сложив их, получить увеличение напряжения $\Delta\sigma_z$ в т. О. Здесь α_1 и α_2 – это углы в радианах, образованные отрезками a и b .



Кажется, мне пора на по...



Подожди унывать! Остенберг, как и Ньюмарк, тоже вывел значение влияния I_σ через a/z и b/z , которое здесь обозначено как k , и его значения также можно взять из графика и подставить в следующую формулу для расчёта увеличения напряжения $\Delta\sigma_z$ (см. стр. 146):

$$\Delta\sigma_z = I_\sigma \cdot q = k \cdot q.$$

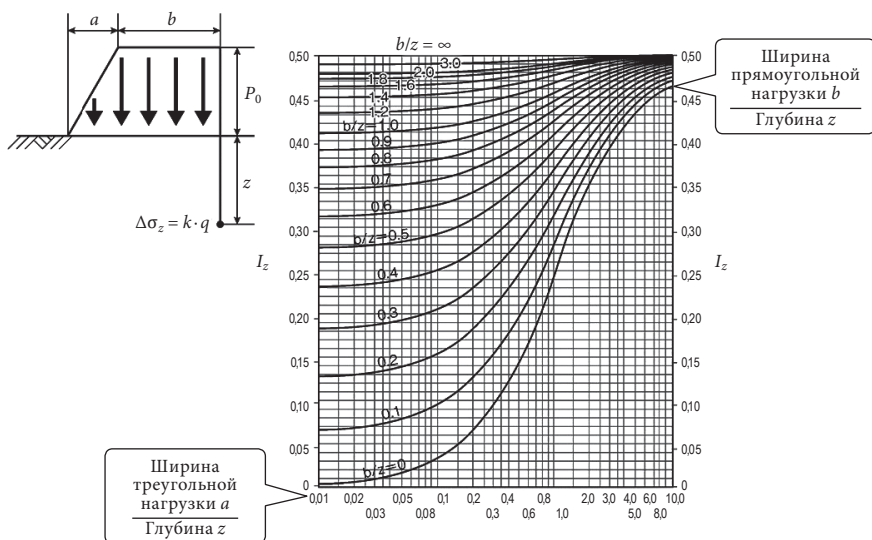


График значения влияния I_σ (k)
при трапецевидной ленточной нагрузке (диаграмма Остенберга)

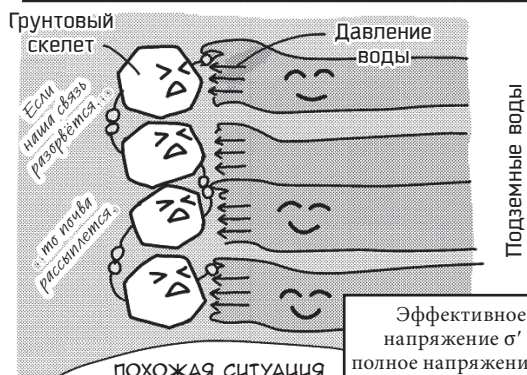


О, Остенберг – тоже молодец!



Таким образом, мы разобрались с напряжением грунта. Как с напряжением от собственного веса, так и с напряжением из-за дополнительной нагрузки.

4.4. НАПРЯЖЕНИЕ ГРУНТА ИЗ-ЗА ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА



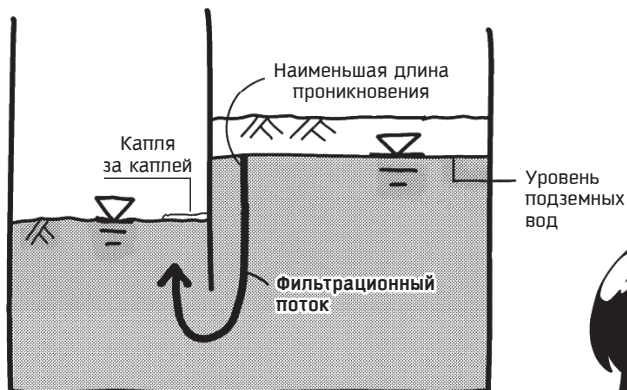
Подземные воды

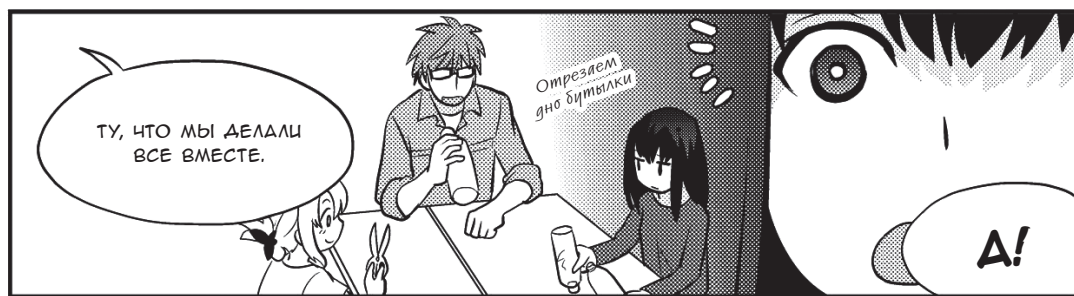
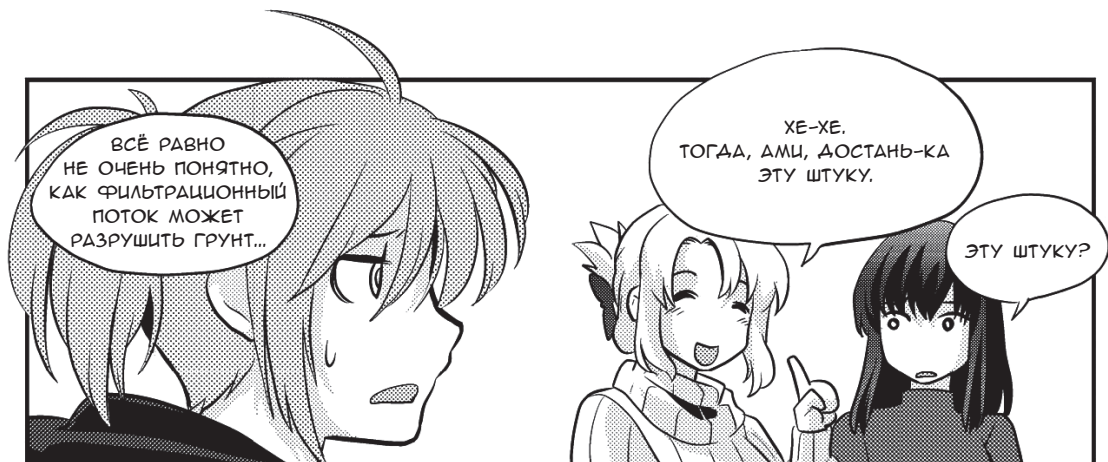
Эффективное напряжение $\sigma' =$ полное напряжение σ – давление поровой воды u

ПОХОЖАЯ СИТУАЦИЯ И В ГРУНТЕ. ЧАСТИЦЫ ПОЧВЫ ПРЕПЯТСТВУЮТ ДВИЖЕНИЮ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И ПРИНИМАЮТ НА СЕБЯ ДАВЛЕНИЕ ВОДЫ В НАПРАВЛЕНИИ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА.

НАСКОЛЬКО ВОЗРАСТАЕТ ДАВЛЕНИЕ ПОРОВОЙ ВОДЫ u , НАСКОЛЬКО УМЕНЬШАЕТСЯ ЭФФЕКТИВНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ σ' .

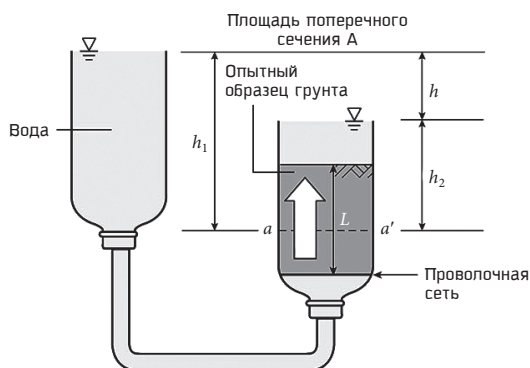








Сначала давайте рассмотрим фильтрационную силу, действующую на поперечное сечение $a-a'$ (площадь поперечного сечения A) в образце грунта. Поперечное сечение $a-a'$ находится на глубине h_1 от уровня воды в левой ёмкости и на глубине h_2 от уровня воды в правой ёмкости, в результате чего подвергается воздействию гидростатического давления. Из-за разницы напоров возникает фильтрационный поток, направленный в сторону меньшего давления, то есть в образце грунта фильтрационная сила будет направлена вверх.



Гидростатическое давление для глубины h_1 равно:

удельный вес воды γ_w (кН/м³) $\times$ глубина h_1 (м) = $\gamma_w h_1$ (кН/м²),

а так как площадь поперечного сечения равна A , то направленное вверх гидростатическое давление будет равно:

гидростатическое давление $\gamma_w h_1$ (кН/м²) $\times$ площадь поперечного сечения A (м²) = $\gamma_w h_1 A$ (кН),

верно?



А гидростатическое давление для глубины h_2 будет равно: $\gamma_w h_2 A$ (кН), но оно направлено вниз, так?



Верно. Разница уровней воды при этом будет равна h ($= h_1 - h_2$), и если она положительна, то силу фильтрационного потока можно найти по следующей формуле:

Фильтрационная сила $F = \gamma_w h_1 A - \gamma_w h_2 A = \gamma_w A (h_1 - h_2) = Ah \gamma_w$ (кН).



В данном случае сила фильтрационного потока действует на весь образец равномерно, поэтому можно вычислить силу фильтрационного потока на единицу площади – f (фильтрационное давление), просто разделив силу фильтрационного потока F на площадь поперечного сечения A :

Фильтрационная сила на единицу площади $f = F/A = h \gamma_w$ (кН/м²).



Кроме того, можно вычислить и фильтрационную силу на единицу объёма j , для чего надо разделить фильтрационную силу F на объём образца (площадь поперечного сечения $A \times$ длина проникновения L):

$$\text{Фильтрационная сила на единицу объёма } j = \frac{F}{AL} = \frac{h}{L} \gamma_w \text{ (кН/м}^3\text{)}.$$



Часто под названием «фильтрационная сила» подразумевают именно фильтрационную силу на единицу объёма j . В любом месте почвы типа той, что представлена в нашем примере, фильтрационная сила будет одинаковой. Итак, посмотрите на эту формулу и скажите, от чего зависит значение фильтрационной силы j ?



$$\text{Фильтрационная сила } j = \frac{h}{L} \gamma_w.$$

Выходит, что чем больше разница уровней воды h и чем меньше длина проникновения L , тем выше значение фильтрационной силы j .



Хм... Где-то я уже видела это h/L ... А! Это же градиент напора i (см. стр. 91), да?



Отлично подмечено! Так как градиент напора $i = h/L$, то можно переписать формулу фильтрационной силы как:

$$j = i \gamma_w \text{ (кН/м}^3\text{)}.$$

Как видно из этой формулы, фильтрационная сила j пропорциональна градиенту напора i .



То есть на удельный вес почвы воздействует восходящая фильтрационная сила j , пропорциональная градиенту напора i , верно?



Именно! Восходящую фильтрационную силу j называют ещё подъёмным давлением. Разницу между нисходящим удельным весом подземных вод γ' и восходящей силой фильтрации j называют эффективным весом на единицу объёма. Вот его формула:

$$\text{Эффективный вес на единицу объёма} = \gamma' - j = \gamma' - i \gamma_w \text{ (кН/м}^3\text{)}.$$



Кроме того, на основе предыдущей формулы можно найти эффективное напряжение σ'_z для глубины z при воздействии восходящего фильтрационного потока j :

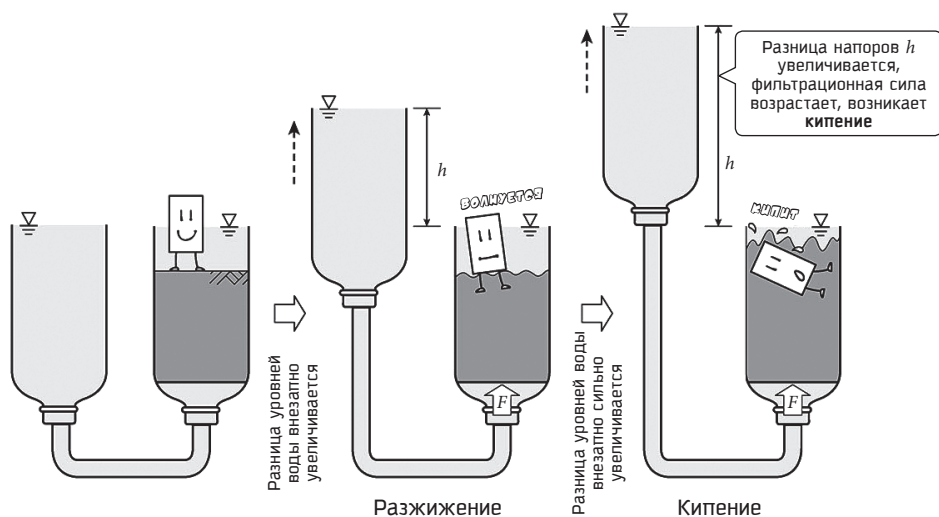
Эффективное напряжение $\sigma'_z = (\gamma' - j)z = (\gamma' - i\gamma_w)z$ (кПа).



Из этой формулы становится понятно, что для песчаного грунта чем больше фильтрационная сила j , тем меньше эффективное напряжение σ'_z . И если $j \geq \gamma'$, то теряется сила, поддерживающая грунтовый скелет, что приводит к разжижению грунта и явлению зыбучих песков.



Когда из-за подъёмного давления в песчаной почве происходит разжижение, то почва начинает как бы вскипать, такое явление называют **песчаным кипением**. Кроме того, иногда песчаное кипение возникает локально из-за концентрации фильтрационной силы в слабом участке грунта, тогда в этом месте образуется песчаный вулкан.



Если подобные явления возникнут на месте строительных работ, это может привести к крупной аварии.



Фильтрационное течение, а следовательно, образование песчаного кипения или зыбучих песков возможно лишь при градиентах давления, превышающих некоторое значение, которое называется предельным градиентом напора i_c . Оно соответствует равновесному состоянию фильтрационной силы и удельного веса подземных вод, то есть j равно γ' . Рассчитывается он следующим образом:

$$\text{Фильтрационная сила } j = \gamma' = i_c \gamma_w = \frac{\rho_s + \rho_w}{1 + e} g = \frac{\rho_w}{1 + e} \gamma_w.$$

$$\text{Предельный градиент напора } i_c = \frac{\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1}{1 + e}.$$



Когда же $j = \gamma'$, то эффективное напряжение грунта $\sigma'_z = (\gamma' - j)z$ становится нулевым. То есть это состояние, когда напряжение между частицами почвы отсутствует.



Чтобы предотвратить возникновение такой ситуации, нужно, исходя из условий на местности, определить градиент напора i и предельный градиент напора i_c и поддерживать коэффициент безопасности $F_s = i_c/i \geq 1$ (метод предельного градиента напора).



Другими словами, если i меньше i_c , то коэффициент безопасности F_s будет больше 1, и тогда песчаного кипения или зыбучих песков не будет.



А теперь подумайте, как можно предотвратить песчаное кипение и зыбучие пески в ёмкости, которую мы используем для экспериментов.



На ближайшем к разделительному блоку пути потока длина проникновения L самая короткая, а градиент напора i – максимальный, что может легко привести к образованию зыбучих песков. Что можно предпринять в таком случае?



Наверное, можно подсыпать почвы, чтобы увеличить эффективный вес, или уменьшить разницу уровней воды с помощью дренажа, чем предотвратить возникновение большой фильтрационной силы j .



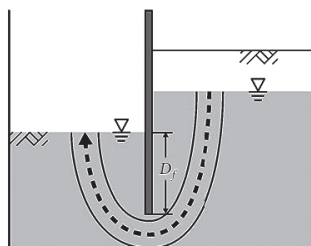
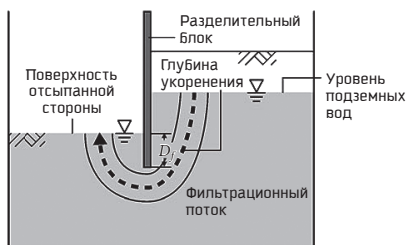
Для уменьшения фильтрационной силы j можно ещё уменьшить градиент напора i ($= h/L$)... А для этого можно, наверное, сократить длину проникновения L ?



Всё правильно! Эффективными способами являются и поддержание грунта с помощью противofiltrационных завес, и понижение уровня грунтовых вод посредством установки дренажных колодцев.



А если увеличить глубину укоренения⁷, то увеличится и путь фильтрационного потока, длина проникновения L станет больше, и градиент напора i уменьшится.



Если же провести вычисления, то на основании формулы коэффициента безопасности F_s можно найти такую глубину укоренения D_f , которая обеспечит коэффициент безопасности $F_s \geq 1$ (см. стр. 147):

$$\text{Коэффициент безопасности } F_s = \frac{i_c}{i} = \frac{\frac{\gamma'}{\gamma_w}}{\frac{h}{h + 2D_f}} = \frac{\gamma'(h + 2D_f)}{\gamma_w h} \geq 1 \text{ (метод предельного градиента напора).}$$



Значит, если решить это уравнение относительно D_f то можно найти такую глубину укоренения, чтобы предотвратить песчаное кипение и выбучие пески?

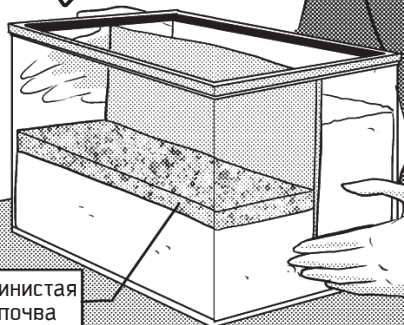


В отношении коэффициента безопасности F_s существует также метод Терцаги, предполагающий, что область сильного влияния фильтрационной силы представлена призмой с высотой D_f и шириной $D_f/2$.

⁷ Глубина погружения разделительного блока в грунт.

ДО СИХ ПОР МЫ
РАССМАТРИВАЛИ
ТОЛЬКО ОДНОРОДНУЮ
ПЕСЧАНУЮ ПОЧВУ.
А ЧТО, ЕСЛИ С ОТСЫПАННОЙ
СТОРОНЫ НАД НАПОРНЫМ
ВОДОНОСНЫМ СЛОЕМ БУДЕТ
НАХОДИТЬСЯ
ВОДОНЕПРОНИЦАЕМЫЙ
СЛОЙ?

БУХ!



ВОДОНЕПРОНИЦАЕМЫЙ СЛОЙ
ЗА СЧЕТ СВОЕГО ВЕСА БУДЕТ
НЕЙТРАЛИЗОВАТЬ
ФИЛЬТРАЦИОННУЮ СИЛУ j ...

БА-БАХ!

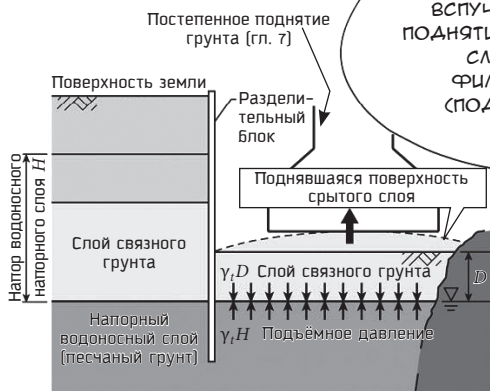
ПОЛУЧАЕТСЯ, ЧТО
ВОДОНЕПРОНИЦАЕМЫЙ СЛОЙ
БУДЕТ СЛУЖИТЬ КАК БЫ КРЫШКОЙ
И ЗАЩИЩАТЬ ОТ ОБРАЗОВАНИЯ
ЗЫБУЧИХ ПЕСКОВ ИЛИ ПЕСЧАНОГО
КИПЕНИЯ.

НО ЕСЛИ МЫ СРЫЛИ ЧАСТЬ
ЗЕМЛИ, ТО НА ЭТУ ЧАСТЬ
УМЕНЬШИТСЯ ДАВЛЕНИЕ
ВСКРЫШИ σ'_z .

ТОГДА
ВОДОНЕПРОНИЦАЕМЫЙ
СЛОЙ УЖЕ НЕ СМОЖЕТ,
КАК КРЫШКА, СДЕРЖИВАТЬ
ФИЛЬТРАЦИОННУЮ СИЛУ j ,
И ПРОИЗОЙДЁТ РАЗРУШЕНИЕ,
РАЗВЕ НЕТ?

НУ, ТАКОГО РАЗРУШЕНИЯ,
КАК ПРИ ПЕСЧАНОМ КИПЕНИИ,
НЕ БУДЕТ, ОДНАКО...

...НА ПОВЕРХНОСТИ СРЫТОГО
СВЯЗНОГО ГРУНТА МОЖЕТ
ПРОИЗОЙТИ ВСПУЧИВАНИЕ.



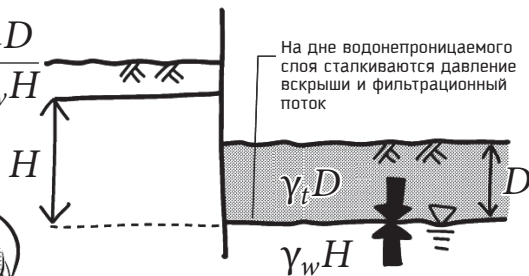
ВСПУЧИВАНИЕ - ЭТО ЯВЛЕНИЕ
ПОДНЯТИЯ ПОВЕРХНОСТИ СРЫТОГО
СЛОЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ
ФИЛЬТРАЦИОННОЙ СИЛЫ f
(ПОДЪЁМНОГО ДАВЛЕНИЯ).

ОНО ПРОИСХОДИТ
ИЗ-ЗА УМЕНЬШЕНИЯ
ДАВЛЕНИЯ ВСКРЫШИ σ'_z
ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОГО
СЛОЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ
ВЫЕМКИ ГРУНТА.

НАДО ЖЕ -
ВСПУЧИВАНИЕ...

ЕСЛИ НАПОР⁸ ВОДОНОСНОГО
НАПОРНОГО СЛОЯ РАВЕН H ,
ТОЛЩИНА ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОГО
СЛОЯ РАВНА D , А УДЕЛЬНЫЙ ВЕС
ВЛАЖНОГО СВЯЗНОГО ГРУНТА
РАВЕН γ_t ,
ТО КОЭФФИЦИЕНТ
БЕЗОПАСНОСТИ F_s
В ОТНОШЕНИИ
ВСПУЧИВАНИЯ БУДЕТ
ВОТ ТАКИМ.

$$F_s = \frac{\gamma_t D}{\gamma_w H}$$



⁸ Давление воды в порах водоносного слоя. Также ещё называется давлением поровой воды, или уровнем напора.

ЕСЛИ ВСПУЧИВАНИЕ БУДЕТ
ПРОДОЛЖАТЬСЯ И В СЛОЕ СВЯЗНОГО
ГРУНТА БУДУТ ОБРАЗОВЫВАТЬСЯ
ПРОРЫВЫ, ТО В КОНЦЕ КОНЦОВ
СРЫТАЯ ПОВЕРХНОСТЬ МОЖЕТ
РАЗРУШИТЬСЯ.

АГА!
Я ЖЕ ГОВОРИЛА!

ЧТО Ж, НА СЕГОДНЯ,
ПОЖАЛУЙ, ВСЁ.

Хорошо поработали!

НАКОНЕЦ-ТО...

ВЫ ТАКИЕ МОЛОДЦЫ.
СЕРЬЁЗНО ЗАНИМАЕТЕСЬ
ИССЛЕДОВАНИЯМИ
МЕХАНИКИ ГРУНТОВ...

СИОРИ, АМИ -
СПАСИБО!

ЗЛЫТСЯ

ПРЕЖДЕ ВСЕГО
НЕ МОГЛА БЫ ТЫ
НАЗЫВАТЬ МЕНЯ
ПО ФАМИЛИИ*!

ДА ЛАДНО ТЕБЕ...

ТЫ НАС ТОЖЕ
НАЗЫВАЙ ПО ИМЕНИ,
АМИ!

хрр.

* В Японии одноклассники и однокурсники часто называют друг друга по фамилии. Обращение по имени означает большую близость и может выглядеть слишком фамильярно. – Прим. перев.

ВАС ЖЕ ВСЕГО ТРОЕ
В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ
ГРУППЕ ГРУНТОВ, АА?
ВЫ ДВОЕ И ОДИН
СЭМПАЙ.

АХ!

МОЛОДАЫЕ ДЕВУШКИ
И ПАРЕНЬ ВСЕ ВРЕМЯ
ВМЕСТЕ... КАК ИНТЕРЕСНО!

ЧТО ТУТ
ИНТЕРЕСНОГО?

НУ КАК ЖЕ,
КТО-ТО МОЖЕТ
ВЛЮБИТЬСЯ...

А? ЕРУНДА КАКАЯ!
ЭТОТ ПАРЕНЬ СЛИШКОМ
СТРАННЫЙ.

ПРАВДА, СИОРИ?

АГА, АГА!

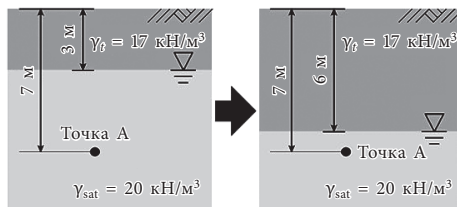
ЧТО?

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Вычисление напряжения от собственного веса грунта

Задача 1

- Как показано на рисунке, в безнапорном водоносном слое уровень подземных вод был снижен с глубины 3 м от поверхности земли до глубины 6 м. Как при этом изменилось давление вскрьши для точки А, находящейся на глубине 7 м?
- Удельный вес воды равен $\gamma_w = 9,8$ (кН/м³).



Рассуждение

Общее напряжение σ_z в точке А равно сумме произведений удельного веса каждого из слоёв над точкой А на соответствующую каждому слою толщину. Давление поровой воды u_z в данном случае равно удельному весу воды, умноженному на толщину, и совпадает с гидростатическим давлением. Вычислив таким образом общее напряжение σ_z и давление поровой воды u_z , из их разницы найдём давление вскрьши σ'_z для уровня подземных вод до и после понижения и сравним полученные значения. В данном случае z_1 – это глубина от поверхности земли до уровня подземных вод, а z_2 – это глубина от поверхности земли до точки А.

Решение

Для уровня подземных вод на глубине 3 м от поверхности земли (до понижения)

Общее напряжение σ_z :

$$\sigma_z = \gamma_t \times z_1 + \gamma_{\text{sat}} \times z_2 = 17 \times 3 + 20 \times 4 = 131 \text{ кПа (кН/м}^2\text{)}.$$

Давление поровой воды u_z :

$$u_z = \gamma_w \times z_2 = 9,8 \times 4 = 39,2 \text{ кПа (кН/м}^2\text{)}.$$

Давление вскрьши σ'_z :

$$\sigma'_z = \sigma_z - u_z = 131 - 39,2 = 91,8 \text{ кПа (кН/м}^2\text{)}.$$

Для уровня подземных вод на глубине 6 м от поверхности земли (после понижения)

Общее напряжение σ_z :

$$\sigma_z = \gamma_t \times z_1 + \gamma_{\text{sat}} \times z_2 = 17 \times 6 + 20 \times 1 = 122 \text{ кПа (кН/м}^2\text{)}.$$

Давление поровой воды u_z :

$$u_z = \gamma_w \times z_2 = 9,8 \times 1 = 9,8 \text{ кПа (кН/м}^2\text{)}.$$

Давление вскрьши σ'_z :

$$\sigma'_z = \sigma_z - u_z = 122 - 9,8 = 112,2 \text{ кПа (кН/м}^2\text{)}.$$

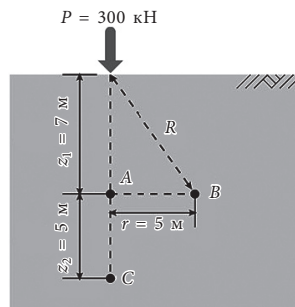
При снижении уровня подземных вод давление вскрьши σ'_z в точке А имеет тенденцию к возрастанию. Это показывает, что откачка подземных вод может привести к проседанию грунта.

Вычисление увеличения напряжения грунта под нагрузкой (случай концентрированной нагрузки)

Задача 2

Как показано на рисунке, на поверхность грунта воздействует концентрированная нагрузка $P = 300$ кН. Вычислите увеличение вертикально направленного напряжения $\Delta\sigma_z$ для следующих точек:

- 1) для точки А, находящейся прямо под нагрузкой на глубине $z = 7$ м;
- 2) для точки В, находящейся на глубине $z = 7$ м и на расстоянии $r = 5$ м от вертикали, проведенной из точки нагрузки;
- 3) для точки С, находящейся прямо под нагрузкой на глубине $z = 12$ м.



Рассуждение

1. Используем формулу Буссинеска (1) для расчета увеличения напряжения $\Delta\sigma_z$ (см. стр. 125). Расстояние от точки нагрузки найдём по формуле $R = \sqrt{r^2 + z^2}$ (теорема Пифагора). Так как в данном случае точка расположена прямо под нагрузкой, то $r = 0$ м.
2. Прделаем те же действия, что и в пункте 1, но теперь $r = 5$ м.
3. Прделаем те же действия, что и в пункте 1, в данном случае $r = 0$ м, а глубина $z = z_1 + z_2 = 12$ м.

Решение

1. Из формулы (1) Буссинеска получаем:

$$\Delta\sigma_{zA} = \frac{3Pz^3}{2\pi R^5} = \frac{3Pz^3}{2\pi(\sqrt{r^2 + z^2})^5} = \frac{3 \times 300 \times 7^3}{2\pi(\sqrt{0^2 + 7^2})^5} = \frac{308\,700}{2\pi \times 16\,807} = 3,98 \text{ кПа (кН/м}^2\text{)}.$$

2. Аналогично:

$$\Delta\sigma_{zB} = \frac{3Pz^3}{2\pi(\sqrt{r^2 + z^2})^5} = \frac{3 \times 300 \times 7^3}{2\pi(\sqrt{5^2 + 7^2})^5} = 1,06 \text{ кПа (кН/м}^2\text{)}.$$

3. Аналогично:

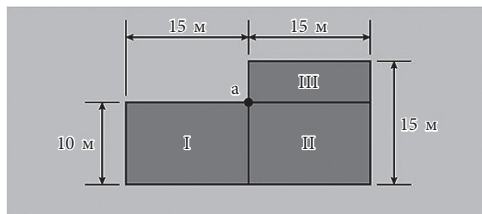
$$\Delta\sigma_{zC} = \frac{3Pz^3}{2\pi(\sqrt{r^2 + z^2})^5} = \frac{3 \times 300 \times 12^3}{2\pi(\sqrt{0^2 + 12^2})^5} = 0,99 \text{ кПа (кН/м}^2\text{)}.$$

Сравнив ответы 1, 2 и 3, можно видеть, что при концентрированной нагрузке P увеличение напряжения $\Delta\sigma_z$ в грунте уменьшается по мере увеличения расстояния R от точки нагрузки.

Вычисление увеличения напряжения грунта под нагрузкой (случай плоскостной нагрузки)

Задача 3

Как показано на рисунке, на плоский грунт действует плоскостная нагрузка (прямоугольная) $q = 100 \text{ кН/м}^2$. Вычислите увеличение вертикально направленного напряжения $\Delta\sigma_z$ для точки А, находящейся прямо под точкой а на глубине $z = 5 \text{ м}$.



Рассуждение

Чтобы найти увеличение вертикально направленного напряжения $\Delta\sigma_z$ для точки, находящейся прямо под углом плоскости, нужно вычислить по формуле Ньюмарка или по графику (см. стр. 129) значение влияния I_σ и подставить его в формулу $\Delta\sigma_z = I_\sigma \cdot q$. Если же искомая точка не является вершиной угла, то надо разделить плоскость на прямоугольники так, чтобы она стала вершиной (метод прямоугольного деления), и применить принцип суперпозиции. Обозначим за B длинную сторону прямоугольника, а за L – его короткую сторону.

Решение

Для обоих прямоугольников I и II $m = B/z = 15/5 = 3$, $n = L/z = 10/5 = 2$, значит, значение влияния I_σ будет следующим:

$$I_\sigma = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + 1 + m^2n^2} \times \frac{m^2 + n^2 + 2}{m^2 + n^2 + 1} + \tan^{-1} \frac{mn}{\sqrt{m^2 + n^2 + 1}} \right) \\ = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{3 \times 2\sqrt{3^2 + 2^2 + 1}}{3^2 + 2^2 + 1 + 3^2 \times 2^2} \times \frac{3^2 + 2^2 + 2}{3^2 + 2^2 + 1} + \tan^{-1} \frac{3 \times 2}{\sqrt{3^2 + 2^2 + 1}} \right) = \frac{1}{2\pi} (0,4811 + 1,0132).$$

Значение влияния I_σ , найденное по графику (см. стр. 129), будет:

$$I_\sigma = 0,238.$$

Следовательно, если подставить вычисленное значение влияния I_σ в формулу, то для прямоугольников I и II ($q = 100 \text{ кН/м}^2$) увеличение напряжения $\Delta\sigma_z$ в точке А будет:

$$\Delta\sigma_{zI} = \Delta\sigma_{zII} = I_\sigma \cdot q = \frac{100}{2\pi} (0,4811 + 1,0132) = 23,782 \text{ кПа (кН/м}^2\text{)}.$$

Для прямоугольника III ($q = 100 \text{ кН/м}^2$) $m = 15/5 = 3$, $n = 5/5 = 1$. Значит, аналогично вышесказанному:

$$\Delta\sigma_{zIII} = I_\sigma \cdot q = \frac{100}{2\pi} (0,5427 + 0,7353) = 20,340 \text{ кПа (кН/м}^2\text{)}.$$

Следовательно, по принципу суперпозиции увеличение вертикально направленного напряжения $\Delta\sigma_z$ в точке А будет равно:

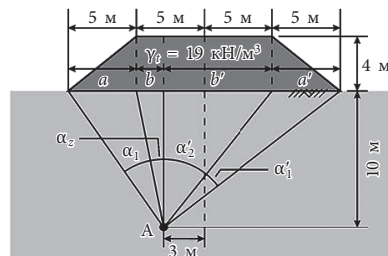
$$\Delta\sigma_z = \Delta\sigma_{zI} + \Delta\sigma_{zII} + \Delta\sigma_{zIII} = 23,782 + 23,782 + 20,340 = 67,9 \text{ кПа (кН/м}^2\text{)}.$$

Задача решена.

Вычисление увеличения напряжения грунта под нагрузкой (случай трапециевидной полосовой нагрузки)

Задача 4

Как показано на рисунке, на почву действует грунтовая трапециевидная ленточная нагрузка ($\gamma_t = 19 \text{ кН/м}^3$). Вычислите увеличение вертикально направленного напряжения $\Delta\sigma_z$ для точки А, находящейся на глубине $z = 10 \text{ м}$ от поверхности земли.



Рассуждение

Разделим пространство от точки А на левую и правую части и, используя формулу Остенберга (см. стр. 131), вычислим в радианах углы $\alpha_1, \alpha_2, \alpha'_1, \alpha'_2$. Найдём значения влияния для левой (K_1) и правой (K_2) частей и, сложив K_{1q} и K_{2q} , вычислим увеличение напряжения $\Delta\sigma_z$.

Решение

Для левой части относительно точки А $a = 5 \text{ м}, b = 2 \text{ м}, z = 10 \text{ м}$. Следовательно:

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \frac{a+b}{z} - \tan^{-1} \frac{b}{z} = \tan^{-1} \frac{2}{10} = 0,413 \text{ рад};$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \frac{b}{z} = \tan^{-1} \frac{2}{10} = 0,197 \text{ рад}.$$

На основании этого найдём K_1 :

$$K_1 = \frac{1}{\pi} \left\{ \left(\frac{a+b}{a} \right) (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{b}{a} \alpha_2 \right\} = \frac{1}{\pi} \left\{ \left(\frac{5+2}{5} \right) (0,413 + 0,197) - \frac{2}{5} 0,197 \right\} = 0,247.$$

Для правой части относительно точки А $a' = 5 \text{ м}, b' = 8 \text{ м}, z = 10 \text{ м}$. Следовательно:

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \frac{a'+b'}{z} - \tan^{-1} \frac{b'}{z} = \tan^{-1} \frac{5+8}{10} - \tan^{-1} \frac{8}{10} = 0,240 \text{ рад};$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \frac{b'}{z} = \tan^{-1} \frac{8}{10} = 0,675 \text{ рад}.$$

На основании этого найдём K_2 :

$$K_2 = \frac{1}{\pi} \left\{ \left(\frac{a'+b'}{a'} \right) (\alpha'_1 + \alpha'_2) - \frac{b'}{a'} \alpha'_2 \right\} = \frac{1}{\pi} \left\{ \left(\frac{5+8}{5} \right) (0,240 + 0,675) - \frac{8}{5} 0,675 \right\} = 0,413.$$

Нагрузка на единицу площади будет $q = \gamma_t H = 19 \times 4 = 76 \text{ кН/м}^2$, следовательно, увеличение вертикально направленного напряжения $\Delta\sigma_z$ в точке А будет равно:

$$\Delta\sigma_z = K_{1q} + K_{2q} = 0,247 \times 76 + 0,413 \times 76 = 50,14 \text{ кПа (кН/м}^2\text{)}.$$

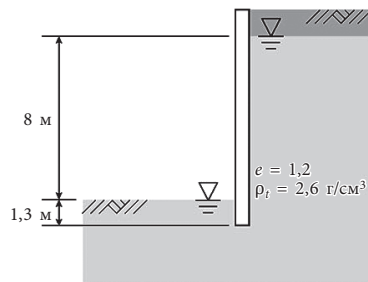
Задача решена.

Вычисление напряжения грунта из-за фильтрационного потока (случай плоскостной нагрузки)

Задача 5

Как показано на рисунке, песчаный грунт был выкопан до уровня подземных вод. Определите, образуются ли в данном случае зыбучие пески. Если зыбучие пески могут образоваться, то какой должна быть глубина укоренения D_f разделительного блока, чтобы предотвратить их образование?

Считаем, что $\rho_w = 1,0 \text{ г/см}^3$.



Рассуждение

Используя формулу со стр. 141 для коэффициента безопасности $F_s = i_c/i \geq 1$ (метод предельного градиента напора), оценим возможность возникновения зыбучих песков. Если зыбучие пески могут образоваться, то есть $i_c/i < 1$, то рассчитаем, при какой глубине укоренения D_f предельный градиент напора i_c будет не меньше градиента напора i . Здесь h – разница уровней воды с разных сторон разделительного блока.

Решение

Оценка образования зыбучих песков:

$$\text{Коэффициент безопасности } F_s = \frac{i_c}{i} = \frac{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)(h - 2D_f)}{(1 + e)h} = \frac{\left(\frac{2,6}{1,0} - 1\right) \times (8 + 2 \times 1,3)}{(1 + 1,2) \times 8} = 0,964 < 1.$$

Значит, зыбучие пески могут образоваться.

Расчёт глубины укоренения D_f :

$$\frac{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right)(h + 2D_f)}{(1 + e)h} \geq 1.$$

Значит,

$$D_f \geq \frac{1}{2} \times \left\{ \frac{(1 + e)h}{\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1} - h \right\} = \frac{1}{2} \times \left\{ \frac{(1 + 1,2) \times 8}{\frac{2,6}{1,0} - 1} - 8 \right\} = 1,5 \text{ м.}$$

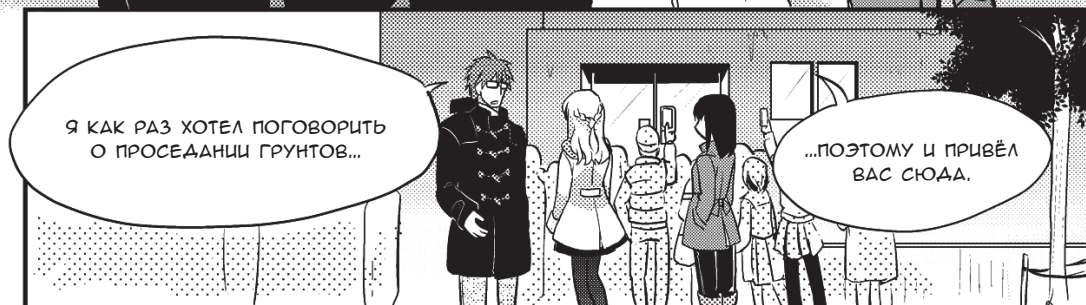
Следовательно, если глубина укоренения будет не менее 1,5 м, это обеспечит защиту от образования зыбучих песков.

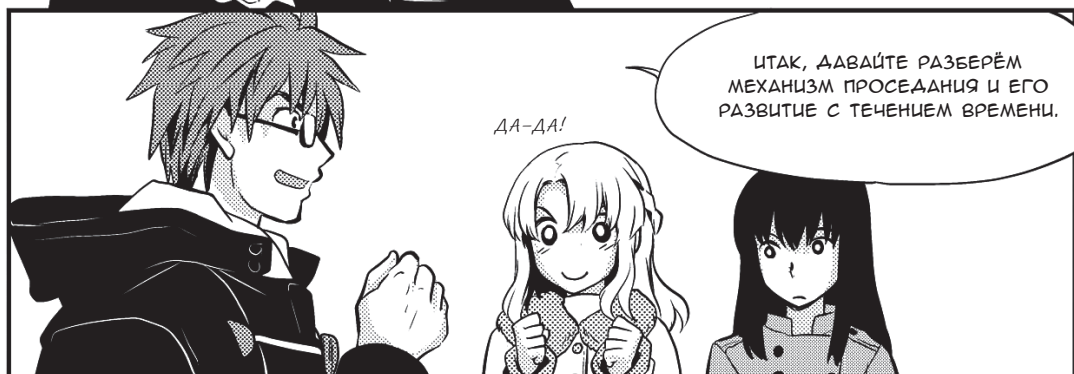
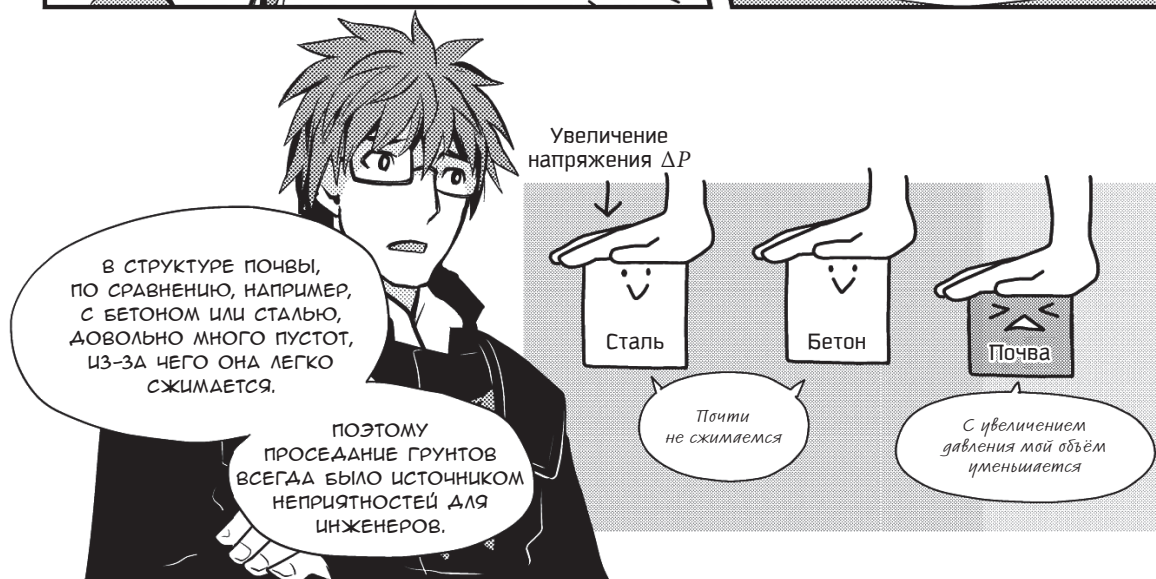


ГЛАВА 5

КОНСОЛИДАЦИЯ ГРУНТА

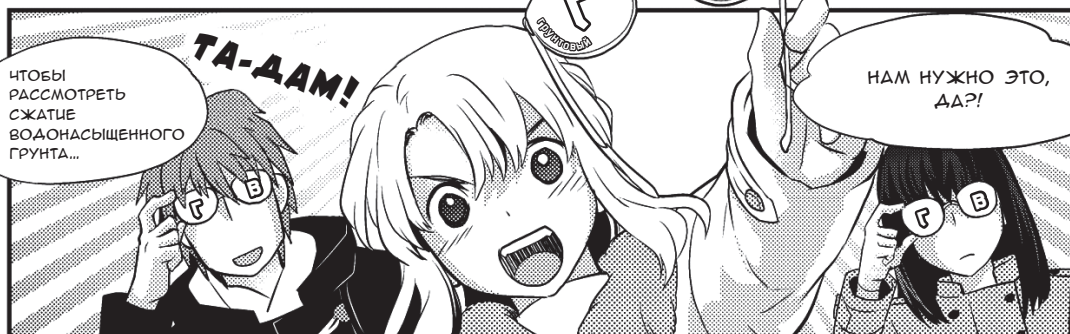






¹ Уменьшение объёма из-за увеличения давления.

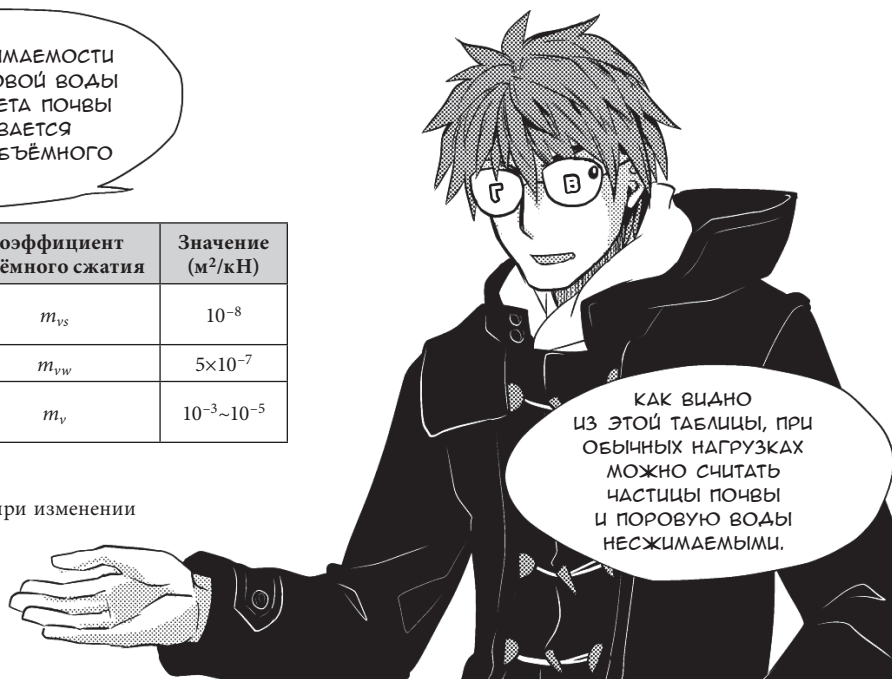
5.1. ЧТО ТАКОЕ КОНСОЛИДАЦИЯ ГРУНТА?

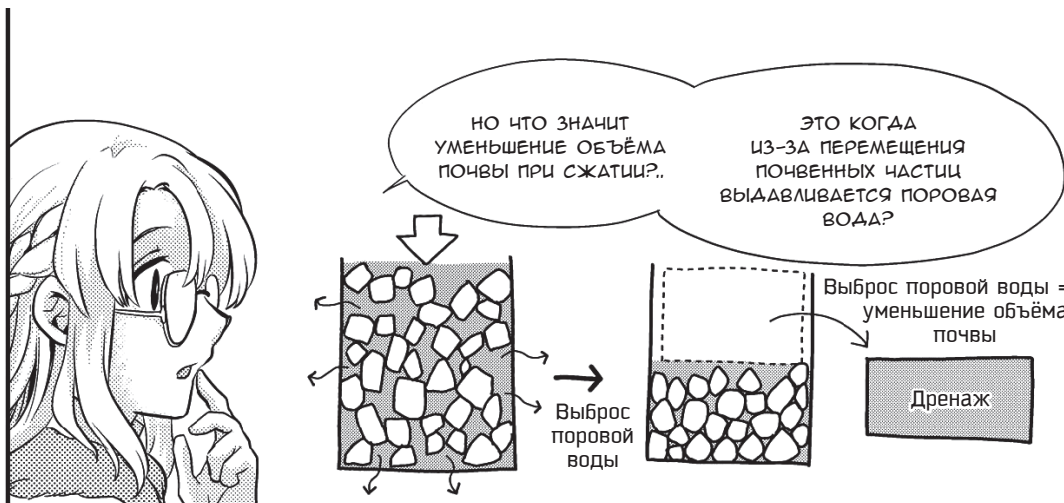


ВЕРНО. СТЕПЕНЬ СЖИМАЕМОСТИ ЧАСТИЦ ПОЧВЫ, ПОРОВОЙ ВОДЫ И ГРУНТОВОГО СКЕЛЕТА В ЦЕЛОМ ОПИСЫВАЕТСЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ ОБЪЁМНОГО СЖАТИЯ².

	Коэффициент объёмного сжатия	Значение (м ² /кН)
Почвенные частицы	m_{vs}	10^{-8}
Поровая вода	m_{vw}	5×10^{-7}
Почва (грунтовый скелет)	m_v	$10^{-3} \sim 10^{-5}$

² Изменение объёма (ΔV_v) при изменении давления (ΔP).



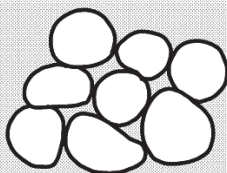


ЕСЛИ СТЕПЕНЬ
ПРОСЕДАНИЯ БУДЕТ
ВОЗРАСТАТЬ, ТО ВЫИДЕТ
МНОГО ПОРОВОЙ ВОДЫ.

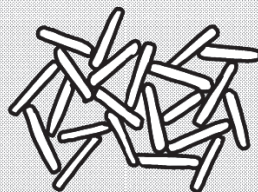
ТО ЕСТЬ ПОЛУЧИТСЯ ПОЧВА
С ВЫСОКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ
ПУСТОТНОСТИ e И ВЫСОКОЙ
ВЛАЖНОСТЬЮ w ?

КСТАТИ ГОВОРЯ,
МЫ УЧИЛИ ВРОДЕ ПРО ПОЧВЫ
С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ СЖАТИЯ...
КАЖЕТСЯ, ЭТО СН (ГЛИНИСТЫЕ
ПОЧВЫ С ВЫСОКИМ ПРЕДЕЛОМ
ТЕКУЧЕСТИ)?..
(СМ. СТР. 59.)

АА-АА!
НАПРИМЕР, У СВЯЗНЫХ
ГРУНТОВ С ВЫСОКИМ
КОЭФФИЦИЕНТОМ
ПУСТОТНОСТИ И ВОЛОКНИСТОЙ
СТРУКТУРОЙ СЖИМАЕМОСТЬ
БУДЕТ БОЛЕЕ ВЫСОКОЙ ПО
СРАВНЕНИЮ С ПЕСЧАНЫМИ
ГРУНТАМИ С ЗЕРНИСТОЙ
СТРУКТУРОЙ.



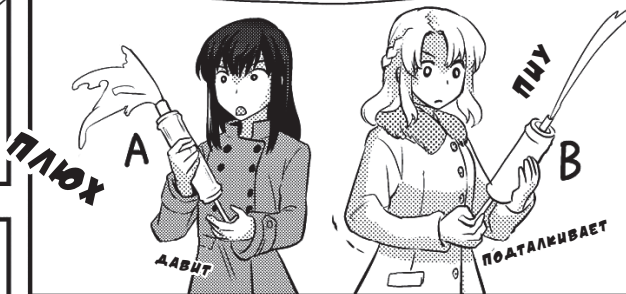
Зернистая структура



Волокнистая структура

А ВОТ ВОПРОСЕ
БЫЛО СКАЗАНО
"В ДОЛГОСРОЧНОЙ
ПЕРСПЕКТИВЕ".
ЧТО ЭТО ЗНАЧИТ?

ЕСЛИ СНАЧАЛА НАДАВИТЬ
НА ПОРШЕНЬ, ТО ДАВЛЕНИЕ ВОДЫ
В СТОЛЕ УВЕЛИЧИТСЯ, И ВОДА
ВЫЛБЕТСЯ НАРУЖУ.



ОТЛИЧНО ПОДМЕЧЕНО!
ВОЗЬМИТЕ, К ПРИМЕРУ,
ВОДЯНЫЕ ПУШКИ.



ЕСЛИ ЖЕ ЗАТЕМ ОСТАНОВИТЬ
ПОРШЕНЬ, ПЕРЕСТАВ ДАВИТЬ, ТО
ЧЕРЕЗ НЕКОТОРОЕ ВРЕМЯ СТРУЯ
ВОДЫ ОСЛАБНЕЕТ.



ЕСЛИ СРАВНИВАТЬ
ВЫБРОС ВОДЫ ВСЛЕДСТВИЕ
КОНСОЛИДАЦИИ ГРУНТА С ВЫСТРЕЛОМ
ИЗ ВОДЯНОЙ ПУШКИ, ТО ЧЕМУ БУДЕТ
СООТВЕТСТВОВАТЬ В ПОЧВЕ
РАЗМЕР ВЫХОДНОГО
ОТВЕРСТИЯ
ПУШКИ?

ЧЕМ ЭТО ОТВЕРСТИЕ МЕНЬШЕ,
ТЕМ ВОДЕ ТРУДНЕЕ
ВЫПЛЕСКИВАТЬСЯ...

А! ЭТО ЖЕ
ВОДОПРОНИ-
ЦАЕМОСТЬ!

ТОЧНО! СВЯЗНЫМ ГРУНТАМ
С НИЗКОЙ ВОДОПРОНИЦАЕ-
МОСТЬЮ ТРЕБУЕТСЯ
ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОЕ ВРЕМЯ
ДЛЯ КОНСОЛИДАЦИИ.
БОЛЕЕ ТОГО, ЕСЛИ КОЭФФИЦИЕНТ
ПУСТОТНОСТИ e И ВЛАЖНОСТЬ w
БОЛЬШЕ, ТО В ДОЛГОСРОЧНОЙ
ПЕРСПЕКТИВЕ СТЕПЕНЬ
ПРОСЕДАНИЯ БУДЕТ
ЗНАЧИТЕЛЬНОЙ.

ДРУГИМИ СЛОВАМИ,
ПРИ КОНСОЛИДАЦИИ ПОЧВЫ
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ
СЖАТИЯ ОДНОВРЕМЕННО
ПРОИСХОДЯТ ДЕФОРМАЦИЯ
И ПРОСАЧИВАНИЕ
ВОДЫ.

И НАОБОРОТ,
ПЕСЧАНЫЕ ГРУНТЫ С ВЫСОКОЙ
ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬЮ ЛЕГКО
ВЫПУСКАЮТ ВОДУ ИЗ ПОР,
И ПОЭТОМУ КОНСОЛИДАЦИЯ
ПРОХОДИТ БЫСТРО, АА?

ПРИ ЭТОМ
КОЭФФИЦИЕНТ ПУСТОТ-
НОСТИ e И ВЛАЖНОСТЬ w
ВЛИЮТ НА СТЕПЕНЬ
ПРОСЕДАНИЯ ГРУНТА,
А ЕГО ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ
ОКАЗЫВАЕТ ВЛИЯНИЕ
НА ВРЕМЯ, ТРЕБУЕМОЕ
ДЛЯ КОНСОЛИДАЦИИ.

НАДО ЖЕ,

УЖЕ СТОЛЬКО
ВРЕМЕНИ...

ОХ, ЧТО-ТО У МЕНЯ
ВАРУГ ГОЛОВА
РАЗБОЛЕЛАСЬ...
Я, ПОЖАЛУЙ,
УЖЕ ПОЕДУ ДОМОЙ.

Ну, вот.
Поправляйся...

ХА!

УДАЧИ!

ХЛОП

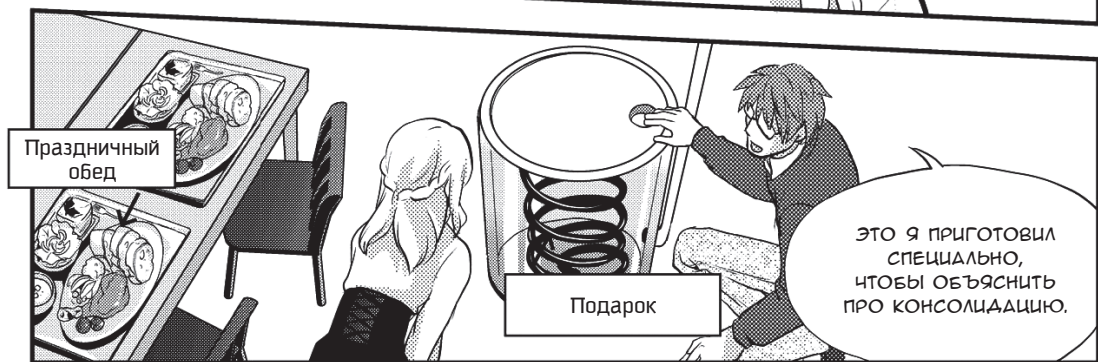
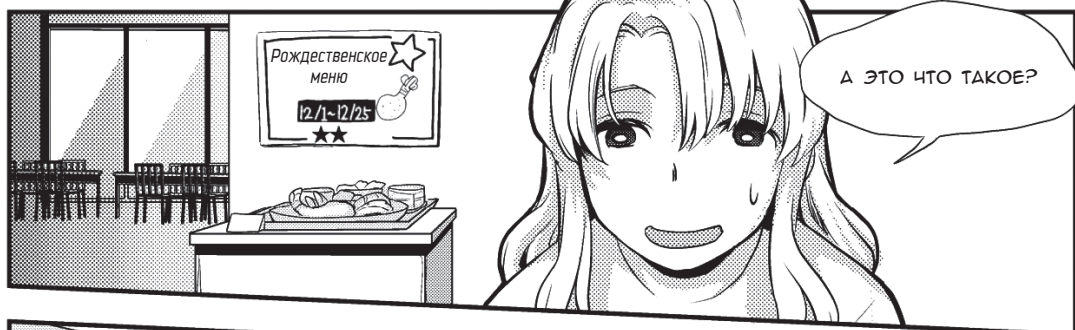
А Я И ПОДАРОК
ПРИГОТОВИЛ.
ПРОДОЛЖИМ РАЗГОВОР
ЗА УЖИНОМ, ХОРОШО?

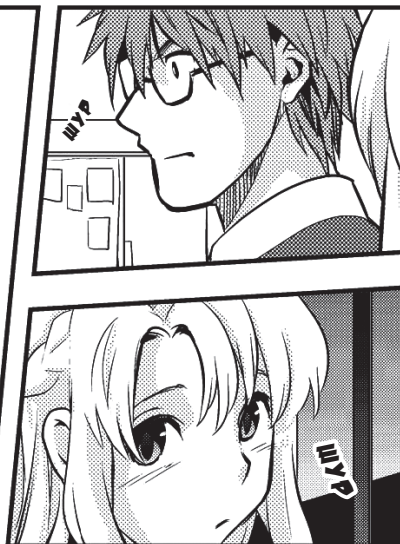
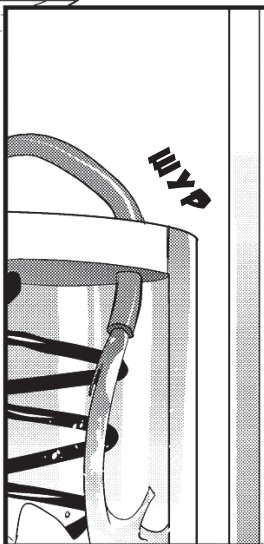
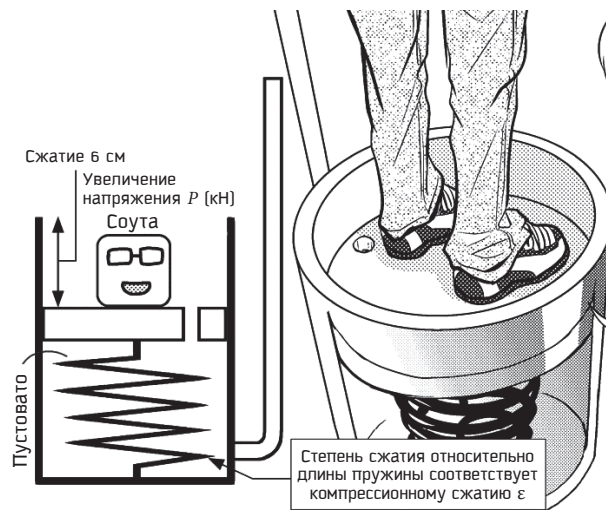
Правда, мы вдвоем
только остались...

СТУК СЕРДЦА

ЭЭЭ...

5.2. ПРОЦЕСС КОНСОЛИДАЦИИ





Напряжение, возникающее в пружине под воздействием нагрузки, соотносим с увеличением эффективного напряжения $\Delta\sigma'$

Губчатая пробка

Поровая вода

булькает

Напряжение, возникающее в поровой воде под воздействием нагрузки, соотносим с избыточным давлением поровой воды Δu

ПРЕЖДЕ ВСЕГО КАКИМ БУДЕТ УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ $\Delta\sigma'$ В ПРУЖИНЕ В МОМЕНТ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НАГРУЗКИ?

ЕСЛИ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ НИЗКАЯ, ТО ВОДА НЕ БУДЕТ СРАЗУ ВЫЛИВАТЬСЯ...

А ЗНАЧИТ, ПОРШЕНЬ НЕ ОПУСТИТСЯ, ПРУЖИНА НЕ СОЖМЁТСЯ И НАПРЯЖЕНИЕ НЕ ВОЗНИКНЕТ, ДА?

АГА, НУ-КА!

шОк

$t = 0$ Вода в манометре поднялась

Сразу после возникновения нагрузки поршень не опускается

Δu

Δu

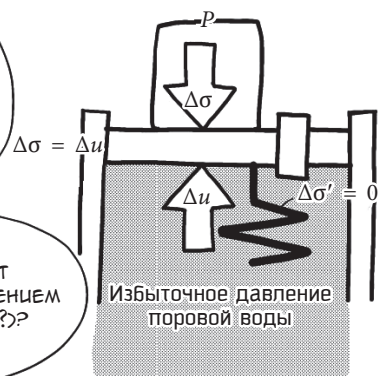
ЧТО ЖЕ СДЕРЖИВАЕТ РОСТ НАПРЯЖЕНИЯ P ПОСЛЕ ТОГО, КАК Я ЗАБРАЛСЯ НА ПОРШЕНЬ? ЕСЛИ УВЕЛИЧЕНИЕ ОБЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ $\Delta\sigma$ РАССЧИТЫВАЕТСЯ КАК:
 $\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta u$.

НУ... РАЗ ПРУЖИНА НЕ СЖИМАЕТСЯ, ЗНАЧИТ, РОСТ ЭФФЕКТИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ $\Delta\sigma'$ НУЛЕВОЙ...

А, ВОДЯНОЙ МАНОМЕТР!

ВЕРНО ПОДМЕЧЕНО! В МОМЕНТ НАЧАЛА КОНСОЛИДАЦИИ ($t = 0$) УВЕЛИЧЕНИЕ ОБЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ $\Delta\sigma$ УРАВНОВЕШИВАЕТСЯ ИЗБЫТОЧНЫМ ДАВЛЕНИЕМ ПОРОВОЙ ВОДЫ Δu (СМ. СТР. 115).

А ЧТО ЖЕ БУДЕТ ПРОИСХОДИТЬ С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ ($0 < t < \infty$)?



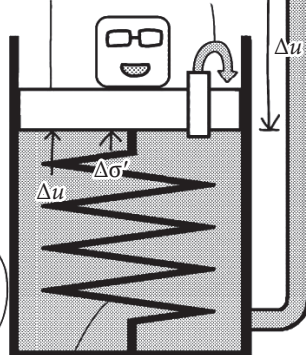
ИЗ-ЗА ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ПОРОВОЙ ВОДЫ Δu ВОДА НАЧНЁТ ПОНЕМОГУ ВЫХОДИТЬ НАРУЖУ, И ПОРШЕНЬ СТАНЕТ ОПУСКАТЬСЯ...

А ИЗ-ЗА СЖАТИЯ ПРУЖИНЫ И УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ $\Delta\sigma'$ СТАНЕТ БОЛЬШИМ, ДА?

Возникает $\Delta\sigma$, поэтому уровень воды в манометре снижается
 $0 < t < \infty$

Поршень опускается

Просачивается вода



Пружина сжимается



Пружина, сжимающаяся при повышении напряжения P ($\Delta\sigma$) на 6 см, сейчас сжалась на 3 см... Значит, рост эффективного напряжения равен $\Delta\sigma' = \Delta\sigma/2$, верно?



Ага-ага.



Тогда:

Увеличение общего напряжения $\Delta\sigma$ = увеличение эффективного напряжения $\Delta\sigma'$ + избыточное давление поровой воды Δu .

А значит,

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta\sigma'}{2} + \Delta u.$$

Избыточное давление поровой воды Δu в цилиндре равно $\Delta\sigma/2$!



Отлично! В нашем случае поперечное сечение $A = 1 \text{ м}^2$, то есть $\Delta\sigma = P/A = P$. И избыточное давление поровой воды можно выразить как $\Delta u = P/2$. Надеюсь, теперь ты получила представление об изменении напряжения в грунте и степени проседания в связи с процессом консолидации.



Напоследок подумай о консолидации в конечный момент времени ($t = \infty$).

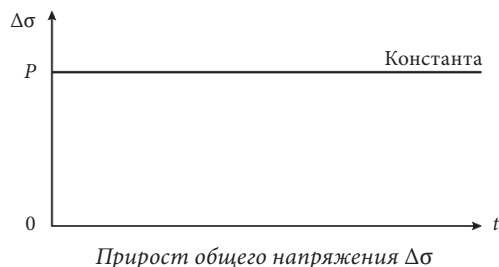


Когда поршень опускается до положения, при котором нагрузка и жёсткость пружины уравновешены (в нашем случае сжатие на 6 см), то вся нагрузка поддерживается пружиной... Если при этом избыточное давление поровой воды рассеется полностью и станет нулевым, то разве дренаж воды не прекратится?



Именно так! А теперь изобразим на графике рост общего напряжения $\Delta\sigma$, избыточное давление поровой воды Δu и рост эффективного напряжения $\Delta\sigma'$ в процессе консолидации.

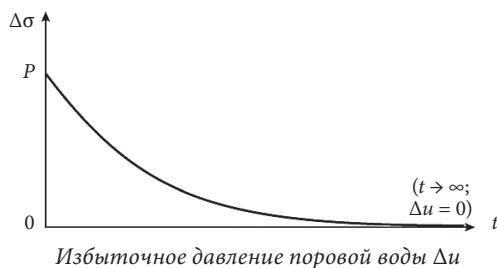
Сначала изобразим изменение общего напряжения $\Delta\sigma = P$, которое всё время от $t = 0$ до $t = \infty$ будет постоянным.



А каким будет избыточное давление поровой воды Δu ?



В момент времени $t = 0$ избыточное давление поровой воды Δu будет равно приросту напряжения P (приросту общего напряжения $\Delta\sigma$). С течением же времени избыточное давление будет постепенно рассеиваться по мере вытеснения воды, и при $t = \infty$ будет $\Delta u = 0$.

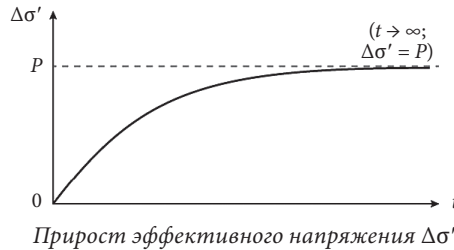




Прирост эффективного напряжения $\Delta\sigma'$, наоборот, будет увеличиваться по мере рассеивания избыточного давления поровой воды Δu . Так как:

$$\Delta\sigma' = \Delta\sigma - \Delta u,$$

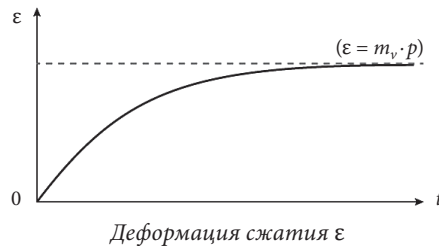
то изменение эффективного напряжения $\Delta\sigma'$ будет симметрично избыточному давлению поровой воды Δu .



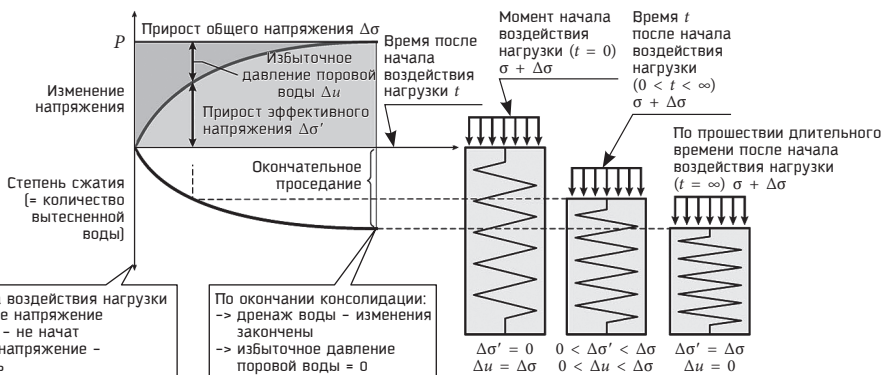
Ну и напоследок, что будет с деформацией сжатия ϵ^3 ?



Как видно на нашей модели с пружиной, по мере роста эффективного напряжения $\Delta\sigma'$ деформация сжатия ϵ тоже увеличивается, и её график будет иметь ту же форму.



Совершенно верно. Если подытожить процесс консолидации с течением времени, то вот что получается.



³ Коэффициент изменения длины или объема тела вследствие сжатия по отношению к исходному значению (в данном случае имеется в виду объем).

5.3. УРАВНЕНИЕ КОНСОЛИДАЦИИ



А теперь попробуем объяснить на основании нашей модели консолидацию водонасыщенного глинистого слоя в зависимости от изменения общего напряжения σ , эффективного напряжения σ' , порового давления u и избыточного порового давления Δu .



До начала консолидации давление поровой воды u соответствует гидростатическому давлению. Сразу после начала воздействия нагрузки ($t = 0$) вода не вытесняется, рост общего напряжения $\Delta\sigma$ обеспечивается избыточным давлением поровой воды Δu . Затем вследствие Δu начинается вытеснение воды и процесс консолидации.



После чего... из-за дренажа воды избыточное давление поровой воды Δu рассеивается, и вместе с тем возникает увеличение эффективного напряжения $\Delta\sigma'$. Когда же увеличение общего напряжения $\Delta\sigma$ полностью поддерживается увеличением эффективного напряжения $\Delta\sigma'$, то Δu становится нулевым. Другими словами, давление поровой воды u снова становится гидростатическим, вытеснение воды прекращается, и консолидация завершается.

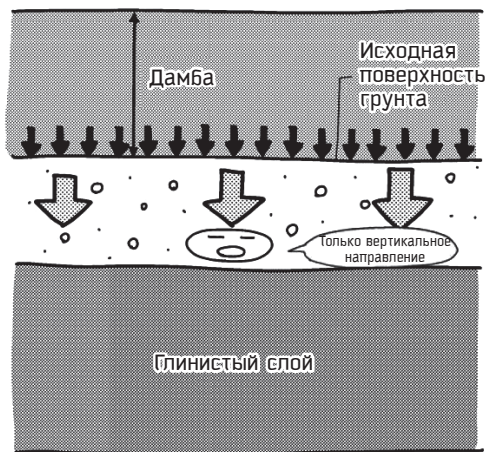


КАК-ТО ТАК ВЫХОДИТ, ПРАВИЛЬНО?

ВЕРНО!
И В РЕАЛЬНЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ ПРОЦЕСС КОНСОЛИДАЦИИ ПРОИСХОДИТ ПО ТАКОЙ ЖЕ СХЕМЕ.

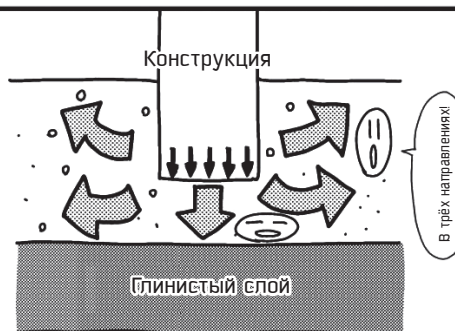
КОГДА ГРУНТОВЫЙ СКЕЛЕТ ВОСПРИНИМАЕТСЯ КАК УПРУГОЕ ТЕЛО, ПОДОБНО ПРУЖИНЕ В НАШЕЙ МОДЕЛИ, А ЕГО ДЕФОРМАЦИЯ ИЗ-ЗА ДВИЖЕНИЯ ПОРОВОЙ ВОДЫ И КОНСОЛИДАЦИИ РАССМАТРИВАЕТСЯ ТОЛЬКО В ВЕРТИКАЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ, ТО ТАКАЯ КОНСОЛИДАЦИЯ НАЗЫВАЕТСЯ ОДНОМЕРНОЙ.

ОДНОМЕРНАЯ
КОНСОЛИДАЦИЯ
ОГРАНИЧЕНА
ВЕРТИКАЛЬНЫМ
НАПРАВЛЕНИЕМ?

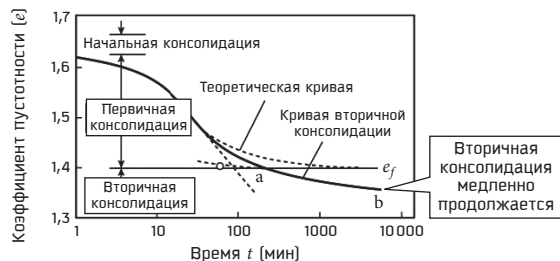


НАПРИМЕР, КОГДА НАГРУЗКА
ЗАНИМАЕТ БОЛЬШУЮ ПЛОЩАДЬ,
ТО БОКОВАЯ ДЕФОРМАЦИЯ
ПОЧТИ НЕ ВОЗНИКАЕТ, ТАК КАК
СДЕРЖИВАЕТСЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ
ДЕФОРМАЦИЕЙ.

ПОЭТОМУ
КОГДА КОНСОЛИДАЦИЯ ПРОИСХОДИТ
В ЕСТЕСТВЕННЫХ СЛОЯХ ГЛИНЫ ИЛИ
В ПРОЦЕССЕ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ПОЧВ,
ТО ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ
ЯВЛЯЕТСЯ НАСТОЛЬКО МАЛЕНЬКОЙ,
ЧТО ЕЮ МОЖНО ПРЕНЕБРЕЧЬ
И ПРИНИМАТЬ ВО ВНИМАНИЕ ТОЛЬКО
ВЕРТИКАЛЬНУЮ ДЕФОРМАЦИЮ.



ОДНАКО КОГДА НАГРУЗКА
ДЕЙСТВУЕТ В УЗКОМ ДИАПАЗОНЕ,
ТО ДЕФОРМАЦИЯ ПРОИСХОДИТ
И В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ.
ПРОИСХОДИТ ТРЁХМЕРНОЕ УПЛОТНЕНИЕ, КОТОРОЕ
НЕЛЬЗЯ ОПИСАТЬ ТЕОРЕТИЧЕСКИ. КРОМЕ ТОГО,
ТАК КАК ГРУНТ НЕ ЯВЛЯЕТСЯ ИДЕАЛЬНО УПРУГИМ
ТЕЛОМ, ТО ДАЖЕ ПОСЛЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО
ОКОНЧАНИЯ КОНСОЛИДАЦИИ НА САМОМ ДЕЛЕ
УПЛОТНЕНИЕ БУДЕТ ПРОДОЛЖАТЬСЯ.
ЭТО ЯВЛЕНИЕ НАЗЫВАЕТСЯ
ПОЛУЧЕСТЬЮ⁴.



Первичная и вторичная консолидация



АА, НЕПРОСТАЯ ЗАДАЧА...

⁴ Явление продолжающейся деформации объекта под постоянной нагрузкой.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНАЯ
КОНСОЛИДАЦИЯ, КОТОРАЯ
НЕ МОЖЕТ БЫТЬ
ОБЪЯСНЕНА ТЕОРИЕЙ
ТЕРЦАГИ О ПЕРВИЧНОЙ
КОНСОЛИДАЦИИ, НАЗЫВАЕТСЯ
ВТОРИЧНОЙ КОНСОЛИДАЦИЕЙ.
РАССМОТРИМ ПЕРВИЧНУЮ
КОНСОЛИДАЦИЮ НА ОСНОВЕ
ТЕОРИИ АНАЛИЗА ОДНОМЕРНОГО
УПЛОТНЕНИЯ.

ОДНОМЕРНАЯ
ПЕРВИЧНАЯ
КОНСОЛИДАЦИЯ...

1

Почва в составе
грунта однородна

2

Пустоты почвы
полностью
насыщены водой

3

Частицы почвы
и поровая вода
несжимаемы

4

Поровая вода
движется только
в вертикальном
направлении
(по закону Дарси)

5

Консолидация
почвы происходит
только
в вертикальном
направлении

6

Коэффициент филь-
трации k , коэффициент
объёмного сжатия m_v
в процессе консолидации
постоянны и не меняются
при давлении
консолидации p

чтобы вывести
основное уравнение,
описывающее процесс
консолидации, для
начала определим
следующие условия.

7

Изменение коэффициента пустотности e по отношению к давлению консолидации p постоянно и демонстрирует упругие свойства. Кроме того, предполагается, что напряжение распределено равномерно в горизонтальном сечении грунта и что свойства грунта в небольшом образце соответствуют свойствам реального грунта.

КАК МНОГО...

И ВОТ КАКИМ БУДЕТ
УРАВНЕНИЕ КОНСОЛИДАЦИИ,
ВЫВЕДЕННОЕ НА ОСНОВАНИИ
ДААННЫХ ПРЕДПОСЫЛОК.

Уравнение одномерной консолидации Терцаги

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{m_v \gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

Здесь u – избыточное давление поровой воды (в тексте обозначается как Δu); k – коэффициент фильтрации (см. стр. 92); m_v – коэффициент объёмного сжатия; γ_w – удельный вес воды; C_v – коэффициент консолидации



Следует обратить внимание в этой формуле на такой важный момент: вызванное нагрузкой рассеивание избыточного давления поровой воды Δu является функцией от времени t и глубины z . Решив это уравнение, Терцаги смог рассчитать для любой точки грунта степень консолидации в зависимости от времени.



А консолидация всех точек вызовет проседание поверхности грунта, да?



В правой части формулы находится так называемый коэффициент консолидации C_v (обычно измеряется в $\text{см}^2/\text{д}$), который показывает скорость процесса консолидации. Как видно из формулы, чем больше коэффициент фильтрации k и чем меньше коэффициент объёмного сжатия m_v , тем коэффициент консолидации больше.



Если водопроницаемость высокая, то избыточное давление поровой воды Δu сразу рассеется, и если сжимаемость низкая, то консолидация быстро завершится. Поэтому, аналогично с коэффициентом консолидации C_v , изменение с течением времени избыточного давления поровой воды Δu (левая часть формулы) пропорционально водопроницаемости (коэффициенту фильтрации k) и обратно пропорционально сжимаемости, верно?



Кстати, а как определяют этот коэффициент объёмного сжатия m_v ?



Необходимые для решения уравнения консолидации значения рассчитываются в лаборатории во время исследования консолидации путём пошагового увеличения нагрузки (см. стр. 177).

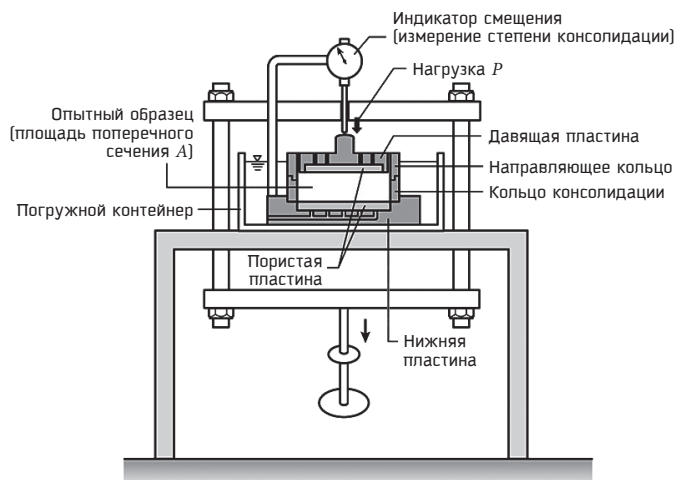
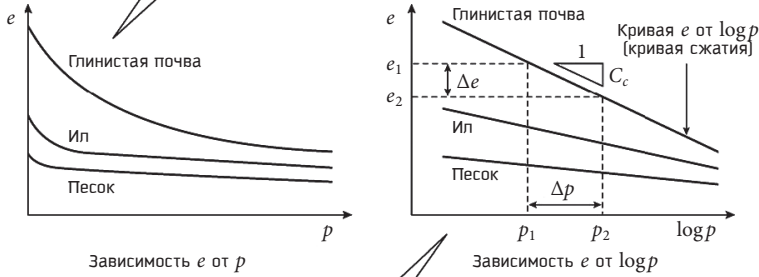


Схема устройства для испытания консолидации



Во время исследования консолидации постепенно увеличивают нагрузку, в ответ на давление p коэффициент пустотности e уменьшается. Если соотношение этих параметров изобразить графически на обычной шкале и на логарифмической, то получится вот что:

Так как в мелкозернистых почвах коэффициент пустотности e большой, то при одинаковом увеличении давления консолидации Δp уменьшение коэффициента пустотности Δe у мелкозернистых почв будет больше, как и сжимаемость



Как видно из приведенных графиков для зависимости e от p , уменьшение коэффициента пустотности Δe относительно увеличения давления консолидации Δp больше при малых значениях давления консолидации p , а зависимость e от $\log p$ практически линейна, за исключением периода, когда давление консолидации p мало.



Поскольку увеличение давления консолидации Δp и уменьшение коэффициента пустотности Δe зависят от типа почвы, то во время прогнозирования процесса консолидации для определения сжимаемости используют следующие два показателя:

- 1) показатель сжимаемости $C_c \rightarrow$ уменьшение коэффициента пустотности Δe относительно увеличения давления консолидации Δp ;
- 2) коэффициент объёмного сжатия $m_v \rightarrow$ деформация объёма ϵ_v относительно увеличения давления консолидации Δp .



Раз C_c – это Δe относительно Δp , то в результате исследования консолидации получится наклонная кривая, да?



Совершенно верно! Наклон прямого участка графика над точкой сгиба можно описать следующими формулами коэффициента сжимаемости a_v ($\text{м}^2/\text{кН}$) и показателя сжимаемости C_c ($\text{м}^2/\text{кН}$):

$$\text{коэффициент сжимаемости } a_v = \frac{e_1 - e_2}{p_2 - p_1} = \frac{-\Delta e}{\Delta p};$$

$$\text{показатель сжимаемости } C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log_{10} p_2 - \log_{10} p_1} = \frac{\Delta e}{\log_{10} \frac{p_1 + \Delta p}{p_1}}.$$

Значения давления консолидации p_1 и p_2 соответствуют e_1 и e_2 .



Кроме того, коэффициент объёмного сжатия m_v выражается как уменьшение объёма ($\varepsilon_v = \Delta V/V_1$) по отношению к увеличению давления консолидации Δp :

$$m_v = \frac{\varepsilon_v}{\Delta p} = \frac{\Delta V/V_1}{\Delta p} = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} \cdot \frac{1}{p_2 - p_1} = \frac{\Delta e/(1 + e)}{\Delta p} = \frac{a_v}{1 + e}$$

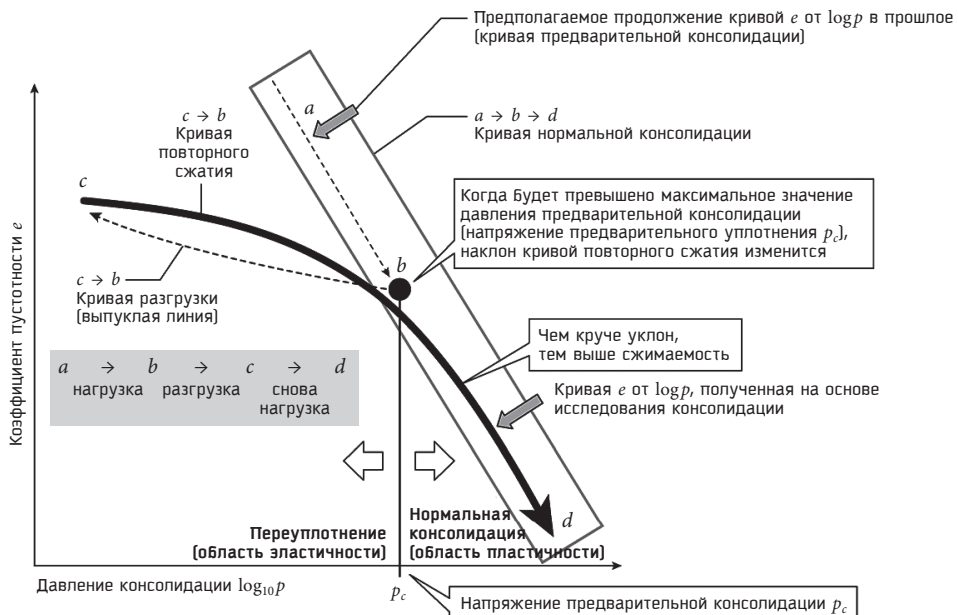
$$\left(= \frac{C_c}{(p_2 - p_1)(1 + e_1)} \cdot \log_{10} \frac{p_2}{p_1} \right).$$



Хм, формула, конечно, очень сложная и малопонятная. Но в целом, кажется, я немало разобралась с этими показателями.



Да, я понимаю, что эта тема не простая, но хочу, чтобы вы поняли ещё одну вещь о консолидации грунта. А именно то, что консолидация необратима. То есть даже если убрать давление консолидации (напряжение уплотнения) p , то уже уменьшенный коэффициент пустотности обратно не восстановится.



Напряжение предварительного уплотнения p_c
нормальная консолидация и переуплотнение



Например, берётся ненарушенная проба для исследования консолидации, если действовавшее до этих пор давление консолидации p , показанное пунктирной линией $a \rightarrow b$, будет снято, значение коэффициента пустотности e не вернётся к изначальному, и график будет выглядеть примерно, как показано пунктирной линией $b \rightarrow c$.



Когда образец подвергнется повторной нагрузке, консолидация продолжится, и какое-то время будет происходить как бы возвращение по предыдущему участку графика ($c \rightarrow b$). А когда давление консолидации p превысит напряжение предварительной консолидации, то график уплотнения будет экстраполировать кривую предварительной консолидации ($a \rightarrow b$) по линии ($b \rightarrow d$).



Давление консолидации p , разделяющее области эластичности и пластичности, называют напряжением предварительной консолидации p_c . Определяют его методом Касагранде (Casagrande) или методом Микаса (см. стр. 181).



А что это за нормальная консолидация и переуплотнение, отмеченные на графике?



Если процесс повторной консолидации происходит при давлении выше, чем напряжение предварительной консолидации p_c , то такая консолидация называется нормальной, а подобная глина называется нормально уплотнённой глиной. Если же в процессе первичной консолидации было применено давление большее, чем текущее, то есть процесс консолидации происходит при давлении ниже, чем напряжение предварительной консолидации p_c , то такая консолидация называется переуплотнением, а глина в подобном состоянии будет переуплотнённой.



Кстати, отношение напряжения предварительной консолидации p_c к давлению вскрыши в том месте, где был взят образец, называется коэффициентом переуплотнения OCR (over consolidation ratio). Для переуплотнённых глинистых почв $OCR > 0$, а для нормально уплотнённых глинистых почв $OCR = 1$.



Получается, что все значения, необходимые для прогнозирования степени и времени проседания грунта, рассчитываются на основании лабораторных исследований. Но условия в лаборатории не соответствуют полностью фактическим условиям на месте. Это следует принимать во внимание при трактовке полученных во время исследований результатов.

5.4. ПРОГНОЗ ПРОСЕДАНИЯ УПЛОТНЁННОГО ГРУНТА



Итак, для работы с грунтами, кроме понимания особенностей консолидации, необходимо составлять прогнозы, дающие ответы, например, на такие вопросы: «Как проседание грунта зависит от величины нагрузки?» и «Как меняется степень проседания с течением времени?».

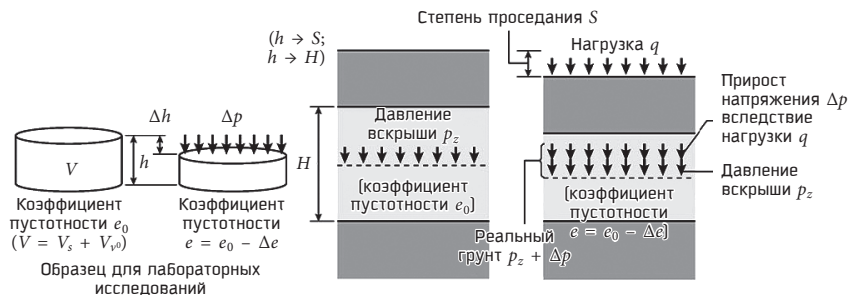


Схема процесса проседания консолидированного грунта



Для ответа на эти вопросы производят бурение на месте, изучают геологический состав грунта, его качества, определяют уровень грунтовых вод. Также берут ненарушенный образец из уплотнённого слоя для исследования консолидации. Исходя из предположения, что консолидация изъятых образцов происходит так же, как и в реальном грунте, по результатам исследования делаются прогнозы степени проседания консолидированного грунта и его зависимости от времени.

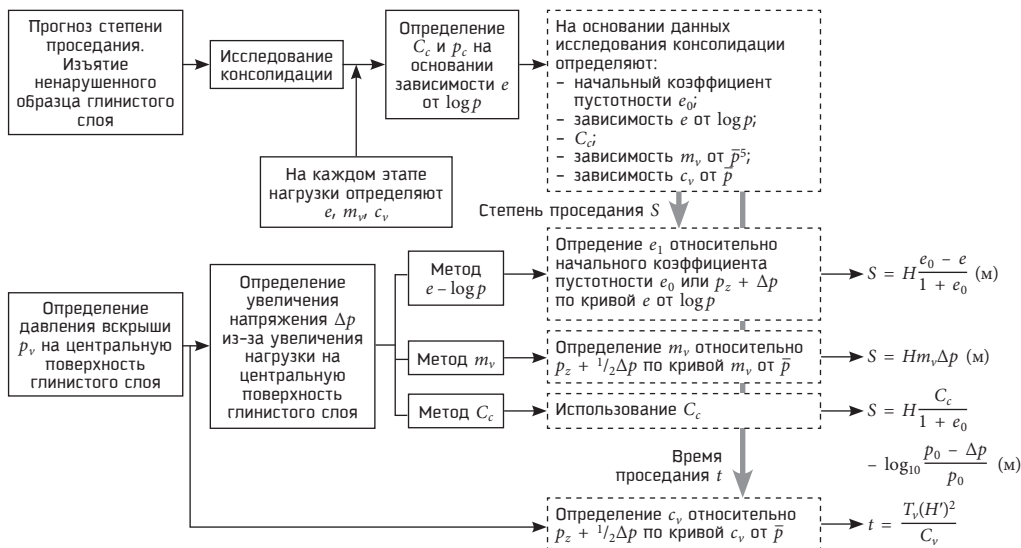


Схема расчёта проседания уплотнённого грунта

⁵ Среднее давление консолидации (кН/м²). $\bar{p} = \sqrt{p/p'}$, где p' – давление консолидации (кН/м²) сразу перед текущей нагрузкой.

⁶ Различается в зависимости от того, нормально консолидирован глинистый слой или переуплотнён.



А теперь разберём каждый пункт по очереди.



Ага, внимательно слушаю.



Сначала рассмотрим схему прогнозирования степени проседания консолидированного грунта (степень проседания S) (см. стр. 180).

- ① **Определение начального напряжения p_0 :** вычисляется давление вскрыши δ'_z в консолидированном слое непосредственно перед возникновением нагрузки.
- ② **Определение увеличения напряжения Δp :** вычисляют увеличение общего напряжения $\Delta \delta_z$ в консолидированном слое, возникшее под влиянием нагрузки⁷.
- ③ **Определение уменьшения коэффициента пустотности Δe :** на основании данных исследования консолидации строится кривая e от $\log p$, по которой определяют коэффициент пустотности e_1 , соответствующий давлению консолидации $p_1 (= p_0 + \Delta p)$. Аналогично определяют начальный коэффициент пустотности e_0 , соответствующий начальному напряжению p_0 , и вычисляют уменьшение коэффициента пустотности $\Delta e (= e_0 - e_1)$.
- ④ **Вычисление степени проседания S :** по давлению вскрыши до воздействия нагрузки p_0 и давлению консолидации после воздействия нагрузки p_1 определяют, соответствуют ли они нормальной консолидации или переуплотнённой. После чего вычисляют степень проседания S (уменьшение толщины консолидированного слоя ΔH), используя один из методов – Δe ($e - \log p$), C_c или m_v .



А что это за методы Δe ($e - \log p$), C_c и m_v ?



Использование одного из этих методов зависит от состояния грунта на месте и от целей исследования. Подробнее о каждом из них – на следующей странице.

Методы расчёта проседания консолидированного грунта, используемые в качестве стандартных при проектировании

	Метод $e - \log p$	Метод C_c	Метод m_v
Рекомендации по проектированию конструкции фундамента здания	Применяется	Если построена кривая e от $\log p$ для проектирования	
Спецификация автодорожных мостов, нижних строений дорог	Применяется	В случае нормально уплотнённой глинистой почвы	
Рекомендации по земляным дорожным работам (противодействие размягчению грунта)	Применяется	В случае нормально уплотнённой глинистой почвы	В случае нормально уплотнённой глинистой почвы
Стандарты проектирования железнодорожных конструкций	Применяется		
Технические стандарты портовых сооружений			Применяется

(Поверхностные слои грунта часто бывают переуплотнёнными, и в таком случае используется только метод m_v .)

⁷ Если нагрузка на грунт имеет большую площадь, можно считать, что увеличение напряжения в грунте будет однородным, хотя на самом деле в общем случае увеличение напряжения будет разным и в вертикальном, и в горизонтальном направлениях.

① Метод Δe ($e - \log p$)

Этот метод основан на идее, что при увеличении нагрузки на грунт уменьшение коэффициента пустотности Δe происходит по кривой e от $\log p$. На этой кривой находят значение e_1 ($= e_0 - \Delta e$), соответствующее давлению консолидации p_1 ($= p_0 + \Delta p$), после чего рассчитывают степень проседания S (м) по следующей формуле:

$$S = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} H_0 = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H_0.$$

Здесь H_0 – это изначальная толщина консолидированного слоя (м).

Методом Δe можно рассчитать степень проседания S как для нормально уплотнённого грунта, так и для переуплотнённого. Однако при масштабных исследованиях желательно построить репрезентативную кривую на основании нескольких кривых e от $\log p$.

② Метод C_c

Этот метод использует показатель сжимаемости C_c , который выражает наклон прямого участка кривой e от $\log p$ (область нормальной консолидации). Степень проседания S (м) вычисляется по следующей формуле:

$$S = \frac{C_c}{1 + e_0} H_0 \log_{10} \frac{p_1}{p_0} = \frac{C_c}{1 + e_0} H_0 \log_{10} \frac{p_0 + \Delta p}{p_0}.$$

Метод C_c может быть легко представлен геометрически, но это применимо только к нормально консолидированным глинистым грунтам⁸.

③ Метод m_v

Этот метод использует коэффициент объёмного сжатия m_v , показывающий, как меняется толщина опытного образца при ступенчатом увеличении нагрузки. Степень проседания S (м) вычисляется по следующей формуле:

$$S = m_v \Delta p H_0.$$

Метод m_v является наиболее простым, но служит только для приблизительной оценки, так как на основании исследований консолидации трудно построить точную кривую m_v .



Как-то сложно...



Осталось совсем немного! Таким образом, степень проседания S рассчитывается этими тремя способами на основании результатов исследования консолидации. Аналогично и конечное значение степени проседания (конечное проседание S_f), соответствующее окончанию консолидации (при $t = \infty$), можно вычислить независимо от теории консолидации Терцаги.

⁸ Используя строительные нормативы, геометрически можно представить и область переуплотнённого грунта.



Существуют три процедуры прогнозирования изменения проседания при консолидации с течением времени (соотношение между временем и степенью проседания). Каждая процедура разработана для определённых целей.

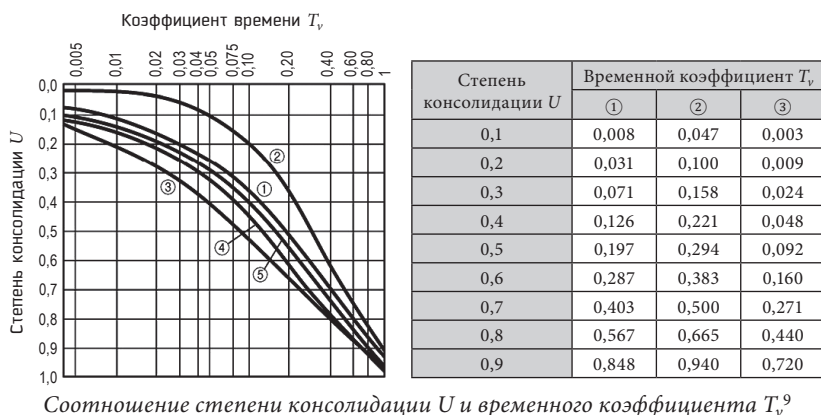
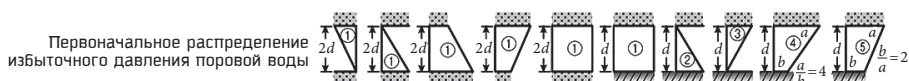


Ещё три?!

Прогнозирование времени до возникновения проседания консолидированного грунта (времени консолидации t)

Уровень консолидации, соответствующий завершению процесса консолидации (когда рассеивается избыточное поровое давление Δu), принимается за 100 %. Консолидацию в определённый момент времени на глубине z называют степенью консолидации U_z (%), а среднюю консолидацию во всём консолидированном слое называют средней степенью консолидации U (или просто степенью консолидации U). На основании соотношения степени консолидации U и временного коэффициента T_v можно рассчитать время консолидации t для любого значения степени консолидации U , следуя описанной ниже процедуре.

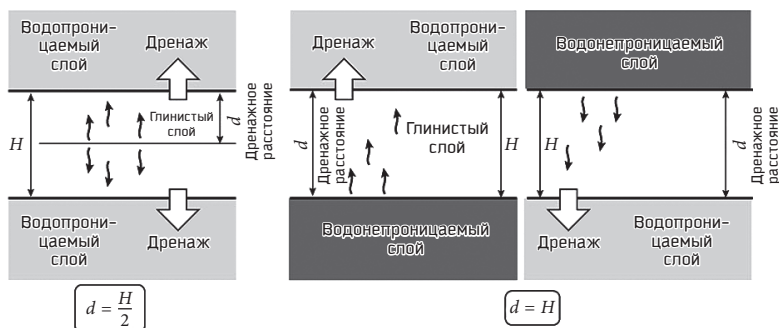
- ① **Вычисление коэффициента консолидации C_v :** рассчитывается по результатам исследования консолидации (см. стр. 175).
- ② **Определение временного коэффициента T_v :** из уравнения консолидации определяется соотношение степени консолидации U и временного коэффициента T_v (отношения U к T_v), и по графику этой зависимости для любого значения степени консолидации U определяют временной коэффициент T_v .



⁹ Отношение U к T_v для различных начальных и граничных условий.

Отношения U к T_v описываются для различных начальных и граничных условий и не зависят от типа грунта. Начальные условия определяются из распределения избыточного давления поровой воды Δu в начале консолидации ($t = 0$), граничные – по избыточному давлению поровой воды на границе консолидированного слоя Δu .

- ③ **Определение дренажного расстояния d :** найти, как показано на рисунке, толщину консолидированного слоя H и, исходя из геологического состава грунта, установить, односторонним или двухсторонним будет дренаж. После чего рассчитать дренажное расстояние d .



(a) Двухсторонний дренаж

(b) Односторонний дренаж

Дренажным расстоянием (длиной дренажа) d называется наибольшее расстояние дренажного пути, образуемое при выталкивании поровой воды из-за давления p в консолидационном слое толщиной H . Например, на рис. *a* глинистый слой зажат между песчаными слоями, поэтому дренаж будет двухсторонним, а дренажное расстояние $d = H/2$. При этом на рис. *b* глинистый слой с одной стороны ограничен коренной породой, поэтому дренаж будет односторонним, а дренажное расстояние $d = H$ ¹⁰.

Вычисление времени консолидации t : подставьте коэффициент консолидации C_v , временной коэффициент T_v , дренажное расстояние d (найденные на шагах ①, ② и ③ соответственно) в следующую формулу и вычислите время консолидации t (в днях) для любой степени консолидации U :

$$t = \frac{T_v d^2}{C_v}$$



Как видно из данной формулы, время консолидации t в глинистых слоях прямо пропорционально квадрату дренажного расстояния d и обратно пропорционально коэффициенту консолидации C_v .

¹⁰ Здесь песчаный слой показан как пример водопроницаемости (пограничное избыточное давление поровой воды $\Delta u = 0$), а коренная порода – как пример водонепроницаемости (пограничная скорость фильтрации $v = 0$).



Таким образом, чтобы способствовать консолидации грунта, можно сократить дренажное расстояние d . Например, существует метод песчаного дренирования, когда в слабых глинистых грунтах делают песчаные скважины, которые собирают воду из глинистого грунта в горизонтальном направлении, чем способствуют уплотнению.

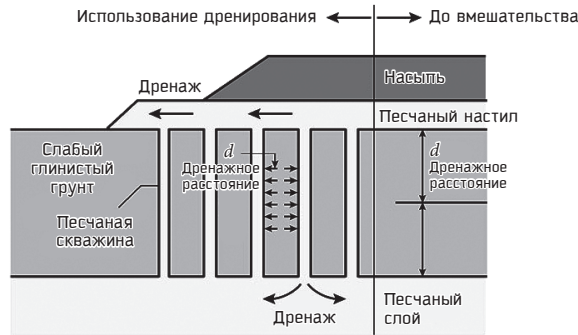


Схема метода песчаного дренирования



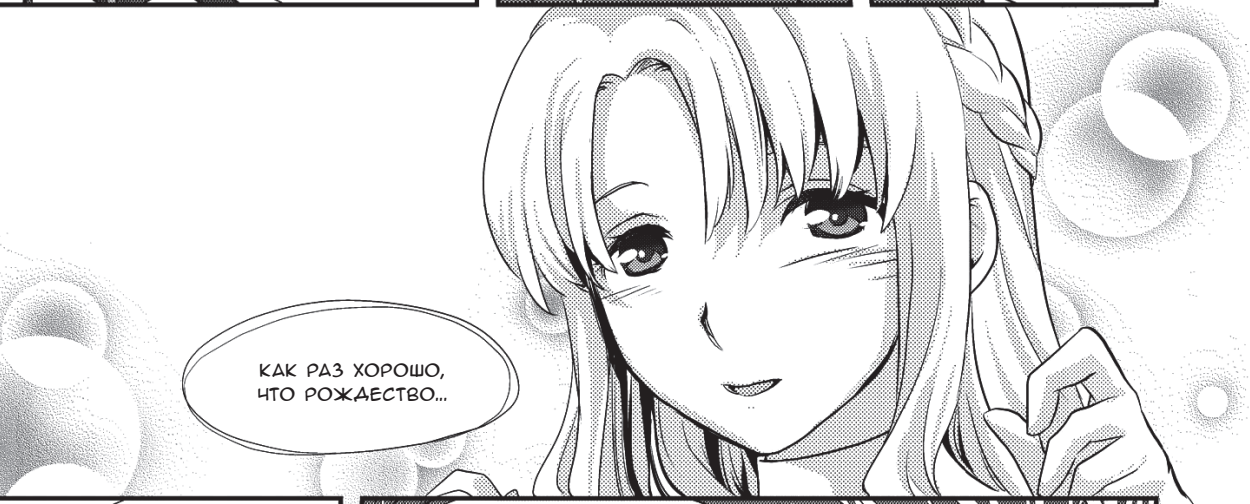
И наконец, степень проседания грунта S_t для каждого момента времени консолидации t рассчитывается по нижеприведенной схеме.

- ① **Вычисление конечной степени проседания S_f :** рассчитывается на основании результатов исследования консолидации одним из трёх методов (метод Δe , метод C_v , метод m_v).
- ② **Вычисление временного коэффициента T_v :** как было показано выше, делается прогноз времени консолидации t , находится коэффициент консолидации C_v и дренажное расстояние d . Найденные значения подставляются в следующую формулу для вычисления временного коэффициента T_v :

$$T_v = \frac{C_v}{d^2} t.$$

- ③ **Определение степени консолидации U_t :** значения степени консолидации U_t относительно временного коэффициента T_v определяются по графику, аналогично тому, как это делается выше при прогнозировании времени консолидации t .
- ④ **Вычисление степени проседания S_t :** подставив в следующую формулу значения конечного проседания S_f и степени консолидации U_t , найденные на шагах ① и ② соответственно, можно вычислить степень проседания S_t (м) для любого времени консолидации t :

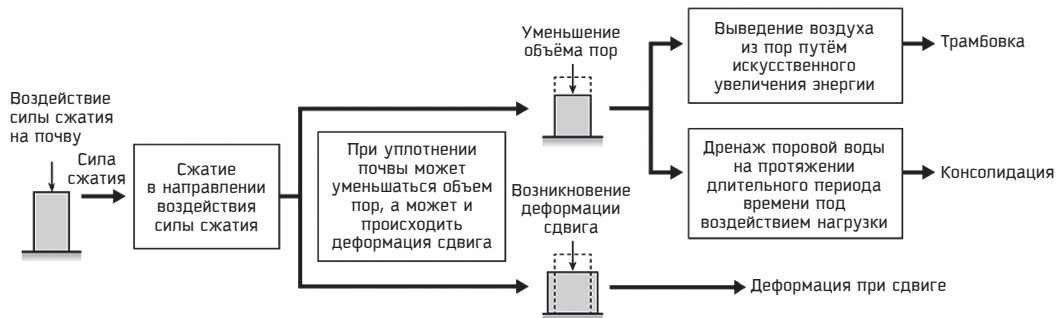
$$S_t = S_f \frac{U_t}{100}.$$



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Уплотнение и деформация грунта

Явление, когда объект деформируется под влиянием силы сжатия, называется уплотнением. В водонасыщенных грунтах под воздействием силы сжатия грунтовый скелет деформируется (почвенные частицы перемещаются), вследствие чего из пор выталкивается вода, и по мере дренирования воды уменьшается объём тела. Так и происходит уплотнение. В водонасыщенных глинистых грунтах коэффициент пустотности и влажность высокие, а водопроницаемость низкая. По этим причинам дренирование воды занимает много времени, и такое длительное уплотнение под статической нагрузкой называется консолидацией. Существуют и другие типы уплотнения почвы, возникающие при трамбовке или сдвиге. Кроме того, важно различать типы уплотнения по тому влиянию, которое они оказывают на физические и механические свойства грунтов.



Исследование консолидации (JIS A 1217)

1. Цель и описание исследования

Исследование консолидации грунта проводится лабораторно с целью определения коэффициента консолидации C_v , коэффициента объёмного сжатия m_v , показателя сжимаемости C_c и напряжения предварительной консолидации p_c . Затем с помощью этих параметров вычисляют степень и время проседания водонасыщенного глинистого слоя грунта.

2. Оборудование для исследования и процедура

При общераспространённом исследовании консолидации (испытание со ступенчатой нагрузкой) ненарушенный образец (диаметр 6 см, высота 2 см) формируется описанным ниже способом и затем помещается в кольцо консолидации, где пошагово подвергается вертикальной нагрузке (давление консолидации p).

- ① Снимаем показание датчика смещения d_i (мм), соответствующее времени $t = 0$ до воздействия нагрузки.
- ② Аккуратно добавляем нагрузку с давлением консолидации $p = 9,8 \text{ кН/м}^2$ так, чтобы не возникла ударная сила. Начинается консолидация.
- ③ Снимаем показания датчика смещения d (мм) через следующие промежутки времени от начала воздействия нагрузки: 6 с, 9 с, 12 с, 18 с, 30 с, 42 с, 1 м, 1,5 м, 2 м, 3 м, 5 м, 7 м, 10 м, 15 м, 20 м, 30 м, 40 м, 1 ч, 1,5 ч, 2 ч, 3 ч, 6 ч, 12 ч, 24 ч. Эти показания интерпретируются как показатели степени консолидации.

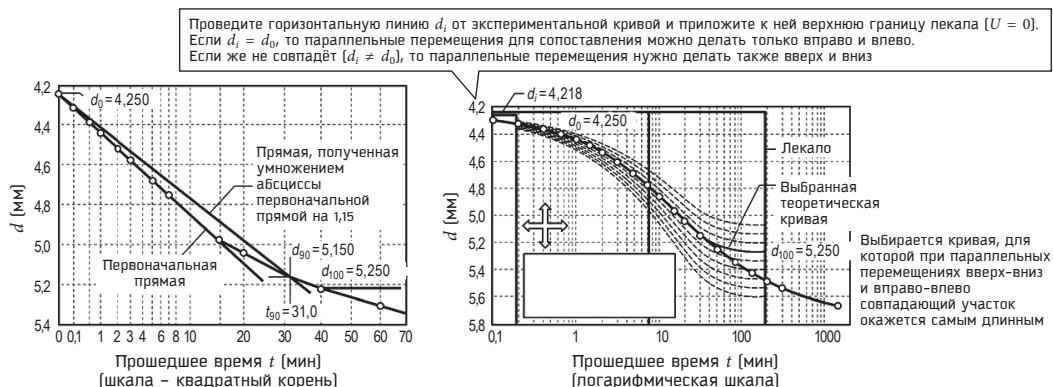
- ④ Далее добавляется нагрузка с тем же давлением консолидации (темп прироста нагрузки $\Delta p/p = 1$, давление консолидации соответственно будет принимать значения: 19,6, 39,2, 78,5, 157, 314, 628, 1256 кН/м²). После чего следует повторить пункты ② и ③, фиксируя значения d на датчике смещения для промежутков времени t .
- ⑤ После снятия всех нагрузок следует достать образец из консолидационного кольца, перенести на специальный поддон и поставить в печь (при температуре 110 ± 5 °С). И после высушивания образца измерить его сухую массу m_s (г).



3. Результаты исследования

1. Систематизация степени консолидации по времени. Чтобы вычислить коэффициент консолидации c_v , применяя теорию консолидации, построим график соотношения степени консолидации и времени одним из методов (метод v_t или метод лекала) и найдём следующие значения:

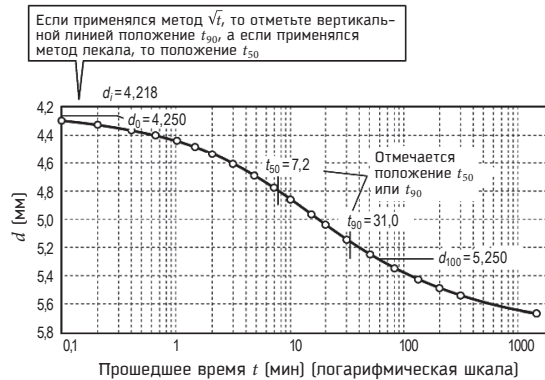
- смещение d_0 (мм), соответствующее теоретическому уровню консолидации 0 %;
- смещение d_{100} (мм), соответствующее теоретическому уровню консолидации 100 %;
- время t_{90} (мин), соответствующее теоретическому уровню консолидации 90 % (при использовании метода v_t);
- время t_{50} (мин), соответствующее теоретическому уровню консолидации 50 % (при использовании метода лекала).



Пример применения метода $\sqrt{t}$

Пример применения метода лекала

2. Построение зависимости степени консолидации от времени. По вертикальной оси откладываются показания датчика смещения d , а на горизонтальной оси отмечаются промежутки времени t в логарифмическом масштабе. Строится кривая зависимости степени консолидации от времени (кривая d от $\log t$), на которой отмечаются найденные в предыдущем пункте значения.



Пример зависимости степени консолидации от времени

3. Расчёт степени одномерного уплотнения и коэффициента консолидации. Степень одномерного уплотнения r и коэффициент консолидации c_v определяются по описанной далее процедуре:

- 1) на каждой ступени при увеличении нагрузки вычисляются высота образца по окончании консолидации H (см) и средняя высота образца $\bar{H}$ (см):

$$H = H' - \Delta H;$$

$$\bar{H} = \frac{H + H'}{2} \text{ (см).}$$

Здесь H' (см) – это высота образца по окончании консолидации непосредственно перед следующей ступенью;

- 2) на каждой ступени вычисляется степень одномерного уплотнения r :

$$r = \frac{\Delta H_1}{\Delta H};$$

- 3) на каждой ступени определяется коэффициент консолидации c_v (см²/д):

$$\text{– если применялся метод } \sqrt{t}: c_v = 0,848 \left(\frac{H + H'}{2} \right)^2 \cdot \frac{1440}{t_{90}} \text{ (см}^2\text{/д);}$$

$$\text{– если применялся метод лекала: } c_v = 0,197 \left(\frac{H_n}{2} \right)^2 \cdot \frac{1440}{t_{50}} \text{ (см}^2\text{/д);}$$

- 4) на каждой ступени определяется скорректированный коэффициент консолидации c'_v (см²/д):

$$c_v = r c'_v \text{ (см}^2\text{/д);}$$

- 5) на вертикальной оси отмечаются на логарифмической шкале значения c_v или c'_v , а на горизонтальной оси – значения среднего давления консолидации $\bar{p}$ тоже в логарифмической шкале. Строится график $\log c_v$ от $\log \bar{p}$.

4. Вычисление коэффициента объёмного сжатия и коэффициента водопроницаемости. Коэффициент объёмного сжатия m_v и коэффициент водопроницаемости k определяются по описанной далее процедуре:

1) на каждой ступени определяется деформация сжатия $\Delta \epsilon$ (%):

$$\Delta \epsilon = \frac{H + H'}{2} \times 100 (\%);$$

2) на каждой ступени определяется коэффициент объёмного сжатия m_v ($\text{м}^2/\text{кН}$):

$$m_v = \frac{\Delta \epsilon / 100}{\Delta p} (\text{м}^2/\text{кН}).$$

Здесь Δp ($\text{кН}/\text{м}^2$) – это увеличение давления консолидации на каждой ступени;

3) по следующей формуле вычисляется среднее давление консолидации. Затем по вертикальной оси откладываются значения m_v в логарифмической шкале, а по горизонтальной оси – среднее давление консолидации $\bar{p}$ ($\text{кН}/\text{м}^2$) в логарифмическом масштабе, после чего строится график зависимости $\log m_v$ от $\log \bar{p}$:

$$\bar{p} = \sqrt{p \cdot p'}.$$

Здесь p' ($\text{кН}/\text{м}^2$) – это давление консолидации непосредственно перед увеличением нагрузки на данной ступени;

4) если необходимо, на каждой ступени вычисляют коэффициент водопроницаемости k ($\text{см}/\text{с}$):

$$k = c_v m_v \frac{\gamma_w}{8,64 \times 10^6}.$$

Здесь γ_w ($\text{кН}/\text{м}^3$) – это удельный объём воды ($= 9,8 \text{ кН}/\text{м}^3$).

5. Расчет показателя сжимаемости. Показатель сжимаемости C_c определяется по следующей процедуре:

1) вычисление коэффициента пустотности e и соотношения объёмов f по окончании консолидации для каждого давления консолидации p :

$$e = f - 1;$$

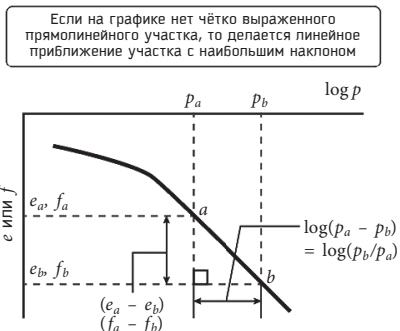
$$f = \frac{H}{H_s};$$

2) по вертикальной оси отмечаются значения коэффициента пустотности e или соотношение объёмов f , а по горизонтальной – давление консолидации p в логарифмическом масштабе. Строится кривая зависимости e от $\log p$ или f от $\log p$;

3) на прямолинейном участке кривой e от $\log p$ либо f от $\log p$ выбираются точки a и b и рассчитывается показатель сжимаемости C_c :

$$\text{– в случае кривой } e \text{ от } \log p: C_c = \frac{e_a - e_b}{\log \left(\frac{p_b}{p_a} \right)};$$

$$\text{– в случае кривой } f \text{ от } \log p: C_c = \frac{f_a - f_b}{\log \left(\frac{p_b}{p_a} \right)}.$$



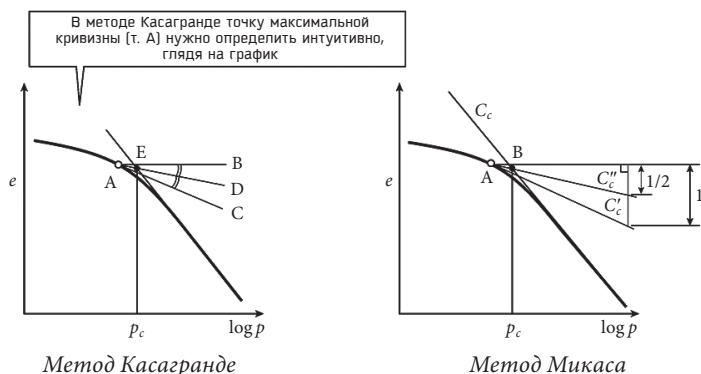
6. *Расчет напряжения предварительного уплотнения.* Для определения напряжения предварительного уплотнения p_c используются метод Касагранде и метод Микаса.

Метод Касагранде¹¹:

- 1) найти точку максимальной кривизны (точку А) на кривой e от $\log p$ либо на кривой f от $\log p$;
- 2) через точку А провести горизонтальную линию АВ и касательную АС;
- 3) провести биссектрису АД угла А. Найти точку Е – точку пересечения АД и линии, продолжающей линейный участок кривой для нахождения показателя сжимаемости C_c ;
- 4) координата точки Е на горизонтальной оси соответствует значению напряжения предварительного уплотнения p_c .

Метод Микаса:

- 1) зная показатель сжимаемости C_c , вычислить $C'_c = 0,1 + 0,25C_c$. Найти точку А – точку пересечения наклонной прямой C'_c и кривой e от $\log p$ либо кривой f от $\log p$;
- 2) провести через точку А наклонную прямую $C''_c = C'_c/2$. Найти точку В – точку пересечения прямой C''_c и линии, продолжающей линейный участок кривой для нахождения показателя сжимаемости C_c ;
- 3) координата точки В на горизонтальной оси соответствует значению напряжения предварительного уплотнения p_c .



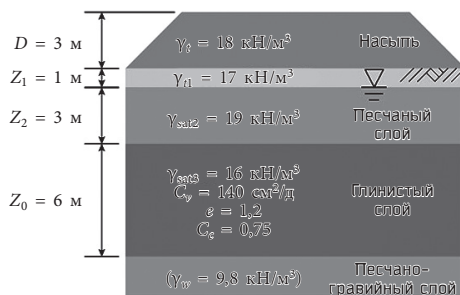
¹¹ В методе Касагранде положение точки максимальной кривизны зависит от шкалы вертикальной оси, что влияет и на величину напряжения предварительного уплотнения. Поэтому нужно внимательно выбирать шкалу. Если при использовании этих методов трудно найти напряжение предварительного уплотнения, то постройте кривую зависимости e от $\log p$ либо f от $\log p$, используя арифметическую шкалу для давления консолидации. Напряжение предварительного уплотнения можно найти, только если на полученной кривой будет виден выпуклый участок.

Расчет степени проседания

Задача 1

На рисунке показан глинистый слой почвы, зажатый между песчаными слоями. В результате исследований консолидации получены следующие значения: коэффициент консолидации глинистой почвы $c_v = 140 \text{ см}^2/\text{д}$, коэффициент пустотности $e = 1,20$, показатель сжимаемости $C_c = 0,75$. На этот грунт положена нагрузка в виде широкой насыпи толщиной $D = 3 \text{ м}$, с удельным весом на единицу объема $\gamma_t = 18 \text{ кН/м}^3$. Требуется найти решение следующих задач:

- ① найти напряжение p_0 внутри глинистого слоя до начала воздействия нагрузки;
- ② найти напряжение p_1 внутри глинистого слоя под воздействием нагрузки;
- ③ найти изменение Δe коэффициента пустотности e из-за влияния нагрузки;
- ④ определить конечную степень проседания грунта S_f из-за консолидации.



Решение

- ① Напряжение p_0 внутри глинистого слоя – это, другими словами, давление вскрыши σ'_z на глубине $z = 7 \text{ м}$ от поверхности земли:

$$p_0 = \gamma_{t1} z_1 (\gamma_{sat2} - \gamma_w) z_2 + (\gamma_{sat3} - \gamma_w) \frac{H_0}{2} \\ = 17,0 \times 1 + (19,0 - 9,8) \times 3 + (16,0 - 9,8) \times 3 = 63,2 \text{ кН/м}^2.$$

(См. гл. 4.)

- ② Прирост напряжения Δp под воздействием нагрузки вычисляется через удельный вес на единицу объема γ_t и толщину D следующим образом:

$$\Delta p = \gamma_t \cdot D = 18,0 \times 3 = 54 \text{ кН/м}^2.$$

Тогда возникшее под действием нагрузки напряжение p_1 внутри глинистого слоя можно вычислить как сумму напряжения p_0 и прироста напряжения Δp :

$$p_1 = p_0 + \Delta p = 63,2 + 54 = 117,2 \text{ кН/м}^2.$$

- ③ Изменение Δe коэффициента пустотности e из-за воздействия нагрузки вычисляется следующим образом:

$$\Delta e = e_0 - e_1 = C_c \log \frac{p_1}{p} = 0,75 \times \log \frac{117,2}{63,2} = 0,201.$$

- ④ Конечная степень проседания грунта S_f из-за консолидации вычисляется следующим образом (см. стр. 172):

$$S_f = \frac{C_c}{1 + e_0} H_0 \log \frac{p_1}{p} = \frac{0,75}{1 + 1,20} \times 6,0 \times \log \frac{117,2}{63,2} = 0,55 \text{ м}.$$

Задание выполнено.

Прогноз времени консолидации

Задача 2

Ответьте на следующие вопросы, касающиеся проседания грунта из-за консолидации из первого задания.

- ① Определите, через сколько дней степень проседания грунта будет соответствовать 90 % от конечной степени проседания S_f . Предполагаем, что напряжение, возникающее в грунте под воздействием нагрузки, распределяется равномерно.
- ② Если под глинистым слоем будет находиться водонепроницаемый слой, через сколько дней степень проседания грунта будет соответствовать 90 % от конечной степени проседания S_f в данном случае?

Решение

- ① Так как в данном случае возникает двухсторонний дренаж, то длина дренажа $d = 600/2 = 300$ см, а из отношения U и T_v (см. стр. 171) получаем, что временной коэффициент для 90 % консолидации $T_v = 0,848$. Следовательно, по формуле времени консолидации находим t (см. стр. 174):

$$t = \frac{d^2}{c_v} T_v = \frac{300^2}{140} \times 0,848 = 545 \text{ дней.}$$

- ② В данном случае возникает односторонний дренаж, так что длина дренажа $d = 600$ см. Аналогично пункту ①, временной коэффициент для 90 % консолидации $T_v = 0,848$. Следовательно, по формуле времени консолидации t получаем:

$$t = \frac{d^2}{c_v} T_v = \frac{600^2}{140} \times 0,848 = 2180 \text{ дней.}$$

Задание выполнено.



ГЛАВА 6

ПРОЧНОСТЬ ГРУНТА





ТАКИМ ОБРАЗОМ,
ЭТА ЗАДАЧА ПОРУЧЕНА
НАШЕЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ
ГРУППЕ!

Участок, на котором
предполагается
строительство
общежития

УХ ТЫ,
ЗАОРОВО!

ПРИХОДИТСЯ
О СЕБЕ ЗАЯВЛЯТЬ,
ЧТОБЫ ЭТУ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКУЮ
ГРУППУ
НЕ РАСФОРМИРОВАЛИ,
ДА?..

КХ-КХ

КХЕ-КХЕ

В ОБЩЕМ,
ЧТОБЫ ОБЕСПЕЧИТЬ
БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОЯЩЕГОСЯ
ЗАДАНИЯ, ВАЖНО ТОЧНО
ОЦЕНИТЬ ПРОЧНОСТЬ
ГРУНТА НА УЧАСТКЕ
ПРЕДПОЛАГАЕМОГО
СТРОИТЕЛЬСТВА.

ПРОЧНОСТЬ
ГРУНТА?

ДЛЯ НАЧАЛА, ЧТО СКАЖЕТЕ
О ПРОЧНОСТИ ЭТИХ ПАЛОЧЕК
ДЛЯ ЕДЫ И РЕЗИНКИ ДЛЯ ВОЛОС?

Палочки
для еды

Резинка
для волос

Прочность?

ТЯНЕТ ГНЕТ

ВОТ ВЫ ОБЕ СЕЙЧАС ИНТУИТИВНО
СТАЛИ РАСТЯГИВАТЬ РЕЗИНКУ
И СГИБАТЬ ПАЛОЧКИ ДЛЯ ЕДЫ,
ПОТОМУ ЧТО ПРЕДПОЛАГАЛИ,
ЧТО ИМЕННО ПРИ ТАКОМ НАПРЯЖЕНИИ
ЭТИ ПРЕДМЕТЫ МОГУТ РАЗРУШИТЬСЯ.



А БЕТОН, НАПРИМЕР, ИСПЫТЫВАЕТ
СЖАТИЕ И ДОЛЖЕН ОБЛАДАТЬ
ПРОЧНОСТЬЮ НА СЖАТИЕ.

А КАК НАСЧЁТ
ПРОЧНОСТИ
ГРУНТА?

СКОРЕЕ, ПРЕДСТАВЛЯЕТСЯ,
ЧТО ПРИ СЖАТИИ ПОЧВА
ОБРУШИВАЕТСЯ ИЛИ СПОЗДАЕТ...

ХМ,
НЕЛЬЗЯ СКАЗАТЬ,
ЧТОБЫ ПОЧВА
РАСТЯГИВАЛАСЬ ИЛИ
СГИБАЛАСЬ...



ВОТ ИМЕННО!
ТАКИЕ РАЗРУШЕНИЯ ГРУНТОВ
И ЗЕМЛЯНЫХ СООРУЖЕНИЙ,
КАК ОБРУШЕНИЕ
И СПОЗДАНИЕ, НАЗЫВАЮТ
САВИГОМ.

ПОД СОБСТВЕННЫМ ВЕСОМ ГРУНТА
ИЛИ ПОД НАГРУЗКОЙ НА ГРУНТ
ДЕЙСТВУЕТ СИЛА САВИГА T . ОНА
ВЫЗЫВАЕТ НАПРЯЖЕНИЕ САВИГА t ;
ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОТОРОГО В ГРУНТЕ
ВОЗНИКАЕТ СОПРОТИВЛЕНИЕ.



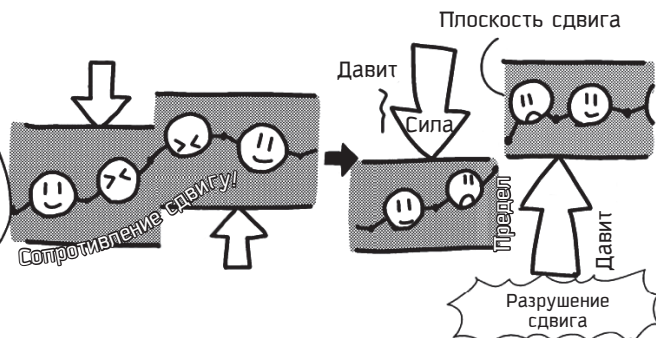
А ЧТО ТАКОЕ САВИГ?



ПРЕДСТАВЬТЕ СЕБЕ
НОЖНИЦЫ. ДВА ЛЕЗВИЯ НОЖНИЦ
РАЗВОДАЮТСЯ ПОСРЕДСТВОМ
ПРИЛОЖЕНИЯ СИЛЫ В ПРОТИВО-
ПОЛОЖНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ,
ПАРАЛЛЕЛЬНО ОПРЕДЕЛЁННОЙ
ПЛОСКОСТИ ПОПЕРЕЧНОГО
СЕЧЕНИЯ.

ПОДОБНОЕ РАЗРУШЕНИЕ
И НАЗЫВАЕТСЯ **РАЗРУШЕНИЕМ
САВИГА**, А ТАКАЯ ПЛОСКОСТЬ -
ПЛОСКОСТЬ САВИГА.

АНАЛОГИЧНО И ВНУТРИ ГРУНТА ИЗ-ЗА НАПРЯЖЕНИЯ СДВИГА Т ВОЗНИКАЕТ ДЕФОРМАЦИЯ, И КОГДА СОПРОТИВЛЕНИЕ СДВИГУ В ПОЧВЕ ДОХОДИТ ДО ПРЕДЕЛА, ТО ДЕФОРМАЦИЯ РЕЗКО УВЕЛИЧИВАЕТСЯ, ПРОИСХОДИТ РАЗРУШЕНИЕ.



В ТАКОМ СЛУЧАЕ САМОЕ БОЛЬШОЕ НАПРЯЖЕНИЕ СДВИГА τ , КОТОРОЕ ЕЩЕ ВЫДЕРЖИВАЕТ ГРУНТ, НАЗЫВАЮТ ПРОЧНОСТЬЮ НА СДВИГ И ОБОЗНАЧАЮТ s .

НО СКАЖИТЕ МНЕ, ЧТО ЖЕ ВНУТРИ ГРУНТА СОПРОТИВЛЯЕТСЯ И КАКИМ ОБРАЗОМ?

ХМ... ПОЧВА СОСТОИТ ИЗ ГРУНТОВОГО СКЕЛЕТА И ПУСТОТ... НАВЕРНОЕ, ЭТО ЧАСТИЦЫ ГРУНТА... ОКАЗЫВАЮТ СОПРОТИВЛЕНИЕ СДВИГУ ИЗ-ЗА СЦЕПЛЕНИЯ И ТРЕНИЯ?



ВЕРНО! ПРОЧНОСТЬ НА СДВИГ s ЗАВИСИТ ОТ СИЛЫ СЦЕПЛЕНИЯ c И УГЛА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ φ ¹.

ЭТО ТАК НАЗЫВАЕМЫЕ ПОСТОЯННЫЕ СДВИГА².

Сцепление...

Трение...

СИЛЫ СЦЕПЛЕНИЯ И ТРЕНИЯ МЕЖАУ ЧАСТИЦАМИ ПОЧВЫ ОПРЕДЕЛЯЮТ ПРОЧНОСТЬ ГРУНТА НА СДВИГ...

¹ Ещё его называют углом сопротивления сдвигу.

² Ещё их называют постоянными прочностями грунта.

6.1. ЧТО ТАКОЕ ПРОЧНОСТЬ ГРУНТА





Образец грунта разделили на верхнюю и нижнюю части и поместили в формы (с площадью поперечного сечения A), добавив воздействие постоянной вертикально направленной силы P (вертикальное сопротивление $\tau = P/A$). Сила сдвига T (напряжение сдвига $\tau = T/A$) постепенно увеличивалась и в конце концов достигла значения прочности на сдвиг s , после чего произошло разрушение. Такой тест, определяющий прочность на сдвиг относительно вертикального напряжения, называется одноплоскостным тестом на сдвиг (прямым тестом на сдвиг). Если, например, изменить вертикальное напряжение σ три раза по нарастающей и вычислить прочность на сдвиг s , то получим следующие отношения $s - \sigma$ (см. стр. 212).

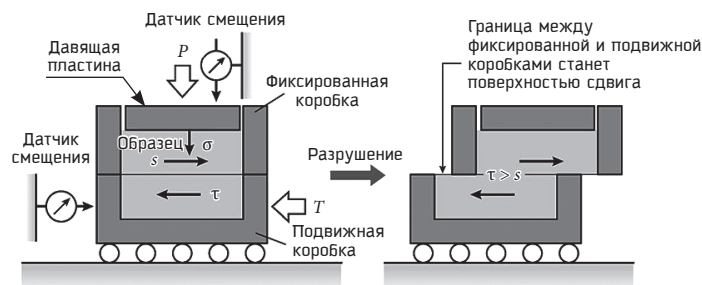
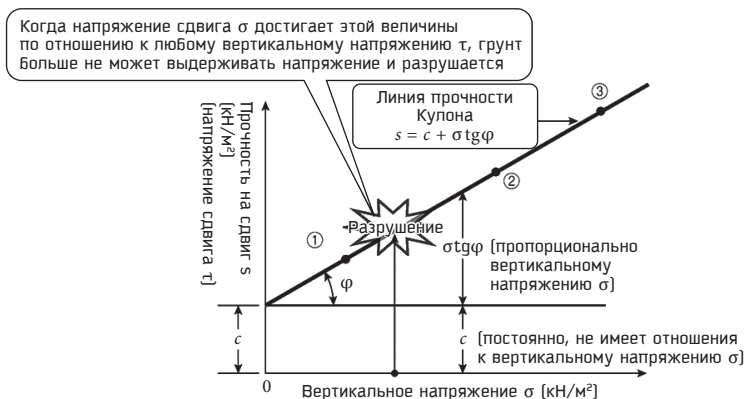


Схема теста на одноплоскостной сдвиг



Результаты теста на одноплоскостной сдвиг



А эта прямая линия и есть граничная линия критерия прочности?



Значит, прочность на сдвиг s изменяется относительно вертикального напряжения σ по прямой?!



Отлично подмечено! Это как с подушками для сидения. Чем больше на них сверху приложено силы (вертикального напряжения σ), тем выше будет сопротивление трения и тем труднее их будет вытащить. На таком примере понятнее?





А из этих линейных отношений s и σ Кулон вывел формулу, названную его именем (критерий прочности Кулона), связывающую сопротивление сцепления, сопротивление трения и прочность на сдвиг s .

$$s = \underbrace{c}_{\text{Сопротивление сцепления}} + \underbrace{\sigma \operatorname{tg} \varphi}_{\text{Сопротивление трения}} \quad (\text{формула Кулона})$$

Здесь: s – прочность на сдвиг; c – сила сцепления; φ – угол внутреннего трения ($\operatorname{tg} \varphi$ – коэффициент трения).



То есть линия прочности и её наклон определяют взаимосвязь между постоянными сдвига и прочностью на сдвиг s , да?



Значит, прочность грунта на сдвиг зависит от постоянной величины силы сцепления (c) и от сопротивления трения ($\sigma \operatorname{tg} \varphi$)³, пропорционального вертикальному напряжению σ ...



Получается, если нет вертикального напряжения $\sigma = 0$, прочность на сдвиг s равна силе сцепления c ... То есть изначально это значение зависит от вида и структуры почвы?



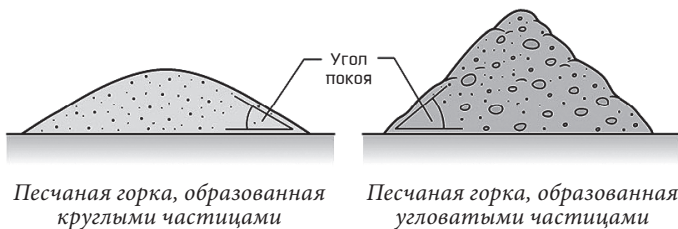
Если грунты связные или затвердевшие, можно сказать, что это зависит от связей между частицами грунта (см. гл. 2). А для сухих песчаных грунтов, в общем случае, сила сцепления $c = 0$.



Это... что-то я не понимаю, что такое угол внутреннего трения?..



Угол внутреннего трения φ выражает сопротивление, возникающее из-за трения между почвенными частицами. Он связан с так называемым углом покоя (стабильным углом)⁴; это угол, который образуется естественным образом при осыпании на плоскую поверхность песка или гравия.



Тогда чем больше трение между частицами, тем больше и угол покоя?

³ Сопротивление трения, являющееся частью прочности на сдвиг s , пропорционально вертикальному к поверхности сдвига напряжению σ . Величина $\operatorname{tg} \varphi$ является коэффициентом трения, а угол φ называется углом внутреннего трения.

⁴ Угол покоя – это максимальный угол наклона, образованный почвой при естественной стабилизации. В случае песчаных почв угол внутреннего трения φ может быть определён непосредственно из угла покоя.



Возьмём, к примеру, песочные часы, где хорошо видны выпуклые и вогнутые поверхности. В песчаных грунтах не действует сопротивление сцепления, поэтому угол покая фиксирован и составляет $30\text{--}35^\circ$ в зависимости от формы и плотности почвенных частиц. В связных же грунтах из-за сопротивления сцепления угол покая не постоянен.



В любом случае сила сцепления c и угол внутреннего трения φ могут быть непосредственно измерены в ходе одноплоскостного испытания на сдвиг, основываясь на простом принципе, однако...



Так как при одноплоскостном испытании на сдвиг образец грунта ограничен верхней и нижней коробками, то и поверхность сдвига будет ограничена, в отличие от реального участка земли, верно?

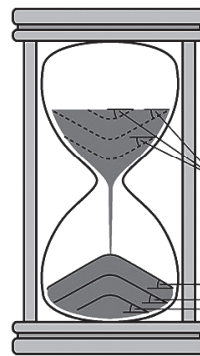


Кроме того, предполагается, что сила сдвига T действует непосредственно на поверхность сдвига, что неестественно...

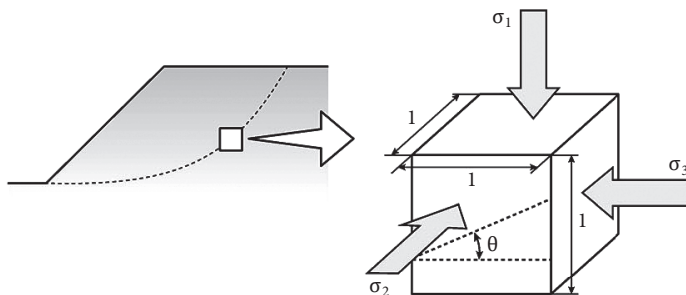
Но как же найти прочность на сдвиг s , возникающую при косвенном воздействии на любую поверхность?



Будем считать, что напряжение, возникающее в некоторой точке внутри грунта, подразделяется на вертикальное напряжение σ , воздействующее перпендикулярно к любой поверхности, проходящей через эту точку, и на напряжение сдвига τ , действующее горизонтально. И рассмотрим кубический участок стабилизированного грунта единичной длины.



Угол покая в песочных часах



Напряжение в стабилизированном грунте



Если мы рассматриваем ситуацию, когда напряжение сжатия действует во всех направлениях, то главные напряжения⁵, перпендикулярные друг другу, называются максимальным σ_1 , средним σ_2 и минимальным σ_3 главными напряжениями. Обычно максимальным главным напряжением σ_1 в грунте является давление вскрыши σ' , а средним σ_2 и минимальным σ_3 напряжениями являются боковые давления грунта (см. гл. 7).

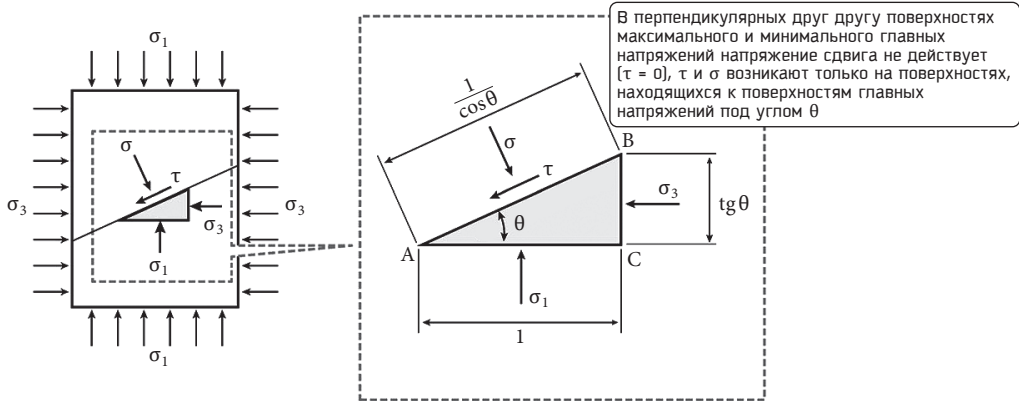
⁵ Поверхности, для которых напряжение сдвига $\tau = 0$, называются поверхностями главных напряжений, а перпендикулярно направленным к ним напряжения σ называются главными напряжениями. Поверхности, на которые действуют напряжения σ_1 и σ_3 , называются соответственно поверхностями максимального и минимального главных напряжений.



В образцах с осевой симметрией, вроде кубических или цилиндрических, нет необходимости учитывать среднее главное напряжение σ_2 . Поэтому рассмотрим только максимальное σ_1 и минимальное σ_3 главные напряжения.



Считаем, что эти напряжения воздействуют на точку внутри куба таким образом, как показано на рисунке ниже. Теперь подумаем о вертикальном напряжении σ и силе сдвига τ на единицу глубины для произвольной поверхности АВ, проходящей через данную точку (под углом θ), при выполнении условия равновесия⁶...



Максимальное σ_1 и минимальное σ_3 главные напряжения на примере бесконечно малого участка внутри грунта

Рассмотрим вертикальное напряжение σ из условия равновесия по вертикали:

$$\sigma \overline{AB} = \sigma_1 \overline{AC} \cos \theta + \sigma_3 \overline{BC} \sin \theta;$$

$$\therefore \sigma = \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_3 \sin^2 \theta$$

$$= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\theta.$$

Рассмотрим напряжение сдвига τ из условия равновесия по горизонтали:

$$\tau \overline{AB} = \sigma_1 \overline{AC} \sin \theta - \sigma_3 \overline{BC} \cos \theta;$$

$$\therefore \tau = \sigma_1 \cos \theta \sin \theta - \sigma_3 \sin \theta \cos \theta = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\theta.$$

⁶ Так как элемент внутри грунта устойчив (находится в состоянии покоя), то условие равновесия выполняется.



На основе предыдущих уравнений можно вывести следующее:

$$\left(\sigma_{\theta} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2.$$



Что-то я совсем потеряла нить рассуждений, мы вроде искали косвенную прочность на сдвиг s ?..



Здесь нам необходимо нарисовать график. Так, если отложить по горизонтали вертикальное напряжение σ , а по вертикали – напряжение сдвига τ , то как будет выглядеть график данного уравнения?



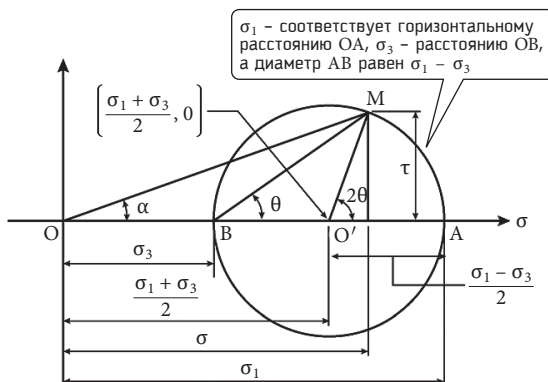
Ну, это уравнение похоже на $(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$, которое является уравнением окружности с центром в точке (a, b) и радиусом r .



Ага, значит, получим окружность с центром в точке $O' ((\sigma_1 + \sigma_3)/2, 0)$ и с радиусом, равным $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$!



Совершенно верно! Траектория, составленная из всех точек, определяемых уравнением для вертикального напряжения σ и напряжения сдвига τ , называется кругом напряжений Мора. Как можно видеть из графика, вертикальное напряжение σ и напряжение сдвига τ зависят от величины угла θ .



Круг напряжений Мора



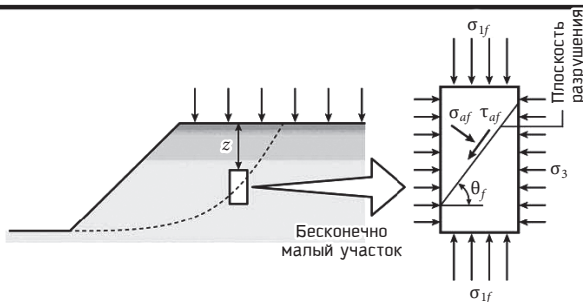
Значит, координаты точки M , находящейся на окружности под углом 2θ , показывают вертикальное напряжение δ и напряжение сдвига τ , которые действуют на поверхности скольжения, находящейся под углом θ .



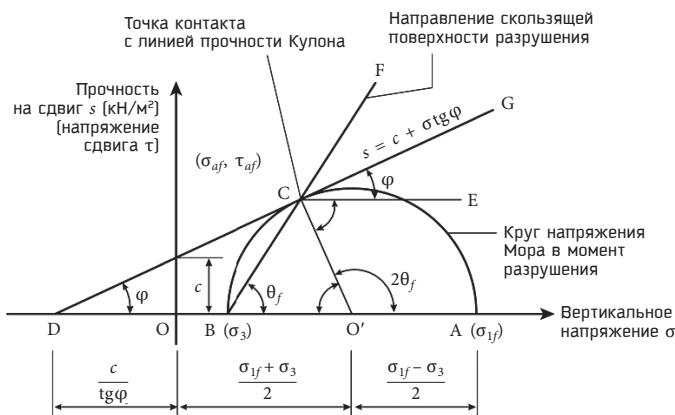
Получается, если нарисовать круг напряжений Мора в момент разрушения из-за сдвига, то по координатам точки соответствующей поверхности сдвига можно определить прочность на сдвиг s .

6.2. КРИТЕРИЙ ПРОЧНОСТИ ГРУНТА

А ТЕПЕРЬ ДОБАВИМ НАГРУЗКУ НА РАССМОТРЕННЫЙ ВЫШЕ ГРУНТ, ПРИ КОТОРОЙ НА БЕСКОНЕЧНО МАЛЫЙ УЧАСТОК ВНУТРИ ГРУНТА БУДЕТ ВОЗДЕЙСТВОВАТЬ ТАКОЕ МАКСИМАЛЬНОЕ ГЛАВНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ σ_{1f} , ЧТО ПРОИЗОИДЁТ РАЗРУШЕНИЕ САВИГА ПОД УГЛОМ θ_f



КАК БУДЕТ ВЫГЛЯДЕТЬ В ЭТОМ СЛУЧАЕ КРУГ НАПРЯЖЕНИЙ? ТАКЖЕ ПОДУМАЙТЕ О ЕГО СВЯЗИ С ЛИНИЕЙ ПРОЧНОСТИ.



Круг напряжения Мора в момент разрушения и линия прочности Кулона

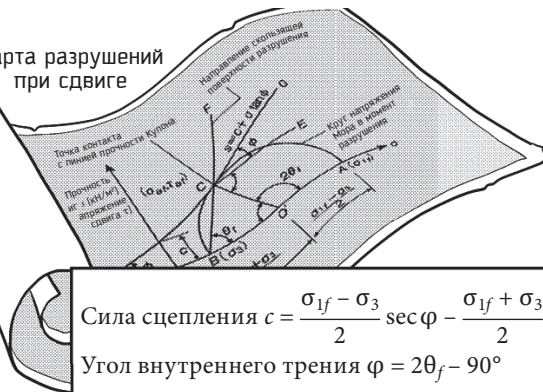
ПОЛУЧАЕТСЯ, ЧТО OA РАВНО σ_{1f} , А OB РАВНО σ_3 , ТОГДА ЦЕНТРОМ КРУГА БУДЕТ ТОЧКА O' С КООРДИНАТАМИ $((\sigma_{1f} + \sigma_3)/2; 0)$, А РАДИУС КРУГА БУДЕТ РАВЕН $(\sigma_{1f} - \sigma_3)/2...$

КООРДИНАТЫ ТОЧКИ C НА ОКРУЖНОСТИ, ОБРАЗОВАННЫЕ ЦЕНТРАЛЬНЫМ УГЛОМ $2\theta_f$, ОПРЕДЕЛЯЮТ ПРОЧНОСТЬ НА САВИГ s , ДЕЙСТВУЮЩУЮ НА ПЛОСКОСТИ САВИГА ПОД УГЛОМ $\theta_f...$ ТО ЕСТЬ ТОЧКА C БУДЕТ ТОЧКОЙ СОПРЯКОСНОВЕНИЯ С ЛИНИЕЙ ПРОЧНОСТИ?

ИМЕННО! ЛИНИЯ ПРОЧНОСТИ ЯВЛЯЕТСЯ ГРАНИЧНОЙ ЛИНИЕЙ, ДОСТИЖЕНИЕ КОТОРОЙ ОЗНАЧАЕТ РАЗРУШЕНИЕ ГРУНТА ИЗ-ЗА САВИГА, ПОЭТОМУ ОНА ПЕРЕСЕКАЕТСЯ С КРУГОМ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОЧКЕ C , ПОКАЗЫВАЮЩЕЙ ПРОЧНОСТЬ НА САВИГ s .



Карта разрушений при сдвиге

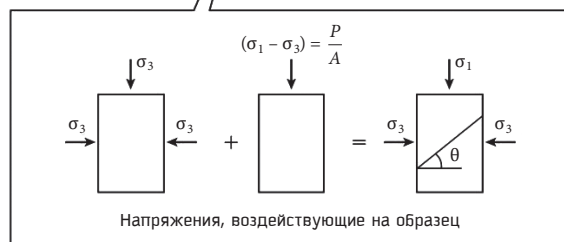
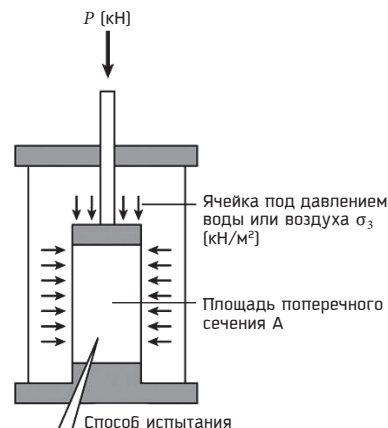


$$\text{Сила сцепления } c = \frac{\sigma_{1f} - \sigma_3}{2} \sec \varphi - \frac{\sigma_{1f} + \sigma_3}{2} \tan \varphi$$

$$\text{Угол внутреннего трения } \varphi = 2\theta_f - 90^\circ$$



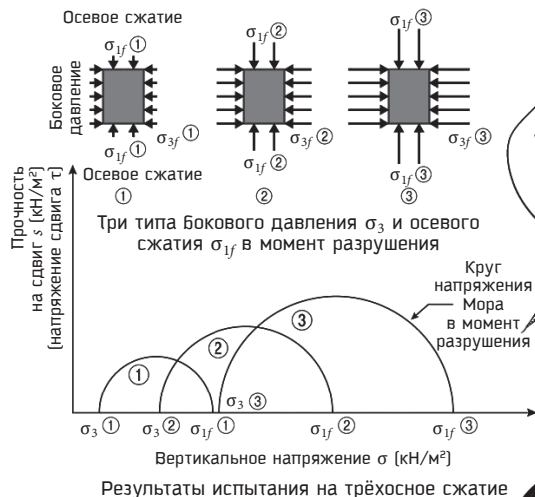
ДЛЯ ЭТОГО СУЩЕСТВУЕТ
ЛАБОРАТОРНЫЙ ТЕСТ, ИСПЫТАНИЕ
НА ТРЁХОСНОЕ СЖАТИЕ⁷,
ВОСПРОИЗВОДЯЩИЙ НЕПРЯМОЕ
РАЗРУШЕНИЕ СДВИГА.



Испытание на трёхосное сжатие



⁷ Во время испытания производится нагрузка по главным направлениям, косвенно вызывающая напряжение сдвига, вследствие чего возникает разрушение. Такое испытание ещё называют испытанием на сдвиг под главными напряжениями (непрямого типа).



НАПРИМЕР,
ДЛЯ ТРЁХ УРОВНЕЙ БОКОВЫХ
ДАВЛЕНИЙ σ_3 ИЗМЕРИМ ОСЕВОЕ СЖАТИЕ
 σ_{1f} И ПОСТРОИМ, СООТВЕТСТВЕННО, ТРИ
КРУГА НАПРЯЖЕНИЙ, ВЫРАЖАЮЩИХ
ОТНОШЕНИЯ s И σ (ОТНОШЕНИЯ τ И σ).

КАК В ДАННОМ СЛУЧАЕ
БУДЕТ РАСПОЛАГАТЬСЯ ЛИНИЯ
ПРОЧНОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНО ЭТИХ
КРУГОВ НАПРЯЖЕНИЙ?



ЛИНИИ ПРОЧНОСТИ ДОЛЖНЫ
КАСАТЬСЯ ТЕХ ТОЧЕК КАЖДОГО
КРУГА, КОТОРЫЕ ОПРЕДЕЛЯЮТ
ПРОЧНОСТЬ НА СДВИГ s ...

А!
ЭТО ЖЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
ДЛЯ ОДНОГО И ТОГО ЖЕ
ОБРАЗЦА, ЗНАЧИТ, ЛИНИЯ
ПРОЧНОСТИ БУДЕТ ОДНОЙ.
ТО ЕСТЬ ЭТИ КАСАТЕЛЬНЫЕ
СОВПАДУТ?

ВЕРНО.
ОБЩАЯ КАСАТЕЛЬНАЯ,
СОВПАДАЮЩАЯ С ЛИНИЕЙ ПРОЧНОСТИ
КУЛОНА, НАЗЫВАЕТСЯ **ОГИБАЮЩЕЙ
МОРА**⁸ (КРИТЕРИЕМ ПРОЧНОСТИ
МОРА).

ТАКУЮ КОМБИНАЦИЮ КРУГОВ
НАПРЯЖЕНИЯ И ЛИНИИ ПРОЧНОСТИ
НАЗЫВАЮТ ЕЩЁ **КРИТЕРИЕМ
ПРОЧНОСТИ МОРА-КУЛОНА**.

⁸ Если испытание на трёхосное сжатие проводится для ненасыщенных или переуплотнённых грунтов, то во многих случаях огибающая будет представлять собой выпуклую вверх кривую.

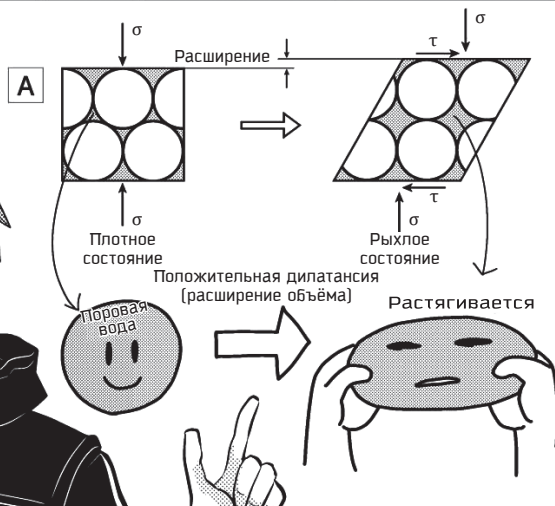
КСТАТИ, ИСПЫТАНИЕ НА ТРЁХОСНОЕ СЖАТИЕ ПРОВОДИТСЯ ДЛЯ ВОДОНАСЫЩЕННОГО ГРУНТА В ОКРУЖЕНИИ РЕЗИНОВОЙ ОБОЛОЧКИ.

ЭТО КАК-ТО СВЯЗАНО С ДАВЛЕНИЕМ ПОРОВОЙ ВОДЫ И?

АА-АА!

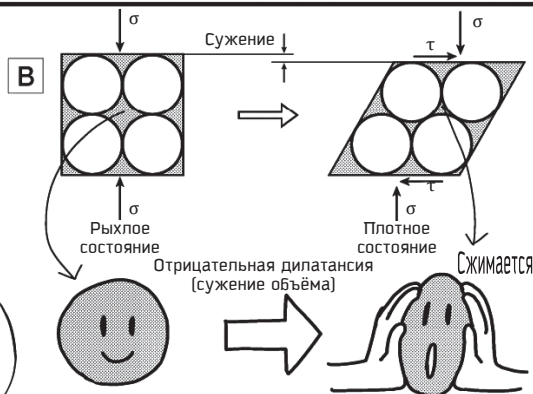
КОНЕЧНО, ПРОЧНОСТЬ НА САВЫГ s ТОЖЕ НЕ ЯВЛЯЕТСЯ ИСКЛЮЧЕНИЕМ. НЕЛЬЗЯ ИГНОРИРОВАТЬ ЕЁ СВЯЗЬ С ДАВЛЕНИЕМ ПОРОВОЙ ВОДЫ И.

РАЗРУШЕНИЯ ПРИ САВЫГЕ, ПРОЯВЛЯЕМЫЕ В ВИДЕ ОСЫПАНИЯ ИЛИ СПОЗДАНИЯ ГРУНТА, НА МИКРОУРОВНЕ ТОЖЕ ПРОИСХОДЯТ ИЗ-ЗА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПОЧВЕННЫХ ЧАСТИЦ. ПОЭТОМУ И ДЕФОРМАЦИЯ САВЫГА СВЯЗАНА С ДАВЛЕНИЕМ ПОРОВОЙ ВОДЫ И. ЕСЛИ, КАК ПОКАЗАНО НА РИС. А, САВЫГ ПРОИСХОДИТ В ПЛОТНОМ ПЕСКЕ ИЛИ ПЕРЕУПЛОТНЁННОМ СВЯЗНОМ ГРУНТЕ (СМ. ГЛ. 5), ТО НАРЯДУ СО СМЕЩЕНИЕМ ПОЧВЕННЫХ ЧАСТИЦ УВЕЛИЧИВАЮТСЯ ПОРЫ И, СЛЕДОМ, ОБЪЁМ ТЕЛА, ВСЛЕДСТВИЕ ЧЕГО ПОЧВА СТАНОВИТСЯ РЫХЛОЙ.



А ЧТО ЖЕ БУДЕТ ПРОИСХОДИТЬ ПРИ САВЫГЕ В РЫХЛОМ ПЕСКЕ ИЛИ В СВЯЗНОМ ГРУНТЕ НОРМАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ? ПОСМОТРИТЕ НА РИС. В.

ПОРЫ СУЖАЮТСЯ, ОБЪЁМ СЖИМАЕТСЯ... ПОЭТОМУ УВЕЛИЧИТСЯ ПЛОТНОСТЬ?



СОВЕРШЕННО ВЕРНО!
ТАКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЁМА
ГРУНТА НАЗЫВАЮТСЯ
ДИЛАТАНСИЕЙ. ТАКИМ ОБРАЗОМ,
ИЗМЕНЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПОРОВОЙ
ВОДЫ И ЯВЛЯЕТСЯ КЛЮЧОМ
К ПОНИМАНИЮ ПРОЧНОСТИ
ГРУНТА.

ЗНАЧИТ, У НАС ЕСТЬ КЛЮЧ:
ДАВЛЕНИЕ ПОРОВОЙ ВОДЫ,
КАРТА КРУГОВ НАПРЯЖЕНИЯ
И ЛИНИЯ ПРОЧНОСТИ.

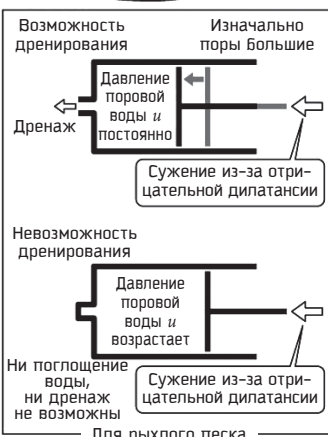
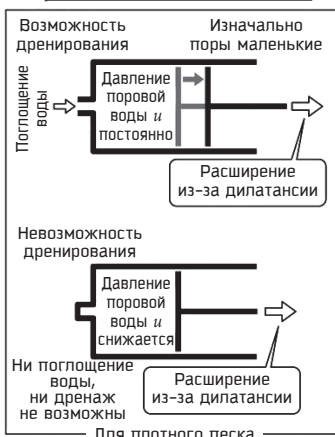
ИТАК, ПРЕДСТАВЬТЕ,
КАК ИЗМЕНЯЕТСЯ ОБЪЁМ
НАСЫЩЕННОГО ГРУНТА
ИЗ-ЗА САВИГА.

СНАЧАЛА
ВСПОМНИТЕ,
ЧТО ПРИВОДИТ
К УМЕНЬШЕНИЮ
ОБЪЁМА
НАСЫЩЕННОГО
ГРУНТА?

ТАК КАК ПОЧВЕННЫЕ
ЧАСТИЦЫ И ПОРОВАЯ ВОДА
НЕСЖИМАЕМЫ, ТО УМЕНЬШЕНИЕ
ОБЪЁМА ПРОИСХОДИТ ЗА СЧЁТ
АРЕНИРОВАНИЯ ПОРОВОЙ ВОДЫ!

НО, ТАК КАК
ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ
ГРУНТА НИЗКАЯ, ПОРОВАЯ
ВОДА НЕ ВЫДАВЛИВАЕТСЯ,
ВОЗНИКАЕТ ИЗБЫТОЧНОЕ
ДАВЛЕНИЕ Δu , ВЕРНО?
(СМ. ГЛ. 5.)

ПРАВИЛЬНО!
ВОЗНИКНЕТ ЛИ ИЗБЫТОЧНОЕ
ДАВЛЕНИЕ ПОРОВОЙ ВОДЫ Δu
ВО ВРЕМЯ САВИГА И ИЗМЕНЕНИЯ
ОБЪЁМА ГРУНТА, ИЛИ, ДРУГИМИ
СЛОВАМИ, ВОЗМОЖНО ЛИ
АРЕНИРОВАНИЕ ПОРОВОЙ ВОДЫ?
ОТВЕТЫ НА ЭТИ ВОПРОСЫ ЗАВЯСЯТ
ОТ ТАК НАЗЫВАЕМЫХ УСЛОВИЙ
АРЕНИРОВАНИЯ.



Изменение давления поровой воды вследствие условий дренирования и особенностей дилатансии

ТАКИМ ОБРАЗОМ, В СВЯЗНЫХ ГРУНТАХ С НИЗКОЙ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬЮ ПОРОВАЯ ВОДА НЕ МОЖЕТ БЫСТРО ДРЕНИРОВАТЬСЯ, И СОЗДАЁТСЯ УСЛОВИЕ НЕВОЗМОЖНОСТИ ДРЕНИРОВАНИЯ, ПОЭТОМУ ВСЛЕДСТВИЕ ДЕФОРМАЦИИ САВИГА ВОЗНИКНЕТ ИЗБЫТОЧНОЕ ДАВЛЕНИЕ ПОРОВОЙ ВОДЫ Δu .

И НАОБОРОТ, В ПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ ВЫСОКАЯ, ДРЕНАЖ ВОЗМОЖЕН И ИЗБЫТОЧНОЕ ДАВЛЕНИЕ ПОРОВОЙ ВОДЫ Δu НЕ ВОЗНИКАЕТ!

ПОЛУЧАЕТСЯ, ЧТО В ПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ ДАВЛЕНИЕ ПОРОВОЙ ВОДЫ И РАВНО ГИДРОСТАТИЧЕСКОМУ ДАВЛЕНИЮ u_0 ?

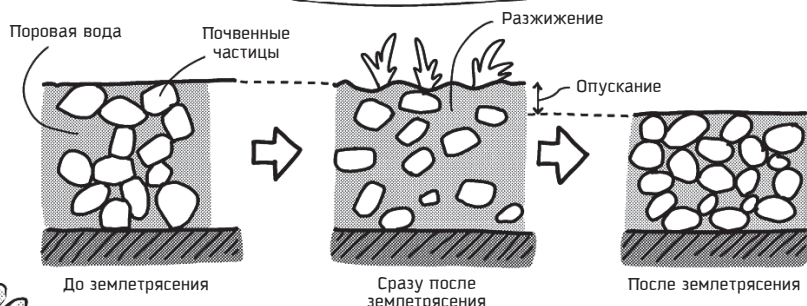
КСТАТИ, ЕСЛИ ПРОИСХОДИТ СИЛЬНЫЙ САВИГ ЗА КОРОТКОЕ ВРЕМЯ, КАК ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ, ТО И В ПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ ИЗБЫТОЧНОЕ ДАВЛЕНИЕ ПОРОВОЙ ВОДЫ Δu НЕ СМОЖЕТ РАССЕЯТЬСЯ.

ИТАК, КАК ВЛИЯЕТ ИЗБЫТОЧНОЕ ДАВЛЕНИЕ ПОРОВОЙ ВОДЫ Δu НА ПРОЧНОСТЬ НА САВИГ В ПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ?

ИЗ-ЗА ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ Δu ЭФФЕКТИВНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ σ' УМЕНЬШИТСЯ... ЗНАЧИТ, СВЯЗЬ МЕЖДУ ПОЧВЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ СТАНЕТ СЛАБЕЕ И ИСЧЕЗНЕТ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРЕНИЯ, ТАК, ЧТО $\mu = 0$?

НО ВЕДЬ В ПЕСЧАНЫХ ГРУНТАХ ИЗНАЧАЛЬНО СИЛА СЦЕПЛЕНИЯ $c = 0$, ТО ЕСТЬ ОНИ НЕ ОБЛАДАЮТ СОПРОТИВЛЕНИЕМ СЦЕПЛЕНИЯ. А ЕСЛИ ЕЩЁ И СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРЕНИЯ ИСЧЕЗНЕТ...

ТАК И ЕСТЬ! ИЗ-ЗА ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ПОРОВОЙ ВОДЫ УМЕНЬШАЕТСЯ ЭФФЕКТИВНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ, А ВСЛЕД ЗА ЭТИМ ИСЧЕЗАЕТ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРЕНИЯ, И ПОЛУЧАЕТСЯ, ЧТО ПРОЧНОСТЬ НА САВИГ $s = 0$. ЭТО МОЖЕТ ПРИВЕСТИ К РАЗЖИЖЕНИЮ ГРУНТА (СМ. СТР. 215).



Возникновение разжижения вследствие землетрясения

6.3. ИСПЫТАНИЕ ГРУНТА НА СДВИГ



Исходя из того, что на сопротивление деформации грунта влияет давление поровой воды u , которое определяется эффективным напряжением σ' , критерий прочности Кулона можно переписать следующим образом:

$$s = c' + (\sigma - u)\operatorname{tg}\varphi = c' + \sigma'\operatorname{tg}\varphi',$$

где u – давление поровой воды (= гидростатическое давление u_0 + избыточное давление поровой воды Δu); c' – эффективная сила сцепления; φ' – эффективный угол внутреннего трения⁹.



Значит, при наличии дренажных условий возникновение и рассеивание избыточного давления поровой воды Δu влияет на эффективное напряжение σ' и сопротивление трения.



Вот он – ключ!

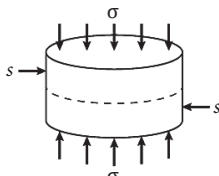
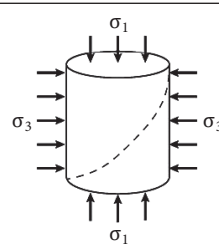
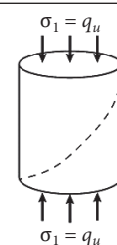


Ага. И поскольку прочность грунта на сдвиг s зависит не только от вида и структуры почвы, но и от плотности, влажности, условий дренирования и т. д., то для проведения лабораторных испытаний нужно оценить условия на месте и величину нагрузки¹⁰.



На практике чаще всего проводят следующие испытания: одноплоскостное на сдвиг, на трёхосное сжатие и испытание на прочность при одноосном сжатии.

Виды и особенности лабораторных испытаний на сдвиг

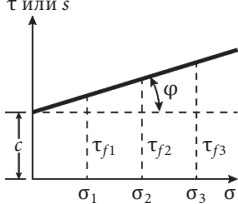
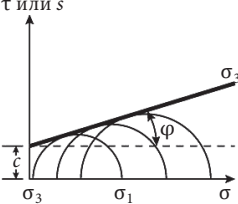
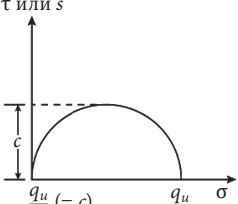
	Напряжение сдвига	Главные напряжения	
Способ нагрузки	Прямая нагрузка в виде вертикальных и поперечных сил на граничную поверхность образца или на определенную плоскость сдвига	При нагрузке на образец на его граничную поверхность действуют главные напряжения. Рассчитывают возникшие на поверхности сдвига при этом непрямом воздействии вертикальное напряжение и напряжение сдвига	
Вид испытания ¹¹	Одноплоскостное испытание на сдвиг	Испытание на трёхосное сжатие	Испытание на прочность при одноосном сжатии
Метод сдвига			

⁹ Поскольку значения силы сцепления c и внутреннего угла трения φ отличаются от подобных значений при полном напряжении, их называют эффективной силой сцепления c' и эффективным углом внутреннего трения φ' (эффективным углом сопротивления сдвигу).

¹⁰ Если проведение лабораторного испытания на сдвиг затруднительно, то проводят испытания на месте, например испытание на сдвиг с лопастью или стандартное испытание на проникновение. При этом учитывают результаты исследований физических свойств образца и наблюдений за ним.

¹¹ Кроме перечисленных в таблице, существуют еще такие лабораторные испытания грунтов на сдвиг, как испытание на кольцевой сдвиг с напряжением сдвига и повторяющееся трёхосное испытание с главными напряжениями.

Продолжение таблицы

	Напряжение сдвига	Главные напряжения	
Описание испытания	Образец помещается в коробку, которая разделяет его на верхнюю и нижнюю части, и подвергается сдвигу в горизонтальном направлении под воздействием вертикального напряжения σ . Выполните три или более испытаний с различными вертикальными напряжениями σ и определите взаимосвязь с напряжением сдвига $\tau_f (= s)$ в момент разрушения	Образец помещается в резиновую оболочку и подвергается боковому давлению σ_3 воды. Испытание проводят до разрушения образца приложением вертикальной нагрузки. Выполните три или более испытаний с различными боковыми давлениями σ_3 и определите взаимосвязь с вертикальным напряжением σ_1 в момент разрушения	Цилиндрической формы образец ничем не ограничивается и не подвергается воздействию бокового давления σ_3 . Испытание проводят до разрушения образца приложением вертикальной нагрузки. Найдите прочность на одноосное сжатие q_u как максимальное напряжение сжатия
Определение постоянных сдвига	 На горизонтальной оси отложите вертикальное напряжение σ, а на вертикальной оси – прочность на сдвиг s и отметьте на графике полученные в процессе измерений значения. Через эти точки проведите линию прочности Кулона и найдите по ней силу сцепления c и угол внутреннего трения ϕ	 На горизонтальной оси отметьте для каждого значения σ_3 соответствующее значение σ_1 и начертите круги напряжений Мора диаметром $(\sigma_1 - \sigma_3)$. Проведите общую касательную к этим кругам (линию прочности Кулона) и найдите силу сцепления c и угол внутреннего трения ϕ	 Если испытание проводится для насыщенного связного грунта, то возникнут условия невозможности дренажа в неуплотнённом грунте. То есть $\phi = 0$, а $c = q_u/2$
Отличительные особенности	Простой метод, подходящий для всех типов грунта, но в зависимости от условий могут возникать деформации и неравномерное напряжение	Подходит для всех типов грунтов, испытание проводится на основе теоретических условий. Но трудноосуществим на практике	Самое простое в реализации испытание, но в общем случае подходит только для самонесущих связных грунтов



Как бы то ни было, из-за сдвига в грунте возникает дилатансия, поэтому во время лабораторных испытаний на сдвиг нужно обращать внимание на условия дренирования и скорость сдвига.



Но ведь в реальных условиях существуют различные условия дренирования...

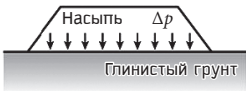
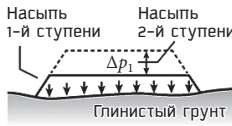
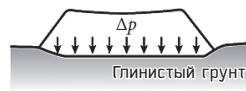


И что ещё за скорость сдвига?



Во время лабораторных испытаний на сдвиг условия дренирования до сдвига и во время него объединяются, и на этом основании выделяют три вида испытаний: неконсолидированно-недренированные, консолидированно-дренированные и консолидированно-недренированные.

Состояние грунта и дренажные условия лабораторных испытаний

	Сразу после возникновения нагрузки	Под ступенчатой нагрузкой	По прошествии длительного времени после начала воздействия нагрузки
			
	Вследствие увеличения нагрузки возникает избыточное давление поровой воды	Консолидация заканчивается под нагрузкой 1-й ступени, прочность возрастает	Консолидация продолжается, увеличенная нагрузка в виде эффективного напряжения передаётся между почвенными частицами
Состояние грунта	Консолидация грунта не происходит, вся дополнительная нагрузка оборачивается избыточным давлением поровой воды, прочность на сдвиг остаётся неизменной (самое опасное состояние)	Когда на мягкий глинистый грунт помещается нагрузка, перед каждой новой ступенью насыпи следует оценить безопасность следующей нагрузки на основании оценки увеличения прочности грунта вследствие консолидации	Если нагрузка воздействует на протяжении долгого времени, то происходит консолидация, а увеличение нагрузки в виде эффективного напряжения передаётся на почвенные частицы
Условия лабораторного испытания	Сдвиг происходит в условиях отсутствия дренажа на протяжении всего испытания Неконсолидированно-недренированный сдвиг (испытание UU)	После завершения консолидации грунта из-за первой нагрузки осуществить сдвиг, не допуская дренирования Консолидированно-недренированный сдвиг (испытание CU)	Сдвиг происходит с дренированием на протяжении всего испытания, при этом давление поровой воды не увеличивается, действует только эффективное напряжение Консолидированно-дренированный сдвиг (испытание CD)



Сначала рассмотрим неконсолидированно-недренированное испытание (UU-испытание), целью которого является исследование кратковременной несущей способности грунта и его стабильности, когда нагрузка прикладывается быстро (проблема кратковременной устойчивости). Условиями данного испытания являются недопущение проникновения или дренирования поровой воды как до сдвига, так и во время него. Не допускается также изменение объёма.



UU – это по первым буквам словосочетания Unconsolidated Undrained, да?



Далее рассмотрим консолидированно-недренированное испытание (CU-испытание). Его задача – исследовать увеличение прочности грунта вследствие консолидации и стабильность уже уплотнённого грунта, когда к нему быстро прикладывается нагрузка. Для этого до сдвига образец подвергается воздействию напряжения консолидации, а затем в отсутствие дренирования осуществляется сдвиг¹².



Значит, CU – это Consolidated Undrained.



И наконец, консолидированно-дренированное испытание (CD-испытание), при котором до сдвига образец подвергается консолидации, а затем, чтобы не возникло избыточное давление поровой воды, во время сдвига разрешается дренирование и изменение объёма. Скорость приложения нагрузки довольно медленная.



Ага, Consolidated Drained – поэтому CD!



Если в глинистом слое во время строительных работ не происходит консолидация и не меняется влажность, или водонасыщенная глина разрушается сразу после возведения насыпи, то какое испытание подойдёт в таких случаях?



Хм, в обоих случаях нет консолидации и дренирования... значит, UU-испытание!



А что будем делать, если после консолидации глинистая насыпь быстро разрушилась?



Если консолидация произошла, а потом быстрое разрушение, значит, отсутствует дренирование... тогда CU-испытание!



А если грунт после уплотнения разрушается постепенно?



Значит, после уплотнения постепенное разрушение грунта сопровождается дренированием... А это CD-испытание.

¹² Если во время сдвига при консолидированно-недренированном испытании измеряется избыточное давление поровой воды, то такое испытание называют CU. В этом случае критерий прочности Кулона будет таким:

$$s = c' + (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi' = c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi' \quad (\text{где } c' = c_d, \varphi' = \varphi_d).$$



Совершенно верно. В частности, в качестве испытания на сдвиг с регулированием условий дренирования нередко используется испытание на трёхосное сжатие. Подытожим.

Условия дренирования и постоянные сдвига

Название испытания		Условия дренирования		Вычисляемые постоянные сдвига	Условия на месте
		процесс консолидации	процесс сдвига		
Неконсолидированно-недренированное испытание	UU-испытание	–	Нет дренажа	c_u, φ_u	Изучение проблем краткосрочной устойчивости. Например, при быстрых нагрузках (быстрое строительство) на глинистые грунты
Консолидированно-недренированное испытание	CU-испытание	Дренаж	Нет дренажа	c_{cu}, φ_{cu}	Определение темпа роста прочности на сдвиг s_u/p при отсутствии дренажа относительно напряжения консолидации p . Например, при быстрой нагрузке (быстром строительстве) на консолидированный глинистый грунт
	CU-испытание	Дренаж	Нет дренажа (измерение u)	c', φ'	
Консолидированно-дренированное испытание	CD-испытание	Дренаж	Дренаж	c_d, φ_d	Изучение долгосрочных проблем при строительстве. Например, на песчаных грунтах с хорошей водопроницаемостью



Получается, что в зависимости от условий дренирования сила сцепления c и угол внутреннего трения φ в каждом испытании различаются: c_u и φ_u в UU-испытании, c_{cu} и φ_{cu} в CU-испытании, c_d и φ_d в CD-испытании...

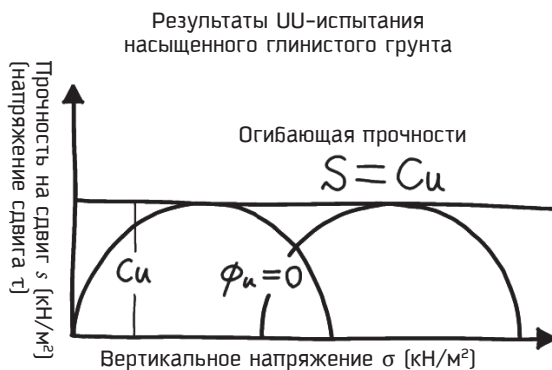


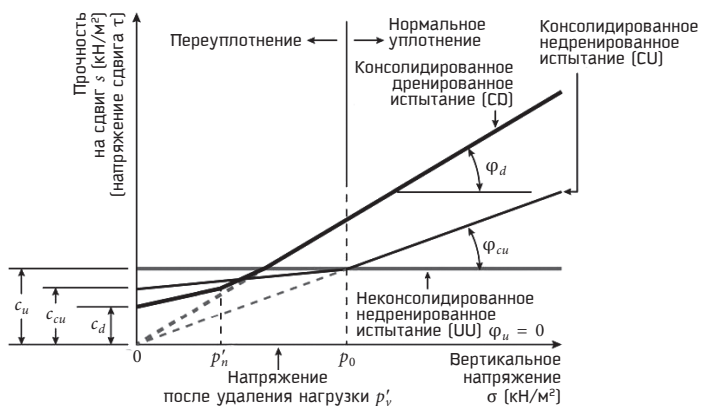
Да! Постоянные сдвига в общем случае будут различаться в зависимости от условий испытаний. Поэтому с помощью нижнего индекса показывают, при каких условиях были найдены данная сила сцепления c и угол внутреннего трения φ .



Получается, что даже такие крупные явления, как обрушение грунта или оползни, прежде всего изучаются на основе подобных лабораторных испытаний, верно?

6.4. ВИДЫ ГРУНТА И ОСОБЕННОСТИ СДВИГА





А КАК БУДЕТ ПРИ ДРУГИХ УСЛОВИЯХ ДРЕНИРОВАНИЯ?

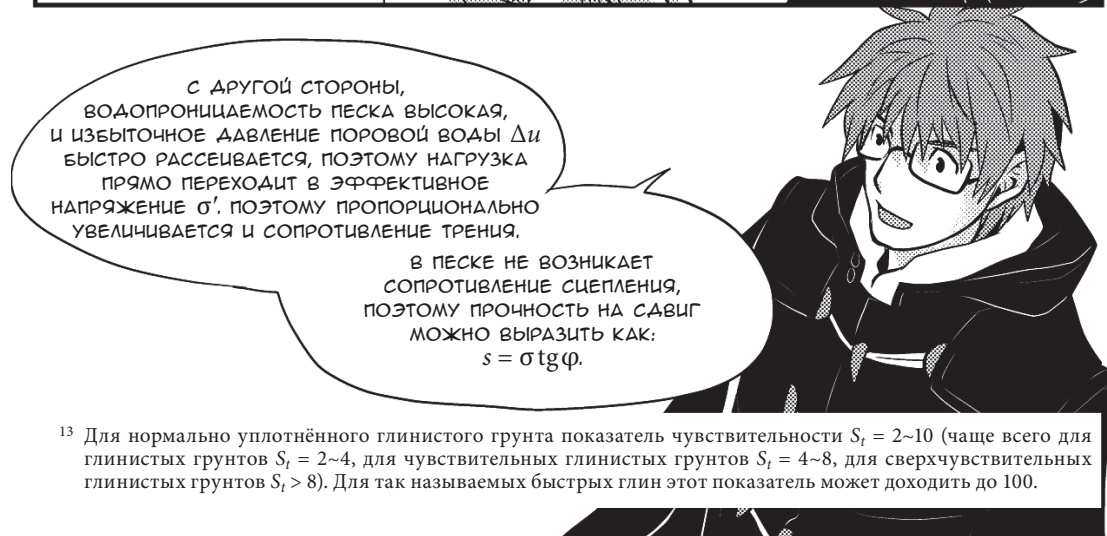
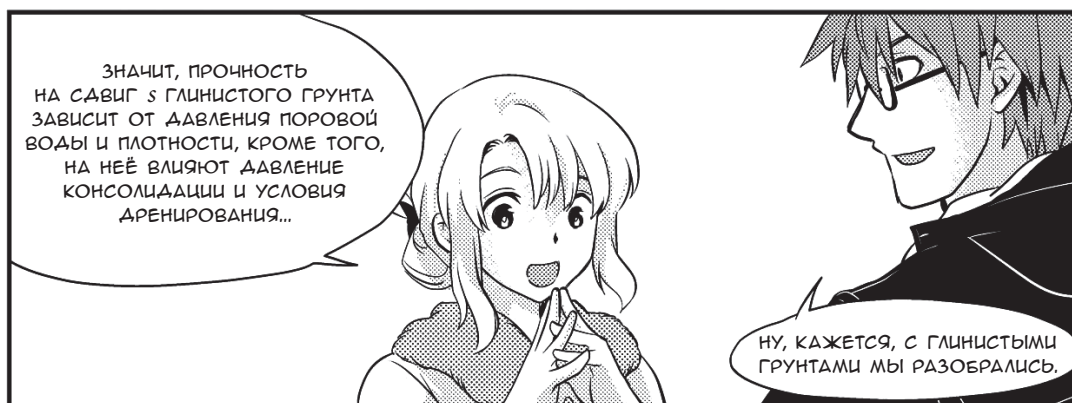
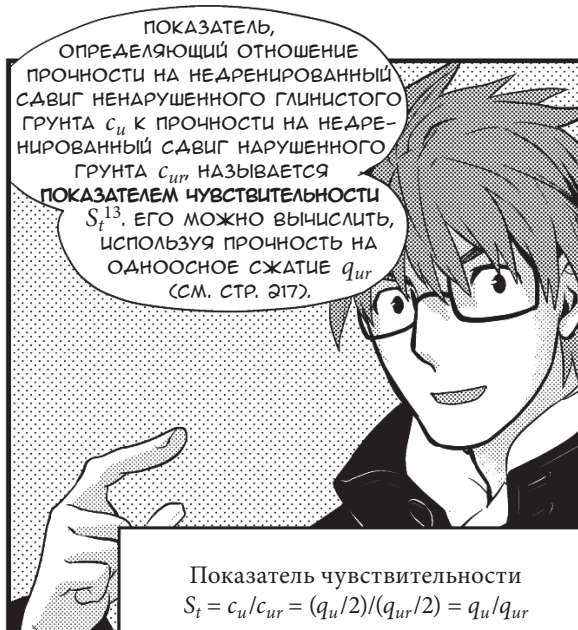
ПРОЧНОСТЬ НА СДВИГ s НЕНАРУШЕННОГО НАСЫЩЕННОГО ГЛИНИСТОГО ГРУНТА С ДАВЛЕНИЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КОНСОЛИДАЦИИ p_0 БУДЕТ РАЗЛИЧАТЬСЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ДРЕНИРОВАНИЯ.

РАЗ В ОБЛАСТИ НОРМАЛЬНОГО УПЛОТНЕНИЯ ПРОЧНОСТЬ НА СДВИГ s ВЫШЕ ПРИ CD-ИСПЫТАНИИ, ЧЕМ ПРИ UU И CU, ТО ЭТО ЗНАЧИТ, ЧТО ПОСЛЕ КОНСОЛИДАЦИИ ГЛИНИСТОГО ГРУНТА ЕГО ПРОЧНОСТЬ ВОЗРАСТАЕТ, ДА?

ОТЛИЧНО ПОДМЕЧЕНО! ПРОЧНОСТЬ ГЛИНИСТОГО ГРУНТА УВЕЛИЧИВАЕТСЯ ПО МЕРЕ УПЛОТНЕНИЯ. ЕСЛИ ДАВЛЕНИЕ УПЛОТНЕНИЯ РАВНО p , А ПРОЧНОСТЬ НА НЕДРЕНИРОВАННЫЙ СДВИГ $s = c_u$, ТО ПРИРОСТ ПЛОТНОСТИ ЗА СЧЁТ ДАВЛЕНИЯ УПЛОТНЕНИЯ МОЖНО ВЫРАЗИТЬ КАК c_u/p .

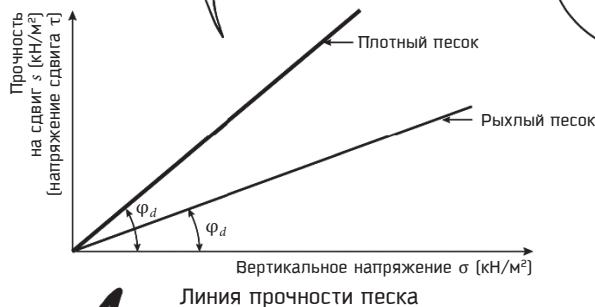
НО ПОЛУЧИТЬ ЭТО ЗНАЧЕНИЕ ПОСРЕДСТВОМ CD-ИСПЫТАНИЯ БЕЗ СОЗДАНИЯ ЧРЕЗМЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПОРОВОЙ ВОДЫ Δu МОЖЕТ БЫТЬ ЗАТРУДНИТЕЛЬНО, ПОЭТОМУ ЕГО ОПРЕДЕЛЯЮТ ПОСРЕДСТВОМ CU-ИСПЫТАНИЯ, МЕНЯЯ ДАВЛЕНИЕ КОНСОЛИДАЦИИ.

А ЧТО, НАРУШЕННОСТЬ ИЛИ НЕНАРУШЕННОСТЬ ОБРАЗЦА ТОЖЕ ВЛИЯЕТ НА ПРОЧНОСТЬ НА СДВИГ s ?



¹³ Для нормально уплотнённого глинистого грунта показатель чувствительности $S_t = 2 \sim 10$ (чаще всего для глинистых грунтов $S_t = 2 \sim 4$, для чувствительных глинистых грунтов $S_t = 4 \sim 8$, для сверхчувствительных глинистых грунтов $S_t > 8$). Для так называемых быстрых глин этот показатель может достигать до 100.

ПРОЧНОСТЬ НА СДВИГ s ПЕСКА ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ТРЕНИЯ, А УГОЛ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ φ БУДЕТ ТЕМ БОЛЬШЕ, ЧЕМ ПЛОТНЕЕ ПЕСОК.



НА ВЕЛИЧИНУ УГЛА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ПЕСКА φ_d^{14} , КРОМЕ ТРЕНИЯ ПОЧВЕННЫХ ЧАСТИЦ, ВЛИЯЕТ ТАКЖЕ ДИЛАТАНСИЯ И СОПРОТИВЛЕНИЕ ВЗАИМНОГО СЦЕПЛЕНИЯ φ_r^{15} .

ЕСЛИ ВЛИЯНИЕ ДИЛАТАНСИИ¹⁶ ОБОЗНАЧИТЬ КАК $\Delta\varphi_D$, ТО УГОЛ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ МОЖНО ВЫРАЗИТЬ КАК:
 $\varphi_d = \varphi_r + \Delta\varphi_D$.

Значение φ_d плотного песка хотя и зависит от формы и размера почвенных частиц, но обычно равно от 35° до 45°. А для рыхлого песка оно чаще всего находится в пределах от 30° до 35°.

КСТАТИ, А КАК ОПРЕДЕЛИТЬ, ПЛОТНЫЙ ПЕСОК ИЛИ РЫХЛЫЙ?

ПЛОТНОСТЬ ПЕСКА ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ПОКАЗАТЕЛЕМ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ D_r , КОТОРЫЙ ПОЛУЧАЮТ ИЗ ИСПЫТАНИЯ НА МИНИМАЛЬНУЮ И МАКСИМАЛЬНУЮ ПЛОТНОСТЬ ПЕСКА.

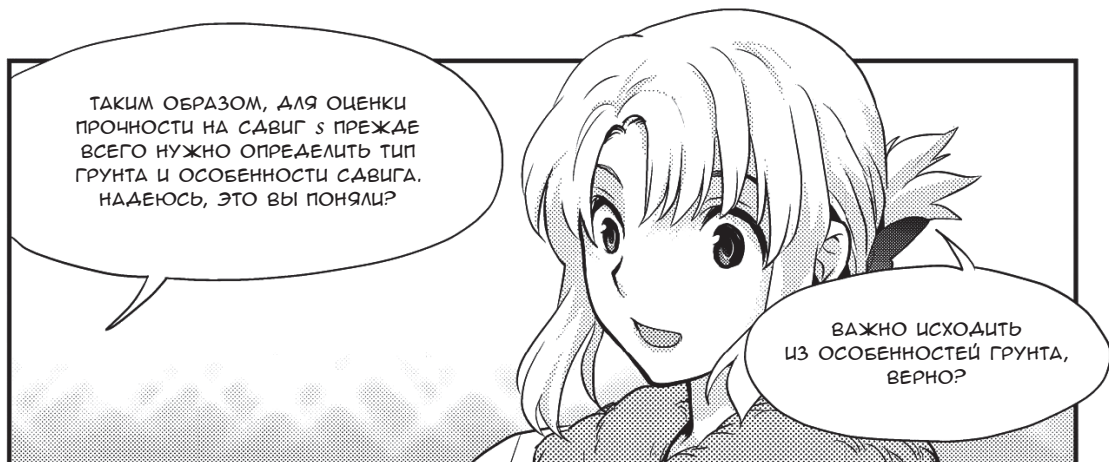
$$\text{Относительная плотность } D_r = (e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min}),$$

где e – коэффициент пустотности, а $e_{\max}$, $e_{\min}$ – максимальный и минимальный коэффициенты пустотности соответственно

¹⁴ Испытание на трёхосное сжатие обычно означает консолидированно-дренированный сдвиг, поэтому здесь используется обозначение φ_d .

¹⁵ На сопротивление взаимного сцепления φ_r влияют размер и форма почвенных частиц, а также шероховатость их поверхности. Его значение близко к углу наклона насыпи из сухого песка (угол покоя).

¹⁶ Влияние дилатансии $\Delta\varphi_D$ больше в плотном песке, где она выше.



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Испытание на одноплоскостной сдвиг

1. Цель и описание исследования

Испытание на одноплоскостной сдвиг проводится с целью получения постоянных сдвига (силы сцепления c , угла внутреннего трения φ), которые используются в расчётах давления на подпорную стену, устойчивости склона, расчёта несущей способности фундамента. Это испытание из-за различий в процессе сдвига подразделяется на два подвида: испытание с постоянным объёмом и испытание с постоянным давлением.

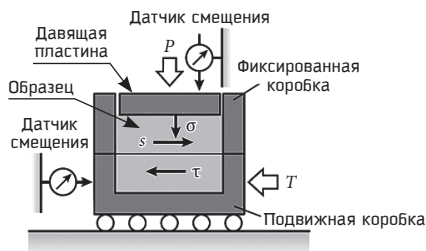
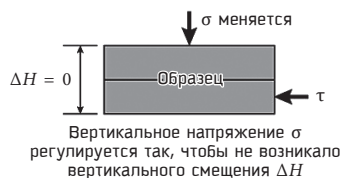


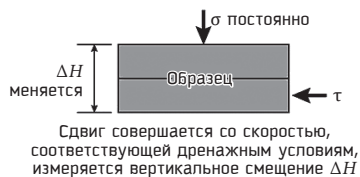
Схема испытания на одноплоскостной сдвиг

1. *Испытание с постоянным объёмом* (JGS 0560). Испытание, в котором сдвиг производится при постоянном объёме образца. Полученное при этом максимальное напряжение сдвига называется прочностью на сдвиг при постоянном объёме. Результаты подобного испытания с водонасыщенным грунтом соответствуют CU-испытанию.



Испытание с постоянным объёмом

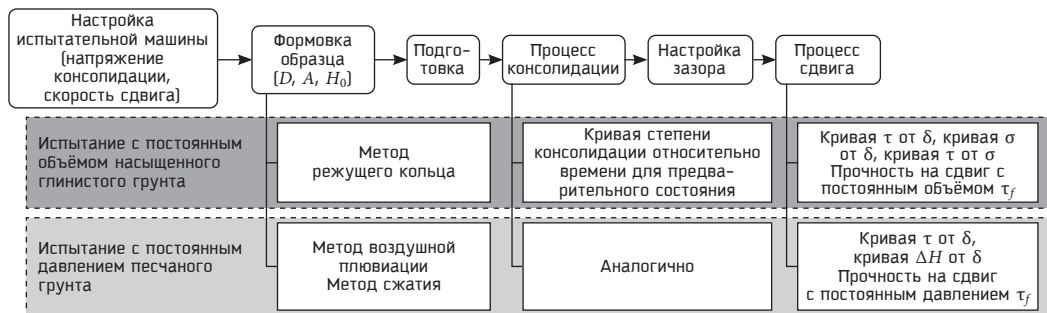
2. *Испытание с постоянным давлением* (JGS 0561). Испытание, в котором сдвиг производится при постоянном вертикальном напряжении. Полученное при этом максимальное напряжение сдвига называется прочностью на сдвиг при постоянном давлении. Так как при данном испытании не возникает избыточное давление поровой воды Δu , оно соответствует CD-испытанию.



Испытание с постоянным давлением

2. Оборудование для исследования и процедура

Образец для испытаний обычно представляет собой ненарушенный комковатый экземпляр водонасыщенной глинистой почвы для испытания с фиксированным объёмом и нарушенный некомковатый экземпляр песчаной почвы для испытания с фиксированным давлением. Испытания проводятся по описанной ниже процедуре.

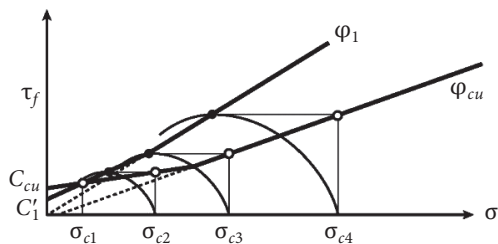


3. Результаты испытания

Постоянные сдвига определяются по следующей схеме на основе результатов испытания с постоянным объёмом либо испытания с постоянным давлением.

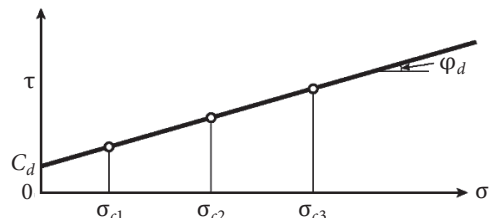
1. Испытание с постоянным объёмом

- По результатам нескольких испытаний построить графики напряжений (τ от σ).
- Отложить напряжения консолидации σ_c относительно прочности на сдвиг при постоянном объёме τ_f .
- По прямой, соединяющей (τ_f ; σ_c), и на основе общего напряжения определить постоянные сдвига c_{cu} , ϕ_{cu} .
- По прямой, соединяющей τ_f на траекториях напряжений, и на основе эффективного напряжения определить постоянные сдвига c'_1 , ϕ'_1 .
- Постройте график коэффициента пустотности до и после уплотнения относительно напряжения консолидации σ_c и используйте его для подтверждения однородности образца.



2. Испытание с постоянным давлением

- По результатам нескольких испытаний постройте график прочности на сдвиг при постоянном давлении τ_f относительно напряжения консолидации σ_c .
- По прямой, соединяющей (τ_f ; σ_c), определите постоянные сдвига c_d , ϕ_d .
- Постройте график коэффициента пустотности до и после уплотнения, а также в момент максимального напряжения сдвига относительно напряжения консолидации σ_c и используйте его для подтверждения однородности образца.

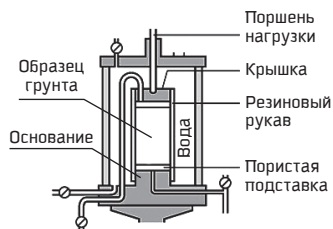


Для расчёта устойчивости, когда вязкий грунт уплотняется, а потом на нём быстро возводится насыпь, используют показатели c_{cu} , ϕ_{cu} , s_w/p , полученные в результате испытания с постоянным объёмом. Для расчёта долговременной устойчивости песчаных и вязких грунтов используются показатели c_d , ϕ_d , полученные в результате испытания с постоянным давлением.

Испытание грунта на трёхосное сжатие (JGS 0521, 0522, 0523, 0524)

1. Цель и описание исследования

Испытание грунта на трёхосное сжатие осуществляется при воссоздании в лаборатории условий, близких к реальным, с целью определения прочности на сдвиг τ_f . Комбинируя условия дренирования до сдвига (во время консолидации) и во время сдвига, выделяют три типа испытаний: неконсолидированные недренированные (UU), консолидированные дренированные (CU, $\bar{C}U$) и консолидированные недренированные (CD).



2. Оборудование для исследования и процедура

Процедура проведения испытания на трёхосное сжатие представлена ниже.

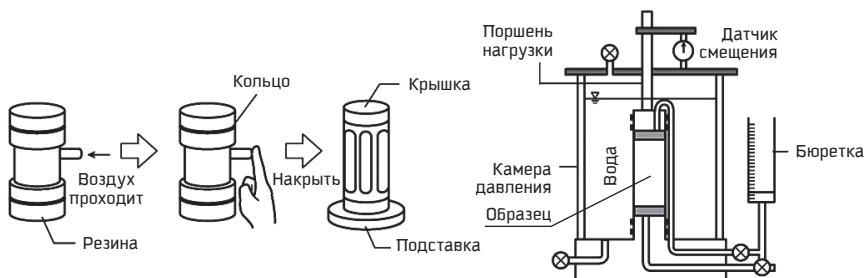


- ① Образец помещают на пористую подставку в резиновый рукав и накрывают крышкой. Сверху и снизу скрепляют резиновыми кольцами.
- ② Для консолидирования создают в камере давление при открытых дренажных клапанах С, D и прикладывают к образцу постоянное изотропное напряжение. В это время происходит консолидация, а поровая вода будет дренировать в бюретку. На основании уровня воды в бюретке вычисляют изменение объёма образца.
- ③ Сдвиг совершается посредством воздействия на образец постоянного изотропного напряжения, к которому добавляется осевое сжатие поршнем. Сжатие продолжается до тех пор, пока образец не разрушится.

Если сила осевого сжатия равна P , а площадь поперечного сечения образца равна A , то разницу главных напряжений, представленную здесь разницей между осевым напряжением σ_a и боковым напряжением σ_r , можно вычислить по следующей формуле:

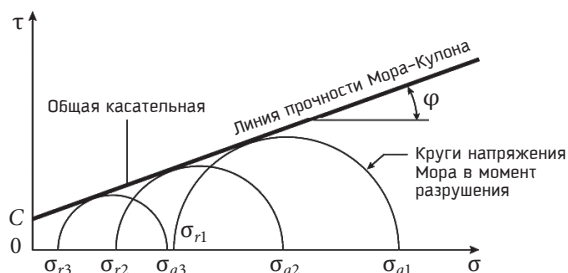
$$(\sigma_a - \sigma_r) = \frac{P}{A} \text{ (кН/м}^2\text{)}.$$

- ④ Подготавливают три или более одинаковых образцов и повторяют пункты с ① по ③, меняя каждый раз боковое давление σ_r .



3. Результаты испытания

Для каждого образца определите максимальную разницу главных напряжений $(\sigma_a - \sigma_r)_{\max}$ и, отложив эти значения на горизонтальной оси (ось σ), начертите круги Мора (круги напряжений). Точка пересечения общей касательной (огibaющей) к кругам Мора с вертикальной осью даст значение силы сцепления c , а угол наклона этой касательной даст значение угла внутреннего трения φ (способ определения по кругам Мора в момент разрушения).



В испытаниях на трёхосное сжатие для определения прочности на сдвиг τ_f при боковой силе сжатия $(\sigma_a - \sigma_r)_{\max}$ необходимо использовать круги Мора. Основываясь на предположке, что огибающая касается всех кругов Мора, определить постоянные сдвига можно также методом определения на основании силы сжатия и напряжения консолидации и методом определения на основании 1/2 силы сжатия и равномерного эффективного напряжения

Определение постоянных сдвига (испытание на одноплоскостной сдвиг)

Задача 1

Было проведено испытание грунта на одноплоскостной сдвиг, результаты которого представлены в таблице. Найдите силу сцепления c и угол внутреннего сжатия φ .

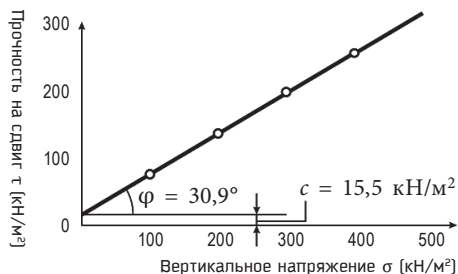
Образец	①	②	③	④
Вертикальное напряжение σ (кН/м ²)	100	200	300	400
Прочность на сдвиг τ (кН/м ²)	75	135	196	254

Рассуждение

Изобразив на графике отношения τ от σ и начертив линию прочности Кулона, из точки её пересечения с вертикальной осью получим значение силы сцепления c , а угол наклона линии даст значение угла внутреннего трения φ .

Решение

Из графика: сила сцепления $c = 15,5$ кН/м², а угол внутреннего трения $\varphi = 30,9^\circ$.



Определение постоянных сдвига (испытание на трёхосное сжатие)

Задача 2

Было проведено испытание грунта на трёхосный сдвиг в условиях консолидированно-дренированности (CD-испытание). Результаты испытания представлены в таблице. Найдите постоянные сдвига для данного грунта (силу сцепления c_d , угол внутреннего сжатия φ_d).

Образец	①	②	③
Боковое напряжение (= напряжение консолидации) σ_3 (кН/м ²)	100	200	300
Напряжение сжатия поршнем σ ($= \sigma_1 - \sigma_3$) (кН/м ²)	156	277	401

Рассуждение

На основании полученных данных испытания трех образцов вычислим значение максимального главного напряжения σ_1 , равное напряжению сжатия поршнем σ , плюс боковое напряжение σ_3 . Для каждой пары σ_1 и σ_3 начертим круги напряжения Мора и проведём общую касательную к этим кругам. Из точки пересечения касательной с вертикальной осью получим значение силы сцепления c_d , а угол её наклона даст значение угла внутреннего трения φ_d .

Решение

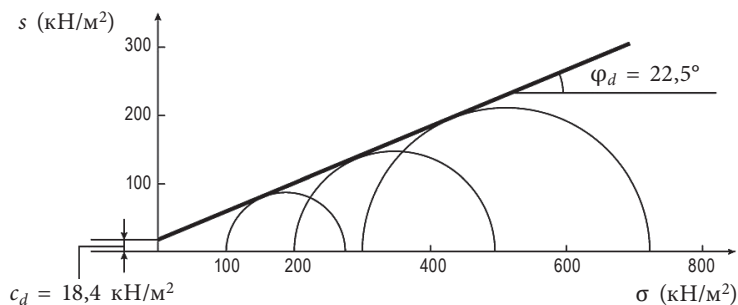
Для каждого из образцов максимальное значение главного напряжения σ_1 будет равно:

① $\sigma + \sigma_3 = 100 + 156 = 256$ кН/м²;

② $\sigma + \sigma_3 = 200 + 277 = 477$ кН/м²;

③ $\sigma + \sigma_3 = 300 + 401 = 701$ кН/м².

Вот что получим:



Из графика кругов напряжений Мора получаем, что сила сцепления $c = 18,4$ кН/м², а угол внутреннего трения $\varphi = 22,5^\circ$.

Вычисление показателя чувствительности (испытание на одноосное сжатие)

Задача 3

Было проведено испытание ненарушенного насыщенного глинистого грунта на одноосное сжатие. В результате получено значение прочности на одноосное сжатие, равное 220 кН/м². А после перемешивания этого грунта значение прочности на одноосное сжатие стало равно 40 кН/м². Найдите значение прочности на недренированный сдвиг s_u и показатель чувствительности S_t .

Решение

По формуле прочности на недренированный сдвиг получаем:

$$s_u = \frac{q_u}{2} = \frac{220}{2} = 110 \text{ кН/м}^2.$$

По формуле показателя чувствительности получаем:

$$S_t = \frac{q_u}{q_{ur}} = \frac{220}{40} = 5,5.$$

Задание выполнено.

Причины разжижения грунтов и меры профилактики

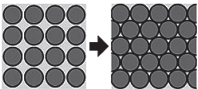
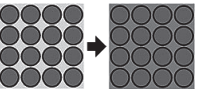
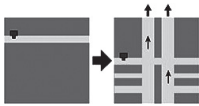
Когда на насыщенный песчаный грунт оказывается внезапное повторяющееся воздействие большой силы, например при землетрясении, то возрастает давление поровой воды, а эффективное напряжение исчезает. При этом связи между почвенными частицами разрываются, и грунт разжижается, почвенные частицы плавают в воде. Непосредственно наблюдать явление разжижения грунта невозможно, но убедиться в его наличии можно по подъёму люков, заваливанию электрических столбов, песчаным кипениям и т. д. Ниже рассматриваются основные причины разжижения грунтов и меры по их предотвращению.

1. Причины разжижения грунтов

1. *Размер частиц, гранулометрический состав.* Разжижение легко возникает в мелкозернистых песках с однородным размером частиц или в илистых песках. (Однако и в крупнозернистых песках или гравии, если они зажаты между водонепроницаемыми слоями, есть вероятность разжижения из-за повышения избыточного давления поровой воды.)
2. *Предварительное эффективное напряжение.* Чем больше действующее на грунт напряжение: давления вскрыши или нагрузки, – тем маловероятнее возникновение разжижения.
3. *Плотность.* В рыхлом песчаном грунте разжижение возникает легко из-за отрицательной дилатансии (тенденции к объёмному сжатию).
4. *Уровень грунтовых вод.* Разжижение легко возникает не только в руслах рек, но и в районах с неглубоким уровнем грунтовых вод: в бывших руслах рек, на мелиорированных землях, в дельтах рек и т. п.
5. *Сила и продолжительность землетрясений.* Чем сильнее и продолжительнее землетрясение, тем вероятнее разжижение грунта.

2. Меры предотвращения разжижения грунтов

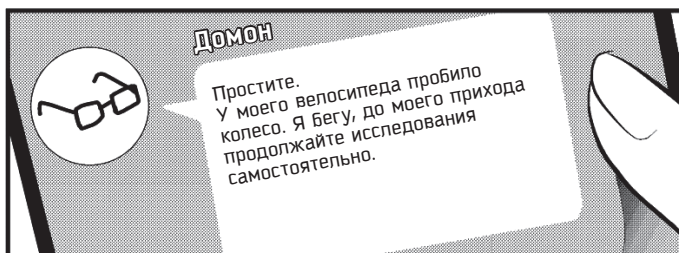
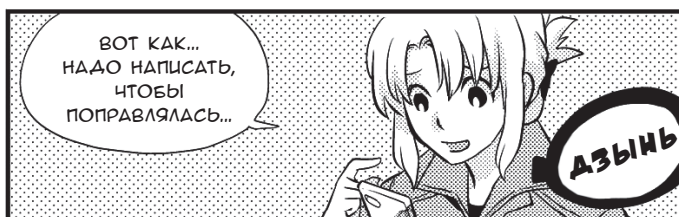
Для предотвращения разжижения грунта и для уменьшения причиняемого им ущерба наиболее эффективным способом является воздействие на факторы, являющиеся причинами разжижений. Для этого предпринимают меры по уплотнению грунта, по укреплению грунта и по отводу воды из грунта. Например, среди мер по уплотнению вибрацией или трамбовкой были разработаны метод укрепления путём создания песчаных свай и метод вибрационной ротации. А для облегчения рассеяния избыточного давления поровой воды используют, например, гравийные сваи в грунте, такой метод называется гравийным дренированием.

	Контрмеры для грунта			Контрмеры для конструкций
Основные причины	Уплотнение грунта  Повышение плотности	Укрепление грунта  Укрепление стабилизаторами	Отвод воды из грунта  Отвод воды посредством скважин	Усиление, например, сваями  Сваи, достающие до твёрдого слоя
Цель воздействия	- Новые конструкции - Грунт непосредственно под конструкцией	- Новые конструкции - Уже существующие конструкции - Грунт непосредственно под конструкцией - Окружающие участки грунта	- Новые конструкции - Уже существующие конструкции - Грунт непосредственно под конструкцией	- Строительный фундамент - Причалы и т. п. * В основном для новых сооружений
Эффективность	Мощные землетрясения Δ	- Мощные землетрясения $\bigcirc$ - Сейсмическое усиление $\bigcirc$	- Мощные землетрясения Δ - Сейсмическое усиление $\bigcirc$	- Мощные землетрясения $\bigcirc$ - Сейсмическое усиление $\bigcirc$
Экономичность	Относительно недорого	Дорого	Недорого, но есть вероятность возникновения деформации	Контрмеры против бокового смещения довольно дороги

ГЛАВА 7

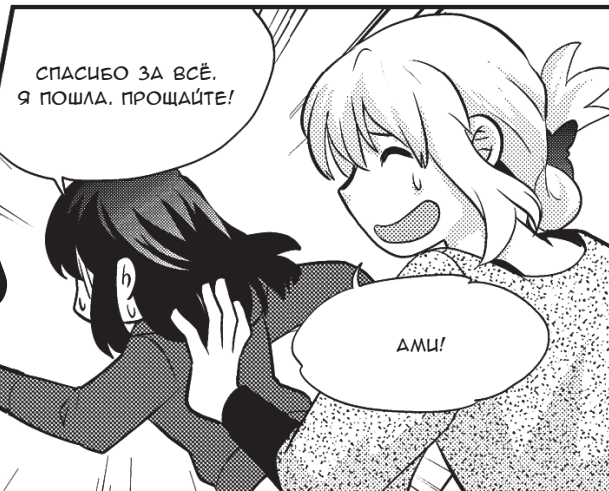
ПРОБЛЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ И ПОДДЕРЖКИ ГРУНТОВ





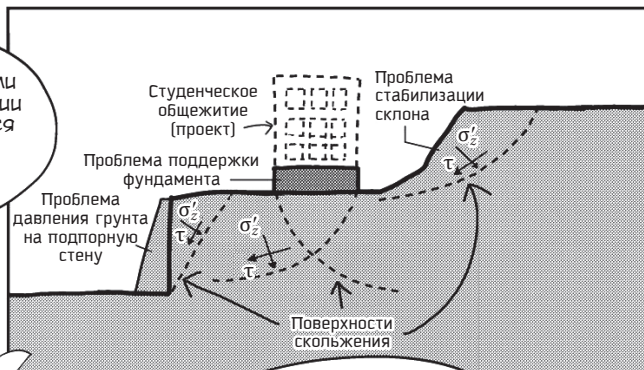


СТРОИТЕЛЬНАЯ
МЕХАНИКА



БАХ

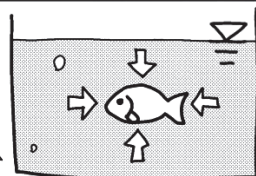
В СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКЕ ГРУНТОВ РАССМАТРИВАЕТСЯ ГИПОТЕТИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ГРУНТА ИЛИ ГРУНТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ И НА ОСНОВАНИИ ПРОЧНОСТИ ГРУНТА (СМ. ГЛ. 6) РЕШАЮТСЯ ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С ДАВЛЕНИЕМ ГРУНТА НА ПОДПОРНУЮ СТЕНУ, СТАБИЛИЗАЦИЕЙ СКЛОНОВ И ПОДДЕРЖКОЙ ФУНДАМЕНТА.



ТО ЕСТЬ МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГРУНТОВ И ГРУНТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ РАССМАТРИВАЮТСЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ, ДА?

7.1. ЧТО ТАКОЕ ДАВЛЕНИЕ ГРУНТА НА ПОДПОРНУЮ СТЕНУ

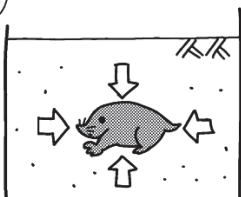
ДЛЯ НАЧАЛА ОБЪЯСНИТЕ, ЧТО ТАКОЕ ДАВЛЕНИЕ ГРУНТА.



КАК В ВОДЕ ЕСТЬ ДАВЛЕНИЕ ВОДЫ, ТАК И В ГРУНТЕ ЕСТЬ ДАВЛЕНИЕ ГРУНТА.

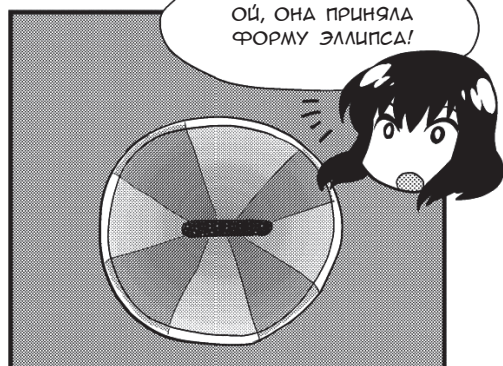
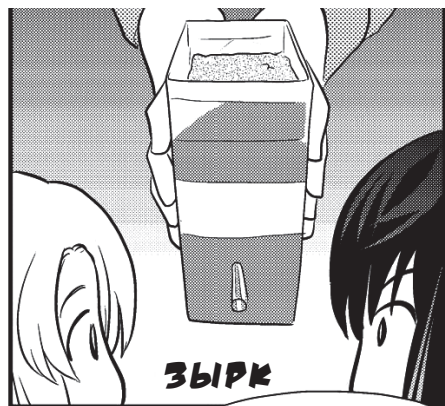
А ЭТО ДАВЛЕНИЕ ОТЛИЧАЕТСЯ ОТ ДАВЛЕНИЯ ВСКРЫШИ, КОТОРОЕ ЯВЛЯЕТСЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ДАВЛЕНИЕМ ПОД СОБСТВЕННОЙ ТЯЖЕСТИЮ ГРУНТА?

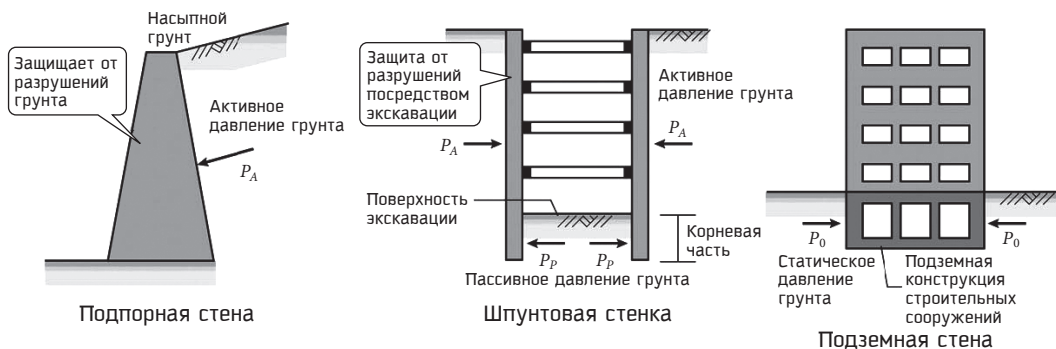
ВЕРТИКАЛЬНО НАПРАВЛЕННОЕ ДАВЛЕНИЕ ПОД СОБСТВЕННЫМ ВЕСОМ ДЛЯ ТОЧКИ НА ГЛУБИНЕ z И ДЛЯ ВОДЫ, И ДЛЯ ГРУНТА ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ КАК УДЕЛЬНАЯ ОБЪЕМНАЯ МАССА γ , УМНОЖЕННАЯ НА ГЛУБИНУ z (СМ. СТР. 118). А КАК БЫТЬ С ГОРИЗОНТАЛЬНО НАПРАВЛЕННЫМ ДАВЛЕНИЕМ¹?



НУ, ДАВЛЕНИЕ ВОДЫ ВО ВСЕХ НАПРАВЛЕНИЯХ БУДЕТ ОДИНАКОВЫМ, ДА? А ДАВЛЕНИЕ ГРУНТА...

¹ Давление грунта определяется эффективным напряжением.





В СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТАХ, СВЯЗАННЫХ С ГРУНТАМИ, ИСПОЛЬЗУЮТ РАЗНЫЕ ТИПЫ СТЕН ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОБРУШЕНИЯ ГРУНТА, НАПРИМЕР ПОДПОРНЫЕ ИЛИ ШПУНТОВЫЕ СТЕНКИ.

И НА ЭТИ СТЕНЫ ДЕЙСТВУЕТ ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ НАСЫПНОГО ГРУНТА, КОТОРОЕ НАЗЫВАЕТСЯ ДАВЛЕНИЕМ ГРУНТА НА ПОВЕРХНОСТЬ СТЕН². ЧТОБЫ СПРОЕКТИРОВАТЬ ЭТИ СТЕНЫ УСТОЙЧИВЫМИ, НЕОБХОДИМО ХОРОШО РАЗОБРАТЬСЯ С ЭТИМ ДАВЛЕНИЕМ.

БЫЛИ РАЗРАБОТАНЫ РАЗНЫЕ ТЕОРИИ ДАВЛЕНИЯ ГРУНТА.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГРУНТА...

ДАВЛЕНИЕ ГРУНТА НА ПОВЕРХНОСТЬ СТЕНЫ БУДЕТ МЕНЯТЬСЯ ИЗ-ЗА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ СТЕНЫ. ПОЭТОМУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МАТЕРИАЛА И СТРУКТУРЫ СТЕНЫ ПРИМЕНЯЮТСЯ РАЗЛИЧНЫЕ ТЕОРИИ.

НАПРИМЕР, ДЛЯ НЕДЕФОРМИРУЕМОЙ СТЕНЫ БУДЕТ ПРИМЕНЯТЬСЯ КЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ДАВЛЕНИЯ ГРУНТА.

ОДНАКО ЕСЛИ СТРУКТУРА СТЕНЫ ДЕФОРМИРУЕМАЯ, ТО ТУТ НУЖНА СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ.

ЕСЛИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ГРУНТА СТЕНА ДВИЖЕТСЯ ПО ГОРИЗОНТАЛИ, ТО РАССУЖДАЮТ ПО-ДРУГОМУ.

А ЕСЛИ В НАСЫПНОМ ГРУНТЕ ЕСТЬ ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ, ТО НЕОБХОДИМО УЧИТЫВАТЬ ИХ ДАВЛЕНИЕ.

Давление воды

Давление грунта

² Иногда под давлением грунта понимают общее давление, действующее на граничную поверхность. А горизонтальное давление на граничную поверхность между стеной и грунтом называют давлением грунта на поверхность стены. (Далее в этой книге для упрощения, говоря о давлении грунта, мы будем иметь в виду давление грунта на поверхность стены.)

ОХ, НЕ ЗНАЕШЬ,
ЗА ЧТО И ХВАТАТЬСЯ...

Разные теории явления грунта?
Давление воды? Движение стены?

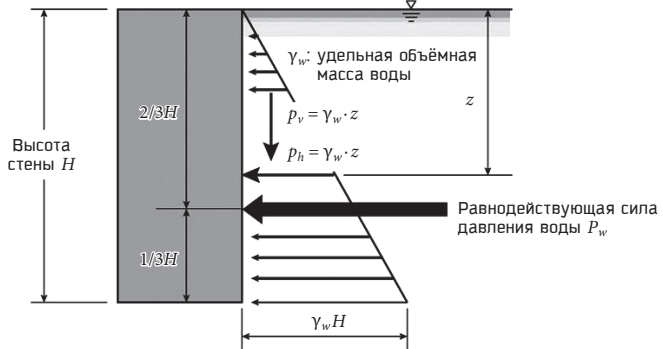
ХА-ХА.
В ЛЮБОМ СЛУЧАЕ, ТАК КАК ДАВЛЕНИЕ
ГРУНТА ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ПРОЧНОСТЬЮ
ГРУНТА НА СДВИГ s , ТО НЕОБХОДИМО
НАЙТИ ПОСТОЯННЫЕ СДВИГА
ДЛЯ НАСЫПНОГО ГРУНТА.

ВОЗЬМЁМ ДЛЯ НАЧАЛА
НЕДЕФОРМИРУЕМУЮ СТЕНУ
И ПОДХОДЯЩУЮ ДЛЯ НЕЁ КЛАССИЧЕСКУЮ
ТЕОРИЮ ДАВЛЕНИЯ ГРУНТА.

ПРЕЖДЕ ВСЕГО РАССМОТРИМ
ДАВЛЕНИЕ ВОДЫ, КОТОРОЕ
ДЕЙСТВУЕТ РАВНОМЕРНО ВО ВСЕХ
НАПРАВЛЕНИЯХ. ТОГДА В ТОЧКЕ НА
ГЛУБИНЕ z ВЕРТИКАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ
 $p_v = \gamma_w \cdot z$ И ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ
ДАВЛЕНИЕ p_h БУДУТ РАВНЫ.

$$p_h/p_v = (\gamma_w \cdot z)/(\gamma_w \cdot z) = 1$$

ПОЭТОМУ ДАВЛЕНИЕ
ВОДЫ P_w НА СТЕНУ
МОЖНО ПРЕДСТАВИТЬ
В ВИДЕ ТРЕУГОЛЬНИКА
С ОСНОВАНИЕМ, РАВНЫМ
ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ
ДАВЛЕНИЮ p_h .



Давление воды на стену

$$P_w = \gamma_w H \times H/2 = \gamma_w H^2/2$$

ПРИ ТАКОМ
РАСПРЕДЕЛЕНИИ ДАВЛЕНИЯ
ТОЧКОЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ
РАВНОДЕЙСТВУЮЩЕЙ СИЛЫ
БУДЕТ, КАЖЕТСЯ, ЦЕНТР
ТЯЖЕСТИ ТРЕУГОЛЬНИКА?

ПРАВИЛЬНО.
РАВНОДЕЙСТВУЮЩАЯ
СИЛА ПРИ ТРЕУГОЛЬНОМ
РАСПРЕДЕЛЕНИИ БУДЕТ
ВОЗДЕЙСТВОВАТЬ
НА ГЛУБИНЕ $1/3H$
ОТ ОСНОВАНИЯ
ТРЕУГОЛЬНИКА.

С ДРУГОЙ СТОРОНЫ, ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ ГРУНТА МЕНЬШЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО, И ОТНОШЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВУЮЩЕГО НА ТОЧКУ НА ГЛУБИНЕ z ВЕРТИКАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ $p_v = \gamma_w \cdot z$ К ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ДАВЛЕНИЮ p_h БУДЕТ МЕНЬШЕ 1, ЧТО МОЖНО ВЫРАЗИТЬ ТАК.



$$p_h/p_v = p_h/(\gamma_t \cdot z) = K$$

А ЧТО ЭТО ЗА К?

K - ЭТО КОЭФФИЦИЕНТ ДАВЛЕНИЯ ГРУНТА³, ОН РАВЕН ОТНОШЕНИЮ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ К ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ В ОПРЕДЕЛЕННОЙ ТОЧКЕ.

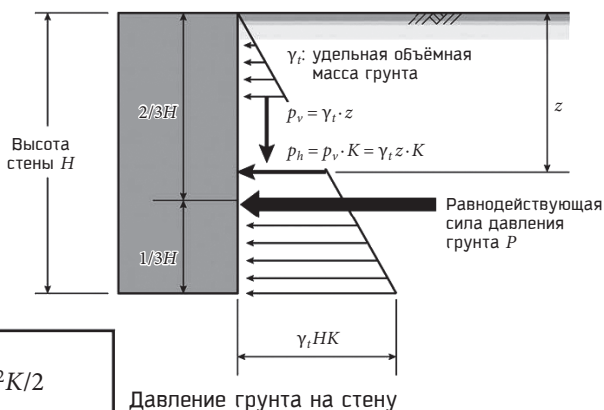
А КАК ТЕПЕРЬ ВЫРАЗИТЬ, ИСПОЛЬЗУЯ КОЭФФИЦИЕНТ ДАВЛЕНИЯ, РАВНОДЕЙСТВУЮЩУЮ СИЛУ P ДАВЛЕНИЯ ГРУНТА НА СТЕНУ?

ТАК... ДАВЛЕНИЕ ГРУНТА p_h , ДЕЙСТВУЮЩЕЕ НА ГЛУБИНЕ H , БУДЕТ РАВНО:

$$p_h = p_v \cdot K = \gamma_t \cdot H \cdot K.$$

ТОГДА РАВНОДЕЙСТВУЮЩАЯ СИЛА ДАВЛЕНИЯ ГРУНТА P , ВОЗДЕЙСТВУЮЩАЯ НА ВСЮ ПОВЕРХНОСТЬ СТЕНЫ, БУДЕТ РАСПРЕДЕЛЯТЬСЯ ПО ТРЕУГОЛЬНИКУ С ОСНОВАНИЕМ p_h . ВОТ ТАК, ЧТО ЛИ, БУДЕТ?

$$P = \gamma_t H^2 K / 2$$



³ Коэффициент давления K меняется в зависимости от формы стены и от угла уклона насыпного грунта. Но большее влияние на него оказывает угол внутреннего сопротивления ϕ , определяющий прочность грунта на сдвиг s .

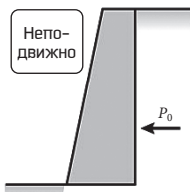


Правильно! Таким образом, давление грунта на стену определяется с помощью коэффициента давления K , который является ключом к вычислению давления грунта! А теперь рассмотрим три основных типа давления грунта в соответствии со смещениями стены.

Вертикальное напряжение образовано давлением клиновидно сползающего насыпного грунта

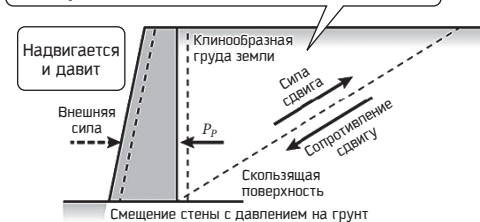


Активное давление грунта



Статическое давление грунта

Горизонтальное напряжение образовано давлением клиновидной массы насыпного грунта при действующей на нее выталкивающей силе



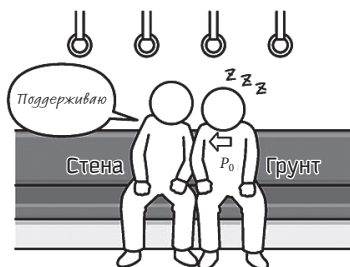
Пассивное давление грунта



Для начала рассмотрим состояние, когда стена неподвижна и давление грунта постоянно. Такое давление называется статическим давлением грунта P_0 , а коэффициент давления при этом называется коэффициентом статического давления грунта K_0 .



Получается, что стена, прислоняясь к грунту, сдерживает его давление... А, это как в электричке, когда пассажир по соседству поддерживает уснувшего пассажира, да?



Ха-ха! Предположим, что грунт является упругим телом. Тогда коэффициент статического давления K_0 можно найти через вертикальное напряжение σ'_v , горизонтальное напряжение σ'_h и коэффициент Пуассона ν ⁴:

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} = \frac{\nu}{(1 - \nu)}.$$

Для нормально уплотнённого грунта можно использовать эмпирическую формулу Джаки (Jaky).

$$K_0 = 1 - \sin \varphi'.$$

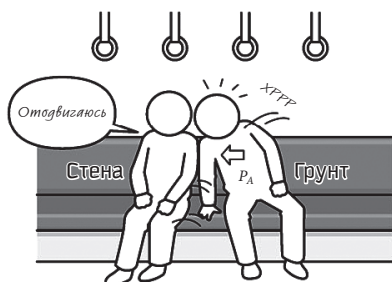
⁴ Коэффициент Пуассона – это отношение поперечной относительно направления напряжения деформации к продольной в рамках пределов упругости (поперечная деформация / продольная деформация). Для песчаных грунтов он равен около 1/3, для глинистых грунтов – около 1/2.



Далее рассмотрим ситуацию, когда стенка смещается, как бы отдаляясь от насыпного грунта. Это состояние называется активным, давление грунта – активным давлением P_A , а коэффициент давления – коэффициентом активного давления грунта K_A .



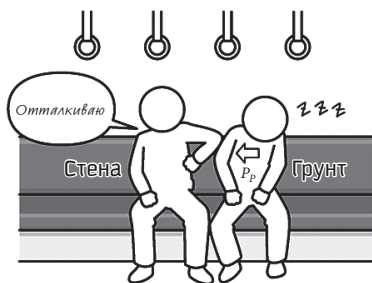
Когда стена отодвигается, давление должно снизиться, да?



И в конце рассмотрим ситуацию, когда стенка смещается, как бы надавливая на насыпной грунт. Это состояние называется пассивным, давление грунта – пассивным давлением P_P , а коэффициент давления – коэффициентом пассивного давления грунта K_P .



Раз стена отодвигает грунт назад, то давление, наверное, увеличивается.



А теперь представьте себя на месте стены и подумайте, какими будут эти давления – статическое P_0 , активное P_A или пассивное P_P – по сравнению друг с другом?



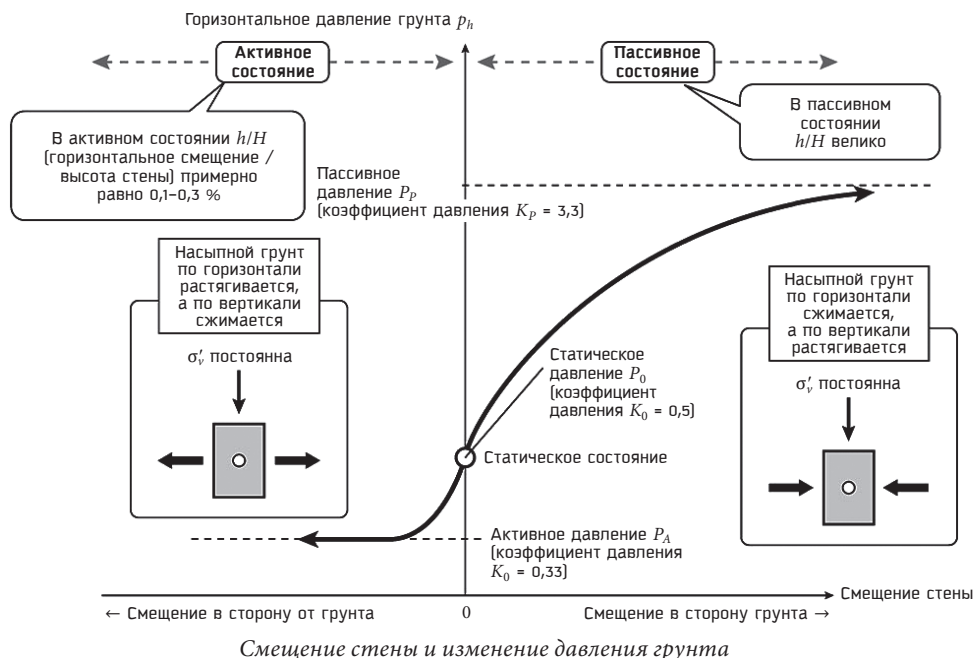
Ну, если представить себя на месте стены, то относительно сдерживающего статического давления P_0 ... наверное, активное давление P_A будет меньше, а пассивное давление P_P будет больше него, так?



Правильно. Отношения этих трёх давлений строятся так: активное давление $P_A <$ статическое давление $P_0 <$ пассивное давление P_P . При активном состоянии стена, отдаляясь от грунта, постепенно снижает статическое давление P_0 , а в пассивном состоянии стена, надавливая на грунт, постепенно увеличивает статическое давление P_0 . В обоих случаях степень смещения практически постоянна.



Здесь мы называем активным давлением P_A минимальное значение давления p_h , соответствующее активному состоянию, а пассивным давлением P_P – максимальное давление, соответствующее пассивному состоянию⁵.



А на практике какое давление нужно учитывать, все зависит от обстоятельств?



Например, если мы говорим о здании, перемещать подземную стену невозможно, поэтому тут берётся статическое давление грунта P_0 . Подпорная стена обычно смещается только в направлении от насыпного грунта, поэтому используем активное давление грунта P_A , а для корневой части (см. стр. 224) шпунтовой стены закладываем в расчёт пассивное давление грунта P_P .

⁵ Когда на стену действует активное давление грунта P_A или пассивное P_P , то возникает предельное состояние (состояние, в котором сила, которая стремится вызвать скольжение, и сила, которая сопротивляется скольжению, находясь в равновесии), после которого может возникнуть разрушение при сдвиге в насыпном грунте. Такие давления грунта называются предельными.

7.2. ТЕОРИЯ ДАВЛЕНИЯ ГРУНТА КУЛОНА И РАНКИНА :



Понятно, что есть разные виды давления грунта, а как насчёт теории?

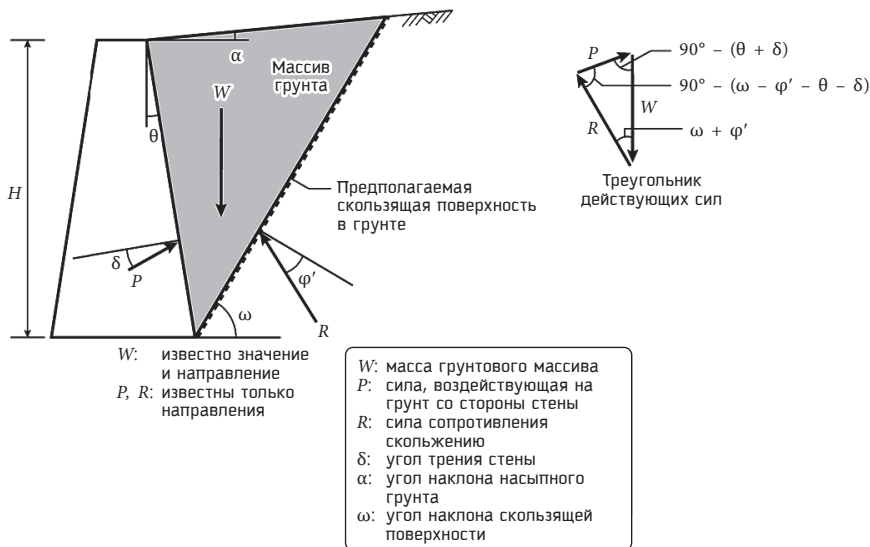


Среди классических теорий хорошо известны теория давления грунта Кулона и теория Ранкина (Rankine) (см. стр. 264).



Опубликованная в 1773 году теория Кулона предлагает формулу для расчёта предельных давлений грунта на всю поверхность стены, основываясь на следующих трёх предположениях:

- ① насыпной грунт является песчаным, он однороден, с углом внутреннего трения φ и с силой сцепления $c = 0$;
- ① образованная в результате смещения стены скользящая поверхность в насыпном грунте является плоской, по этой поверхности скользит клиновидный массив грунта (V-образный);
- ① рассматривается воздействие на единицу глубины клиновидного массива грунта как устойчивого тела.



Рассуждения, основанные на теории Кулона ($c' = 0$)



Кулон, основываясь на результатах наблюдений, предложил метод расчёта предельного давления (метод предельного равновесия) в момент разрушения вдоль скользящей поверхности клинообразного массива грунта с обратной стороны стены⁶.



Предполагается наличие клинообразного массива грунта... но ведь этот массив может быть разным, в зависимости от угла скользящей поверхности, да?



Да. Результирующая сила давления грунта на стену рассчитывается на основе баланса сил, действующих на грунт, который изменяется в зависимости от угла скользящей поверхности. Поэтому рассматриваются различные скользящие поверхности, и среди них выбирается та, которая разрушается в активном состоянии (активная скользящая поверхность) под таким углом, при котором давление грунта, вызывающее сползание клинообразного массива, будет максимальным. Такое давление грунта и будет активным давлением P_A .



А что с пассивным давлением P_P ?



Аналогично. Среди предполагаемых скользящих поверхностей выбирается та, которая разрушается в пассивном состоянии (пассивная скользящая поверхность) под таким углом, при котором давление грунта, вызывающее выталкивание и поднятие клинообразного массива, будет минимальным. Такое давление грунта будет пассивным давлением P_P . Теория давления грунта Кулона применяется более широко, чем теория Ранкина, она учитывает трение стены, ее наклон и наклон поверхности насыпного грунта.



А что из себя представляет теория давления Ранкина?



Теория Ранкина появилась на 80 лет позже теории Кулона (в 1857 г.). Она предлагает метод вычисления предельных давлений, основываясь на следующих пяти предположениях:

- ① рассматривается напряжённое состояние насыпного грунта, при этом поверхность стены вертикальна, трение стены отсутствует;
- ② напряжённое состояние насыпного грунта одинаково во всех точках, находящихся на одной глубине;
- ③ насыпной грунт целиком обладает пластичностью и находится в состоянии пластического равновесия, то есть перед разрушением;
- ④ поверхность насыпного грунта горизонтальна и простирается бесконечно;
- ⑤ в основание теории положен критерий прочности Мора–Кулона ($\tau_f = \sigma'_f \times \operatorname{tg} \varphi'$).

⁶ Иногда эту теорию называют теорией земляного клина, так как она предполагает наличие треугольного массива грунта с задней стороны стены.

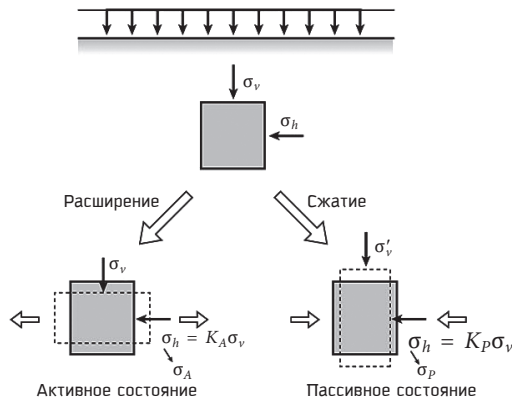
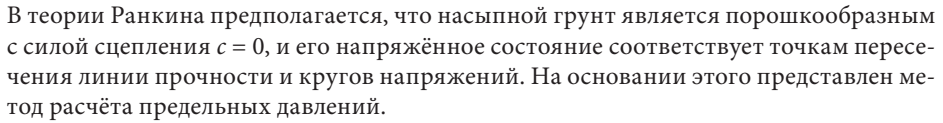
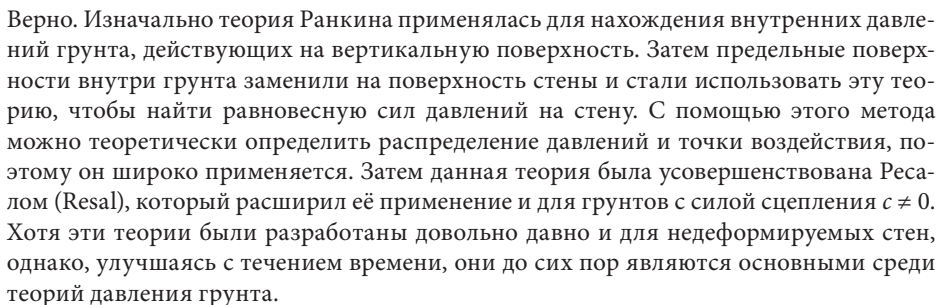
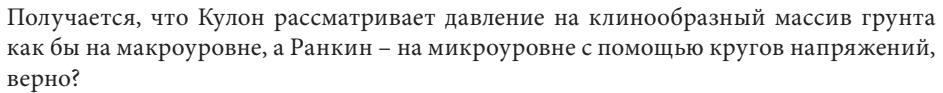
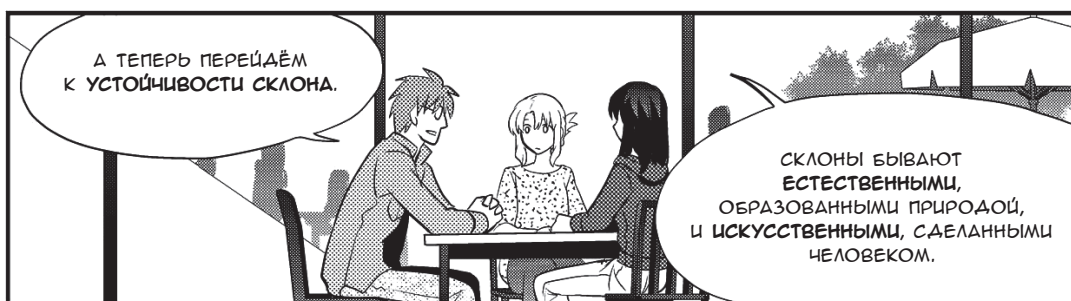


Схема концепции теории давления грунта Ранкина





7.3. УСТОЙЧИВОСТЬ СКЛОНА



ЕСТЕСТВЕННЫЕ СКЛОНЫ СОЗДАЮТСЯ
ДЕФОРМАЦИЕЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
ВСЛЕДСТВИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СИЛ ПРИРОДЫ
И ФОРМИРУЮТСЯ НА ПРОТЯЖЕНИИ
ДАВНОГО ВРЕМЕНИ.



А ИСКУССТВЕННЫЕ СКЛОНЫ
НАЗЫВАЮТ ЕЩЁ **ОТКОСАМИ**. ОТКОСЫ
БЫВАЮТ **НАСЫПНЫМИ**, ОБРАЗОВАННЫМИ
НАСЫПЬЮ, ИЛИ **ОТКОСАМИ ВЫЕМОК**,
ОБРАЗОВАННЫМИ ПРИ ВЫКАПЫВАНИИ ГРУНТА.
И ТЕ, И ДРУГИЕ ПРОЕКТИРУЮТСЯ ДЛЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ И СОЗДАЮТСЯ
В КОРОТКОЕ ВРЕМЯ.

ОТКОСЫ ПРОЕКТИРУЮТСЯ?

АА.
ХОТЯ ЭТО ПРОСТО ОТКОСЫ,
НО ОНИ, НАПРИМЕР, ПОДДЕРЖИВАЮТ
ТРАНСПОРТНУЮ НАГРУЗКУ ДОРОГ
И ПРОЧЕЕ КОНСТРУКЦИИ, В ВИДЕ
ДАМБ СДЕРЖИВАЮТ ВОДУ
И Т. Д.

ПОЭТОМУ ИХ ПРОЕКТИРУЮТ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЦЕЛЕЙ
И УСЛОВИЙ.

И ОЧЕНЬ ВАЖНО
СПРОЕКТИРОВАТЬ ИХ
УСТОЙЧИВОСТЬ, ТАК КАК
РАЗРУШЕНИЕ ОТКОСОВ
МОЖЕТ ПРИВЕСТИ
К ТЯЖЁЛЫМ
ПОСЛЕДСТВИЯМ.

УСТОЙЧИВЫЕ
СКЛОНЫ?..

РАССМОТРИМ НА
ПРИМЕРЕ ШОКОЛАДНЫХ
ШАРИКОВ И ПОПКОРНА.

ШОКОЛАДНЫЕ
ШАРИКИ

ШУХ

АГА, ПОХОЖЕ
НА НАСЫПЬ!

Сила
тяжести

Хочу стать
как можно
более
плоским

Сила
тяжести

КАЖЕТСЯ,
СКЛОНЫ
ПОЛУЧИЛИСЬ
РАЗНЫМИ.

СКЛОН ОБРАЗУЕТСЯ ГРУППОЙ ПОЧВЕННЫХ
ЧАСТИЦ И ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ
СТРЕМИТСЯ СТАТЬ ПЛОСКИМ. ПОЭТОМУ ВНУТРИ
СКЛОНА ВСЕГДА СУЩЕСТВУЕТ НАПРЯЖЕНИЕ
САВИГА τ , СПОСОБСТВУЮЩЕЕ
СОСКАЛЬЗЫВАНИЮ.

И ЕСЛИ ОНО ПРЕВЫСИТ ПРОЧНОСТЬ
НА САВИГ s , КОТОРАЯ ОПРЕДЕЛЯЕТ
СПОСОБНОСТЬ ГРУНТА
К СОПРОТИВЛЕНИЮ САВИГУ,
ТО ПРОИЗОЙДЁТ ОБРУШЕНИЕ.

ТО ЕСТЬ ЧЕМ БОЛЬШЕ
ПРОЧНОСТЬ НА СДВИГ s , ТЕМ
СЛОЖНЕЕ СКЛОНУ РАЗРУШИТЬСЯ.
А СКЛОН У ПОПКОРНА БОЛЕЕ
КРУТОЙ, ПОТОМУ ЧТО В НЁМ ВЫШЕ
СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРЕНИЯ, АА
(СМ. ГЛ. 6)?

ЕСЛИ ШОКОЛАДНЫЕ
ШАРИКИ НАЧНУТ ТЯГТЬ,
ТО В НИХ ПОВЫСИТСЯ
СОПРОТИВЛЕНИЕ СЦЕПЛЕНИЯ,
И СКЛОН, ВОЗМОЖНО, ТОЖЕ
СТАНЕТ КРУЧЕ. АА?

ИЛИ ЕСЛИ ВЗЯТЬ ГОРСТЬ
ШОКОЛАДНЫХ ШАРИКОВ,
ИМИТИРУЯ ВЫЕМКУ ГРУНТА
С ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ОТКОСА...

ШУР-ШУР-ШУР

ОЙ
СОВСЕМ ШУТОК
НЕ ПОНИМАЕТЕ...

НУ, ЛАДНО ВАМ.
ЗНАЧИТ, ИЗ-ЗА ВЗЯТОЙ
ГОРСТИ ШАРИКОВ СКЛОН
СТАЛ КРУЧЕ, БАЛАНС
НАРУШИЛСЯ
И ОБРАЗОВАЛСЯ
ОПОЛЗЕНЬ, АА?

РАВНОВЕСИЕ НАПРЯЖЕНИЯ СДВИГА τ
И ПРОЧНОСТИ НА СДВИГ s МОЖЕТ
БЫТЬ НАРУШЕНО ПОД ВЛИЯНИЕМ
САМЫХ РАЗНЫХ ФАКТОРОВ.

НАПРИМЕР, ЕСЛИ
В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ СКЛОНА
РАЗМЕЩАЕТСЯ НАГРУЗКА...

БУХ!

ИЛИ СЛУЧАЕТСЯ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ...

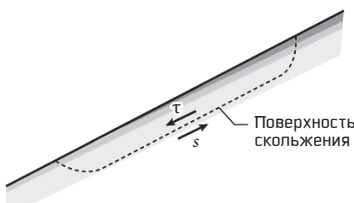
БА-БАХ!

БАЛАНС T И S ВНУТРИ СКЛОНА, КРОМЕ ТОГО, МОЖЕТ БЫТЬ НАРУШЕН ПРОСОЧИВШЕЙСЯ ВОДОЙ ИЛИ ИЗМЕНЕНИЕМ ДАВЛЕНИЯ ПОРОВОЙ ВОДЫ, ЧТО ТАКЖЕ МОЖЕТ ПРИВЕСТИ К РАЗРУШЕНИЯМ ГРУНТА (СМ. ГЛ. 6).

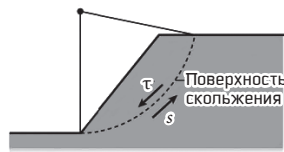
НО ВСЁ-ТАКИ ОСНОВНОЙ И ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ПРИЧИНОЙ ЯВЛЯЕТСЯ СИЛА ТЯЖЕСТИ.

ЗНАЧИТ, НАГРУЗКИ, ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ, ВОДА И ПРОЧИЕ ФАКТОРЫ КАК БЫ УСИЛИВАЮТ ДЕЙСТВИЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ, КОТОРАЯ СТРЕМИТСЯ СДЕЛАТЬ СКЛОН ПЛОСКИМ?..

ИТАК, ТИПЫ РАЗРУШЕНИЙ СКОЛЬЖЕНИЯ (ОПОЛЗНЕЙ) ТОЖЕ БЫВАЮТ РАЗНЫМИ И ПО ФОРМЕ СКОЛЬЗЯЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОДРАЗДЕЛЯЮТСЯ НА ПЛОСКИЕ И АРОЧНЫЕ СКОЛЬЖЕНИЯ.



Плоское (прямое) скольжение



Арочное скольжение

Формы скользящих поверхностей

ПЛОСКИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ ЛЕГКО ВОЗНИКАЮТ НА ЕСТЕСТВЕННЫХ СКЛОНАХ, ГДЕ НЕУСТОЙЧИВАЯ ПОЧВА ПОКРЫВАЕТ ТВЁРДУЮ ПОРОДУ. ПРИ ЭТОМ ПЛОСКАЯ СКОЛЬЗЯЩАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ОБРАЗУЕТСЯ ПАРАЛЛЕЛЬНО ДЛИННОМУ СКЛОНУ⁷, И ОБЫЧНО ЭТО ПРИВОДИТ К КРУПНОМАСШТАБНЫМ РАЗРУШЕНИЯМ.

С ДРУГОЙ СТОРОНЫ, АРОЧНОЕ СКОЛЬЖЕНИЕ, ПРИ КОТОРОМ ФОРМА СКОЛЬЗЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ДУГООБРАЗНАЯ, ОБРАЗУЕТСЯ НА ИСКУССТВЕННЫХ СКЛОНАХ КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ В ОДНОРОДНОМ ТОЛСТОСЛОЙНОМ МЯГКОМ НАСЫПНОМ ГРУНТЕ.

⁷ Склон с постоянным уклоном и постоянной толщиной слоя однородного грунта, когда длина скольжения значительно больше глубины скользящей плоскости, называется склоном безграничной длины. Скользящая поверхность может возникнуть даже там, где она почти параллельна земной поверхности.



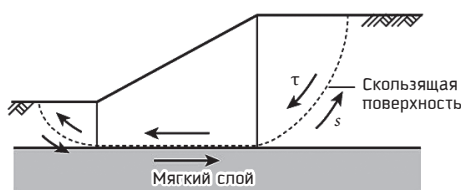
Значит, форма скользящей поверхности зависит от типа грунта и условий...



А форма скользящей поверхности может быть только прямой или арочной?



На естественных склонах форма скользящей поверхности повторяет подземные водные пути и форму коренных пород, а на искусственных склонах в зависимости от структуры грунта скользящая поверхность включает и прямые, и арочные участки, создавая комбинированное скольжение. Однако обычно при рассмотрении вопросов безопасности склонов для облегчения исследований скользящую поверхность упрощают.



Комбинированное скольжение



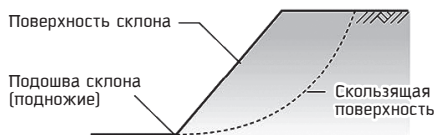
Значит, для изучения безопасности предполагают упрощённую форму скользящей поверхности, да?



Кроме того, арочное скольжение в зависимости от места возникновения подразделяется на три типа: разрушение подошвы склона, разрушение ниже подошвы и разрушение внутри склона.



Сначала рассмотрим разрушение подошвы склона. В этом случае нижний край поверхности скольжения проходит через подошву склона, и круг скольжения при этом называется кругом подошвы склона. Напряжение имеет тенденцию концентрироваться в районе подошвы склона, да ещё при этом нельзя ожидать возникновения сопротивления трения, так как давление вскрыши невелико. Поэтому разрушение вершины склона легко возникает в песчаных грунтах или твёрдых связных грунтах, то есть там, где сопротивление сцепления мало.



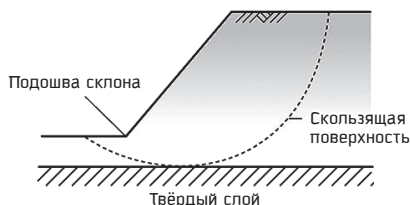
Разрушение вершины склона



Далее рассмотрим разрушение ниже подошвы склона, когда край скользящей плоскости проходит перед подножием склона. В этом случае круг скольжения называется срединным кругом⁸. В пологой насыпи из связной почвы с сильным сопротивлением сцепления, созданной на мягком грунте, может возникнуть скользящая поверхность, протянувшаяся от места перед подошвой склона и проходящая глубоко под насыпью.



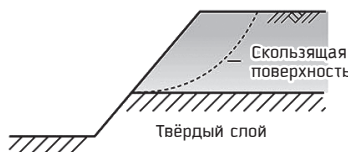
Если же неглубоко находится слой твёрдого грунта, то поверхность скольжения при разрушении ниже подошвы склона будет касаться этого слоя, и положение арки поверхности скольжения будет определяться глубиной этого слоя.



Разрушение ниже подошвы склона



Напоследок рассмотрим разрушения внутри склона, когда край скользящей поверхности проходит через область на самом склоне. Круг скольжения тогда называется внутренним кругом. Можно сказать, что это разновидность разрушения подошвы склона. Если неглубоко от поверхности находится твёрдый слой грунта, как в случае с разрушением ниже подошвы склона, то поверхность скольжения может возникнуть в середине склона.



Разрушение внутри склона



Мм... Другими словами, соскальзывания склонов различают в зависимости от положения поверхности скольжения, верно?

⁸ Если склон простой, то при разрушении ниже подошвы склона линия через центр круга будет проходить посередине склона.

7.4. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНА



А теперь перейдём к устойчивости склонов. При проектировании и оценке склонов для обеспечения их устойчивости используется так называемый анализ устойчивости склонов с помощью метода предельного равновесия или метода анализа напряжений.



Что касается метода предельного равновесия, то в теории давления грунта Кулона что-то такое уже было... Кажется, пределом называется момент, предшествующий обрушению массы грунта, а равновесием – баланс сил, да?



Совершенно верно. Метод предельного равновесия на основе типа и структуры грунта предполагает наличие плоскости скольжения, и расчёт коэффициента безопасности F_s ⁹ разрушения основывается на представлении состояния предельного равновесия¹⁰.



Коэффициент безопасности F_s ?

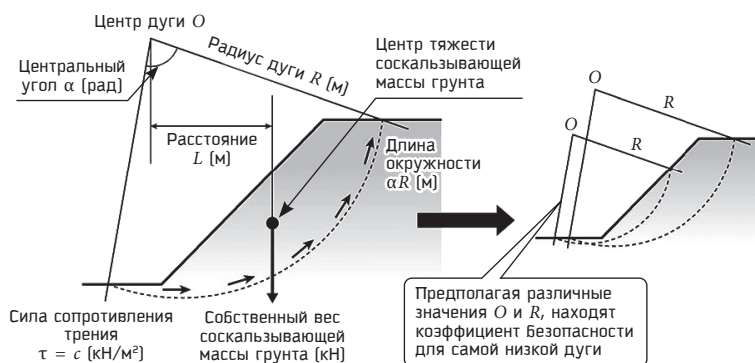


Коэффициент безопасности F_s представляет собой отношение суммы сил, сопротивляющихся соскальзыванию, к сумме сил, способствующих соскальзыванию.

$$F_s = \frac{\text{Сумма сил, сопротивляющихся соскальзыванию (прочность на сдвиг } s) \sum s}{\text{Сумма сил, способствующих соскальзыванию (напряжение сдвига } \tau) \sum \tau} \quad 11.$$



Метод предельного равновесия рассматривает несколько вариантов дуг скольжения для одного склона, и выбирается дуга (критический круг), обеспечивающая минимальное значение коэффициента безопасности F_s . Это значение и будет коэффициентом безопасности данного склона F_s (минимальный коэффициент безопасности) (см. стр. 268).



Метод предельного равновесия

⁹ На обычных склонах коэффициент безопасности должен быть больше 1,2, а для крупных насыпных дамб необходимый минимум для коэффициента безопасности составляет 1,2–1,3.

¹⁰ Поскольку устойчивый склон не находится в состоянии предельного равновесия, в анализе устойчивости предполагается, что состояние предельного равновесия достигается снижением прочности на сдвиг s на скользящей поверхности.

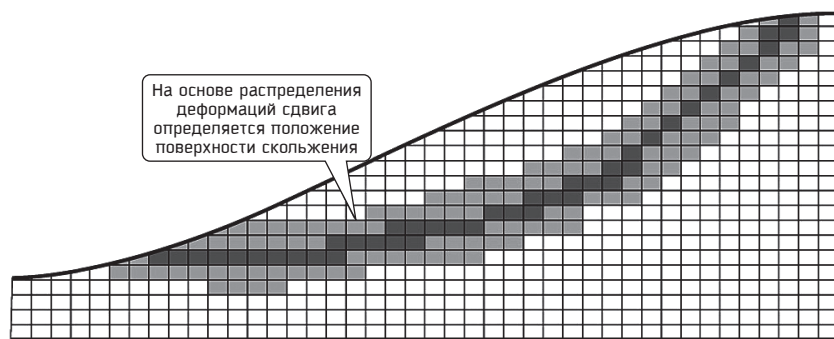
¹¹ Метод скользящей дуги (см. стр. 268) рассматривает момент силы относительно центра дуги O как для сопротивления, так и для силы скольжения.



Риск соскальзывания склона самый большой для поверхности с минимальным коэффициентом безопасности F_s . Поэтому-то этот уровень безопасности и определяет состояние предельного равновесия, да?



А теперь рассмотрим метод анализа напряжений. В этом методе рассчитываются напряжения и деформация для каждой точки грунта, затем оценивается плоскость скольжения, соединяющая точки с высокой деформацией сдвига. Из соотношения напряжения сдвига τ и сопротивления сдвигу s на этой плоскости определяется безопасность склона.



Карта деформаций сдвига



Такие вычисления без компьютера не сделать...



Для этого применяются методы численного анализа¹², например метод конечных элементов, и используются разные способы повышения точности анализа.



Как бы то ни было, важно выбрать наиболее подходящий метод анализа устойчивости, исходя из особенностей конкретного склона и его актуального состояния.



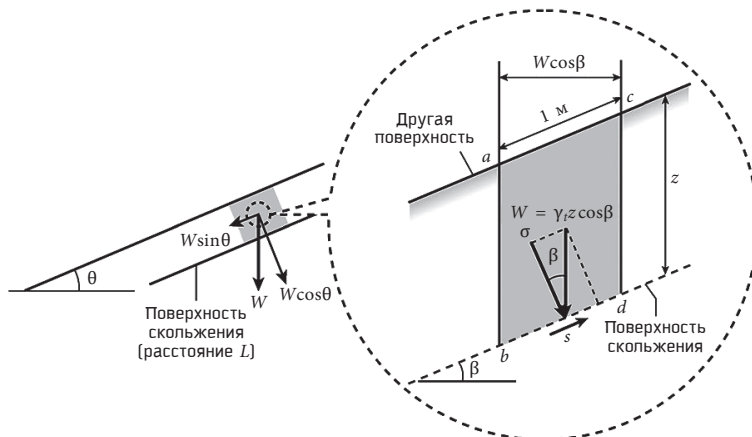
Ну, давайте попробуем найти коэффициенты безопасности F_s для некоторой поверхности скольжения в случае прямого скольжения и в случае арочного скольжения, используя метод предельного равновесия.

¹² В методе анализа напряжений, исходя из рассматриваемого оползня и неоднородности поверхностей, выбирается наиболее подходящий, например метод дискретного элемента, метод конечных элементов, модель жесткой пружины и т. п.



Возьмём в качестве скользящей поверхности плоскость, параллельную склону без-
граничной длины (на расстоянии L), и рассмотрим массив грунта, ограниченный
перпендикулярными линиями (a_b , c_d), находящимися на единичном расстоянии
(1 м) от скользящей поверхности. Глубина массива тоже единичная (1 м).

Какими будут вертикальное напряжение σ и напряжение сдвига τ , действующие на
поверхность скольжения на единицу длины (bd) и единицу глубины?



γ_t – удельная объёмная масса грунта;
 c – сила сцепления грунта; φ – угол внутреннего трения.
Так как уровень грунтовых вод ниже поверхности скольжения
и нет движения фильтрационного потока, то $\sigma = \sigma'$

Анализ устойчивости для плоского скольжения



Ну, раз масса грунтового массива равна W , то вертикально направленное к плоско-
сти скольжения (с углом наклона β) напряжение σ будет вычисляться по формуле:

$$\text{вертикальное напряжение } \sigma = \frac{W \cos \beta}{L} (= \gamma_t z \cos^2 \beta) \text{ (кН/м}^2\text{)}.$$

А горизонтально направленное напряжение сдвига τ будет вычисляться как:

$$\text{напряжение сдвига } \tau = \frac{W \sin \beta}{L} (= \gamma_t z \cos \beta \sin \beta) \text{ (кН/м}^2\text{)}.$$



Отлично! А теперь найдите прочность на сдвиг s .



Если в критерии на прочность Мора–Кулона (см. стр. 198) в формулу прочности на сдвиг s подставить значение вертикального напряжения σ , то получится вот так, да?

$$\text{Прочность на сдвиг } s = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi = c + \frac{W \cos \beta}{L} \operatorname{tg} \varphi \\ (= c + \gamma_t z \cos^2 \beta \operatorname{tg} \varphi).$$



Так, а как насчёт коэффициента безопасности F_s ?



Так как коэффициент безопасности F_s – это отношение суммы прочностей на сдвиг s к сумме напряжений сдвига τ , то нужно умножить напряжение сдвига τ и прочность на сдвиг s на расстояние L , верно?

$$F_s = \frac{\Sigma_s}{\Sigma_t} = \frac{sL}{\tau L} = \frac{cL + W \cos \beta \operatorname{tg} \varphi}{W \sin \beta}.$$



Отлично! А если теперь подставить в эту формулу удельную объёмную массу γ_t , то вот что получим:

$$F_s = \frac{cL + \gamma_t z L \cos^2 \beta \operatorname{tg} \varphi}{\gamma_t z L \cos \beta \sin \beta} = \frac{c}{\gamma_t z \cos \beta \sin \beta} + \frac{\cos \beta \operatorname{tg} \varphi}{\sin \beta} \\ = \frac{2c}{\gamma_t z \sin 2\beta} + \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg}^2 \beta}.$$



Из обеих формул можно сделать вывод: чем меньше сопротивление сцепления и сопротивление трения в грунте, тем ниже коэффициент безопасности F_s . Если же имеется песчаный грунт с силой сцепления $c = 0$, то коэффициент безопасности F_s будет:

$$F_s = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \beta}.$$

О чём это говорит?



Если коэффициент безопасности $F_s < 1$, то произойдёт соскальзывание... А чтобы выполнялось условие $F_s > 1$, нужно, чтобы $\varphi > \beta$, верно?



Абсолютно! Итак, чтобы на склоне с силой сцепления $c = 0$ не возникло плоского соскальзывания, необходимо, чтобы угол наклона склона β был меньше угла внутреннего трения грунта φ .



Используемые в анализе устойчивости сила сцепления c и угол внутреннего трения φ обычно определяются в результате испытания на сдвиг. Однако если насыпь сооружается на мягком связном грунте, то нужно учитывать, что сразу после сооружения насыпи и по прошествии длительного времени будет отсутствовать дренаж. Поэтому при проведении испытаний нужно правильно использовать условия дренирования в зависимости от ситуации на объекте (см. стр. 204).



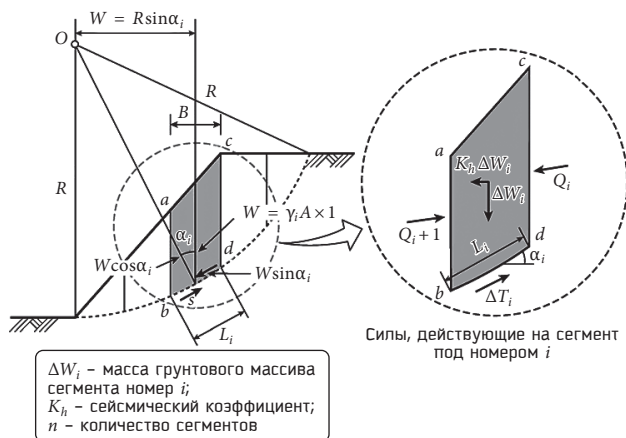
А теперь рассмотрим ситуацию, когда плоскость скольжения склона безграничной длины дугообразная. Если поверхность склона однородная без фильтрационных потоков, то для анализа устойчивости используется график устойчивости Тейлора (Taylor) (см. стр. 270). Если же поверхность неоднородная и прочность на сдвиг s неодинаковая, то используется метод деления (метод сегментов)¹³.



Метод деления?



В анализе устойчивости базовым является рассмотренный ранее случай с плоской поверхностью скольжения. Чтобы применить подобный же способ к более сложной арочной плоскости, используют метод деления, когда массив грунта над плоскостью скольжения делится по вертикали на блоки одинаковой ширины B . Эти блоки называют сегментами. Метод, предполагающий, что силы между сегментами уравновешены, и учитывающий только силы, воздействующие на скользящую поверхность, называется упрощённым методом.



Анализ устойчивости при арочном скольжении (упрощённый метод)

¹³ В зависимости от предполагаемых условий, например от силы между сегментами, используются разные методы, допустим упрощённый метод (метод Fellenius), метод Bishop, метод Janbu, метод Morgenstern-Price и др.



Значит, при методе деления сложная поверхность скольжения разделяется на простые по форме участки, и приблизительные вычисления осуществляются путём сложения значений разных сегментов.



А теперь представим себе сегмент i (под номером i из n), ограниченный вертикальными линиями (ab , cd), отходящими от арочной плоскости скольжения на расстояние L_i , с единичной глубиной (1 м). Найдите коэффициент безопасности F_{si} на единицу длины и глубины для плоскости скольжения, относящейся к сегменту i .



Ну, по аналогии с предыдущими вычислениями, если грунтовый массив массой W_i действует на плоскость скольжения (с углом наклона α_i), то получается следующее:

$$\text{вертикальное напряжение } \sigma_i = \frac{W_i \cos \alpha_i}{L_i} \text{ (кН/м}^2\text{);}$$

$$\text{напряжение сдвига } \tau_i = \frac{W_i \sin \alpha_i}{L_i} \text{ (кН/м}^2\text{);}$$

$$\text{прочность на сдвиг } s = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi = c + \frac{W_i \cos \alpha_i}{L_i} \operatorname{tg} \varphi \text{ (кН/м}^2\text{);}$$

$$F_{si} = \frac{cL_i + W_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi}{W_i \sin \alpha_i}.$$



А теперь найдите коэффициент безопасности F_s для всей арочной плоскости скольжения.



Для плоскости скольжения, состоящей из всех сегментов ($i = 1 \sim n$), коэффициент безопасности будет равен сумме всех прочностей на сдвиг s_i , делённой на сумму всех напряжений сдвига τ_i . То есть:

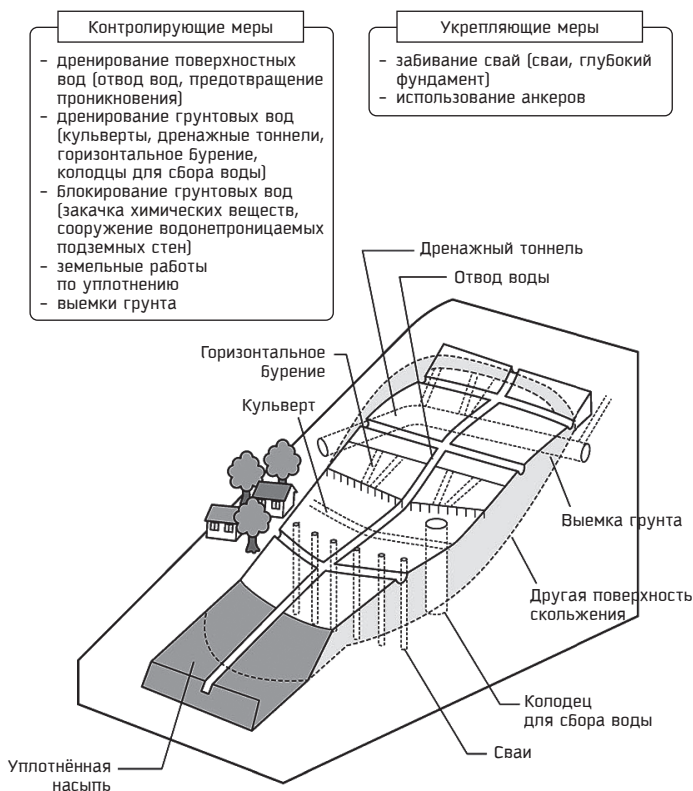
$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n (cL_i + W_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i}.$$



Правильно! А массу W_i сегмента i на единицу глубины можно вычислить как $W_i = \gamma_i A_i$ (где A_i – площадь поперечного сечения сегмента i).



Надеюсь, теперь вы получили общее представление о методах оценки безопасности склонов. Кстати, контрмеры против разрушения склонов подразделяют на два типа: контролирующие, к которым относятся меры по устранению причин разрушения склонов, например предотвращение проникновения воды, и укрепляющие, направленные на усиление самого грунта или на создание устойчивых конструкций.



Контрмеры против разрушений склонов



Так как в Японии мало равнин, меры по защите склонов от разрушений очень важны, да?



А ещё в горах много дождей...



7.5. НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ФУНДАМЕНТА



ГОВОРЯ
ОБ УСТОЙЧИВОСТИ
ФУНДАМЕНТА, СРАЗУ
ВСПОМИНАЕТСЯ ТО
ЗАДАНИЕ С ПРОСЕВШИМ
ГРУНТОМ, ЧТО МЫ
ВИДЕЛИ...

АГА, ДАЖЕ ЕСЛИ НАГРУЗКА,
ПЕРЕДАЮЩАЯСЯ ЧЕРЕЗ ФУНДАМЕНТ,
НАХОДИТСЯ В РАМКАХ НЕСУЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ, ЗАДАНИЕ МОЖЕТ БЫТЬ
ПОВРЕЖДЕНО ИЗ-ЗА ДЕФОРМАЦИИ
ГРУНТА.

ПОЭТОМУ ВАЖНО ИЗУЧАТЬ
НЕ ТОЛЬКО БЕЗОПАСНОСТЬ
ФУНДАМЕНТОВ, НО И ПРОЧНОСТЬ
И ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ
ГРУНТОВ.

РАССМОТРИМ НЕСУЩУЮ
СПОСОБНОСТЬ НА ПРИМЕРЕ ЭТИХ
ИГРУШЕК, КОТОРЫЕ БУДУТ ИГРАТЬ
РОЛЬ ЗАДАНИЙ, ИХ НОГИ БУДУТ
ВЫПОЛНЯТЬ РОЛЬ ФУНДАМЕНТОВ,
А ТОРТЫ - РОЛЬ ГРУНТОВ.

Полностью
довольно мягкий

Полностью
твёрдый

ТОРТЫ?!

Чизкейк

Шоколадный
торт

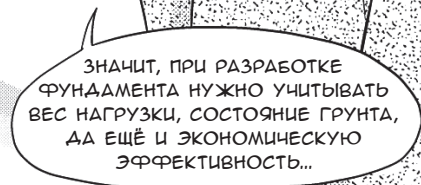
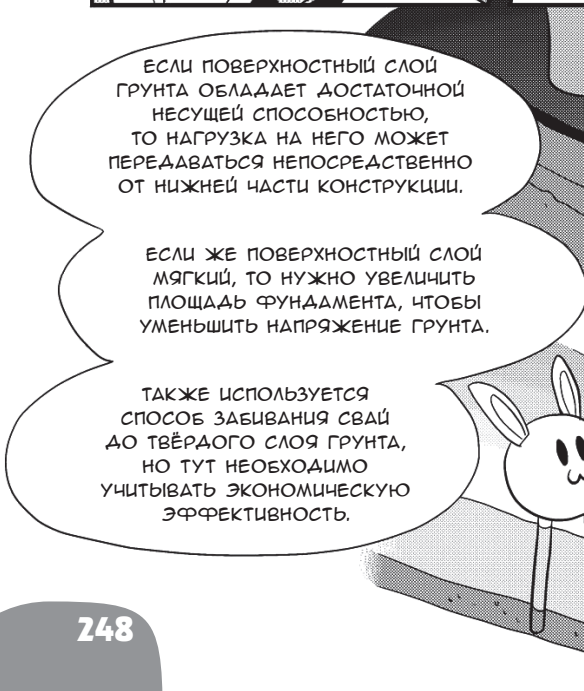
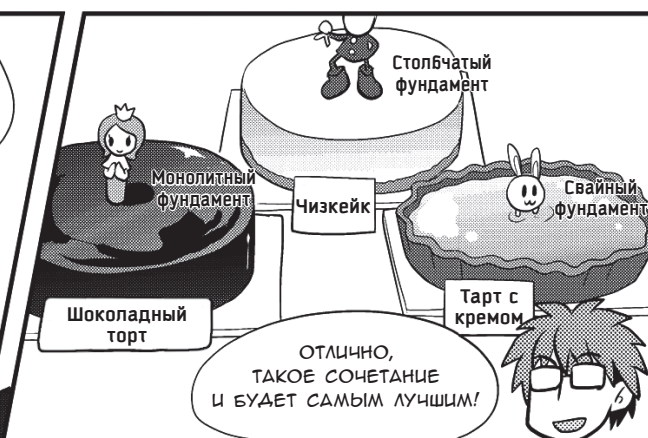
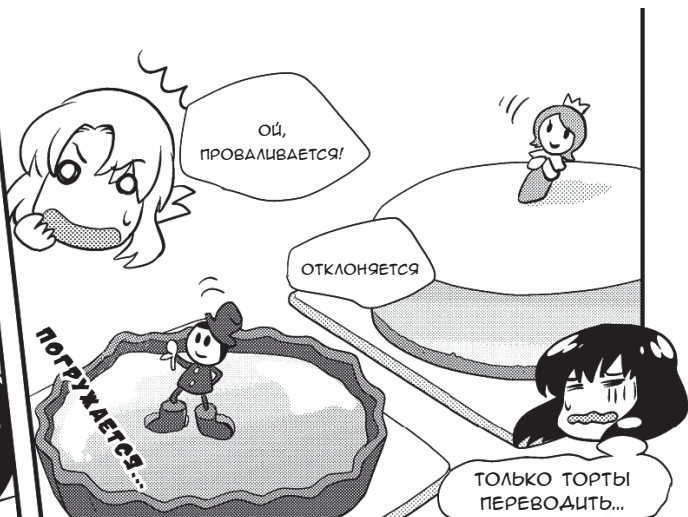
Монолитный
фундамент

Свайный
фундамент

Тарт с кремом

Сверху
мягкий,
но глубже
твёрдый

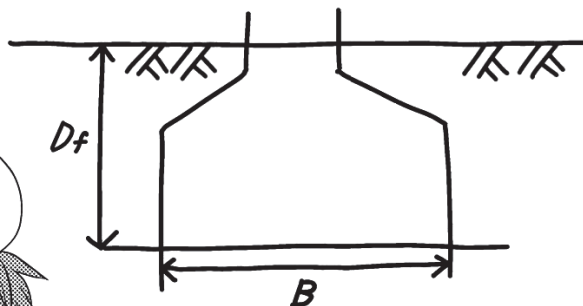
Столбчатый
фундамент



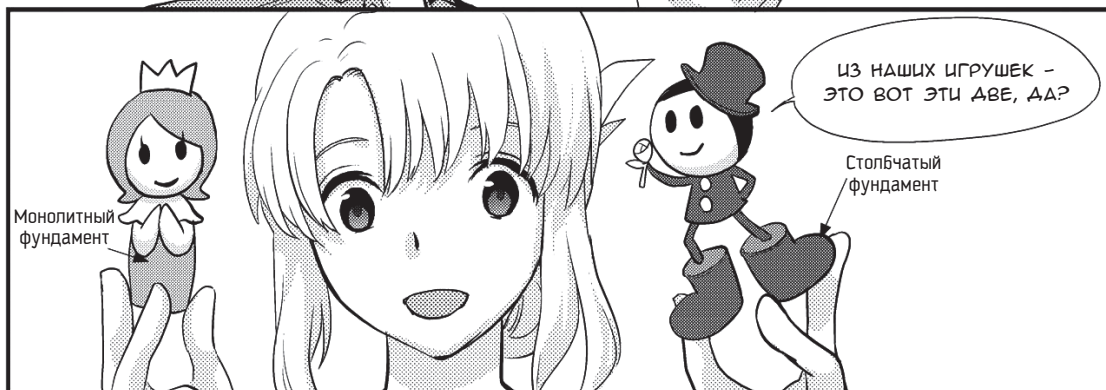


ФУНДАМЕНТ СЧИТАЕТСЯ НЕГЛУБОКИМ, ЕСЛИ ГЛУБИНА ЕГО ПОГРУЖЕНИЯ D_f МАЛЕНЬКАЯ, ПО СРАВНЕНИЮ С ШИРИНОЙ B ФУНДАМЕНТА, СОПРИКАСАЮЩЕЙСЯ С ГРУНТОМ. ТО ЕСТЬ КОГДА $D_f/B < 1$.

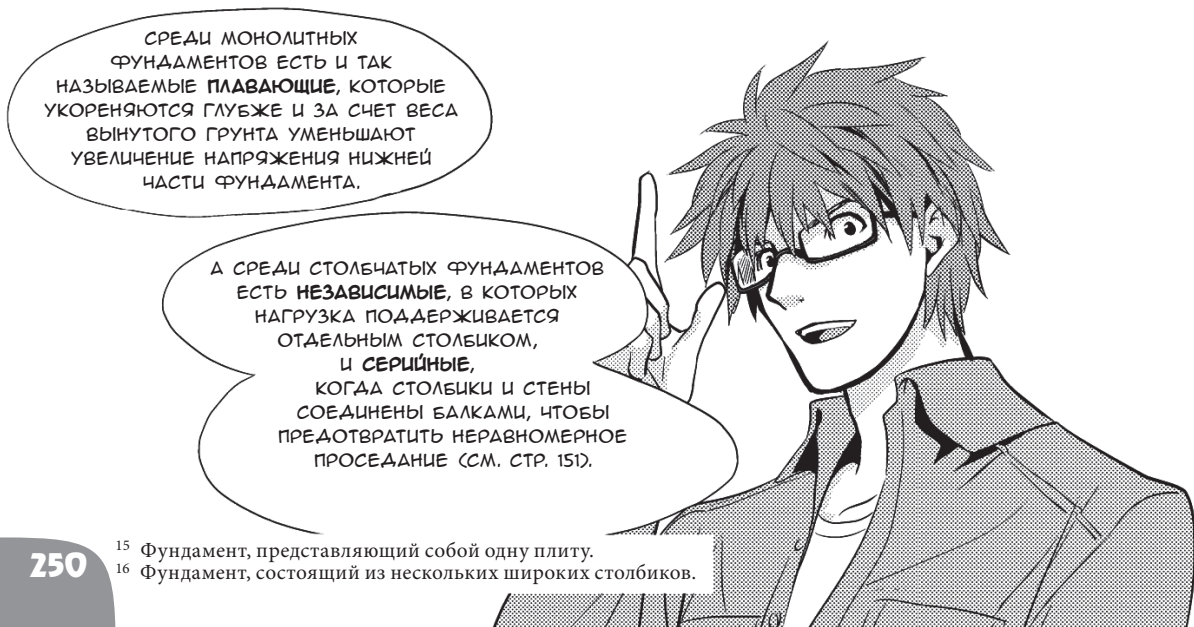
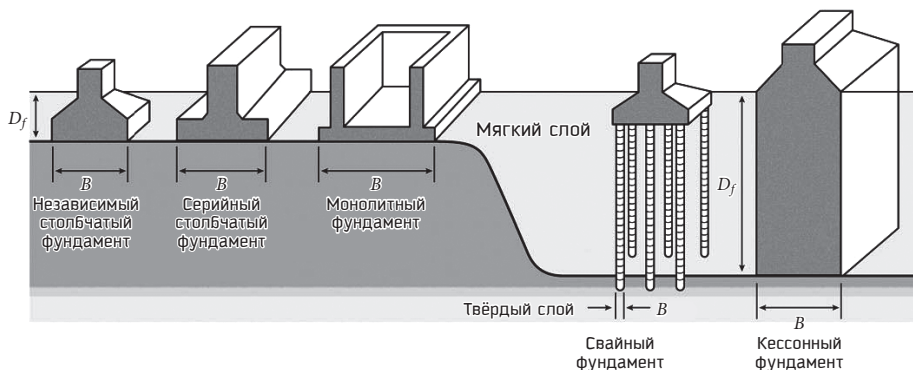
ТАК КАК НАГРУЗКА НА ГРУНТ ПЕРЕДАЁТСЯ НАПРЯМУЮ ЧЕРЕЗ НИЖНЮЮ ПОВЕРХНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ, ТО ТАКОИ ФУНДАМЕНТ ЕЩЁ НАЗЫВАЮТ НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ¹⁴.



Пример неглубокого фундамента ($B \geq D_f$)



¹⁴ Фундамент для мостов считается непосредственным, если $D_f/B < 0,5$.



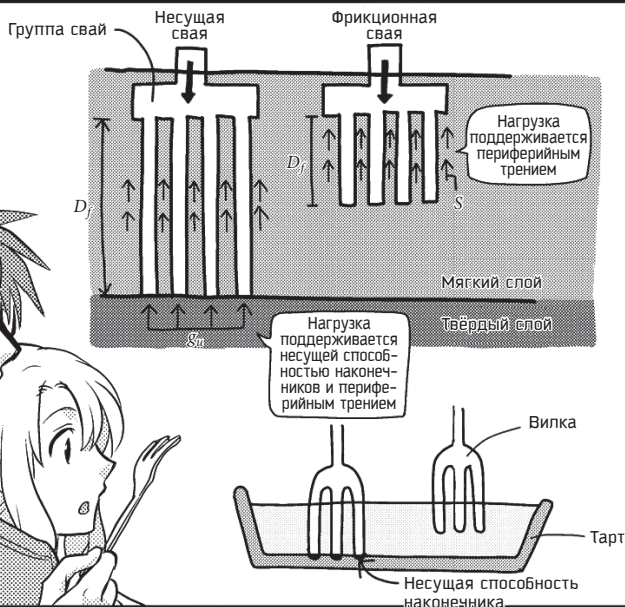
250

¹⁵ Фундамент, представляющий собой одну плиту.
¹⁶ Фундамент, состоящий из нескольких широких столбиков.



СВАИ ТОЖЕ БЫВАЮТ
ДВУХ ВИДОВ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОГО,
ДОХОДЯТ ОНИ
ДО НЕСУЩЕГО СЛОЯ
ИЛИ НЕТ.

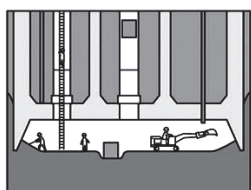
КОГДА СВАИ ДОХОДЯТ
ДО НЕСУЩЕГО СЛОЯ, ОНИ
НАЗЫВАЮТСЯ **НЕСУЩИМИ**.
В ПРОТИВНОМ СЛУЧАЕ –
ФРИКЦИОННЫМИ¹⁷.



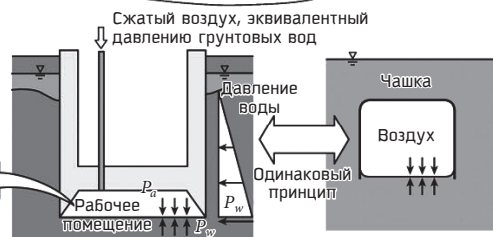
КЕССОННЫЕ ЖЕ
ФУНДАМЕНТЫ¹⁸ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ТАМ,
ГДЕ УСЛОВИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА
НЕ ПОДХОДЯТ ДЛЯ СВАЙНЫХ
ФУНДАМЕНТОВ, ЛИБО ТАМ,
ОТ ФУНДАМЕНТА ТРЕБУЕТСЯ БОЛЬШАЯ
НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ЖЁСТКОСТЬ.

ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТАКОГО ФУНДАМЕНТА
НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ СООРУЖАЕТСЯ
КОНСТРУКЦИЯ, НАЗЫВАЕМАЯ **КЕССОН**, СНИЗУ
КОТОРОЙ ПРОВОДЯТСЯ РАБОТЫ ПО ВЫЕМКЕ
ГРУНТА ДО ДОСТИЖЕНИЯ НЕСУЩЕГО СЛОЯ,
ПОСЛЕ ЧЕГО ВНУТРЕННЯЯ ЧАСТЬ КЕССОНА
ЗАПОЛНЯЕТСЯ БЕТОНОМ
ИЛИ ПЕСКОМ.

Схема устройства
пневматического кессона



В последние годы управление
производится дистанционно



Если $P_w = P_a$, то в рабочее
помещение не проникнет вода.
 P_w – давление в месте
установки кессона
 P_a – давление воздуха
в рабочем помещении

⇔ Давление воздуха
в чашке равно
давлению воды
⇓
В чашке остаётся место,
куда не может
проникнуть вода

¹⁷ Сваи для такого фундамента используются либо готовые, либо изготовленные на площадке в полевых условиях.

¹⁸ Кессонные фундаменты относят обычно к фундаментам глубокого заложения. По способу выемки грунта подразделяются на пневматические и открытые.



НЕ ПОЙМУ,
ЭТО РАЦИОНАЛЬНО
ИЛИ УЖ ЧЕРЕСЧУР...



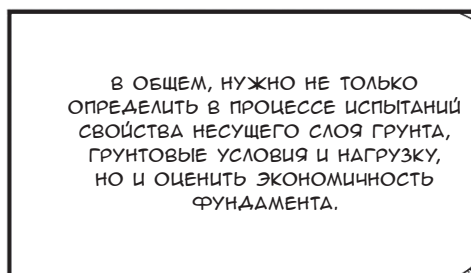
А ЕЩЁ ПРЕДСТАВЬТЕ
КОНСТРУКЦИЮ ВЫСОТОЙ
С ТОКИЙСКОЕ НЕБЕСНОЕ ДЕРЕВО*
СО СВАЙНЫМ ФУНДАМЕНТОМ,
КОТОРЫЙ ДОЛЖЕН БЫТЬ СПОСОБНЫМ
СОПРОТИВЛЯТЬСЯ ПАДЕНИЮ
И ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ СИЛАМ,
ВРОДЕ ВЕТРА¹⁹.

* Самая высокая телебашня Японии. – Прим. перев.



КРОМЕ ТОГО,
ХОТЯ ДЛЯ ПЕСЧАНОГО ГРУНТА
НЕОБХОДИМ ГЛУБОКИЙ ФУНДАМЕНТ,
ЧТОБЫ ПРЕДОТВРАТИТЬ
РАЗЖИЖЕНИЕ (СМ. СТР. 217),

НО ЧЕМ ГЛУБЖЕ ФУНДАМЕНТ,
ТЕМ ДОРОЖЕ ОБОИДУТСЯ ЕГО
СТРОИТЕЛЬСТВО, ПОЭТОМУ ИНОГДА
ВЫГОДНЕЕ ОКАЗЫВАЕТСЯ УЛУЧШИТЬ
ГРУНТ.



В ОБЩЕМ, НУЖНО НЕ ТОЛЬКО
ОПРЕДЕЛИТЬ В ПРОЦЕССЕ ИСПЫТАНИЙ
СВОЙСТВА НЕСУЩЕГО СЛОЯ ГРУНТА,
ГРУНТОВЫЕ УСЛОВИЯ И НАГРУЗКУ,
НО И ОЦЕНИТЬ ЭКОНОМИЧНОСТЬ
ФУНДАМЕНТА.



ОЙ...
ТОРТ УМЕНЬШИЛСЯ!

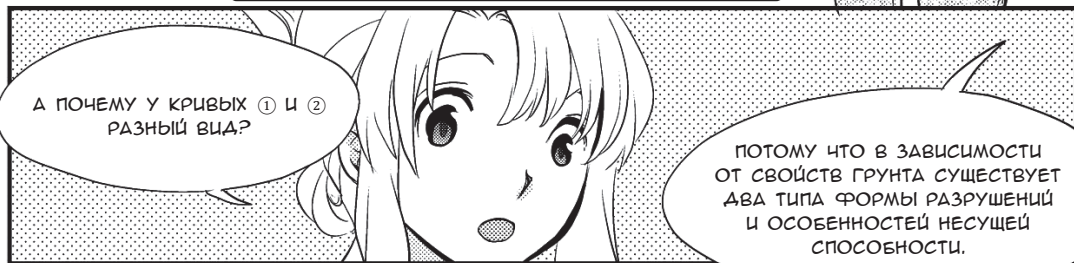
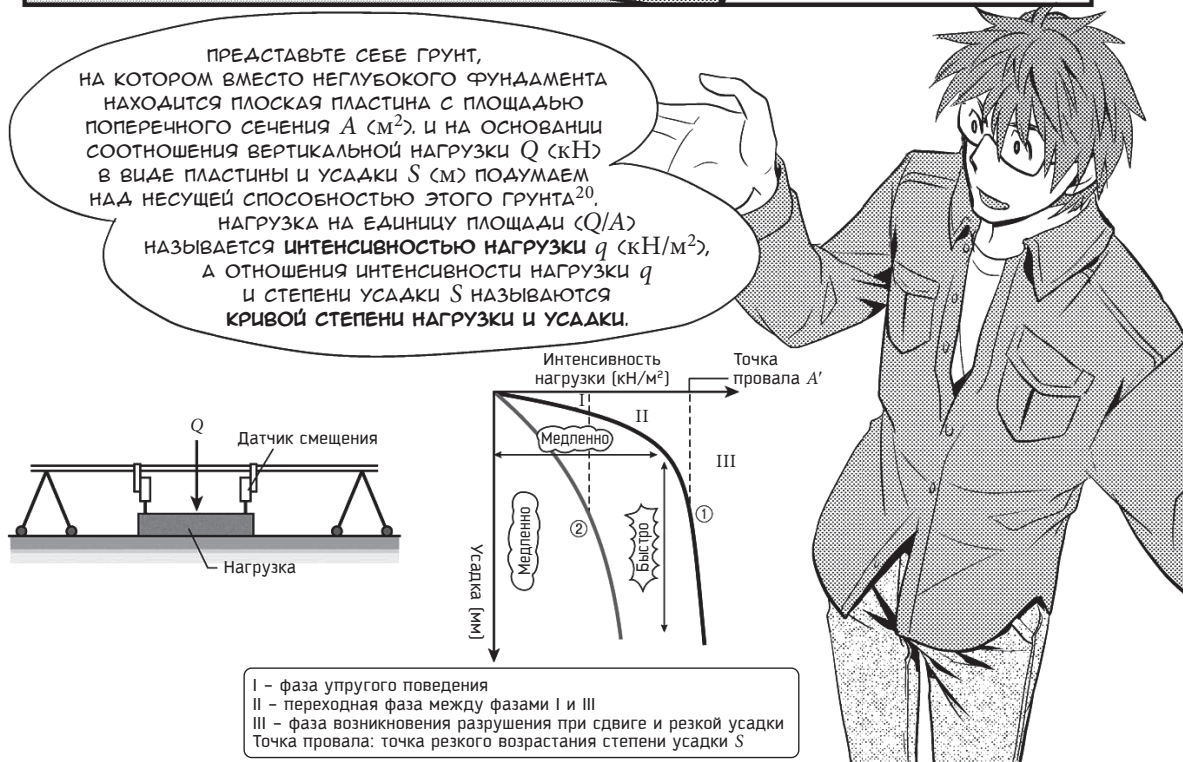
И ПРАВАА!
ПОЛОВИНА ТОЛЬКО
ОСТАЛАСЬ. АМИ,
ТЫ НЕ ЗНАЕШЬ, ЧТО
СЛУЧИЛОСЬ?

¹⁹ Обычно устанавливают вертикальные сваи, но для более эффективного сопротивления горизонтальным силам иногда устанавливают и наклонные сваи. Также в некоторых случаях используют группы из вертикальных и наклонных свай.



7.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ



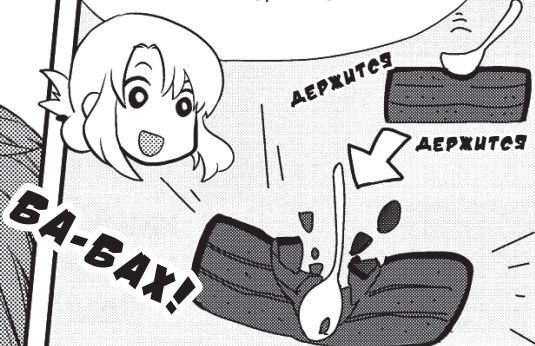


²⁰ Для исследования несущей способности грунта проводят испытание нагрузкой в виде плоской пластины. На поверхность грунта укладывается пластина, нагрузку постепенно увеличивают и по отношению величины вертикальной нагрузки к степени усадки находят несущую способность грунта.

КРИВАЯ ① ОТРАЖАЕТ СИТУАЦИЮ, КОГДА НАПРЯЖЕНИЕ СДВИГА τ В КАЖДОЙ ТОЧКЕ ГРУНТА ПРАКТИЧЕСКИ ОДНОВРЕМЕННО ДОСТИГАЕТ ЗНАЧЕНИЯ ПРОЧНОСТИ НА СДВИГ s В ТОЧКЕ ПРОВАЛА И ГРУНТ РАЗРУШАЕТСЯ МГНОВЕННО.

ТОЧКА ПРОВАЛА ПРИ ЭТОМ ОЧЕВИДНА, ТАКОЕ РАЗРУШЕНИЕ НАЗЫВАЕТСЯ ПОЛНЫМ РАЗРУШЕНИЕМ ПРИ СДВИГЕ. ОНО ПРОИСХОДИТ В ПЛОТНЫХ ПЕСЧАНЫХ И ПЕСЧАНО-ГРАВИЙНЫХ ГРУНТАХ, А ТАКЖЕ В ТВЁРДЫХ СВЯЗНЫХ ГРУНТАХ.

ЭТО КАК В НАШЕМ ПРИМЕРЕ С ТВЁРДЫМ ТОРТОМ, АД? КОГДА ОН ДЕРЖАЛСЯ-ДЕРЖАЛСЯ, А ПОТОМ РАЗ, И РАЗРУШИЛСЯ.



ТОЧНО! ИНТЕНСИВНОСТЬ НАГРУЗКИ В ТОЧКЕ ПРОВАЛА ПРИ ПОЛНОМ РАЗРУШЕНИИ ПРИ СДВИГЕ НАЗЫВАЕТСЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ q_u (кН/м²).

ОНА ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ КАК ПРОЧНОСТЬ В ПРЕДЕЛЬНОМ СОСТОЯНИИ, ПО ДОСТИЖЕНИИ КОТОРОГО ГРУНТ РАЗРУШИТСЯ.

ЗНАЧИТ, НЕГЛУБОКИЕ ФУНДАМЕНТЫ СТРОЯТ НА ОСНОВАНИИ ЭТОЙ ПРЕДЕЛЬНОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ q_u ?

КРОМЕ ТОГО, КАК И В СЛУЧАЕ С ОЦЕНКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ, ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ФУНДАМЕНТА НУЖНО УЧИТЫВАТЬ КОЭФФИЦИЕНТ БЕЗОПАСНОСТИ, СООТВЕТСТВУЮЩИЙ КОНСТРУКЦИИ И ГРУНТОВЫМ УСЛОВИЯМ.

ЗНАЧЕНИЕ, ПОЛУЧЕННОЕ ДЕЛЕНИЕМ ПРЕДЕЛЬНОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ q_u НА КОЭФФИЦИЕНТ БЕЗОПАСНОСТИ F_s^{21} , НАЗЫВАЕТСЯ **ДОПУСТИМОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ** q_a (кН/м²).

ОНА ПОКАЗЫВАЕТ ПРОЧНОСТЬ, ПРИ КОТОРОЙ СОХРАНЯЕТСЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И НЕ ПРОИСХОДИТ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ СДВИГЕ.

²¹ Коэффициент безопасности зависит от прочности на сдвиг s , но в общем случае коэффициент безопасности прочности при оползнях $F_s = 1,2-1,3$, а коэффициент безопасности несущей способности $F_s = 3$.

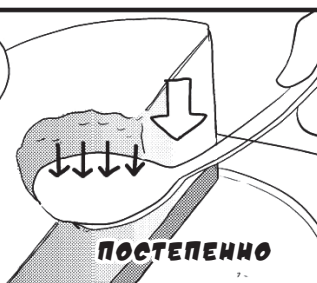
НО ЕСТЬ ЖЕ
ЕЩЁ ОДИН ТИП?

КРИВАЯ ② ИЗОБРАЖАЕТ
ПРОЦЕСС УВЕЛИЧЕНИЯ СТЕПЕНИ
УСАДКИ S , КОГДА В КАЖДОЙ ТОЧКЕ
ГРУНТА НАПРЯЖЕНИЯ СВАИГ τ
РАЗНЫЕ И ОНИ ВЫЗЫВАЮТ
ЛОКАЛЬНЫЕ РАЗРУШЕНИЯ, КОТОРЫЕ
РАСПРОСТРАНЯЮТСЯ ПО ЦЕПОЧКЕ.



В ДАННОМ СЛУЧАЕ ТОЧКА ПРОВАЛА
НЕ ЯВНАЯ, И ТАКИЕ РАЗРУШЕНИЯ
НАЗЫВАЮТСЯ ЛОКАЛЬНЫМИ
РАЗРУШЕНИЯМИ ПРИ СВАИГЕ.
ОНИ ЧАСТО НАБЛЮДАЮТСЯ
В РЫХЛЫХ ПЕСКАХ И В МЯГКИХ
СВЯЗНЫХ ГРУНТАХ.

ПОГРУЖЕНИЕ



НО РАЗ ТОЧКА ПРОВАЛА
НЕ ЯВНАЯ, ТО КАК ЖЕ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ
ПРЕДЕЛЬНАЯ НЕСУЩАЯ
СПОСОБНОСТЬ q_u ?



В СЛУЧАЕ ЛОКАЛЬНЫХ РАЗРУШЕНИЙ ПРИ
СВАИГЕ ТОЧКА ПРОВАЛА ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ
ОПЫТНЫМ ПУТЁМ, НАПРИМЕР КАК МЕСТО,
ПОСЛЕ КОТОРОГО КРИВАЯ УСАДКИ
СТАНОВИТСЯ ПРЯМОЙ. А ЗАТЕМ УЖЕ
НАХОДЯТ И ПРЕДЕЛЬНУЮ НЕСУЩУЮ
СПОСОБНОСТЬ q_u .

ОДНАКО ЕСЛИ НЕСУЩАЯ
СПОСОБНОСТЬ q_u ВЫСОКА И СТЕПЕНЬ
УСАДКИ S БОЛЬШАЯ, ТО ХОТЯ ГРУНТ
ПРИ ЭТОМ И НЕ ПРОВАЛИВАЕТСЯ,
СУЩЕСТВУЕТ ВЕРОЯТНОСТЬ ПОТЕРИ
КОНСТРУКЦИЕЙ СВОИХ ФУНКЦИЙ
И УГРОЗА БЕЗОПАСНОСТИ.



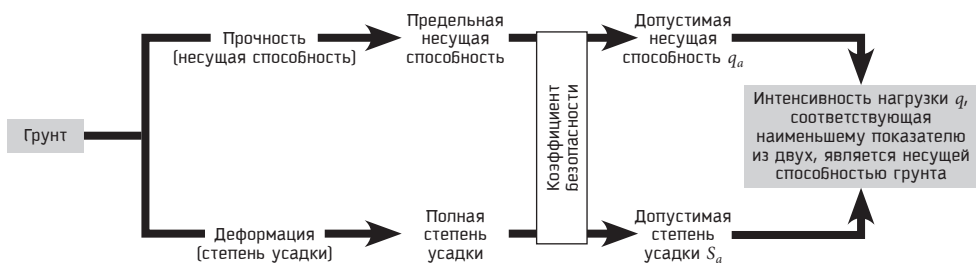
ДЕФОРМАЦИЯ ВЛИЯЕТ НА
ПРОЧНОСТЬ ГРУНТА, ДА?
ЭТО ЖЕ ВРОДЕ НАЗЫВАЕТСЯ
ПРОСЕДАНИЕМ В РЕЗУЛЬТАТЕ
КОНСОЛИДАЦИИ, ВЕРНО?



Усадка бывает двух типов: возникающая почти сразу под воздействием нагрузки, мгновенная усадка, и возникающая постепенно под воздействием уплотнения, усадка консолидации. В любом случае, для обоих типов проседания существует предел степени усадки S , допустимый с точки зрения функциональности и безопасности конструкции. Поэтому нужно определить допустимую степень усадки S_a ²² и спроектировать такой фундамент, чтобы интенсивность нагрузки q не превышала допустимое значение.



Другими словами, оценка устойчивости фундамента с точки зрения деформации производится на основании допустимой степени усадки S_a , а с точки зрения прочности грунта – на основании допустимой несущей способности q_a , да?



Верно. Интенсивность нагрузки должна находиться в допустимом диапазоне и для допустимой несущей способности q_a , и для допустимой степени усадки S_a . То есть меньшее из этих значений считается несущей способностью грунта²³.



Выбор меньшего значения обеспечивает безопасность фундамента как с точки зрения прочности грунта, так и с точки зрения деформации, да?



Именно! Стоимость фундамента составляет довольно большую часть в стоимости всей конструкции. Поэтому к вопросу оценки фундаментов и обеспечиваемой ими устойчивости конструкции следует подходить рационально.

Ну а теперь я расскажу вам о теории несущей способности Терцаги и формуле несущей способности, которые используются для неглубоких фундаментов.



Как-то уже звучит слишком сложно...

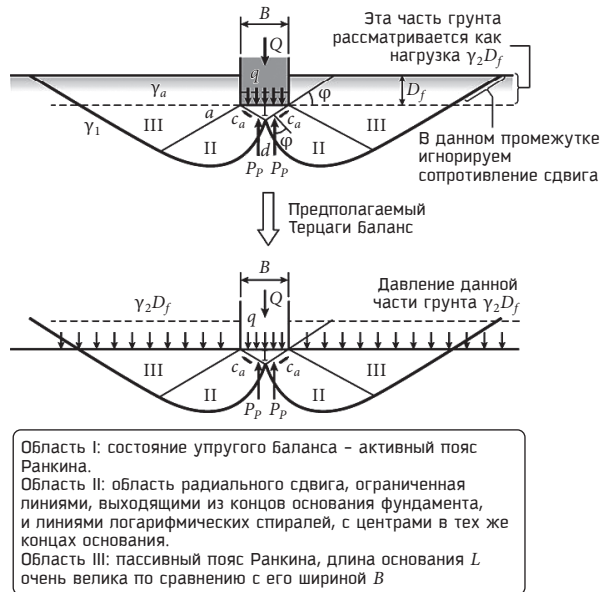
²² При расчёте предельных состояний предельная несущая способность q_u соответствует несущей способности в конечном пограничном состоянии, а допустимая степень усадки S_a соответствует несущей способности в эксплуатационном пограничном состоянии.

²³ Меньшее из допустимых значений несущей способности q_a и степени усадки S_a называют допустимой несущей способностью грунта, показывающей поддерживающую силу грунта.



Теория для оценки несущей способности грунтов основывается на упрощенном механизме несущей способности грунта и идеализации его характеристик.

Терцаги рассматривал ленточный фундамент (ширина фундамента B (м)), погружённый на глубину D_f (м) в плотный песчаный грунт. И изучил механизм несущей способности грунта, получающего равномерно распределённую нагрузку q (в центре ленточного фундамента вертикальная нагрузка Q (кН)).



Предполагается, что при этом грунт выше дна фундамента (часть грунта, соответствующая корневой части фундамента) не оказывает сопротивления сдвигу.



Значит ли это, что для неглубоких фундаментов грунт выше поверхности нагрузки рассматривается не как опорный грунт, а лишь как дополнительная нагрузка в виде давления вскрыши $p_0 = \gamma_2 D_f$?



Молодец, абсолютно верно! Если глубина укоренения фундамента D_f больше его ширины B , то невозможно игнорировать сопротивление сдвигу в грунте выше поверхности нагрузки. Поэтому-то теория Терцаги имеет дело только с неглубокими фундаментами, где $D_f/B < 1$.

Представьте теперь, что вертикальная нагрузка Q постепенно увеличивается, следом за интенсивностью нагрузки q возрастает степень усадки S_a (м), и в конце концов будет достигнута предельная несущая способность q_u . Как в таком случае произойдёт разрушение несущего грунта?



Поскольку это плотный песок, то, видимо, произойдёт полное разрушение.



Да, правильно! Рассмотрим теперь состояние внутри несущего грунта. По мере увеличения действующей на фундамент вертикальной нагрузки Q грунт под фундаментом действует вместе с фундаментом как твёрдое клинообразное тело, ограничиваемое силой трения и силой сцепления, формируя область I^{24} .



Клинообразная область I погружается вместе с фундаментом вертикально вниз и получает сопротивление пассивного давления грунта областей II и III (см. стр. 228). В то же время области III слева и справа деформируются, сжимаясь под горизонтальным давлением, что в конце концов вызывает пассивное разрушение. В зоне пассивного разрушения III поверхность скольжения будет прямой, а в зоне II – веерообразной.



В самом деле, твёрдый торт у нас так и разрушился.



Терцаги вывел следующую формулу для вычисления предельной несущей способности q_u , исходя из баланса вертикально направленных сил в области I :

$$q_u = cN_c + \frac{1}{2} \gamma_1 B N_\gamma + \gamma_2 D_f N_q \text{ (кН/м}^2\text{)}.$$

q_u : предельная несущая способность (кН/м²)

c : сила сцепления грунта ниже дна фундамента (несущий грунт) (кН/м²)

γ_1 : удельная объёмная масса грунта ниже дна фундамента (несущий грунт) (кН/м³)

γ_2 : удельная объёмная масса грунта выше дна фундамента (корневая часть) (кН/м³)

B : минимальная ширина дна фундамента (м)

D_f : корневая глубина фундамента (м)



А что означает трижды повторяющийся показатель в правой части формулы?



N с разными индексами.



Первое слагаемое правой части формулы показывает несущую способность, обусловленную силой сцепления несущего грунта. Второе слагаемое означает несущую способность, обусловленную собственным весом несущего грунта на ширину фундамента B . А третье слагаемое показывает несущую способность, обусловленную давлением вскрыши $p_0 = \gamma_2 D_f$ корневой части грунта на глубину укоренения D_f . Множители же этих слагаемых N_c , N_γ , N_q называются коэффициентами несущей способности и зависят от угла внутреннего трения φ . Сумма всех элементов даёт предельную несущую способность q_u .

²⁴ Глубина области I определяется углом α в общем случае; если дно фундамента гладкое, то этот угол равен $45^\circ + \varphi/2$; если же дно фундамента шершавое, то угол равен φ .



Получается, что несущая способность неглубокого фундамента вычисляется посредством разделения влияния на неё силы сцепления грунта c , ширины фундамента B и глубины укоренения D_f , верно?



Кроме того, после череды экспериментов Терцаги предложил также формулы несущей способности для квадратных и круглых фундаментов. А Японское общество архитекторов обобщило эти формулы, расширив формулу вычисления предельной несущей способности q_u :

$$q_u = \alpha c N_c + \beta \gamma_1 B N_\gamma + \gamma_2 D_f N_q \text{ (кН/м}^2\text{)},$$

где α и β являются коэффициентами, определяемыми формой поверхности дна фундамента. Их значения представлены в таблице.

**Коэффициенты формы согласно руководству
по проектированию конструкций фундаментов зданий**

Коэффициенты формы	Форма дна фундамента			
	линия	квадрат	прямоугольник	круг
α	1,0	1,2	$1,0 + 1,2(B/L)$	1,2
β	0,5	0,3	$0,5 - 0,2(B/L)$	0,3

B – длина короткой стороны; L – длина длинной стороны.



Таким образом, механизм несущей способности грунта довольно сложен, и эти формулы расчёта применяются, когда происходит полное разрушение при сдвиге. Если же разрушение локальное, то определённой поверхности скольжения не возникнет, и деформацию можно будет увидеть локально около обоих концов фундамента.



И мы это видели на примере мягкого торта.



А как насчёт глубоких фундаментов, вроде свайного?



Во время испытания на нагрузку свайного фундамента, в котором используются реальные сваи, несущую способность можно получить по кривой усадки. Однако если проведение испытания на нагрузку затруднительно, то несущая способность рассчитывается по формуле на основании результатов исследований и испытаний грунта.

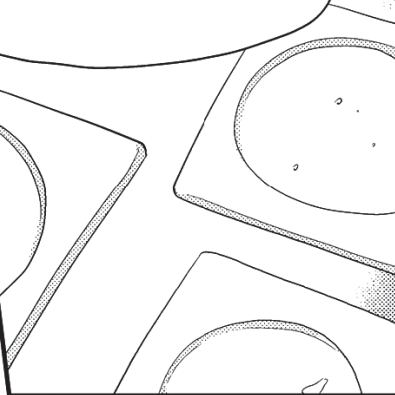
Кроме того, в зонах проседания из-за консолидации возможно воздействие на сваи **отрицательного трения**, что влияет на несущую способность и степень усадки. Это необходимо учитывать (см. стр. 273).



ИТАК, ЗАВТРА МЫ ПРОВЕДЁМ
ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ
И НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГРУНТА

С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ
СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ.

РАБОТА ПРЕДОСТОИТ ТРУДНАЯ,
ТАК ЧТО ПОАКРЕПИМСЯ...
ОЙ, А ГДЕ ЖЕ ТОРТЫ?

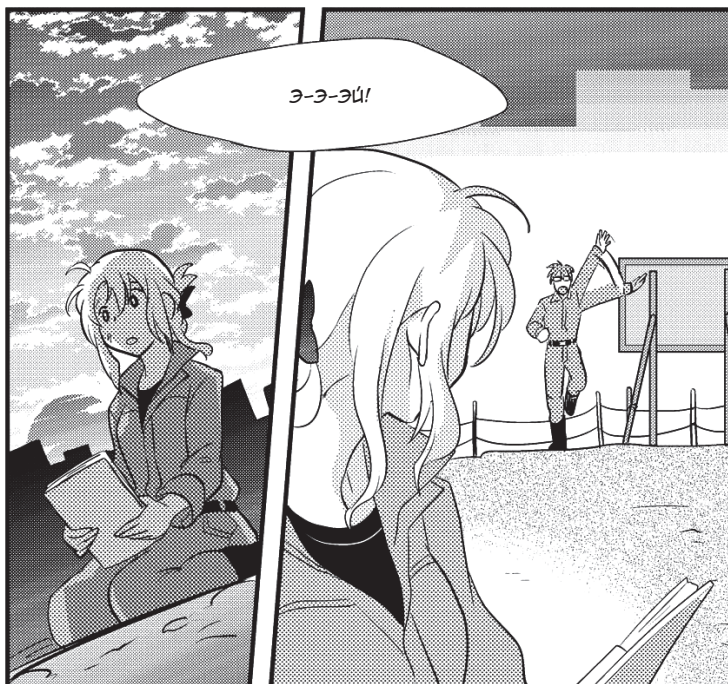


НЕУЖЕЛИ АМИ?!

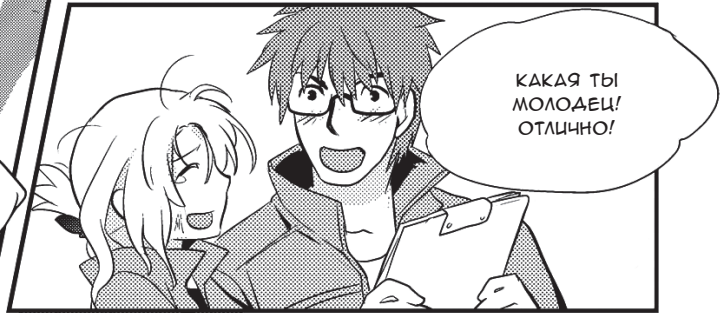
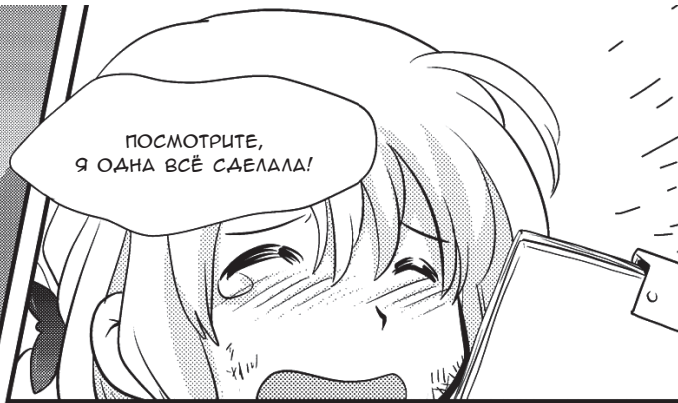
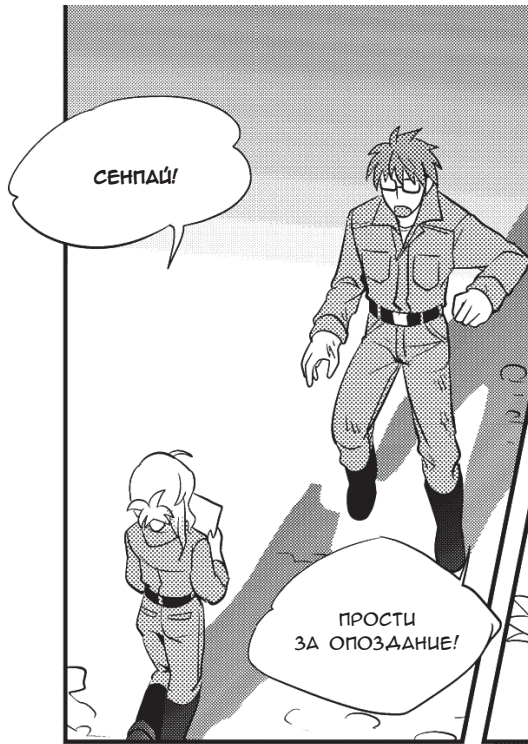
ВСЁ-ТАКИ ТРИ ЦЕЛЫХ ТОРТА
ТЯЖЕЛОВАТО ДАЛИСЬ...



ХИ-ХИ



Э-Э-ЭЦ!



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Давление грунта на подпорную стену (теория давления грунта Кулона)

1. Активное давление грунта Кулона P_A

Сила, с которой стена поддерживает массив грунта ABC, равна активному давлению грунта P_A :

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 K_A \text{ (кН/м)}.$$

Здесь K_A – это коэффициент активного давления грунта Кулона.

$$K_A = \frac{\sin^2(\theta - \varphi)}{\sin^2 \theta \sin(\theta - \varphi)} \left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\theta - \delta) \sin(\theta - \beta)}{\sin(\theta + \delta) \sin(\theta + \beta)}} \right)^{-2}.$$

Здесь γ_t – масса на единицу объема насыпного грунта (кН/м³), H – высота стены (м), θ – угол наклона задней поверхности стены (°), φ – угол внутреннего трения (°), δ – угол трения поверхности стены, β – угол наклона земной поверхности (°). Кроме того, если поверхность насыпного грунта горизонтальна ($\beta = 0^\circ$), угол наклона задней поверхности стены прямой ($\theta = 90^\circ$), а угол трения поверхности стены $\delta = 0^\circ$, то активное давление грунта P_A будет равно:

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \text{ (кН/м)}.$$

При этом коэффициент активного давления грунта K_A :

$$K_A = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right),$$

значит, точка воздействия h_A активного давления грунта P_A находится на расстоянии $H/3$ от нижнего края стены.

2. Пассивное давление грунта Кулона P_P

Пассивное давление P_P :

$$P_P = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 K_P \text{ (кН/м)}.$$

Здесь K_P – коэффициент пассивного давления грунта Кулона.

Вот что получится:

$$K_P = \frac{\sin^2(\theta + \varphi)}{\sin^2 \theta \sin(\theta - \varphi)} \left(1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi + \beta)}{\sin(\theta - \delta) \sin(\theta - \beta)}} \right)^{-2}.$$

Кроме того, если поверхность насыпного грунта горизонтальна ($\beta = 0^\circ$), угол наклона задней поверхности стены прямой ($\theta = 90^\circ$), а угол трения поверхности стены $\delta = 0^\circ$, то пассивное давление грунта P_P будет равно:

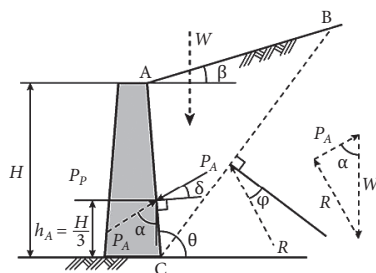


Рис. 1. Активное давление грунта Кулона

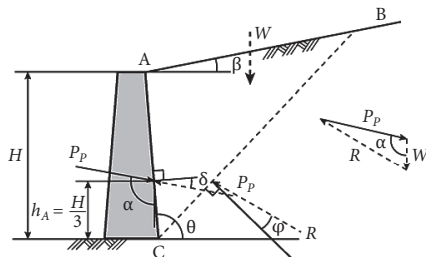


Рис. 2. Пассивное давление грунта Кулона

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma_1 H^2 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) (\text{кН/м}).$$

При этом коэффициент пассивного давления грунта K_p :

$$K_p = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right),$$

значит, точка воздействия h_p пассивного давления грунта P_p находится на расстоянии $H/3$ от нижнего края стены.

Задача 1

Основываясь на рис. 1 и 2, определите активное P_A и пассивное P_p давления грунта Кулона, а также точки их воздействия h_A и h_p , если поверхность грунта горизонтальна ($\beta = 0^\circ$), угол наклона задней поверхности стены прямой ($\theta = 90^\circ$), а высота стены $H = 5$ м. Считая, что удельная масса насыпного грунта на единицу объёма $\gamma_t = 18$ кН/м³, угол внутреннего трения $\varphi = 24^\circ$, а угол трения поверхности стены $\delta = 0^\circ$.

Рассуждение

Так как $\beta = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$ и $\delta = 0^\circ$, то коэффициент активного давления грунта $K_A = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right)$,

коэффициент пассивного давления грунта $K_p = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$, и тогда активное давление грунта P_A можно вычислить по формуле:

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) (\text{кН/м}),$$

а пассивное давление грунта P_p можно вычислить по формуле:

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma_1 H^2 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) (\text{кН/м}).$$

Решение

Активное давление грунта P_A :

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma_1 H^2 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = \frac{1}{2} \times 18 \times 5^2 \times \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{24^\circ}{2} \right) = 94,9 \text{ кН/м}.$$

Пассивное давление грунта P_p :

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) = \frac{1}{2} \times 18 \times 5^2 \times \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{24^\circ}{2} \right) = 533,5 \text{ кН/м}.$$

Обе точки приложения активного давления h_A и пассивного давления h_p находятся на расстоянии $H/3$ от нижнего края стены, а значит, $h_A = h_p = 5/3 = 1,7$ м.

Давление грунта на подпорную стену (теория давления грунта Ранкина)

1. Активное давление грунта Ранкина P_A

Активное давление грунта P_A :

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 K_A (\text{кН/м}).$$

Здесь K_A – коэффициент активного давления грунта Ранкина.

$$K_A = \cos\beta \frac{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi}}{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi}}.$$

Кроме того, если поверхность насыпного грунта горизонтальная ($\beta = 0^\circ$), то активное давление грунта P_A и коэффициент активного давления K_A определяются так же, как в теории Кулона:

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) (\text{кН/м}).$$

$$K_A = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right).$$

Значит, точка воздействия h_A активного давления грунта P_A находится на расстоянии $H/3$ от нижнего края стены.

2. Пассивное давление грунта Ранкина P_P

Пассивное давление P_P :

$$P_P = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 K_P (\text{кН/м}).$$

Здесь K_P – коэффициент пассивного давления грунта Ранкина.

$$K_P = \cos\beta \frac{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi}}{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\varphi}}.$$

Кроме того, если поверхность насыпного грунта горизонтальная ($\beta = 0^\circ$), то пассивное давление грунта P_P и коэффициент пассивного давления K_P определяются так же, как в теории Кулона:

$$P_P = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) (\text{кН/м});$$

$$K_P = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right),$$

значит, точка воздействия h_P пассивного давления грунта P_P находится на расстоянии $H/3$ от нижнего края стены.

(Справка) Случай, когда существует сила сцепления грунта ($c \neq 0$)

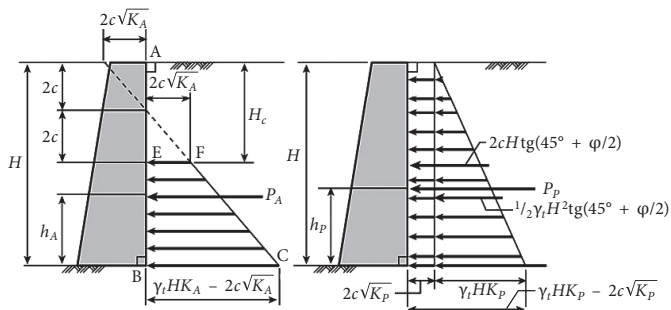


Рис. 4. Давление грунта Ранкина, когда существует сила сцепления грунта

Активное P_A и пассивное P_P давления грунта Ранкина равны:

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c H \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (\text{кН/м});$$

$$P_P = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c H \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (\text{кН/м}),$$

где c – сила сцепления (кН/м²).

Тогда точки приложения активного P_A и пассивного P_P давлений грунта h_A и h_P (расстояния от нижнего края стены (м)):

$$h_A = \frac{1}{P_A} \left\{ \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \frac{H}{3} - 2c H \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \frac{H}{2} \right\} \quad (\text{м});$$

$$h_P = \frac{1}{P_P} \left\{ \frac{1}{2} \gamma_t H^2 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \frac{H}{3} - 2c H \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \frac{H}{2} \right\} \quad (\text{м}).$$

Задача 2

Основываясь на рис. 3 и 4, определите активное P_A и пассивное P_P давления грунта Ранкина, если угол наклона поверхности грунта $\beta = 15^\circ$, угол наклона задней поверхности стены прямой ($\theta = 90^\circ$), а высота стены $H = 5$ м. Считайте, что удельная масса насыпного грунта на единицу объёма $\gamma_t = 18$ кН/м³, угол внутреннего трения $\varphi = 24^\circ$.

Рассуждение

Так как поверхность насыпного грунта наклонная ($\beta = 15^\circ$), то коэффициент активного давления грунта $K_A = \cos \beta \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}}$, а коэффициент пассивного давления грунта равен

$K_P = \cos \beta \frac{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}}{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}}$, поэтому активное давление грунта P_A можно вычислить по формуле $P_A = 1/2 \gamma_t H^2 K_A$, а пассивное P_P – по формуле $P_P = 1/2 \gamma_t H^2 K_P$.

Решение

Коэффициент активного давления K_A равен:

$$K_A = \cos \beta \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}} = \cos 15^\circ \frac{\cos 15^\circ - \sqrt{\cos^2 15^\circ - \cos^2 24^\circ}}{\cos 15^\circ + \sqrt{\cos^2 15^\circ - \cos^2 24^\circ}} = 0,4923.$$

Коэффициент пассивного давления K_P равен:

$$K_P = \cos \beta \frac{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}}{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \varphi}} = \cos 15^\circ \frac{\cos 15^\circ + \sqrt{\cos^2 15^\circ - \cos^2 24^\circ}}{\cos 15^\circ - \sqrt{\cos^2 15^\circ - \cos^2 24^\circ}} = 1,8954.$$

Активное давление грунта P_A равно:

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 K_A = \frac{1}{2} \times 18 \times 5^2 \times 0,4923 = 110,8 \text{ кН/м}.$$

Пассивное давление грунта P_p равно:

$$P_p = \frac{1}{2} \gamma_t H^2 K_p = \frac{1}{2} \times 18 \times 5^2 \times 1,8954 = 426,5 \text{ кН/м.}$$

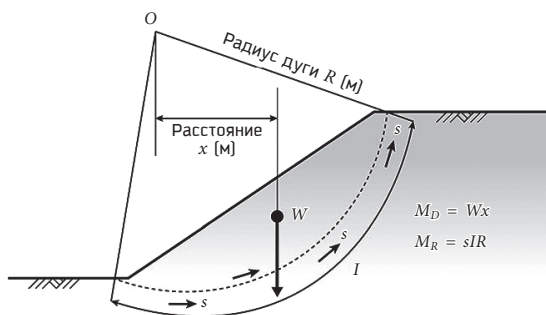
Задание выполнено.

Устойчивость склона (анализ устойчивости при дугообразной плоскости скольжения)

Обычно трудно определить положение поверхности скольжения заранее. Поэтому, повторяя приведённую ниже последовательность действий, сравнивают коэффициенты безопасности F_s .

Процедура анализа устойчивости

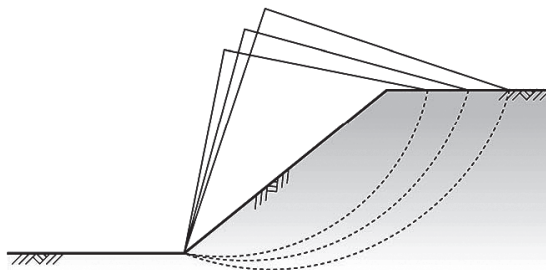
- 1) Определение центральной точки O дуги скольжения и её радиуса R .



- 2) Вычислить воздействующие на предполагаемую поверхность скольжения скользящий момент M_D (момент силы сдвига относительно центральной точки O) и момент сопротивления M_R (момент сопротивления сдвигу относительно центральной точки O), определить коэффициент безопасности F_s предполагаемой плоскости скольжения из соотношения M_R к M_D .

$$F_s = \frac{M_R}{M_D}.$$

- 3) Рассмотреть предполагаемые плоскости скольжения с другим центром и другим радиусом, повторяя каждый раз вычисления из пункта 2). Определить окружность, соответствующую минимальному из найденных значений коэффициенту безопасности F_s (предельный круг).

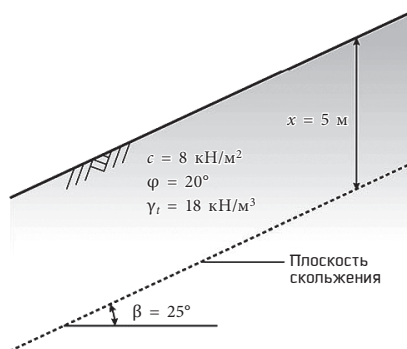


Полученное таким образом минимальное значение коэффициента безопасности F_s будет соответствовать коэффициенту безопасности для данного склона.

Устойчивость склона (анализ устойчивости при прямой плоскости скольжения)

Задача 3

Для изображенного на рисунке склона (угол наклона $\beta = 25^\circ$) вычислите коэффициент безопасности F_s при разрушении от сдвига с прямой плоскостью скольжения. Считаем, что сила сцепления формирующего склон грунта $c = 8 \text{ кН/м}^2$, угол внутреннего трения $\varphi = 20^\circ$, а удельная объемная масса $\gamma_t = 18 \text{ кН/м}^3$.



Рассуждение

Подставив соответствующие значения в формулу, приведённую на стр. 242, найдём коэффициент безопасности F_s от разрушения при плоскостном сдвиге.

Решение

$c = 8 \text{ кН/м}^2$, $\varphi = 20^\circ$, $\gamma_t = 18 \text{ кН/м}^3$, следовательно, коэффициент безопасности F_s равен:

$$F_s = \frac{2c}{\gamma_t z \sin 2\beta} + \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{2 \times 8}{18 \times 5 \times \sin(2 \times 25^\circ)} + \frac{\operatorname{tg} 20^\circ}{\operatorname{tg} 25^\circ} = 1,01.$$

Так как коэффициент безопасности $F_s > 1$, то на данном склоне не случится разрушения при плоскостном скольжении.

Устойчивость склонов (анализ устойчивости по графику устойчивости Тейлора)

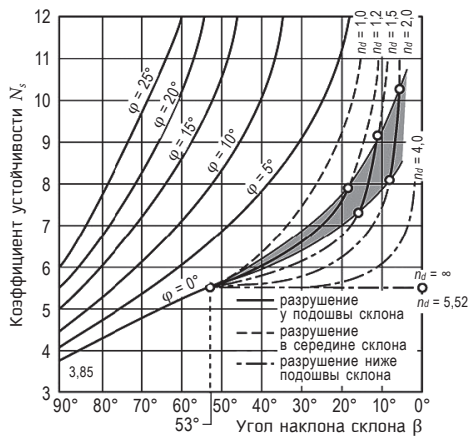
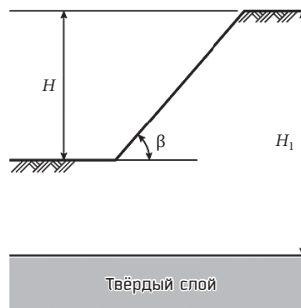


Рис. 5. График устойчивости Тейлора



Коэффициент глубины n_d

Для анализа устойчивости склонов, сформированных из однородного грунта, используют график устойчивости Тейлора. Значение коэффициента устойчивости N_s берётся из рис. 5. По приведённой ниже формуле рассчитывается предельная высота H_c , при которой склон не разрушится, а затем рассчитывается и коэффициент безопасности F_s . Если же угол внутреннего трения $\varphi = 0^\circ$, а угол наклона склона $\beta < 53^\circ$, то коэффициент устойчивости N_s получают на основании β и коэффициента глубины n_d (= глубина от вершины склона до твёрдого слоя H_1 (м) / высота склона H (м)) и находят значение предельной высоты H_c .

$$\text{Предельная высота } H_c = N_s \frac{c}{\gamma_t} \text{ (м).}$$

Здесь c – сила сцепления грунта, формирующего склон (кН/м^2); γ_t – удельная объёмная масса грунта, формирующего склон.

$$\text{Коэффициент безопасности } F_s = \frac{H_c}{H}.$$

Задача 4

Каким будет коэффициент безопасности F_s для вертикальной выемки ($\beta = 90^\circ$) связного грунта, если глубина выемки $H = 4$ м, сила сцепления $c = 18 \text{ кН/м}^2$, угол внутреннего трения $\varphi = 0^\circ$, а удельная объёмная масса $\gamma_t = 15 \text{ кН/м}^3$?

Рассуждение

На графике устойчивости Тейлора (рис. 5) найдём значение коэффициента устойчивости N_s , соответствующее углу наклона склона $\beta = 90^\circ$ и углу внутреннего трения $\varphi = 0^\circ$. По приведённой выше формуле найдём предельную высоту H_c и вычислим коэффициент безопасности F_s .

Решение

Как видно из графика устойчивости Тейлора, коэффициент устойчивости $N_s = 3,85$. Тогда предельная высота H_c равна:

$$H_c = N_s \frac{c}{\gamma_t} = 3,85 \times \frac{18}{15} = 4,62 \text{ м.}$$

Следовательно, коэффициент безопасности F_s будет равен:

$$F_s = \frac{H_c}{H} = \frac{4,62}{4} = 1,16.$$

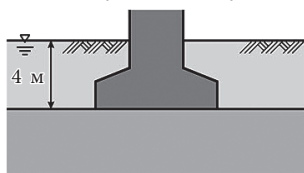
Несущая способность фундамента (неглубокий фундамент)

Задача 5

Как показано на рисунке, на глубину $D_f = 4$ м установлен фундамент в грунт, состоящий из двух слоёв. Найдите предельную несущую способность фундамента q_u для каждого из трёх вариантов его формы:

- ① линейный фундамент (ширина $B = 6$ м);
- ② квадратный фундамент (сторона квадрата $B = 6$ м);
- ③ прямоугольный фундамент (короткая сторона $B = 6$ м, длинная сторона $L = 12$ м).

Фундамент, установленный на двухслойный грунт



$$\begin{aligned} \gamma_{\text{sat}} &= 19 \text{ кН/м}^3 \\ c' &= 12 \text{ кН/м}^2 \\ \varphi' &= 10^\circ \\ \gamma_{\text{sat}} &= 20 \text{ кН/м}^3 \\ c' &= 10 \text{ кН/м}^2 \\ \varphi' &= 20^\circ \end{aligned}$$

Коэффициенты формы согласно руководству по проектированию конструкций фундаментов зданий

Коэффициенты формы	Форма дна фундамента			
	линия	квадрат	прямоугольник	круг
α	1,0	1,2	$1,0 + 1,2(B/L)$	1,2
β	0,5	0,3	$0,5 - 0,2(B/L)$	0,3

B – длина короткой стороны; L – длина длинной стороны.

Коэффициенты несущей способности согласно руководству по проектированию конструкции фундамента зданий

$\varphi' (^\circ)$	N_c	N_q	N_γ
0	5,1	1,0	0,0
5	6,5	1,6	0,1
10	8,3	2,5	0,4
15	11,0	3,9	1,1
20	14,8	6,4	2,9
25	20,7	10,7	6,8
28	25,8	14,7	11,2
30	30,1	18,4	15,7
32	35,5	23,2	22,0
34	42,2	29,4	31,1
36	50,6	37,8	44,4
38	61,4	48,9	64,1
> 40	75,3	64,2	93,7

Рассуждение

Так как уровень грунтовых вод совпадает с поверхностью грунта, то удельную объёмную массу каждого слоя γ_1 и γ_2 можно вычислить, используя удельную объёмную массу воды $\gamma' (= \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w)$ (кН/м³). Угол внутреннего трения на дне фундамента равен $\varphi' = 20^\circ$. Из приведённой выше таблицы возьмём соответствующие этому значению угла коэффициенты несущей способности N_c , N_q , N_γ . Для каждой исследуемой формы поверхности дна фундамента возьмём

соответствующие значения коэффициентов формы α и β . Затем найдём предельную несущую способность грунта по формуле $q_u = \alpha c N_c + \beta \gamma_1 B N_\gamma + \gamma_2 D_f N_q$.

Решение

Коэффициенты несущей способности $N_c = 14,8$, $N_q = 6,4$, $N_\gamma = 2,9$. Удельная объёмная масса грунта, находящегося ниже поверхности дна фундамента, $\gamma_1 = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = 20 - 9,8 = 10,2 \text{ кН/м}^3$, а удельная объёмная масса грунта, находящегося выше поверхности дна фундамента, $\gamma_2 = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w = 19 - 9,8 = 9,2 \text{ кН/м}^3$.

① Линейный фундамент (ширина $B = 6 \text{ м}$). Так как коэффициенты формы $\alpha = 1,0$, $\beta = 0,5$, то предельная несущая способность q_u будет равна:

$$q_u = \alpha c N_c + \beta \gamma_1 B N_\gamma + \gamma_2 D_f N_q = (1,0 \times 10 \times 14,8) + (0,5 \times 10,2 \times 6 \times 2,9) + (9,2 \times 4 \times 6,4) = 472 \text{ кН/м}^2.$$

② Квадратный фундамент (длина стороны $B = 6 \text{ м}$). Так как коэффициенты формы $\alpha = 1,2$, $\beta = 0,3$, то предельная несущая способность q_u будет равна:

$$q_u = \alpha c N_c + \beta \gamma_1 B N_\gamma + \gamma_2 D_f N_q = (1,2 \times 10 \times 14,8) + (0,3 \times 10,2 \times 6 \times 2,9) + (9,2 \times 4 \times 6,4) = 466 \text{ кН/м}^2.$$

③ Прямоугольный фундамент (длина короткой стороны $B = 6 \text{ м}$, длина длинной стороны $L = 12 \text{ м}$). Так как коэффициенты формы $\alpha = 1,0 + 0,2(B/L) = 1,0 + 0,2 \times 6/12 = 1,1$ и $\beta = 0,5 - 0,2(B/L) = 0,5 - 0,2 \times 6/12 = 0,4$, то предельная несущая способность q_u будет равна:

Несущая способность фундамента (глубокий фундамент)

1. Формула расчёта Мейерхофа

Мейерхоф (Meyerhof) установил соотношение между предельной несущей способностью песчаного грунта Q_u и значением N , получаемым в результате стандартного испытания на проникновение. Из этого соотношения, а также из соотношения значения N и силы периферийного трения сваи f_s (кН/м²) Мейерхоф предложил следующую полуэкспериментальную формулу для вычисления предельной несущей способности сваи Q_u (кН) в песчаном грунте:

$$\text{Предельная несущая способность } Q_u = 9,81 \left(40 N A_p + \frac{\bar{N}}{5} A_s \right) \text{ (формула Мейерхофа),}$$

где N – значение N для грунта на конце сваи; $\bar{N}$ – среднее значение N для грунта вокруг сваи; A_p – площадь поперечного сечения кончика сваи (м²); A_s – площадь круга сваи (м²).

Чтобы перевести единицы измерения силы на вес (тс) в единицы измерения СИ (кН), производится умножение на 9,81.

2. Практическая расчётная формула из руководства по проектированию фундаментов зданий

Существуют разные способы установки свай на площадке, например такие, как метод забивки уже готовых свай и метод производства свай на площадке. В зависимости от используемого метода будут отличаться коэффициенты в расчётной формуле. Кроме того, данная формула была предложена для песчаных грунтов, поэтому при её применении для связных грунтов используют недренированную прочность на сдвиг s_u . Для корректного отражения способа установки свай и характеристик грунта в руководстве по проектированию фундаментов зданий приведена расширенная формула для расчёта предельной несущей способности Q_u в следующем виде:

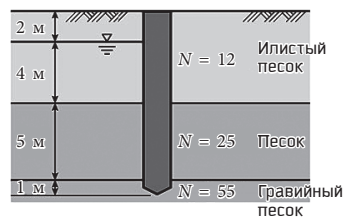
Таблица 1. Практическая формула расчёта вертикальной несущей способности свай

	Предельная несущая способность сваи $Q_u = Q_p + Q_s$ (кН/шт.)			
	Несущая способность нижнего конца Q_p		Периферийная сила трения Q_s	
	Песчаный грунт	Связный грунт	Часть песчаного грунта	Часть связного грунта
Забивная свая (готовая)	$300\bar{N}_1 A_p$ $\bar{N}_1$: среднее значение N в области грунта в диапазоне от $1D$ вниз от нижнего конца сваи до $4D$ вверх от него (однако $\bar{N}_1 \leq 60$)	$6s_{u1} A_p$ s_{u1} : прочность на недренированный сдвиг в области нижнего конца сваи (кН/м ²) (однако $s_{u1} \leq 3000$ (кН/м ²))	$2,0\bar{N}_2 A_s$ $\bar{N}_2$: среднее значение N для периферийного грунта вокруг сваи (однако $\bar{N}_2 \leq 50$)	$s_{u2} A_s$ s_{u2} : средняя прочность на недренированный сдвиг в периферийной области вокруг сваи (кН/м ²) (однако $s_{u2} \leq 100$ (кН/м ²))
Забивная свая (сделанная на площадке)	$100\bar{N}_1 A_p$ $\bar{N}_1$: среднее значение N в области грунта в диапазоне от $1D$ вниз от нижнего конца сваи до $1D$ вверх от него (однако $\bar{N}_1 \leq 75$)	$6s_{u1} A_p$ ($s_{u1} \leq 1250$ (кН/м ²))	$3,3\bar{N}_2 A_s$ ($\bar{N}_2 \leq 50$)	$s_{u2} A_s$ ($s_{u2} \leq 100$ (кН/м ²))
Вставная свая	$200\bar{N}_1 A_p$ $\bar{N}_1$: среднее значение N в области грунта в диапазоне от $1D$ вниз от нижнего конца сваи до $1D$ вверх от него (однако $\bar{N}_1 \leq 60$)	$6s_{u1} A_p$ ($s_{u1} \leq 2000$ (кН/м ²))	$2,5\bar{N}_2 A_s$ ($\bar{N}_2 \leq 50$)	$0,8s_{u2} A_s$ ($s_{u2} \leq 125$ (кН/м ²))

A_p – площадь поперечного сечения нижнего конца сваи (м²); A_s – площадь поперечного сечения сваи в области песчаного или связного грунта (м²); D – диаметр сваи.

Задача 6

Как показано на рисунке, в грунт забита уже готовая бетонная свая диаметром 50 см. Вычислите её предельную несущую способность, следуя руководству по проектированию фундаментов зданий.



Коэффициент глубины n_d

Рассуждение

На основании табл. 1 получаем, что для изготовленной заранее забитой сваи, нижний конец которой находится в песчаном грунте, несущая способность его будет вычисляться по формуле $Q_p = 300\bar{N}_1 A_p$, а сила периферийного трения для песчаного грунта будет вычисляться по формуле $Q_s = 2,0\bar{N}_2 A_s$.

Решение

По практической формуле расчёта предельная несущая способность $Q_u = 300\bar{N}_1 A_p + 2,0\bar{N}_2 A_s$.

$$\overline{N}_1 = \frac{(55 \times 0,5) + \{(55 \times 1) + (25 \times 1)\}}{0,5 + 2} = 43, \quad A_p = \frac{\pi \times 0,5^2}{4} = 0,196 \text{ м}^2;$$

$$\overline{N}_2 = \frac{(12 \times 6) + (25 \times 5)}{6 + 5} = 17,91, \quad A_s = \pi \times 0,5^2 \times 11 = 17,28 \text{ м}^2.$$

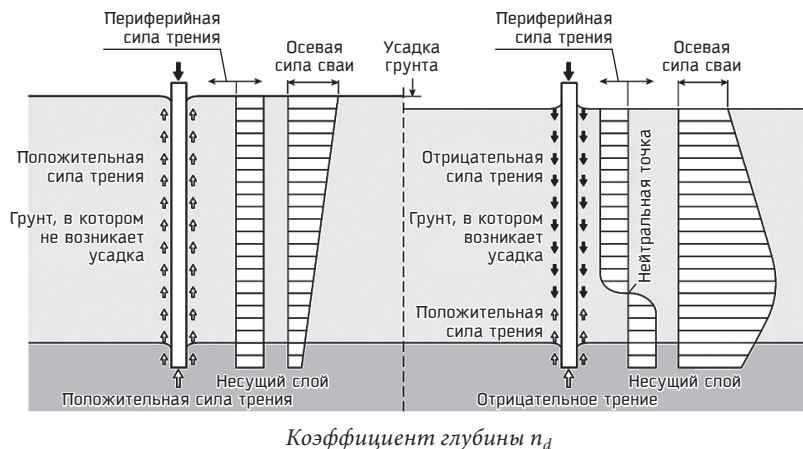
Подставим эти значения в формулу вертикальной несущей способности Q_u , получим:

$$Q_u = 300\overline{N}_1 A_p + 2,0\overline{N}_2 A_s = (300 \times 43 \times 0,196) + \{2,0 + (17,91 \times 27,28)\} = 3019 \text{ кН/шт.}$$

Отрицательное периферийное трение

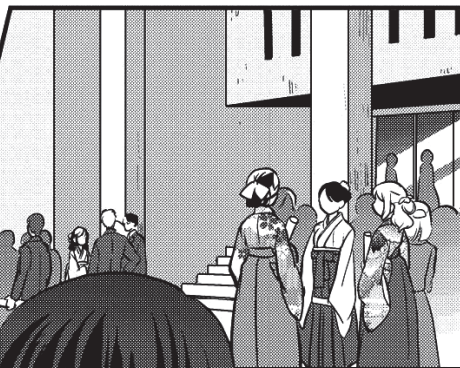
Действующая на опорную сваю вертикальная нагрузка обычно поддерживается несущей способностью наконечника Q_p и периферийной силой трения Q_s . В непроседающем грунте на периферии сваи действует направленная вверх сила трения (положительная сила трения: positive friction).

С другой стороны, если после установки сваи грунт проседает, например из-за падения уровня подземных вод, то сила трения на периферии сваи не будет содействовать несущей способности, а будет направлена вниз, подобно нагрузке (отрицательная сила трения: negative friction).

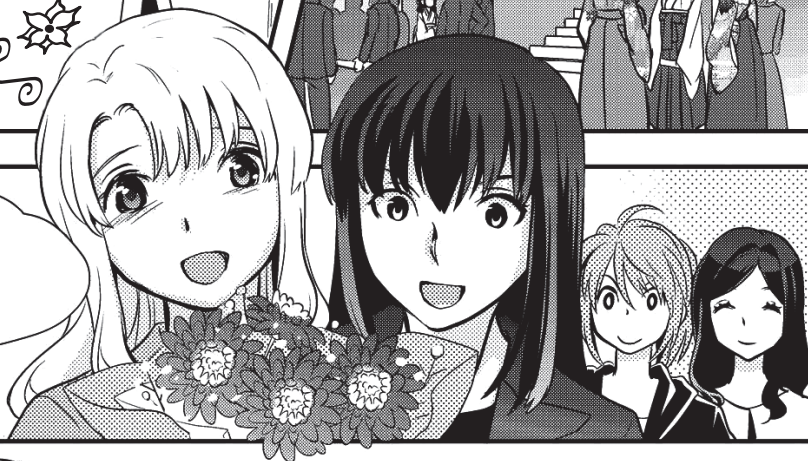


ЭПЦЛОГ





ПОЗДРАВЛЯЕМ
С ОКОНЧАНИЕМ
УНИВЕРСИТЕТА!



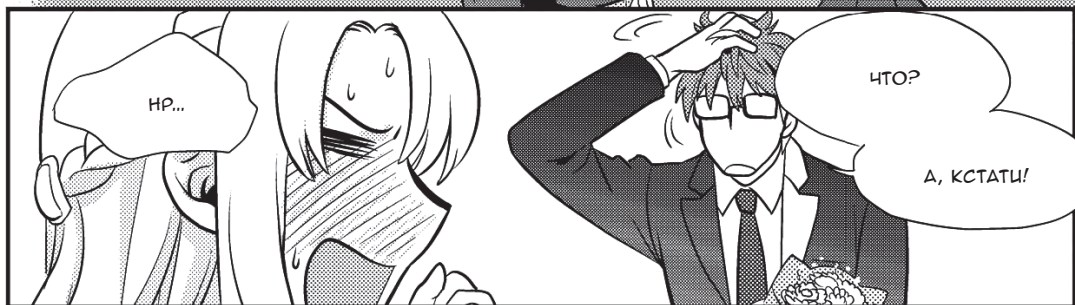
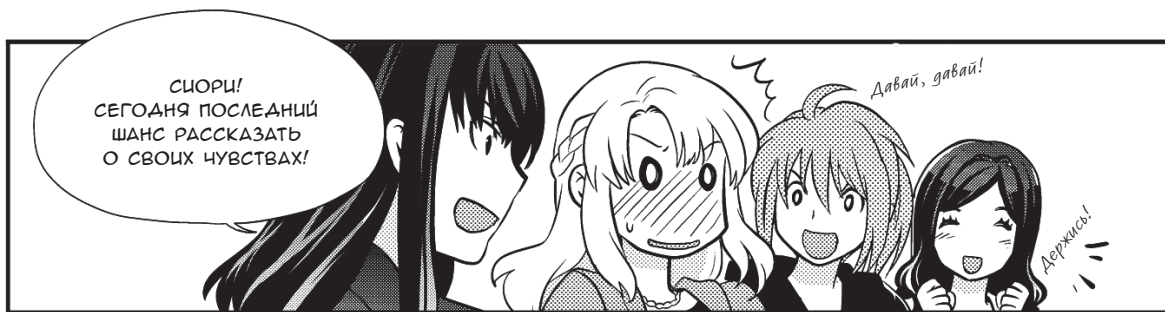
СПАСИБО!
БЛАГОДАРЯ ВАМ Я
СПОКОЕН ЗА БУДУЩЕЕ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ
ГРУППЫ ГРУНТОВ!

А Я БЛАГОДАРЯ ВАМ,
СЭМПАЙ,
ЗАИНТЕРЕСОВАЛАСЬ
ГРУНТАМИ.

Я ЕЩЁ ТОЛЬКО В НАЧАЛЕ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПУТИ,
НО КАК ГЛАВА ГРУППЫ БУДУ
СТАРАТЬСЯ ИЗО ВСЕХ СИЛ!



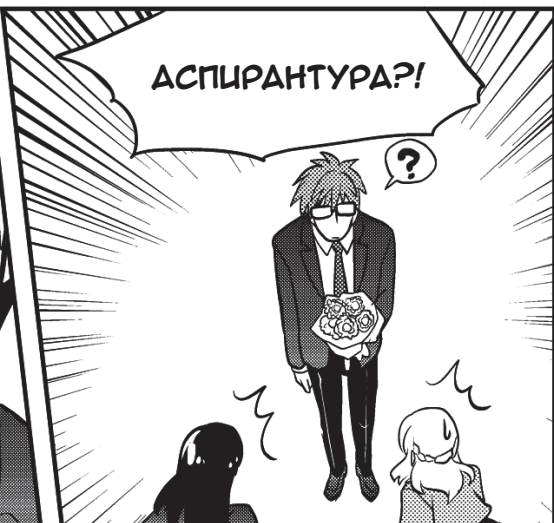
РАД СЛЫШАТЬ!





Я С НОВОГО
УЧЕБНОГО ГОДА БУДУ ЗАНЯТ
В АСПИРАНТУРЕ, ТАК ЧТО НАБОР
НОВЫХ ЧЛЕНОВ ГРУППЫ
ОСТАВЛЯЮ НА ВАС!

Только не надо
делать как я!



АСПИРАНТУРА?!



ТАК, ЗНАЧИТ,
ВЫ И В СЛЕДУЮЩЕМ ГОДУ
БУДЕТЕ В УНИВЕРСИТЕТЕ?!



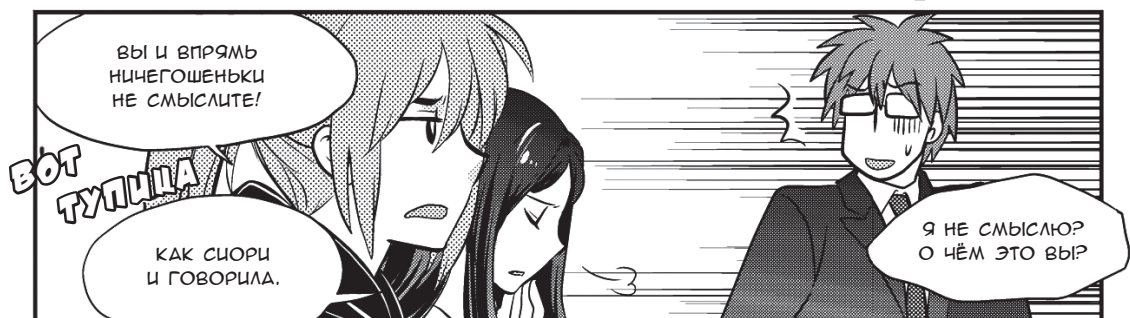
А РАЗВЕ Я НЕ ГОВОРИЛ ВАМ,
ЧТО СО СЛЕДУЮЩЕГО ГОДА
БУДУ АСПИРАНТОМ?



А Я ВОТ ТАК И ПЛАНИРОВАЛ,
ЧТО ПОСЛЕ ВЫПУСКА ИЗ УНИВЕРСИТЕТА
СУНАХАРА-САН БУДЕТ ГЛАВОЙ ГРУППЫ,
А Я СТАНУ ВАШИМ КОНСУЛЬТАНТОМ,
И ВМЕСТЕ МЫ ПРОВЕДЕМ ЕЩЁ МНОГО
ИНТЕРЕСНЫХ ИСПЫТАНИЙ!



ТАК ЧТО ТЫ ХОТЕЛА
МНЕ СКАЗАТЬ?



Книги издательства «ДМК ПРЕСС» можно купить оптом и в розницу в книготорговой компании «Галактика» (представляет интересы издательств «ДМК ПРЕСС», «СОЛОН ПРЕСС», «КТК Галактика»).

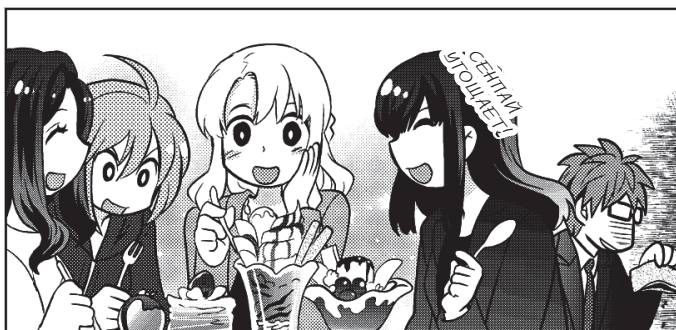
Адрес: г. Москва, пр. Андропова, 38;

тел.: **(499) 782-38-89**, электронная почта: **books@aliens-kniga.ru**.

При оформлении заказа следует указать адрес (полностью), по которому должны быть высланы книги; фамилию, имя и отчество получателя.

Желательно также указать свой телефон и электронный адрес.

Эти книги вы можете заказать и в интернет-магазине: **www.a-planet.ru**.



Каноу Ёсукэ (автор), Курохати (художник)

Занимательное строительство. Грунты

Манга

Главный редактор *Д. А. Мовчан*

Зам. главного редактора *Е. А. Сенченкова*

dmkpress@gmail.com

Переводчик *С. Л. Плеханова*

Корректор *Г. И. Синяева*

Верстальщик *А. А. Чаннова*

Гарнитура Anime Ace. Печать цифровая.

Усл. п. л. 21,06. Тираж 500 экз.

Веб-сайт издательства www.dmkpress.com