ОДМ 218.3.120–2020

ОТРАСЛЕВОЙ ДОРОЖНЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ДОКУМЕНТ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО

РОСАВТОДОР

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ НАСЫПЕЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА СЛАБЫХ ГРУНТАХ ОСНОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО

(РОСАВТОДОР)

МОСКВА 2020

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН: Обществом с ограниченной ответственностью «Мегатех Инжиниринг» совместно с Обществом с ограниченной ответственностью «Инновационный технический центр» в соответствии с государственным контрактом от10.12.2018 № ФДА 47/140

Коллектив авторов (Исполнители): канд. геол.-мин. наук Федоренко Е.В., канд. техн. наук Баранов А.Ю., инж. Белов А.В., инж. Девятилов Д.А.

2 ВНЕСЕН: Управлением научно-технических исследований и информационного обеспечения Федерального дорожного агентства

3 ИЗДАН: распоряжением Федерального дорожного агентства

от «11» сентября 2020 г. № 2848-р

4 ИМЕЕТ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Содержание:

1 Область применения ... 4
2 Нормативные ссылки ... 6
3 Термины и определения ... 7
5 Общие положения ... 12
6 Типизация дисперсных грунтов ... 14
7 Назначение поведения по условиям дренирования ... 15
8 Получение исходных данных для расчета ... 17
9 Полевые испытания ... 18
10 Лабораторные испытания ... 19
11 Оценка качества образцов ... 24
12 Основные параметры комплексных геомеханических моделей грунта ... 25
13 Характеристики природного напряженного состояния грунтового массива ... 28
14 Показатели сжимаемости грунтов ... 33
15 Параметры прочности грунтов ... 37
16 Валидация моделей ... 42
17 Процедура валидации расчетной схемы ... 43
18 Общие положения моделирования ... 44
19 Типы поведения моделей по условиям дренирования ... 48
20 Расчёт начального напряженного состояния. ... 50
21 Расчёт напряженно-деформированного состояния ... 52
22 Расчёт консолидации ... 57
23 Расчет устойчивости ... 65
24 Учет армирующих геосинтетических прослоек ... 69
25 Рекомендуемая последовательность выполнения расчетов ... 76
26 Общие рекомендации по учету ленточных геодрен ... 78
Приложение А (справочное) Таблица полевых методов ... 81
Приложение Б (справочное) Комплексные геомеханические модели грунта ... 82
Приложение В (справочное) Параметры КГМ ... 83
Приложение Г (справочное) Пример определения природного напряженного состояния ... 85
Приложение Д (рекомендуемое) Выбор моделей и параметров расчета ... 87
Библиография ... 90

1 Область применения

1.1 Настоящий отраслевой дорожный методический документ (далее – Методический документ) является документом рекомендательного характера, разработанным в развитие действующих методик [3] аналитических расчетов и предназначен для численного моделирования методом конечных элементов.

1.2 Настоящий методический документ разработан в целях обеспечения нормативной базы рекомендациями по расчетам осадки, времени консолидации и устойчивости насыпей автомобильных дорог на слабых основаниях (критерии отнесения грунтов к слабым приведены в [3]), усиленных конструкциями с применением геосинтетических материалов в виде обойм и полуобойм. Вопросы сейсмического воздействия и их учет в ОДМ не рассматриваются.

1.3 В настоящем методическом документе представлены основные требования к исходным данным для выполнения расчетов, даны указания по анализу и интерпретации результатов испытаний грунтов и приведены рекомендации по выполнению численного моделирования: сочетания типов расчета и типов поведения моделей грунта по условиям дренирования, последовательность выполнения расчета, учет армирующих прослоек, контроль и анализ получаемых результатов.

Рекомендации по проведению лабораторных испытаний, приведенные в документе, носят информационный характер и предназначаются в первую очередь для инженера, выполняющего расчет с целью обеспечения понимания работы грунтовой лаборатории.

1.4 Методический документ содержит общие принципы численного моделирования насыпей на слабых основаниях в программах, работающих на основе метода конечных элементов (МКЭ). В качестве примеров используется программный геотехнический комплекс PLAXIS (хорошо зарекомендовавший себя в отечественной проектной практике в течение более 20 лет), однако все рекомендации могут быть применены и для любых других программ-аналогов (midas GTX NX, RS, ZSOIL, ГЕО5МКЭ и др.). Приведенные в Методическом

документе модели грунтов не являются частью только одной программы, а представляют собой программный код, который используется в разных программных комплексах.

1.5. Методический документ разработан для применения в области проектирования и геотехнических расчетов насыпей (только в статической постановке) преимущественно на обводненных глинистых грунтах, а также при наличии других грунтов, классифицированных как слабые основания при новом строительстве и реконструкции автомобильных дорог. Результатом использования рекомендаций, изложенных в настоящем Методическом документе, является получение: требуемых параметров геосинтетических материалов, сопутствующих элементов конструкций усиления; результатов, определяющих объемы строительных материалов; параметров технологического процесса сооружения земляного полотна и критериев для выполнения геотехнического мониторинга конструкций.

2 Нормативные ссылки

В настоящем методическом документе использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.

ГОСТ 19912-2012 Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием.

ГОСТ 20276-2012 Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости.

ГОСТ 23278-2014 Грунты. Методы полевых испытаний проницаемости.

ГОСТ 25584-2016 Межгосударственный стандарт. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации

ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.

ГОСТ 30416-2012 Межгосударственный стандарт. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения

ГОСТ 30672-2012 Грунты. Полевые испытания. Общие положения.

ГОСТ 32836-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Изыскания автомобильных дорог. Общие требования.

ГОСТ 32868-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Требования к проведению инженерно-геологических изысканий.

ГОСТ 32960-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения.

ГОСТ 33149-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Правила проектирования автомобильных дорог в сложных условиях.

ГОСТ Р 54476-2011 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик сопротивляемости сдвигу грунтов в дорожном строительстве.

ГОСТ Р 54477-2011 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик деформируемости грунтов в дорожном строительстве.

ГОСТ Р 55028-2012 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Классификация, термины и определения.

ГОСТ Р 58270-2018 Грунты. Метод испытаний расклинивающим дилатометром.

ГОСТ Р 58326-2018 Грунты. Метод лабораторного определения параметров переуплотнения.

ОДМ 218.2.046-2014 Отраслевой дорожный методический документ. Рекомендации по выбору и контролю качества геосинтетических материалов, применяемых в дорожном строительстве.

ОДМ 218.5.003-2010 Рекомендации по применению геосинтетических материалов при строительстве и ремонте автомобильных дорог.

ПНСТ 318-2018 «Материалы геосинтетические. Методы испытания на долговечность».

СП 23.13330.2018 Основания гидротехнических сооружений. (актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85*).

СП 34.13330.2012 Свод правил. Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85*.

СП 47.13330.2016 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96.

3 Термины и определения

В настоящем методическом документе применены следующие термины с соответствующими определениями:

Стабилизированное состояние грунта: состояние грунта, характеризуемое окончанием деформаций уплотнения под определенной нагрузкой и отсутствием избыточного давления в поровой воде.

Нестабилизированное состояние грунта: состояние грунта, характеризуемое незавершенностью деформаций уплотнения под определенной нагрузкой и наличием избыточного давления в поровой воде.

Недренированная прочность: недренированное сопротивление сдвигу, обозначаемое Cu и использующееся для оценки прочности нестабилизированных оснований.

Эффективные параметры прочности: удельное сцепление c' и угол внутреннего трения φ' получаемые по результатам консолидированно-дренированных (КД) или консолидированно-недренированных (КН) трехосных испытаний. В терминологии [3] называются условными.

Полные напряжения (σ): напряжения в грунтовом массиве, соответствуют сумме напряжений в скелете (эффективные) и порового давления.

Эффективные напряжения (σ'): напряжения в скелете грунта, определяемые разностью полных напряжений и порового давления.

Поровое давление (U): давление в поровой воде (жидкости) грунта, при отсутствии внешних воздействий является гидростатическим (P_{steady}), в случае нагружения грунта является избыточным (P_{excess}).

Индекс компрессии (Cc): тангенс угла наклона части компрессионной кривой в осях «коэффициент пористости-десятичный логарифм давления», определяемый за пределами давления предуплотнения по ветви первичного нагружения.

Индекс рекомпрессии Cs (Cr): тангенс угла наклона части компрессионной кривой в осях «коэффициент пористости-десятичный логарифм давления», определяемый по ветви разгрузки.

Модифицированный коэффициент компрессии (λ*): тангенс угла наклона части компрессионной кривой в осях «относительная деформация-натуральный логарифм давления», определяемый за пределами давления предуплотнения по ветви первичного нагружения.

Модифицированный коэффициент рекомпрессии (к*): тангенс угла наклона части компрессионной кривой в осях «относительная деформация-натуральный логарифм давления», определяемый по ветви разгрузки.

Историческое давление (напряжение): максимальное вертикальное (историческое) напряжение за весь период существования массива грунта, как правило, отсутствующее в настоящее время по причине таяния ледника, эрозионных и денудационных процессов или колебания грунтовых вод.

Давление предварительного уплотнения (предуплотнения): тоже, что и историческое давление.

Кластер: элемент расчетной схемы, объединяющий несколько конечных элементов с одинаковым набором параметров (одна модель поведения материала), который, как правило, определяет ИГЭ или часть насыпи.

Конечный элемент: элемент, содержащий точки (узлы), определяющие напряжения и перемещения в расчетной схеме программ, работающих на основе метода конечных элементов.

Точки напряжений (stress point): точки в которых определяются напряжения в грунте (полные, эффективные, главные), а также поровое давление воды (точки Гаусса).

Узловые точки (node point): точки (Лагранжа) в которых определяются перемещения (все компоненты), а также относительные деформации (в том числе объемные и сдвиговые).

Валидация: процесс определения степени соответствия данных, получаемых в процессе математического моделирования расчетной модели (модели грунта или геотехнической модели грунтового основания), реальному физическому поведению объекта (образца), для которого создана модель, в рамках области планируемого ее использования.

Модель грунта: математическое описание основных характерных типов поведения элементарного объема реального грунта, предназначена для создания в расчетной схеме инженерно-геологических элементов, характеризующихся

одинаковым поведением при механических, гидравлических и температурных воздействиях.

Геотехническая модель грунтового основания: совокупность моделей грунта с набором параметров, определяющих отклик на механические и гидравлические воздействия, геометрически описывающая инженерно-геологический разрез (двухмерная задача) или пространственный грунтовый массив (трехмерная задача) и предназначенная для выполнения моделирования инженерных задач.

Консервативная оценка: выполнение геотехнического расчета без учета упрочнения грунта в процессе его консолидации во время отсыпки насыпи, что приводит к заниженному значению коэффициента устойчивости или завышенной осадке. Выполняется для соответствия расчета действующим нормативным документам.

4 Обозначения и сокращения

В настоящем методическом документе применяются следующие обозначения и сокращения:

КН: консолидированно-недренированные трехосные испытания;

КД: консолидированно-дренированные трехосные испытания;

НН: неконсолидированно-недренированные трехосные испытания;

МКЭ: метод конечных элементов;

НУ: нормальноуплотненное состояние (NC - Normally Consolidated);

ПУ: переуплотненное состояние (ОС – OverConsolidated);

НДС: напряженно-деформированное состояние;

МПР: метод предельного равновесия;

МКЭ: метод конечных элементов;

КГМ: комплексные геомеханические модели;

SRM: метод снижения прочности (Strength Reduction Method);

OCR: коэффициент переуплотнения, показывающий во сколько раз историческое давление превышает бытовое (Overconsolidation Ratio);

POP: нагрузка, действовавшая в историческом прошлом (Pre-Overburden Pressure), создавшая напряжения, называемые давлением предварительного уплотнения (ледник или толща грунтов, подвергнутая денудационным и эрозионным процессам; эффективные напряжения в толще, увеличивающиеся при колебании уровня грунтовых вод).

Аббревиатуры моделей грунта приведены в приложении Б.

5 Общие положения

5.1 В процессе расчета насыпей на слабых основаниях с использованием геосинтетических материалов следует руководствоваться указаниями соответствующих разделов норм (ГОСТ 33149–2014), сводов правил, инструкций и иных действующих нормативных документов (см. раздел 2), а также требованиями настоящего методического документа.

5.2 Расчеты методом конечных элементов, с использованием комплексных геомеханических моделей грунта позволяют снизить затраты на мероприятия по усилению и стабилизации за счет более полной оценки процессов, происходящих при строительстве земляного полотна на слабых водонасыщенных глинистых грунтах.

5.3 Преимущество использования численного моделирования по сравнению с аналитическими подходами заключается в следующем:

- оценка прочности грунтов в зависимости от уровня действующих напряжений и степени консолидации во времени и пространстве (учет упрочнения в процессе консолидации);

- оценка устойчивости геотехнической системы «насыпь-основание» методом снижения прочности (SRM), являющимся альтернативным для методов предельного равновесия (МПР), которые не позволяют получить однозначную величину коэффициента устойчивости;

- при оценке стабильности основания (коэффициент стабильности) учитываются касательные силы от насыпи (влияние материала насыпи);

- учет при определении осадки насыпи не только составляющей от сжатия грунта, но и влияние бокового отжатия, наличия области пластических деформаций и реологических свойств (ползучесть);

- расчет консолидации производится с переменным значением деформационной характеристики грунта (в зависимости от уровня действующих напряжений в слое) и переменным значением коэффициента консолидации (фильтрации);

- учет осевой жесткости геосинтетических прослоек осуществляется совместно с параметрами их взаимодействия с грунтом и прочностью на разрыв;

- возможность оценить растягивающие усилия в армирующей прослойке и ее деформации;

- возможность учитывать нелинейное поведение (график усилие – деформация) разнообразных геосинтетических материалов, а также их ползучесть (деформации в процессе эксплуатации сооружения);

- определение коэффициента стабильности (безопасности) основания с учетом влияния геосинтетических армирующих прослоек.

5.4 При оценке устойчивости насыпей на слабых основаниях следует учитывать нестабилизированное и стабилизированное состояния грунтового основания. Оценка нестабилизированного состояния производится одним из двух приведенных ниже способов:

- Анализ в полных напряжениях – основан на использовании либо прочности грунта в виде недренированного сопротивления сдвигу Cu, либо прочностных характеристик c_w и φ_w, (по ГОСТ 12248-2010 или ГОСТ Р 54476-2011). Этот вид анализа предполагает переменные значения параметров прочности Cu или c_w и φ_w (в зависимости от изменения влажности w). Поровое давление в этом случае не учитывается.

- Анализ в эффективных напряжениях – основан на использовании эффективных параметров прочности c’ и φ’, получаемых из приборов трехосного сжатия испытанием по консолидированно-дренированной схеме (*ГОСТ 12248-2010*). Принцип расчета заключается в снижении сопротивления сдвигу при постоянных значениях параметров прочности c’ и φ’ за счет определения избыточного порового давления и его рассеивания в процессе консолидации.

Оценка стабилизированного состояния производится только в эффективных напряжениях.

5.5 Применение численных методов не означает отказа от действующих аналитических методик (ОДМ 218.003-2010) [3], сложность численного моделирования требует взаимной проверки численных и аналитических методов.

При этом результаты, получаемые в ходе моделирования, обеспечивают проектировщика полной картиной поведения сооружения при различных воздействиях, устройстве разнообразных мероприятий для усиления (стабилизации) или других планируемых инженерных действий.

6 Типизация дисперсных грунтов

6.1 Типизация грунтов производится для назначения основных видов лабораторных и полевых испытаний в зависимости от вида расчета и класса грунта (табл. 1). Поведение грунтов при нагружении условно разделено на две схемы в зависимости от протекания процесса фильтрационной консолидации:

- **дренированное** – скорость нагружения и фильтрационные свойства грунта обеспечивают рассеивание избыточного порового давления и дренированные условия.

- **недренированное** – скорость приложения нагрузки или низкие значения коэффициента фильтрации приводят к образованию избыточного порового давления, требуется особый подход к выполнению расчетов и оценке нестабилизированного состояния.

6.2 Отдельно выделена категория условно не консолидирующихся грунтов, поведение которых выходит за рамки теории фильтрационной консолидации и может быть оценено только с позиций неводонасыщенных грунтов. Для всех глинистых грунтов с показателем текучести менее 0,5 расчет фильтрационной консолидации не применяется.

Таблица 1 – Типизация грунтов

Класс, подкласс	Схема работы по дренированию	Критерий	Тип
Дисперсные несвязные (песчаные)	дренированная	$T > 2$	А
Дисперсные связные (глинистые, илы)	дренированная		Б1
	недренированная	$10^{-4} < T < 2$	Б2
	условно не консолидирующиеся	$I_L<0,5$ $Sr<0,8$	Б3

Примечание - T – фактор времени; I_L – показатель текучести.

7 Назначение поведения по условиям дренирования

7.1 Основными критериями для оценки результатов геотехнических расчетов являются:

- устойчивость сооружения: в строительный период без транспортной нагрузки и до начала фильтрационной консолидации (нестабилизированное состояние); в эксплуатационный период с транспортной нагрузкой и после завершения более 80% консолидации (стабилизированное состояние).

- время достижения допустимой интенсивности осадки грунтового основания.

7.2 Исходя из необходимости выполнения указанных видов оценки, исходные данные должны удовлетворять потребностям геотехнического расчета. Согласно [3] выделяют два типа поведения грунтов по условию дренирования (отжатия поровой воды), характеризующихся отличающимися параметрами прочности и требующих проверки устойчивости:

- **Недренированное поведение** - для условий быстрой отсыпки насыпи (обычный темп), при которой грунт основания не успевает консолидироваться и повысить свою природную прочность, поскольку отжатие поровой воды затруднено. В расчетах используют прочностные параметры грунта, полученные в приборе одноплоскостного среза по схеме быстрого сдвига при его природной влажности $\mathbf{C_{нач}}$, $\mathbf{\varphi_{нач}}$ или недренированное сопротивление сдвигу Cu по результатам трехосных неконсолидированно-недренированных (НН) или консолидированно-недренированных (КН) испытаний.

- **Дренированное поведение** - для условий медленной отсыпки насыпи (с выдержками), при которой передача нагрузки осуществляется по мере увеличения прочности грунта в результате его консолидации под предыдущей ступенью нагрузки с возможностью отжатия поровой воды. В расчетах используют эффективные сцепление и угол внутреннего трения $\mathbf{c'}$, $\mathbf{\varphi'}$, получаемые по консолидированно-дренированным (КД) или консолидированно-недренированным (КН) трехосным испытаниям.

7.3 Выбор типа поведения по условиям дренирования определяется следующими параметрами:

- скорость фильтрации воды в грунте, Кф;

- скорость возведения сооружения;

- граничные условия расчетной схемы и геометрические параметры сооружения.

Например, для супеси отсыпка насыпи за 3 дня может быть отнесена к недренированному поведению, а отсыпка в течение месяца к дренированному, хотя грунт один и тот же.

7.4 В качестве предварительного критерия для отнесения грунта к дренированному или недренированному типу поведения рекомендуется использовать фактор времени Т, определяемый по формуле:

$$T = \frac{C_v \cdot t}{H^2}, \quad (1)$$

где Cv – коэффициент консолидации;

t – расчетное время;

H – путь фильтрации.

В зависимости от результата расчета по формуле 1 предварительно назначается поведение грунтов:

- Дренированное поведение:

$\mathbf{T} > 2$ (степень консолидации больше 90%)

- Недренированное поведение:

$\mathbf{T} < 10^{-4}$ (степень консолидации меньше 1%);

Для случая $10^{-4} < \mathbf{T} < 2$ необходимо выполнить расчет консолидации и дополнительной проверки по критерию прочности.

7.5 Дисперсные связные грунты могут быть разделены на три типа: Б1 и Б2 в зависимости от условий дренирования и тип Б3, который предполагает условное завершение консолидации (от собственного веса) и не требует выполнения расчетов консолидации этих грунтов. Условность данного требования связана с теорией фильтрационной консолидации, которая применима только к полностью

водонасыщенным грунтам, а в глинистых грунтах твердой и полутвердой консистенции в силу особых свойств связной воды и повышенной вязкости поровой воды фильтрационный режим не следует закону Дарси, который лежит в основе фильтрационной теории. Кроме того, требование к выполнению расчетов консолидации согласно [3] применяется к слабым грунтам, к которым отнесены глинистые грунты с показателем текучести I_L>0,5.

8 Получение исходных данных для расчета

8.1 Основной акцент в этом разделе делается на механических характеристиках грунта, представляющих собой основу для геотехнического расчета. Результаты испытаний должны обеспечить получение следующих свойств грунтов:

- деформационных;
- прочностных;
- фильтрационных;
- реологических (ползучесть).

Инженерные изыскания следует производить в соответствии с требованиями СП 47.13330.2016, ГОСТ 32836-2014, ГОСТ 32868-2014.

8.2 Необходимо провести полевые и лабораторные испытания для взаимного контроля: полевые позволяют оценить состояние грунта в массиве, а лабораторные сделать прогноз изменения при воздействии сооружения. Использование современных видов полевых испытаний в сочетании с лабораторными позволяют обеспечить наилучшее качество исходных данных, от которых зависит не только стоимость затрат на строительство, но и надежность и бесперебойность эксплуатационной работы сооружения. Рекомендуются к использованию такие методы полевых испытаний как: CPTu (пьезостатическое зондирование с измерением порового давления) и дилатометр, позволяющие при наличии региональных корреляционных зависимостей получать не только границы между слоями и боковое давление грунта, но и целый ряд других важных геотехнических параметров. Особенности выполнения испытаний грунтов требуют использования

3-4 способов испытаний грунтов, например, 2 полевых, 2 лабораторных. Полевые испытания позволяют получать информацию в массиве грунта, однако выдаваемая приборами зондирования информация требует корреляции с лабораторными методами, которые, в свою очередь являются основными поставщиками исходных данных в геотехнические методы расчетов. Кроме того, лабораторные методы, в отличие от полевых, позволяют сделать прогноз изменения свойств при различных воздействиях (траектории нагружения, замачивание и пр.), однако процесс извлечения образцов вносит существенные погрешности в качество результатов.

Лабораторные испытания проводятся с учетом не только общепринятого ГОСТ 12248-2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости», но и отраслевых документов: ГОСТ Р 54477-2011 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик деформируемости грунтов в дорожном строительстве» и ГОСТ Р 54476-2011 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик сопротивляемости сдвигу грунтов в дорожном строительстве», учитывающих специфику линейных транспортных сооружений.

8.3 Общие рекомендации к составу и результатам полевых испытаний приведены в разделе 8; к лабораторным испытаниям в разделе 9.

9 Полевые испытания

9.1 Рекомендуется проведение комплекса работ, включающих: геофизические методы (георадар, малоглубинная сейсморазведка методами преломленных и отраженных волн, а также сейсмотомография), статическое зондирование аналог CPTu (с измерением порового давления), дилатометрические испытания и испытания методом вращательного среза прибором лопастного типа (крыльчатка) в соответствии с положениями ГОСТ 30672-2012.

9.1.1 Испытания вращательным срезом производятся с определением прочности грунта по глубине (построение профиля недренированной прочности). Дополнительно определяется чувствительность грунтов St (отношение пиковой и остаточной прочности) по ГОСТ 20276-2012.

9.1.2 Статическое зондирование (ГОСТ 19912-2012) рекомендуется производить с измерением порового давления (.

9.1.3 Измерение бокового давления в состоянии покоя с использованием дилатометров и прессиометров (ГОСТ 20276-2012, ГОСТ 58270-2018).

9.1.4 Фильтрационные испытания (опытная откачка, опытный налив) по ГОСТ 23278-2014 для определения коэффициента фильтрации в природном состоянии.

9.2 Основными показателями, для получения которых необходимы полевые данные являются параметры моделей грунтов, характеризующие природное напряженное состояние грунтового массива (начальное состояние): К0 – коэффициент бокового давления; OCR – коэффициент переуплотнения или давление предварительного уплотнения σр (историческое давление).

9.3 Пьезостатическое зондирование обеспечивает получение параметров комплексных геомеханических моделей для несвязных грунтов (песчаные), отбор которых без нарушения состояния, установление структурной прочности и естественной плотности затруднено. При наличии региональных корреляционных зависимостей с лабораторными испытаниями пьезометрическое зондирование является поставщиком большинства параметров моделей грунта при проведении испытаний и интерпретации результатов.

10 Лабораторные испытания

10.1 Компрессионные испытания выполняются с максимальным давлением 0,8-3,2 МПа для грунтов типа А, Б1, Б2 и до 5-10 МПа для грунтов типа Б3 (стремясь приблизится к $0{,}42e_0$ [2]). Испытания обязательно производятся с разгрузкой для получения данных по второй ветви. Рекомендуется выдерживать каждую ступень 24 часа для соблюдения условий дренирования, либо контролировать поровое давление. Допускается использовать прибор с кинематическим нагружением и релаксацией напряжений (ГОСТ Р 58326-2018).

10.2 Определение давления предварительного уплотнения σр производится в соответствии с ГОСТ Р 58326-2018. После получения давления предуплотнения необходимо установить степень переуплотнения (OCR≤1 – для нормально уплотненных грунтов и OCR>1 для переуплотненных).

10.3 Консолидационные испытания грунта производятся под расчетной нагрузкой после первой ступени при бытовом давлении. Испытания проводятся отдельно от компрессионных испытаний по определению модуля деформации. Коэффициент консолидации определяется для вертикально- и горизонтально-ориентированного положения образца. Допускается определение коэффициента консолидации Cv методом трехосного сжатия по консолидированно-недренированной (КН) схеме.

По результатам проведения испытаний на консолидационной кривой в осях «коэффициент пористости (или относительная деформация) - логарифм (десятичный) времени» (рисунок 1) выделяют участок вторичной консолидации с определением коэффициента ползучести Cα (по ГОСТ 12248-2010, Приложение К). Используемый в некоторых моделях модифицированный коэффициент ползучести μ* определяется по формуле:

$$\mu^* = \frac{C_\alpha}{2{,}3} \quad , \tag{2}$$

где Cα – коэффициент ползучести (вторичная консолидация);

2,3 – основание натурального логарифма.

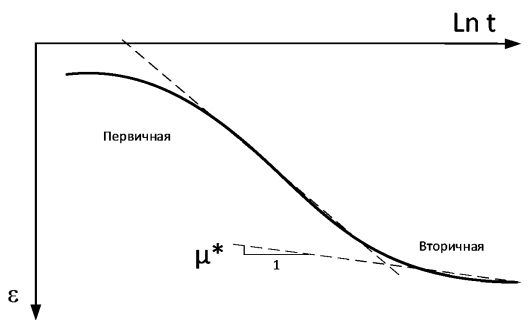

Рисунок 1 – Консолидационная кривая для определения приведенного коэффициента ползучести μ*

10.4 Компрессионно-фильтрационные испытания производятся для двух состояний образца: при бытовом давлении и при давлении от расчетной нагрузки (ГОСТ 25584-2016). При отсутствии данных о расчетной нагрузке или при переменном ее значении производятся испытания для нескольких вариантов нагрузки. Допускается определение коэффициента фильтрации в трехосных приборах (особенно для слабоводопроницаемых грунтов).

Учитывая нелинейность зависимости модуля деформации от напряжений, коэффициента фильтрации от изменения пористости грунта рекомендуется выполнять расчет консолидации на основе коэффициента фильтрации, как входного параметра модели. Непостоянство модуля деформации учитывается в моделях грунта при использовании логарифмических показателей сжимаемости (индекс компрессии Cc или модифицированный коэффициент компрессии λ* и степенного показателя m), снижение проницаемости в процессе сжатия учитывается за счет коэффициента Ck.

Изменение коэффициента фильтрации в процессе уплотнения определяется по формуле (графическое представление показано на рисунке 2):

$$k_{\text{ф}} = k_{\text{ф},0} \cdot exp\left(\frac{e-e_0}{C_k}\right), \quad (3)$$

где $k_{\text{ф},0}$ – опорный коэффициент фильтрации в природном состоянии с коэффициентом пористости e_0;

Ck – коэффициент, учитывающий изменение фильтрационных свойств грунта в процессе сжатия;

e – коэффициент пористости, соответствующий нагрузке от сооружения.

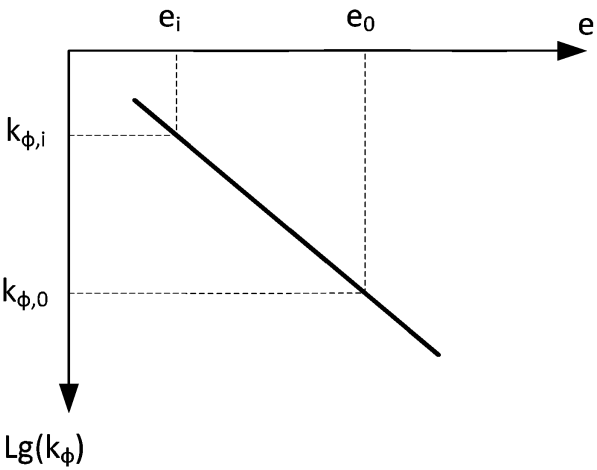

Рисунок 2 – Зависимость между коэффициентом фильтрации и коэффициентом пористости в полулогарифмических координатах

10.5 Трехосные испытания по консолидированно-недренированной схеме (КН) могут быть выполнены в двух исполнениях:

- С приложением нагрузки обжатия, соответствующей бытовым напряжениям, и последующим девиаторным разрушением q для определения недренированного сопротивления сдвигу Cu=q/2.

- Стандартным образом по ГОСТ 12248-2010. Давления в камере прибора рекомендуется задавать после определения коэффициента переуплотнения OCR таким образом, чтобы превышалось давление предварительного уплотнения σ_p. В этом случае эффективные параметры прочности будут соответствовать нормальноуплотненному поведению грунта.

Неконсолидированно-недренированные трехосные испытания (НН) выполняются с целью построения профиля недренированного сопротивления сдвигу Cu по глубине. На профиль также наносятся данные результатов КН и полевых (крыльчатка) испытаний.

Консолидированно-дренированные испытания (КД) выполняются при обязательном соблюдении скоростного режима во избежание возникновения порового давления в образце.

Испытания в стабилометре типа Б производятся для определения коэффициента бокового давления K_0 [4].

10.6 Испытания в приборе одноплоскостного среза производятся в соответствии с ГОСТ 12248-2010 с учетом специфики линейных сооружений, изложенной в ГОСТ Р 54476-2011 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик сопротивляемости сдвигу грунтов в дорожном строительстве» по схеме быстрого сдвига. Полученные значения прочностных характеристик c_w и φ_w могут быть использованы только для оценки нестабилизированного состояния путем анализа в полных напряжениях. Данные испытаний по схеме медленного сдвига в виде условных параметров прочности c' и φ' в численном моделировании слабых грунтов, как правило, не применяются.

10.7 Грунты, используемые в теле земляного полотна должны быть испытаны по следующей схеме (ГОСТ 30416-2012; ГОСТ Р 54477-2011):

1. получение образцов нарушенного сложения;

2. определение максимальной плотности и оптимальной влажности в приборе стандартного уплотнения ПСУ;

3. задание в приборе состояния плотности-влажности, соответствующей требуемому коэффициенту уплотнения $K_{упл}$;

4. определение прочности грунта при заданном состоянии плотности-влажности. Для пойменных насыпей у подтопляемых территорий испытания производятся под водой.

Предпочтительно использование трехосных приборов, позволяющих создавать напряженное состояние, более приближенное к реальному по сравнению с одноплоскостным срезом.

10.8 Рекомендуемые параметры и методы их получения приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Рекомендуемые параметры и методы их определения

Раздел	Вид испытания	Результат	Тип
8.1.1	Крыльчатка	Недренированная прочность Cu	Б2
8.1.2	Пьезостатическое зонидрование (CPTu)	Недренированная прочность Cu,	Б2
		Эффективная прочность φ', c',	А, Б
		Коэффициент консолидации Cv,	Б2
		Коэффициент бокового давления K_0 Коэффициент переуплотнения OCR Давление предварительного уплотнения σ_p	А, Б
9.1	Компрессионные	Одометрический модуль деформации E_{oed}^{ref},	Б
		Индекс (коэффициент) компрессии Cc (λ*),	Б
		Индекс (коэффициент) рекомпрессии Cs (Cr или κ*)	Б
		Модуль упругости E_{ur}^{ref}	А, Б
		Показатель степени m	Б
9.2	Компрессионные	Коэффициент переуплотнения OCR Давление предварительного уплотнения σ_p Структурная прочность $P_{стр}$	Б
9.3	Консолидационные	Коэффициент консолидации C_v,	Б2
		Коэффициент ползучести C_α (μ*)	Б2
9.4	Фильтрационные	Коэффициент фильтрации $k_ф$ для разных обжимающих давлений	А, Б2
9.5	КН испытания	Недренированная прочность Cu,	Б2
		Эффективная прочность φ', c'	А, Б
9.5	НН испытания	Недренированная прочность Cu	Б2
9.5	КД испытания	Модуль деформации E_{50}^{ref} Модуль упругости E_{ur}^{ref} Эффективная прочность φ', c' Показатель степени m Коэффициент бокового давления K_0	А, Б
9.6	Одноплоскостной срез	Прочность до консолидации $C_{нач}$, $\varphi_{нач}$,	Б2

11 Оценка качества образцов

11.1 Ввиду существенных проблем, связанных с отбором качественных образцов ненарушенного сложения в водонасыщенных грунтах, для повышения достоверности результатов лабораторного определения прочностных и

деформационных характеристик рекомендуется выполнять оценку качества образцов, предназначенных для испытаний (методика СП 23.13330.2018).

11.2 Количественную оценку качества образцов следует выполнять посредством измерения объемной деформации грунта в результате приложения эффективных бытовых давлений, соответствующих глубине отбора образца по таблице 3. Для этого на стадии консолидации образца определяют параметр **к**:

$$\mathbf{к} = \frac{\varepsilon_{быт}(1+e_0)}{e_0}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{быт}$ – относительная (объемная) деформации под действием приложенных давлений;

e_0- начальный коэффициент пористости образца.

Таблица 3 – Критерии оценки качества образцов

Качество образца	Коэффициент качества **к**		
	нормальноуплотненный OCR = 1÷2	переуплотненный	
		OCR = 2÷4	OCR = 4÷6
отличное	до 0,04	до 0,03	до 0,02
хорошее	0,04-00,7	0,03-0,05	0,02-0,035
плохое	0,07-0,14	0,05-0,1	0,035-0,07
очень плохое	свыше 0,14	свыше 0,1	свыше 0,07

Примечание: при выдерживании ступени более 3 часов для определения коэффициента качества образцов к необходимо определить момент завершения первичной консолидации.

Показатель OCR определяется в соответствии с разделом 13. Параметры природного напряженного состояния грунтового массива

Образцы, получившие оценку качества «плохое» или «очень плохое» для дальнейшей обработки и анализа, не допускаются.

12 Основные параметры комплексных геомеханических моделей грунта

12.1 Для выполнения расчетов рекомендуется использование **комплексных геомеханических моделей грунта** (КГМ), которые представляют собой совокупность различных самостоятельных теорий поведения грунтов, объединенных в единой системе уравнений и обеспечивающей взаимную связь

между двумя основными видами механического поведения грунта при внешнем воздействии: объемное сжатие и девиаторное нагружение в виде траекторий напряжений [5]. Модели грунта представляют собой набор математических зависимостей, которые добавляются в программные комплексы как дополнительные DLL библиотеки с программным кодом, поэтому производители программ могут по своему усмотрению добавлять или не добавлять в свои программы те или иные модели. Наиболее удачные модели применяются в разных программах и не имеют отношения к конкретному программного продукту, при этом могут быть слегка видоизменены каждым разработчиком под возможности программы.

12.2 Классификация геомеханических моделей грунта, используемых в геотехнических программных комплексах:

1) простые

1.1) упругая или линейно-деформируемая (Linear Elastic);

1.2) упругая (линейно-деформируемая) идеальнопластическая (Mohr-Coulomb);

2) комплексные

2.1) учитывающие объемное упрочнение (CamClay, модифицированная CamClay; SoftSoil);

2.2) учитывающие объемное и сдвиговое упрочнение (HardeningSoil, Hardening Mohr-Coulomb; HardeningSoilSmall, General HardeningSoil);

2.3) учитывающие анизотропность (Sekiguchi-Ohta, S1Clay, NGI ADP);

2.4) учитывающие реологические свойства, т.е. деформации во времени (SoftSoilCreep, Sekiguchi-Ohta).

Модели SoftSoil и SoftSoilCreep являются наиболее оптимальными для моделирования слабых грунтов, что связано с достаточно сложным механизмом их работы и доступными исходными данными. Модель Норвежского геотехнического института NGI ADP описывает более сложное напряженное состояние в основании насыпей на слабых грунтах, но требует специальных (дополнительных) лабораторных испытаний.

Основные преимущества использования КГМ грунта:

- учет нелинейности между напряжениями и деформацией (по логарифмической зависимости);

- разница в осадке между первичным и повторным нагружением (учет модуля упругости и модуля деформации);

- использование критерия прочности Кулона-Мора (стандартные результаты инженерных изысканий);

- учет вторичной консолидации (ползучесть во времени);

- возможность формировать начальное напряженное состояние в процессе расчета исторического уплотнения и учитывать его влияние на прочность и деформируемость грунтов в расчетах устойчивости и осадки, соответственно;

- учет пластических деформаций при первичном девиаторном нагружении (сдвиговые деформации основаны на лабораторных трехосных испытаниях);

- упругое поведение (расчет осадки по модулю упругости при экскавации грунта);

- учет увеличения прочности с глубиной.

Основные параметры моделей и способы их определения приведены в приложении В.

12.3 Для моделей, учитывающих объемное и сдвиговое упрочнение, входные показатели жесткости относятся к определенному опорному (референтному) давлению p_{ref}, заданному техническим заданием (по умолчанию референтное давление принимается равным 100 кПа). В том случае, если в распоряжении испытательной лаборатории имеются данные о величине геостатического (бытового) давления в точке отбора образца, последнее может быть принято в качестве опорного. Опорное давление должно превышать давление предварительного уплотнения $p_{ref}>\sigma_p$. Давление предварительного уплотнения и коэффициент переуплотнения OCR для предварительных расчетов может быть определен по методике ВНИИГ им. Веденеева (патент RU 2405083).

12.4 Для моделирования слабых грунтов рекомендуется использование моделей, учитывающих: 1) нелинейную зависимость между напряжениями и деформацией, объемное упрочнение (наиболее подходящей является модель SS;

использование модели HS ограничено условием $E_{oed}^{ref}/E_{50}^{ref} < 0.5$); 2) реологические свойства грунтов (модели с учетом ползучести, например, SSC). Применение моделей, учитывающих объемное и сдвиговое упрочнение (HS, HSS, MCC) рекомендуется в тех случаях, когда преобладают сдвиговые деформации, например, устройство котлована при замене грунта или для моделирования песчаных грунтов, в том числе грунтов насыпи. Простая модель (упругая или линейно-деформируемая идеально пластическая Mohr-Coulomb) может быть использована для предварительной проверки расчетной схемы, назначении этапов расчета и оценки устойчивости. Допускается применение этой модели для грунтов с показателем текучести I_L<0,5 и несвязных грунтов. Возможность использования модели для этих случаев определяется на основе сопоставления напряжений и деформаций по критерию 10% [3] согласно пункту 13.6.

В приложении Д приведена таблица сочетания основных типов поведения, моделей и результатов расчёта.

12.5 Распределение параметров для основных рекомендуемых моделей грунта приведено в приложении В. Получение параметров КГМ грунта на основе анализа и интерпретации полевых и лабораторных данных кратко приводится в разделах 2-14.

13 Характеристики природного напряженного состояния грунтового массива

13.1 В ходе исторических процессов формирования отложений горных пород, происходил процесс диагенеза и последующего длительного естественного уплотнения за счет отжатия свободной воды (фильтрационная консолидация). Грунты, задействованные в этом процессе, для которых существующее эффективное давление от вышележащих пластов представляет собой максимальное давление, под которым происходила консолидация за всю историю, называются нормальноуплотненными (НУ).

13.2 В отдельных регионах в ходе геологической истории происходили события, изменившие процесс нормального уплотнения: давление от ледников;

эрозионные и денудационные (плоскостной смыв) процессы, способствующие размыву (снижению высоты) и уменьшению давления; колебания грунтовых вод и прочие, что привело к переуплотнению грунтов. Грунты, которые были полностью консолидированы давлением большим, чем существующее бытовое давление называются переуплотненными или предварительно уплотненными (ПУ).

13.3 Другим вариантом нарушения процесса нормального уплотнения является химическая цементация частиц на любой стадии формирования отложений, приводящая к приостановке консолидации под собственным весом. Грунты, в которых процесс консолидации от собственного веса не завершён, а давление, при котором происходит разрушение цементационных связей (называемое структурной прочностью) превышает эффективное бытовое давление, называются недоуплотненными [2].

13.4 Для наиболее часто встречающихся видов грунтов, как оснований для транспортных сооружений, можно привести следующую упрощенную схему стадий их формирования:

1) Илы – неуплотнённые грунты (молодой осадок) имеют малую плотность и хлопьевидную структуру, благодаря которой могут выдерживать нагрузки без деформаций скелета (структурная прочность $P_{стр}$), имеют влажность, превышающую влажность на границе текучести WL и показатель текучести $I_L>1$ (к этой группе относятся глинистые грунты скрытотекучей консистенции и иольдиевые глины).

2) Нормальноуплотненные глинистые грунты – образуются из илов в ходе процесса диагенеза сначала в текучей консистенции и влажности близкой к границе текучести ($IL\leq1$), а затем в течение длительного времени подвергаются уплотняющему воздействию от собственного веса и в ходе фильтрационной консолидации переходят в пластичное, а затем и в твердое состояние ($I_L\rightarrow0$). Под влиянием факторов, описанных в п. 13.2 могут иметь различную степень переуплотнения.

13.5 Показателем, на основе которого осуществляется отнесение грунта к одной из трех разновидностей, является коэффициент переуплотнения OCR (over consolidation ratio):

$$OCR = \frac{\sigma_p}{\sigma'_v}, \quad (5)$$

где σ'_v - бытовые эффективные напряжения, кПа;

σ_p - давление предуплотнения (предшествующее давление).

13.6 В зависимости от величины коэффициента переуплотнения OCR грунты условно делятся на [1]:

- недоуплотненные (OCR<1);
- нормальноуплотненные (OCR= 1);
- переуплотненные (OCR>1).

Выбор типа грунта по степени переуплотнения определяет дальнейшее его поведение при нагрузке от транспортного сооружения.

13.7 Комплексные геомеханические модели предполагают обязательное использование в качестве исходных данных один из параметров начального состояния грунтового массива:

- коэффициент переуплотнения **OCR**;
- величину исторической нагрузки **POP** (preoverburden pressure) - приращение давления от бытового σ'_v до максимального, действующего ранее $\sigma_{v,\max} = \sigma_p$:

$$\text{POP} = \sigma_p - \sigma'_v, \quad (6)$$

где σ_p - давление предуплотнения, кПа;

σ'_v - эффективное бытовое напряжение (от собственного веса), кПа.

13.8 В зависимости от состояния переуплотнения в модели грунта учитывается коэффициент бокового давления для разных состояний (нормальноуплотненное - $K_0^{НУ}$ и переуплотненное $K_0^{ПУ}$). В простых моделях, например, Mohr-Coulomb параметров OCR и POP нет. Параметры начального природного состояния играют важную роль в поведении выбранной модели грунта

и влияют как на результаты расчетов осадки (консолидации), так и на результаты расчетов устойчивости.

13.9 Давление переуплотнения определяется из компрессионных испытаний образцов грунта ненарушенной структуры **только для образцов**, имеющих качество «хороший» и «отличный» (раздел 10) по ГОСТ Р 54477-2011 (приложение Г) или по ГОСТ Р 58326-2018. Предпочтительно определение давления предуплотнения полевыми методами в грунтовом массиве.

13.10 В расчетной схеме параметры начального состояния задаются коэффициентом переуплотнения OCR или величиной исторического давления POP в зависимости от характера распределения переуплотнения по глубине. В первом случае при постоянном значении OCR давление предуплотнения увеличивается с глубиной по закону (рисунок 3):

$$\sigma_p = OCR \cdot \sigma'_v \quad (7)$$

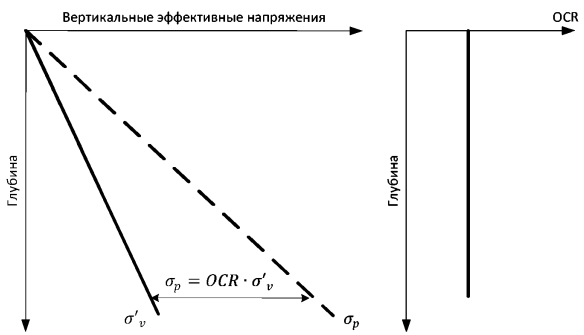

Рисунок 3 – Профиль исторического давления или давления предуплотенния (слева) и профиль коэффициента переуплотнения (справа) по глубине при использовании OCR

Во втором случае заданная постоянная величина давления POP приводит к переменному значению коэффициента OCR (рисунок 4):

$$OCR = \frac{POP}{\sigma'_v} + 1 \quad (8)$$

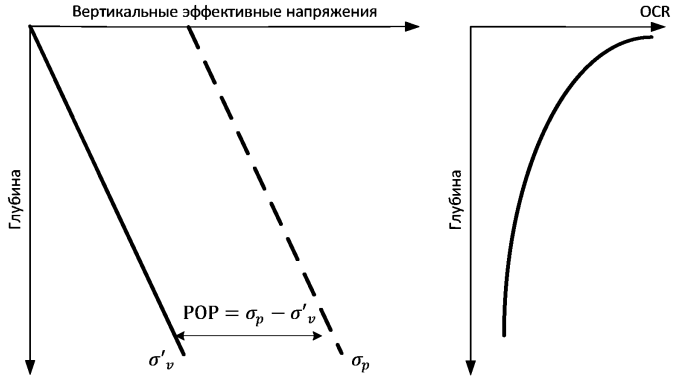

Рисунок 4 – Профиль давления предуплотнения (слева) и профиль коэффициента переуплотнения OCR (справа) по глубине при использовании величины исторической нагрузки POP

13.11 При невозможности провести полевые исследования и при отсутствии в лаборатории стабилометров с камерой типа Б приближенно коэффициент бокового давления в состоянии покоя можно определить по эмпирическим зависимостям, например, по формуле Jaky:

$$K_0^{НУ} = (1 - sin\varphi') \quad (9)$$

где φ' – эффективный угол внутреннего трения, определяемый по трехосным испытаниям по схеме консолидированно-дренированного или консолидированно-недренированного сжатия по точке, соответствующей моменту разрушения или достижения 15% деформаций (для слабых грунтов рекомендуется принимать как остаточную прочность).

13.12 Зависимость (9) не учитывает историю нагружения грунта в природных условиях, а пригодна лишь для грунтов в области нормального уплотнения (НУ) и основана только на структурных особенностях. Для учета влияния на коэффициент бокового давления исторических природных процессов рекомендуется использование эмпирических зависимостей:

$$K_0^{ПУ} = K_0^{НУ}\sqrt{OCR} = (1 - sin\varphi')\sqrt{OCR} \quad (10)$$

$$K_0^{ПУ} = (1 - sin\varphi')OCR^{sin\varphi'} \quad (11)$$

Пример выбора параметров природного напряженного состояния приведен в приложении Г.

14 Показатели сжимаемости грунтов

14.1 Определение показателей сжимаемости грунтов производится в двух вариантах:

1. в виде одометрического модуля деформации E_{oed} (опорного для модели HS или соответствующего средним напряжениям в слое для модели MC);

2. в виде индекса компрессии Cc или модифицированного коэффициента компрессии λ^*.

14.2 Слабые грунты, как правило, относятся к сильносжимаемым и деформационные свойства рекомендуется задавать логарифмическими показателями сжимаемости Cc или λ^* (для КГМ учитывающих объемное упрочнение, например, SS, SSC) либо опорным модулем деформации E_{oed}^{ref} и показателем степени m (для КГМ учитывающих объемное и сдвиговое упрочнение, например, MMC, HS). Для простых моделей, использующих только одно значение модуля деформации, необходимо разделение слоя на несколько частей в зависимости от действующих напряжений, что более трудоемко и часто нецелесообразно.

14.3 Анализ результатов компрессионных испытаний производится в полулогарифмической системе координат, позволяющей оценивать все необходимые параметры на одном графике. В общем виде параметры, отражающие поведение грунтов при нагружении и разгрузке, получаемые по результатам компрессионных испытаний, показаны на рисунке 5. Для нормальноуплотненных (НУ) и переуплотненных (ПУ) грунтов давление предуплотнения σ'_p (может быть больше или равно бытовому σ'_v) разделяет компрессионную кривую на две области: упругую (ПУ) и деформируемую (НУ).



Рисунок 5 – Графические результаты анализа компрессионной кривой

14.4 Для анализа рекомендуется использовать компрессионную кривую в полулогарифмической шкале в виде:

1) зависимости коэффициента пористости от десятичного логарифма давления (e-log(σ)), как показано на рисунке 5;
2) зависимости относительной деформации от натурального логарифма давления (ε-ln(σ)).

В первом случае логарифмический индекс компрессии Cc определяется по формуле:

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log(\sigma_2) - \log(\sigma_1)} \quad (12)$$

2. Логарифмический индекс рекомпрессии Cs определяется аналогичным образом по ветви разгрузки или повторного нагружения.

Во втором случае параметры могут быть получены непосредственно в виде значений модифицированного коэффициента компрессии λ* и модифицированного коэффициента рекомпрессии *κ** аналогичным образом по компрессионной кривой в осях «относительная деформация ε – натуральный логарифм давления ln(σ)» (рисунок 6).

$$\lambda^* = \frac{\Delta\varepsilon}{\ln(\sigma_2) - \ln(\sigma_1)} \tag{13}$$

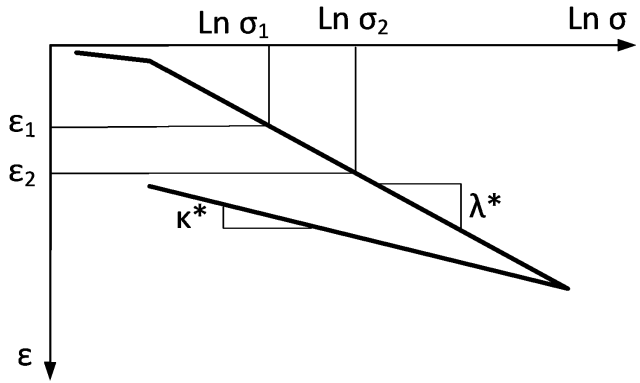

Рисунок 6 – Компрессионная кривая в представлении для получения приведенных параметров λ* и *κ**

Взаимная зависимость параметров логарифмического представления компрессионной кривой определяется формулами:

$$\lambda^* = \frac{C_c}{2{,}3\,(1+e_0)} \tag{14}$$

$$\kappa^* = \frac{2C_r}{2{,}3\,(1+e_0)} \tag{15}$$

14.5 Одометрический модуль деформации E_{oed}^{ref} определяется при опорном давлении P_{ref} по компрессионной кривой как показано на рисунке 7.

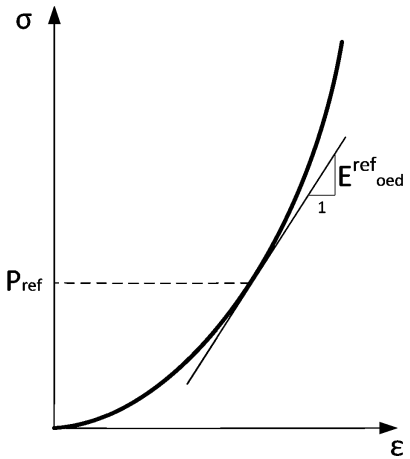

Рисунок 7 – Определение опорного модуля деформации

Опорное давление Pref соответствует бытовому эффективному напряжению (допускается принимать на глубине залегания кровли слоя при большой мощности и середине слоя при небольшой). Опорное давление должно быть больше исторического $P_{ref} > \sigma_p$.

14.6 Для простой модели Mohr-Coulomb модуль деформации необходимо назначать с учетом напряженного состояния путем деления слоя большой мощности на несколько частей. При выделении расчетных слоев толщи исходят из условия, чтобы значения относительной деформации Δε или напряжений $\Delta\sigma_p^{ср}$ в пределах расчетного слоя не изменялись более чем на 10 %.

Для оценки возможности использования простой модели Mohr-Coulomb или перехода на другие модели грунта производится определение модуля деформации в соответствии со схемой на рисунке 8. Для этого определяется среднее бытовое (природное) напряжение $\sigma_{пр}^{ср}$ в середине расчетного слоя и откладывается на компрессионной кривой в осях давление-относительная деформация. Далее определяется среднее напряжение от насыпи $\sigma_p^{ср}$ в середине расчетного слоя и также откладывается на компрессионной кривой от точки природного напряжения

$\sigma_{пр}^{ср}$. При возможности описания полученного отрезка прямой линией допускается назначение модуля деформации для всего расчетного слоя по формуле:

$$E_{oed} = \frac{\sigma_{р}^{ср}}{\Delta\varepsilon} \quad (16)$$

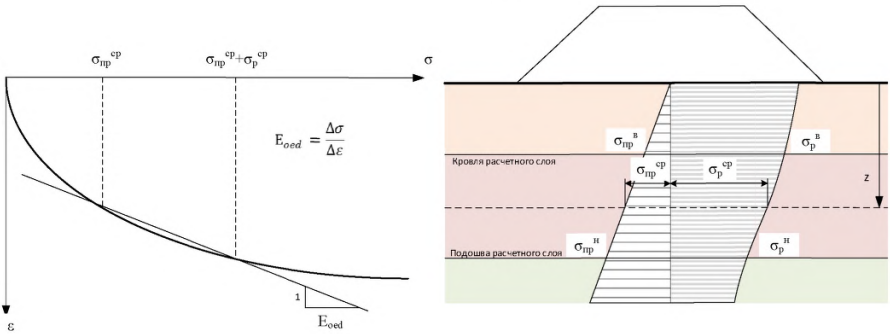

Рисунок 8 – Определение переменного значения модуля деформации $\sigma_{р}^{в}$ – напряжения от насыпи на кровле слоя; $\sigma_{р}^{н}$ – напряжения от насыпи на подошве слоя; $\sigma_{пр}^{в}$ – бытовые напряжения на кровле слоя; $\sigma_{пр}^{н}$ – бытовые напряжения на подошве слоя; $\sigma_{р}^{ср}$ - среднее напряжение от насыпи; $\sigma_{пр}^{ср}$ - среднее бытовое (природное) напряжение

Если участок компрессионной кривой описать линейной зависимостью нельзя, необходимо разделить слой на части или использовать модели с нелинейной зависимостью деформаций от напряжений (SS, SSC, MMC, HS и др).

15 Параметры прочности грунтов

15.1 Параметры прочности для слабых грунтов должны позволять оценивать стабилизированное и нестабилизированное состояние. Для выполнения расчетов необходимо иметь два набора прочностных характеристик, получаемых из лабораторных или полевых испытаний:

- для оценки нестабилизированного состояния в виде недренированного сопротивления сдвигу Cu или параметров прочности **$C_{нач}$, $\varphi_{нач}$** из прибора одноплоскостного среза;

- для оценки стабилизированного состояния в виде эффективных параметров прочности **c', φ'**.

15.2 Оценку нестабилизированного состояния рекомендуется производить на основе недренированного сопротивления сдвигу Cu, для чего следует построить профиль изменения этой характеристики с глубиной. Поведение нормальноуплотненных грунтов (НУ) характеризуется увеличением прочности с глубиной (рисунок 9 справа). В тоже время недоуплотненные грунты, к которым относятся, например, илы, не проявляют приращения прочности с глубиной (рисунок 9 слева). Для предварительной оценки недренированное сопротивление сдвигу может быть принято по [3].

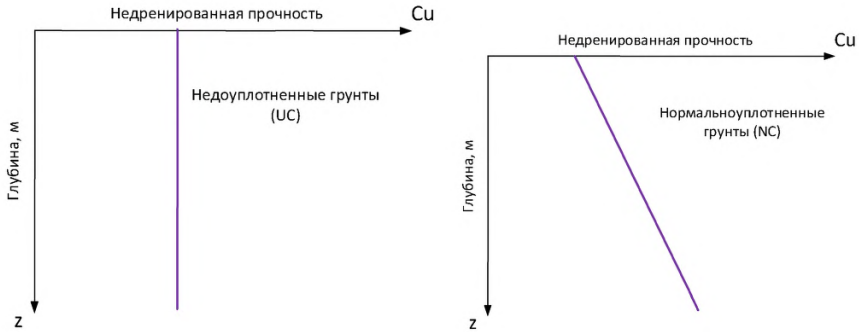

Рисунок 9 – Изменения прочности грунтов с глубиной

15.3 Получения профиля сопротивления сдвигу по глубине осуществляется путем привязки, полученной в испытаниях величины к глубине (соответствие давления в испытании бытовому). На рисунке 10 показан пример трехосных неконсолидированно-недренированных (НН) испытаний, по результатам которых получают величину недренированного сопротивления сдвигу Cu, и принцип построения профиля сопротивления сдвигу по глубине.

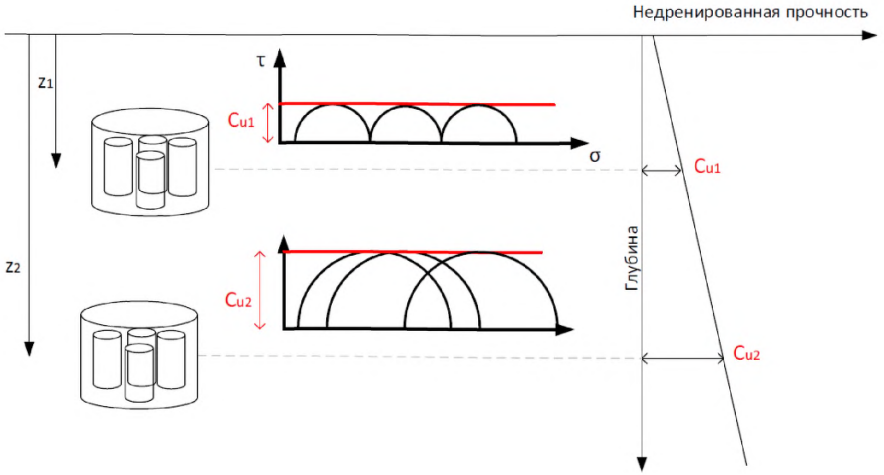

Рисунок 10 – Принцип построения профиля сопротивления сдвигу по глубине

Для нормальноуплотненных (НУ) грунтов, имеющих увеличение прочности с глубиной (рисунок 10) определяют нормализованную (по глубине) прочность C_u/σ'_v и приращение прочности с глубиной ΔC_u.

15.4 Для получения профиля сопротивления сдвигу по глубине используются все методы, позволяющие оценивать прочность слабых грунтов как в лаборатории, так и в массиве: трехосные консолидированно-недренированные (КН) испытания (только для круга, соответствующего бытовым напряжениям); крыльчатка, пьезостатическое зондирование с измерением порового давления (CPTu), отдельные разновидности дилатометров и пр. Построение профиля необходимо для оценки начального состояния и контроля при анализе в эффективных напряжениях.

15.5 Для перехода от недренированного сопротивления сдвигу к дренированной прочности допускается использование зависимости между прочностью в эффективных и полных напряжениях [7]:

$$\frac{C_u}{\sigma'_v} = \frac{sin\varphi'}{2}, \qquad (17)$$

где φ' – угол внутреннего трения в эффективных напряжениях, град.

Для предварительных расчетов допускается получение нормализованной (по глубине) прочности C_u/σ'_v по формуле Скемптона в зависимости от числа пластичности:

$$\frac{C_u}{\sigma'_v} = 0{,}11 + 0{,}0037 \cdot Ip, \tag{18}$$

где Ip – число пластичности, %.

Для грунтов, обладающих переуплотнением (OCR>1) используется другая зависимость:

$$\left[\frac{C_u}{\sigma'_v}\right] = \frac{\sin(\varphi')}{2} OCR^m \ , \tag{19}$$

где φ' – угол внутреннего трения в эффективных напряжениях, град;

OCR – коэффициент переуплотнения;

m – степенной параметр, определяемый по формуле:

$$m = \frac{C_c - C_s}{C_c}, \tag{20}$$

где Cc – индекс компрессии; Cs – индекс рекомпрессии.

Допускается использование других зависимостей для получения остаточного угла внутреннего трения (соответствует большим сдвиговым деформациям, характерным для слабых грунтов) в эффективных напряжениях:

- зависимость от числа пластичности:

$$\varphi'_r = \frac{46{,}6}{I_p^{0{,}446}} \tag{21}$$

- зависимость от влажности на границе текучести:

$$\varphi'_r = \frac{453{,}1}{w_L^{0{,}85}} \tag{22}$$

Полученное значение эффективного (дренированного) угла внутреннего трения φ’ (φ’$_r$) следует использовать в расчетах при нулевом эффективном сцеплении c’=0 в моделях SS и SSC с универсальным типом поведения по условиям дренирования.

Анализ результатов трехосных консолидированно-дренированных (КД) испытаний рекомендуется производить в координатах инвариант напряжений:

- вертикальная ось – девиатор напряжений q:

$$q = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \quad (23)$$

- горизонтальная ось – среднее напряжение p:

$$p' = \frac{(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)}{3} \quad (24)$$

В графической форме результаты испытаний представляют в виде графика p-q (рисунок 11).

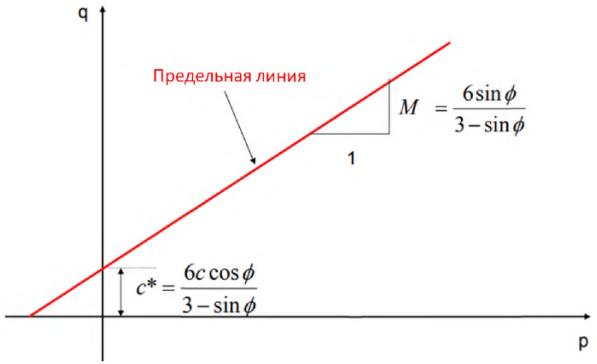

Рисунок 11 – Представление трехосных испытаний в пространстве p-q

Такой подход позволяет делать статистическую обработку трехосных испытаний при определении прочностных характеристик. Параметры предельной линии в пространстве p-q определяются величинами M и c*. Получение эффективных параметров прочности для условия Кулона-Мора осуществляется по зависимостям:

$$\varphi' = arcsin\frac{3 \cdot M}{6 + M}, \quad (25)$$

$$c' = c^* \cdot \frac{3 - sin\varphi'}{6 \cdot cos\varphi'}, \quad (26)$$

где M – тангенс угла наклона предельной линии на графике p-q (рисунок 11);

c* - отрезок, отсекаемый предельной линией на оси ординат.

В качестве точки разрушения следует принимать момент достижения в испытании 15% деформации (остаточная прочность).

При определении прочности следует разделять круги, расположенные левее давления предуплотнения (область ПУ) и круги правее (область НУ). Для каждой области необходимо определять свое положение предельной линии.

16 Валидация моделей

Для численного моделирования после определения входных параметров модели необходимо провести их валидацию путем проведения виртуальных лабораторных испытаний моделей и сопоставления результатов с лабораторными испытаниями. Процедура включает следующую последовательность действий:

1. Анализ лабораторных испытаний грунта и получение параметров модели;
2. Проведение виртуальных лабораторных испытаний, имитирующих испытания, выполненные в грунтовой лаборатории;
3. Сопоставление лабораторной зависимости и зависимости, соответствующей математической модели.
4. Корректировка параметров модели для достижения близкого характера обеих кривых.

На рисунке 12 показан пример валидации модели SS по данным компрессионных испытаний с разгрузкой. При валидации необходимо учитывать историческое давление (давление предуплотнения σ_p).

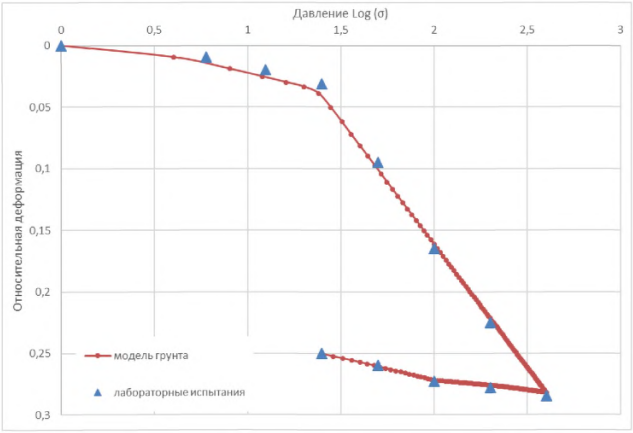

Рисунок 12 – Верификация модели по данным компрессионных испытаний

17 Процедура валидации расчетной схемы

Процедура выполняется только при использовании универсального типа поведения (Undrained A). Для оценки корректности расчетной схемы необходимо выполнить ее валидацию, т.е. проверку генерируемой расчетной недренированной прочности. В качестве эталона принимается сопротивление сдвигу, полученное в виде профиля недренированной прочности Cu по глубине для нестабилизированного состояния. Построение профиля выполняется в соответствии с рекомендациями раздела 15.

Процедура проверки выполняется в следующей последовательности:

1. Создается отдельная расчетная схема в виде вырезанного по оси насыпи столбика грунтов, включающего насыпь и грунтовое основание;
2. Все грунты, кроме проверяемого задаются при помощи линейно-упругой модели с удельным весом без учета параметров прочности.
3. Проверяемый слой задается выбранной комплексной геомеханической моделью грунта с универсальным типом поведения. Модель должна пройти процедуру валидации согласно разделу 16.
4. Производится расчет нулевой фазы (Initial) при отключенных кластерах грунта насыпи.
5. На следующей стадии производится активация кластеров насыпи с типом расчета НДС (Plastic), обеспечивающим условно мгновенное приложение нагрузки (соответствие неконсолидированно-недренированной схеме испытаний в трехосном приборе).
6. По результатам расчета строится эпюра величины мобилизованной прочности (τ_{mob}, раздел 20.3) по глубине, которая является *расчетным* сопротивлением сдвигу модели.
7. Производится сопоставление *измеренного* сопротивления сдвигу (неконсолидированно-недренированные (НН) или консолидированно-дренированные (КН) трехосные испытания, крыльчатка, статическое зондирование с измерением порового давления и др.) и расчетного

сопротивления сдвигу по результатам моделирования (величина мобилизованной прочности τ_{mob}). Расчетное сопротивление сдвигу не должно превышать измеренное (рисунок 13).

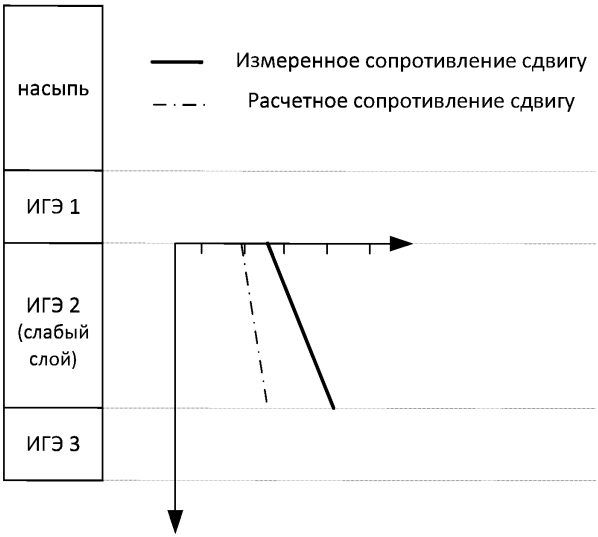

Рисунок 13 – Принцип валидации расчетной схемы

18 Общие положения моделирования

18.1 Назначение граничных условий для расчетной схемы выполняется в соответствии с общими рекомендациями рисунка 14.

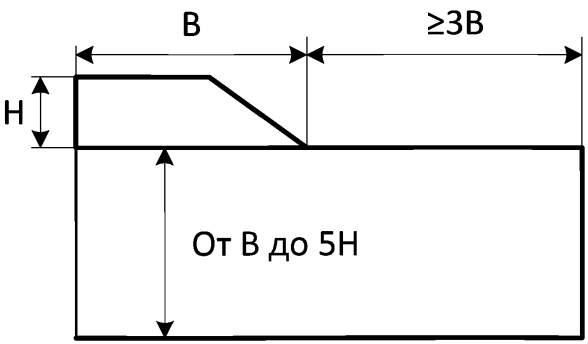

Рисунок 14 – Рекомендуемые размеры расчетной схемы

Границы расчетной схемы не должны оказывать влияния на результаты расчетов устойчивости, и должны быть обоснованы для выполнения расчетов осадки (сжимаемая толща). Если области пластических деформаций достигают границ схемы, ее необходимо расширить. Нижнюю границу расчетной схемы допускается принимать не менее половины ширины насыпи понизу.

18.2 Расчеты могут быть выполнены в следующих вариантах:

- **одностадийные**, выполняются в полных напряжениях с недренированной прочностью в качестве характеристики основания и позволяют оценивать только начальное (нестабилизированное) состояние (рекомендуется использовать недренированный тип поведения Undrained B или C);

- **многостадийные**, позволяют производить оценку влияния упрочнения грунта в процессе консолидации во время и после отсыпки земляного полотна, рекомендуется использование универсального типа поведения по условиям дренирования (Undrained A) и эффективных параметров прочности с обязательной валидацией сопротивления сдвигу в нестабилизированном состоянии (раздел 16, 17). Оценка производится как для нестабилизированного, так и для стабилизированного состояния.

18.3 Для выполнения расчетов устойчивости и стабильности рекомендуется применение двух видов анализа:

- в полных напряжениях;

- в эффективных напряжениях.

Анализ в **полных напряжениях** предполагает использование прочностной характеристики грунта – недренированной прочности Cu, которую получают по результатам трехосных испытаний по консолидированно-недренированной (КН) и неконсолидированно-недренированной (НН) схемам, а также полевыми методами (крыльчатка, статическое зондирование с измерением порового давления, дилатометр). Расчеты производятся без учета изменения прочностных характеристик в процессе отсыпки, что соответствует быстрому темпу отсыпки и низкой водопроницаемости ($К_ф$<0,0001 м/с) глинистых грунтов. Анализ в полных напряжениях применяется при **одностадийной** схеме расчета.

Анализ в **эффективных напряжениях** основан на теории К. Терцаги, согласно которой сопротивление сдвигу при постоянных параметрах прочности зависти от порового давления U по формуле:

$$\tau = (\sigma_n - U)tg\varphi' + c', \quad (27)$$

где σ_n – нормальные полные напряжения, кПа;

U – поровое давление, кПа;

φ' - эффективный (дренированный) угол внутреннего трения, град;

c' - эффективное сцепление, кПа.

Анализ в эффективных напряжениях применяется при **многостадийной** схеме расчета.

Эффективные параметры прочности получают по результатам трехосных консолидированно-дренированных (КД) или консолидированно-недренированных (КН) испытаний, эти параметры соответствуют стабилизированному состоянию. Анализ устойчивости в эффективных параметрах необходимо проверять анализом в полных напряжениях, который использует в качестве входных параметры нестабилизированного состояния.

18.4 Анализ в эффективных напряжениях позволяет оценивать два состояния: нестабилизированное (до консолидации) и стабилизированное (после консолидации). Принцип оценки двух состояний заключается в использовании теории К. Терцаги в виде формулы:

$$\sigma = \sigma' + U, \quad (28)$$

где σ – полные напряжения;

σ’ – эффективные напряжения;

U – поровое давление.

Поровое давление может быть в виде *избыточного* (возникает при нагружении) или в виде *гидростатического* (определяется уровнем грунтовых вод). Величина U предполагает суммарное поровое давление: гидростатическое и избыточное. До отсыпки насыпи при наличии уровня грунтовых вод присутствует гидростатическое давление, в процессе отсыпки возникает избыточное, во время консолидации избыточное рассеивается, а после завершения консолидации

остаётся только гидростатическое поровое давление. Например, в программном комплексе PLAXIS поровое давление описывается формулой:

$$P_{active} = P_{steady} + P_{excess}, \quad (29)$$

где P_{active}- полное поровое давление (активное в зависимости от условий), кПа;

P_{steady} - гидростатическое поровое давление, кПа;

P_{excess} - избыточное поровое давление, кПа.

Принцип использования эффективной прочности для оценки нестабилизированного состояния заключается в следующем. На рисунке 15 показано нестабилизированное напряженное состояние, определяемое кругами Мора в полных напряжениях σ_1 и σ_3. Сопротивление сдвигу (Cu) или радиус круга Мора в полных напряжениях для недренированных условий не зависит от величины нагрузки. Если известно избыточное поровое давление, то круг может быть смещен и перестроен в эффективных напряжениях (σ'_1 и σ'_3), а запас прочности (или его отсутствие, как на рисунке 15, где круг касается предельной линии) может быть определен в эффективных напряжениях относительно заданной эффективной прочности c' и φ'.

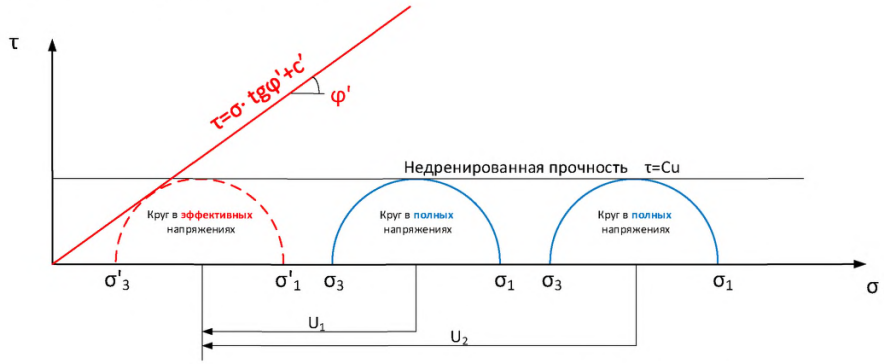

Рисунок 15 – Принцип оценки нестабилизированного состояния в эффективных напряжениях

18.5 Особенность геотехнических программ, работающих на основе метода конечных элементов с комплексными геомеханическими моделями (КГМ) грунтов,

заключается в дополнении возможностей КГМ еще двумя независимыми компонентами расчета: типом поведения моделей по условиям дренирования (дренированное, недренированное или универсальное) и типом расчетов. При этом, корректное сочетание КГМ, типа поведения и типа расчета обеспечивает геотехника широкими возможностями анализа.

Основные типы расчетов, используемые для решения задач в статической постановке:

- расчёт природного напряженного состояния (Initial phase);
- расчёт напряженно-деформированного состояния (Plastic);
- расчёт консолидации (Consolidation);
- расчёт устойчивости (Safety).

19 Типы поведения моделей по условиям дренирования

19.1 Для возможности выполнения оценки поведения насыпей на слабых грунтах программы численного моделирования должны иметь несколько типов поведения моделей по условиям дренирования. Рекомендуются к использованию программы, имеющие кроме дренированного и недренированного типа универсальный тип поведения, что позволяет производить анализ как в полных, так и в эффективных напряжениях и осуществлять взаимный контроль результатов.

19.2 В общем виде можно выделить следующие **типы поведения моделей *по условию дренирования*** и их установившиеся в практике применения названия:

1. **Дренированный** тип поведения (Drained) предполагает использование по умолчанию эффективных характеристик прочности и жесткости, однако при необходимости допускается задание прочности в полных напряжениях в виде c_w и φ_w в зависимости от влажности w. В этом случае дренированный тип поведения подразумевает постоянство этих параметров в процессе консолидации, что приводит к занижению прочности для стабилизированного состояния (после завершения фильтрационной консолидации) если расчет консолидации выполняется.

2. **Недренированный** тип поведения (Undrained B или Undrained C) для анализа в полных напряжениях предполагает использование недренированного сопротивления сдвигу с возможностью упрочнения по глубине, но без изменения во времени (в процессе консолидации), т.е. только для оценки нестабилизированного состояния.
3. **Универсальный** тип поведения (Undrained A) для анализа в эффективных напряжениях с использованием эффективных параметров прочности и жесткости, обеспечивающий оценку как нестабилизированного состояния, так и стабилизированного с оценкой прочности в любой момент процесса консолидации. Этот тип поведения требует валидации расчетной схемы по прочности (раздел 16).

В таблице 4 представлены входные параметры для трех типов недренированного поведения, используемых в наиболее распространенных геотехнических комплексах [6].

Таблица 4 – Типы поведения моделей по условиям дренирования

Тип поведения	**Входные данные**	**Применение**
Универсальный (Undrained A)	Эффективные значения параметров прочности: c', ϕ', ψ'	Для учета изменения прочности во времени (консолидация)
	Эффективные значения параметров жесткости: E', ν'	
Недренированный (Undrained B)	Значения параметров прочности в полных напряжениях cu, ϕ=0, ψ=0	Для оценки нестабилизированного состояния
	Эффективные значения параметров жесткости: E', ν'	
Недренированный (Undrained C)	Полные значения параметров прочности: cu, ϕ=0, ψ=0	
	Полные значения параметров жесткости: Eu, ν_u=0.495	

Примечание:

1) *E' – дренированный модуль, который может принимать значения модуля деформации из компрессионных испытаний $E'=E_{oed}$; или из трехосных испытаний $E'=E_{50}$ (при боковом давлении, соответствующим глубине отбора).*
2) *Eu – недренированный модуль, определение которого производится при отсутствии дренирования, либо принимается $Eu\approx1,3E'$.*
3) *Недренированный тип поведения Undrained B рассчитывает недренированный модуль деформации Eu за счет определения избыточного порового давления.*

20 Расчёт начального напряженного состояния.

20.1 Эта стадия расчетов является ключевой особенностью численного моделирования, поскольку она определяет отправные параметры для дальнейшего расчета. Основная краткая информация об этой стадии моделирования приведена в таблице 5.

Таблица 5 – Расчет начального напряженного состояния (Initial phase)

Результат	**Особенности**
Распределение напряжений по заданному значению K_0^{NC}	Горизонтальная поверхность рельефа, субгоризонтальные слои и уровень грунтовых вод
Распределение напряжений в зависимости от коэффициента Пуассона ν (gravity loading)	Негоризонтальная поверхность рельефа, наличие существующих насыпей, возвышенностей, дамб и пр. наклонные слои грунта, линзы, негоризонтальный уровень грунтовых вод. Не учитывается OCR и POP (рекомендуется задать нагрузкой или изменением коэффициента веса (ΣM_{weight})).

20.2 Результатом расчета начального напряженного состояния является поле напряжений (главное максимальное σ_1 и главное минимальное σ_3; вертикальное σ_{yy} и горизонтальное σ_{xx}), деформации в этом случае соответствуют историческим, уже реализованным, поэтому в дальнейшем расчете, как правило, не учитываются. На рисунке 16 показаны оси эллипсов главных напряжений (σ_1 и σ_3). Для нормальноуплотненного состояния вертикальные напряжения превышают горизонтальные $\sigma_1>\sigma_3$, что соответствует коэффициенту бокового давления $K_0<1$.

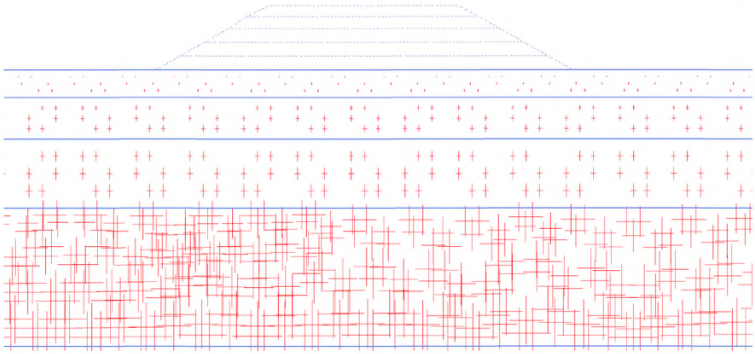

Рисунок 16 – Результат расчета начального напряженного состояния

20.3 В ходе расчета определяется главное максимальное напряжение σ_1 и через коэффициент бокового давления K_0 главное минимальное σ_3. Полученное таким образом мобилизованное напряженное состояния в каждой точке обозначается как мобилизованное сопротивление сдвигу τ_{mob}. Поскольку прочностные характеристики являются входными параметрами, то для каждой точки возможно определение степени запаса до нарушения условия прочности. Для этого программой определяется максимальное сопротивление сдвигу τ_{max}, соответствующее расширению мобилизованного круга Мора до касания предельной огибающей, заданной условием прочности Кулона-Мора (рисунок 17).

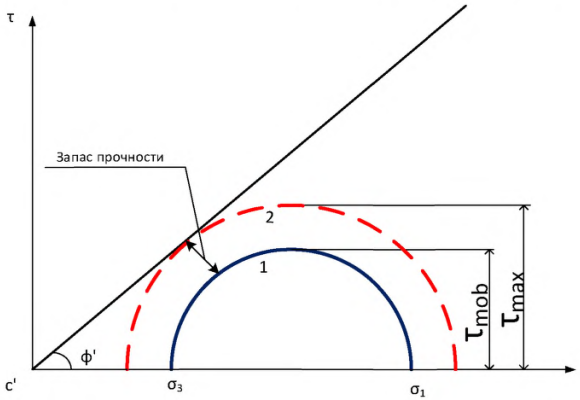

Рисунок 17 – Схема к определению запаса прочности в точке

Запас прочности оценивается относительной прочностью:

$$\tau_{rel} = \frac{\tau_{mob}}{\tau_{max}} \quad (30)$$

Или обратной зависимостью в виде коэффициента стабильности:

$$К_{стаб} = \frac{1}{\tau_{rel}} = \frac{\tau_{max}}{\tau_{mob}} \quad (31)$$

Таким образом, в зависимости от заданной величины $К_0$ будет рассчитано сопротивление сдвигу τ_{mob} (радиус круга Мора) и произведена оценка запаса прочности в каждой точке. Следует обращать особое внимание на получение достоверного значения $К_0$ для каждого слоя, для чего рекомендуется сопоставлять полевые и лабораторные данные.

21 Расчёт напряженно-деформированного состояния

21.1 Метод конечных элементов в геотехнике позволяет производить моделирование процесса строительства с учетом влияния различных факторов с анализом большого количества результатов расчета. Для осуществления процесса моделирования в ходе расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) рекомендуется приближать активацию элементов расчетной схемы к реальному процессу. Возведение насыпей осуществляется с использованием принципа поэтапности или стадийности (Staged construction), когда активируются отдельные слои насыпи с указанием времени их возведения. Расчетные толщины слоев насыпи рекомендуется задавать по 15-20% от высоты насыпи (допускаются другие величины при обосновании). Основная краткая информация об этой стадии моделирования приведена в таблице 6.

Таблица 6 – Расчёт напряженно-деформированного состояния (Plastic)

Результат	Особенности
НДС (стационарное)	Используется с дренированным типом поведения (Drained). Действия с кластерами и другими элементами расчетной схемы без учета времени (кроме моделей, учитывающих ползучесть, например, SSC). Применяется для активации нагрузки от транспорта.
Величина избыточного порового давления	Только при использовании недренированного или универсального типа поведения (**Undrained A** или **B).** Не определяется при активации опции Ignore undrained behavior **Не зависит** от Кф, времени и границ по гидравлическим условиям. В расчете генерируется максимально возможное избыточное поровое давление.
Сейсмическое воздействие*	Дополнительная стадия для активации сейсмической силы (горизонтальный и вертикальный коэффициент для квазистатического расчета или на основе записи акселерограммы расчетного сейсмического события)
Коэффициенты надежности**	Дополнительная стадия для активации специальной опции (**Design approaches)**

*Примечание * - порядок учета сейсмических воздействий излагается в соответствующих документах*

*** - дополнительная возможность назначать частные коэффициенты надежности по ГОСТ 27751-2014 к входным параметрам расчетных элементов (доступно в некоторых версиях программ).*

21.2 Применительно к задаче возведения насыпей на слабых водонасыщенных грунтах тип расчета Plastic может быть использован в следующих ситуациях:

1. Для консервативной оценки устойчивости и осадки при возведении насыпи, поскольку согласно таблице 6 в процессе моделирования отсыпки слоя в этом режиме избыточное поровое давление не рассеивается (расчет не зависит от времени). В этом случае используется универсальный (Undrained A) или полностью недренированный (Undrained B) тип поведения по условиям дренирования. Такой способ предполагает отсутствие упрочнения грунта в процессе отсыпки и выдержки до начала отсыпки следующего слоя.

Рекомендуемая последовательность: активация кластера слоя насыпи в режиме Plastic и выдержка слоя в режиме расчета Consolidation в течение примерного времени отсыпки этого слоя.

2. Для вычисления конечной осадки, т.е. осадки на момент завершения процесса фильтрационной консолидации. Такой вариант расчета носит приблизительный характер в виду некорректного учета прочности для слабых оснований: до начала консолидации прочность низкая, что приводит к возникновению боковых смещений грунта и связанного с этим увеличения осадки, а после существенно возрастает. Расчет конечной осадки может быть выполнен либо с нестабилизированной прочностью, что не соответствует стабилизированному состоянию и конечной осадке, либо со стабилизированной прочностью, что не позволит учесть влияние слабого грунта и боковых (сдвиговых) деформаций в начальный период. В этом расчете сопротивление сдвигу не изменяется во времени и в зависимости от введенных параметров может соответствовать или только нестабилизированному состоянию или только стабилизированному. Для более реалистичного моделирования рекомендуется использование универсального типа поведения по условиям дренирования (Undrained A).

Рекомендуемая последовательность: активация всей насыпи без деления на слои. Рассматриваемый вариант расчета производится либо с дренированным типом поведения моделей (Drained), либо с отключением недренированного поведения (Ignore undrained behavior).

3. Для оценки влияния транспортной нагрузки. С целью расчета эксплуатационных деформаций и устойчивости в эксплуатационный период активация нагрузки производится только с типом расчета Plastic и обязательным отключением недренированного поведения (Ignore undrained behavior). Это означает, что нагрузка учитывается только в статическом режиме, т.е. с *обязательным недопущением генерирования избыточного порового давления (что следует обязательно проверять в результатах расчетов).* Нагрузку следует задавать в соответствии с ГОСТ 32960-2014.

Рекомендуемая последовательность: активация транспортной нагрузки в дренированном поведении грунтов расчетной схемы.

21.3 Если осадка насыпи превышает 18% высоты или превышает 0,5 м [3], расчет с учетом взвешивающего воздействия (для грунтов тела насыпи) целесообразен. Если колебания уровня грунтовых вод не превышают 20% высоты насыпи, то учет взвешивающего воздействия воды не требуется. Учет взвешивающего воздействия в некоторых программах осуществляется за счет перестройки сетки конечных элементов и уровня грунтовых вод (двойная опция «Update Mesh +»).

21.4 Анализ результатов

Величина осадки насыпи определяется в режиме просмотра результатов Deformation - Total displacements - Uy и отключения кластеров тела насыпи (Рисунок 18) или путем построения эпюры (рисунок 19) осадки (Cross section).

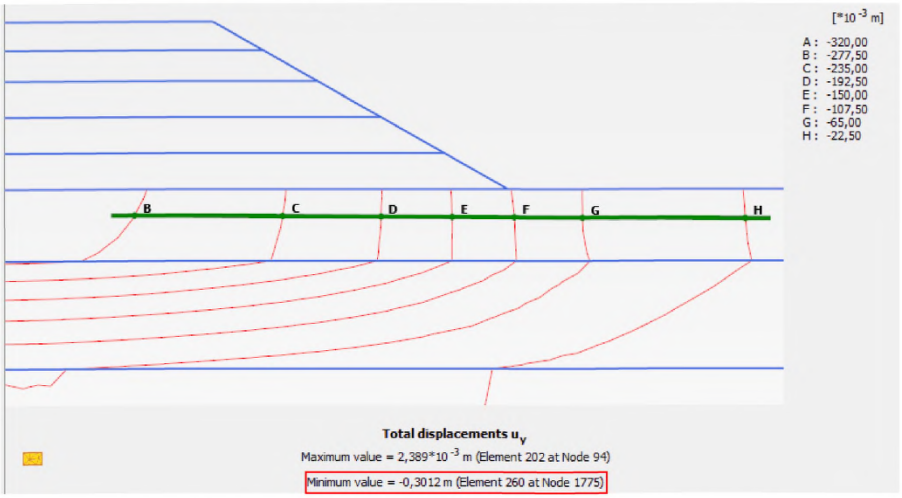

Рисунок 18 – Изолинии конечной (дренированной) осадки

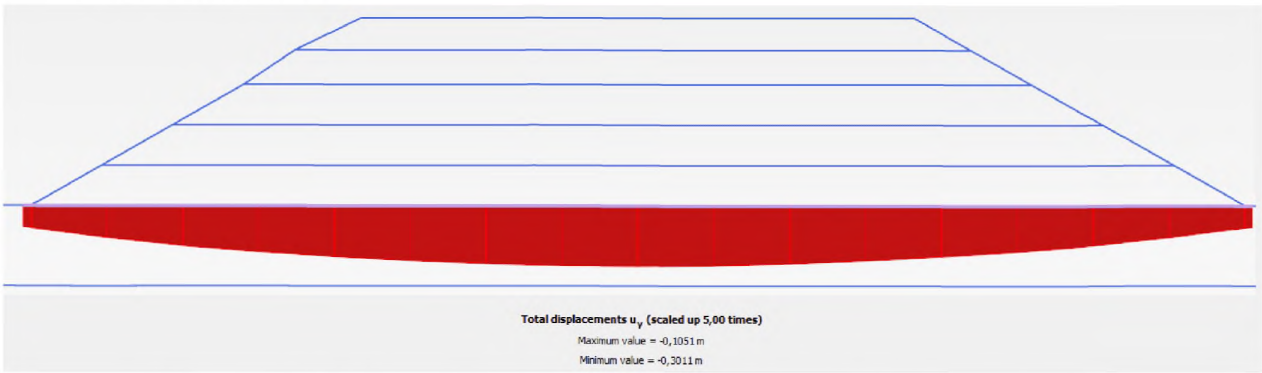

Рисунок 19 – Эпюра конечной (дренированной) осадки насыпи

Объемные деформации ε_v (соответствуют модулю осадки в размерности м/м [3]) показывают в каком слое реализуется осадка (рисунок 20) и позволяют сопоставить результат численного моделирования с ручным счетом по формуле для каждого слоя:

$$S = \varepsilon_v \cdot H_{сл}\ , \qquad (32)$$

где ε_v - объемные деформации;

$H_{сл}$ – мощность рассматриваемого слоя.

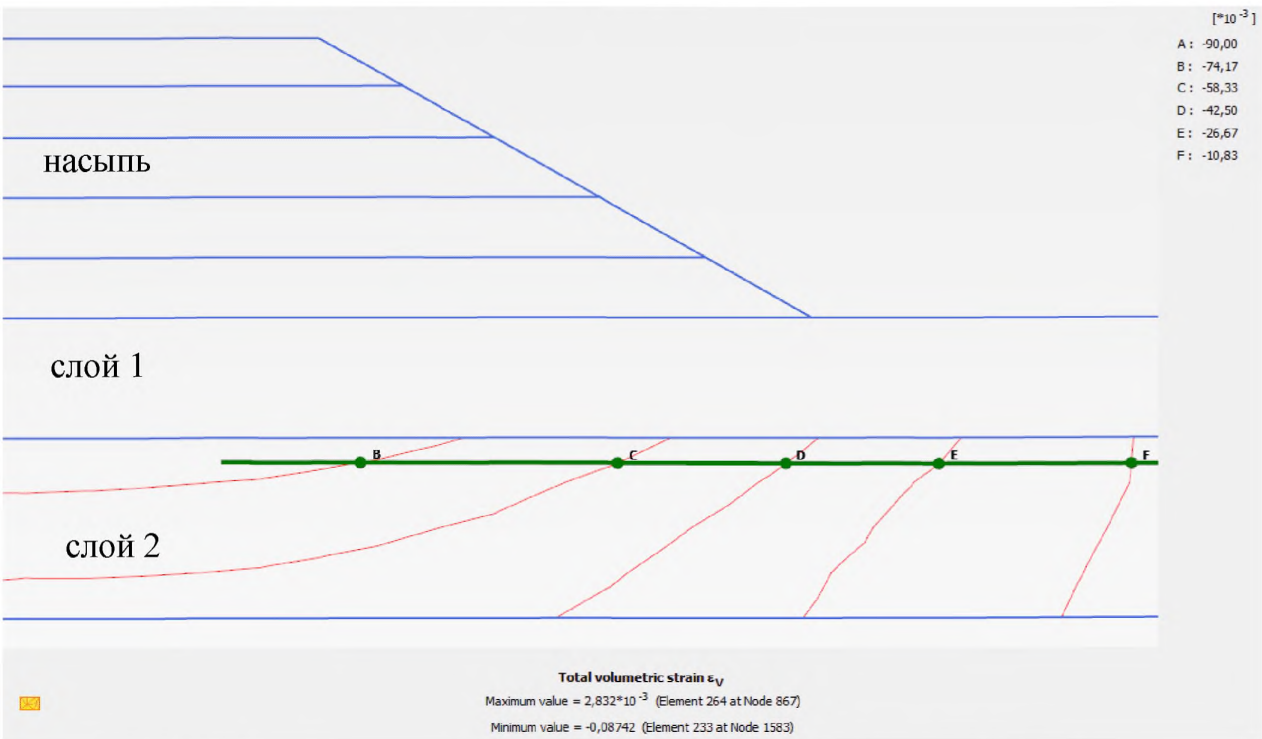

Рисунок 20 – Изолинии объемных деформаций (слой 2 имеет большую сжимаемость и меньшее значение модуля деформации)

Сдвиговые деформации γ_s отображают области с преобладающим сдвиговым характером, что позволят оценить потенциальное положение поверхности скольжения. В отдельных случаях рекомендуется смотреть приращения сдвиговых деформаций $\Delta\gamma_s$, что позволяет лучше видеть предполагаемую поверхность скольжения (рисунок 21).

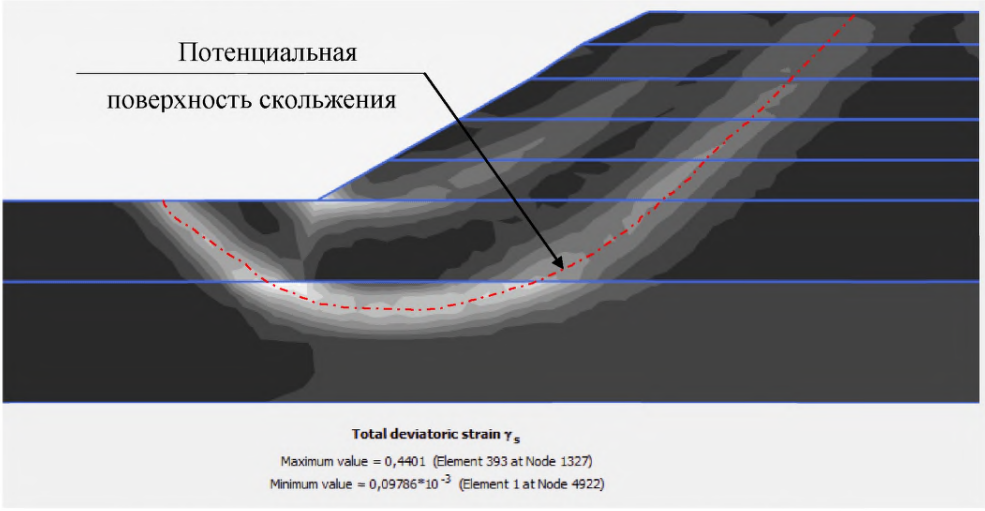

Рисунок 21 – Изополя приращения сдвиговых деформаций $\Delta\gamma_s$

22 Расчёт консолидации

22.1 Расчет времени осадки может быть выполнен в двух вариантах:

1. приближенно с использованием простой модели МС, имеющей постоянное значение модуля деформации и постоянное значение коэффициента консолидации;

2. с применением КГМ грунта (SS, MMC, HS) учитывающей нелинейность зависимости напряжения-деформация и изменение коэффициента фильтрации $k_ф$ при сжатии за счет коэффициента C_k (учитывающего изменение фильтрационных свойств грунта в процессе сжатия), определяемого согласно 10.4.

Расчет консолидации предназначен для генерации избыточного порового давления при нагружении или оценки времени реализации осадки. В отличие от

аналитического расчета одномерной консолидации, численное моделирование решает задачу прямым способом и в двухмерной (трехмерной) постановке. Расчет консолидации может быть произведен тремя способами:

1) Путем подбора времени, необходимого для полного (степень консолидации 90%) рассеивания избыточного порового давления (итерационный принцип, аналогичный аналитическим методам расчета).
2) Путем прямого расчета времени консолидации по заданной степени консолидации (Degree of consolidation 0-99%), т.е. степени рассеивания избыточного порового давления.
3) Путем прямого расчета времени консолидации, определяемого путем снижения избыточного порового давления до заданного значения (Minimum pore pressure).

Основная краткая информация об этой стадии моделирования приведена в таблице 7.

Таблица 7 – Расчёт консолидации (Consolidation)

Результат	**Особенности**
НДС (нестационарное)	Определяется эффективными напряжениями, соответствующими степени консолидации (степени рассеивания избыточного порового давления). При невысоких значениях степени консолидации (<20-30%) НДС определяется с учетом восприятия части внешнего давления несжимаемой поровой водой (недренированная жесткость высокая, осадка небольшая)
Поровое давление	Зависит от Кф, времени и границ схемы по гидравлическим условиям. ***Не зависит** от типа поведения (**Drained**/Undrained). В кластерах с типом Non-Porous или с опцией Cluster dry поровое давление не рассчитывается.
Время консолидации	Слабо чувствителен к потере устойчивости ***Не зависит** от типа поведения (**Drained**/Undrained)

*Примечание: * - режим расчета Consolidation при нагружении генерирует избыточное поровое давление вне зависимости от наличия грунтовых вод.*

22.2 Критерии времени консолидации:

1) В программах, работающих по методу конечных элементов, критерий расчета 90% консолидации (90% от величины максимального избыточного порового давления или Degree of consolidation) не соответствует общепринятому критерию, приведенному в нормативных документах (90% от конечной осадки). Для полного соответствия расчета нормативным требованиям необходимо построить график «осадка S – время t» консолидации и определить по нему время $t_{90\%}$, соответствующее 0,9 от конечной осадки Sk (Рисунок 22).
2) Для получения нормативных сроков 2 см/год и 5 см/год необходимо на графике зависимости «осадка S – время t» провести линию с наклоном, соответствующим интересующему критерию (например, отложив 1 год по горизонтальной оси и 2 см по вертикальной). Далее путем параллельного переноса найти точку, в которой линия является касательной, соответствующая ей абсцисса и является искомым сроком (например, $t_{2см/год}$ на рисунке 22).
3) Для построения графика зависимости «осадка S – время t» рекомендуется использовать критерий расчета консолидации - снижение избыточного порового давления до 1 кПа (Minimum pore pressure) с целью выхода кривой графика на асимптоту условной конечной осадки (приближение расчётного времени к $t_{фк}$ – время завершения фильтрационной части осадки).

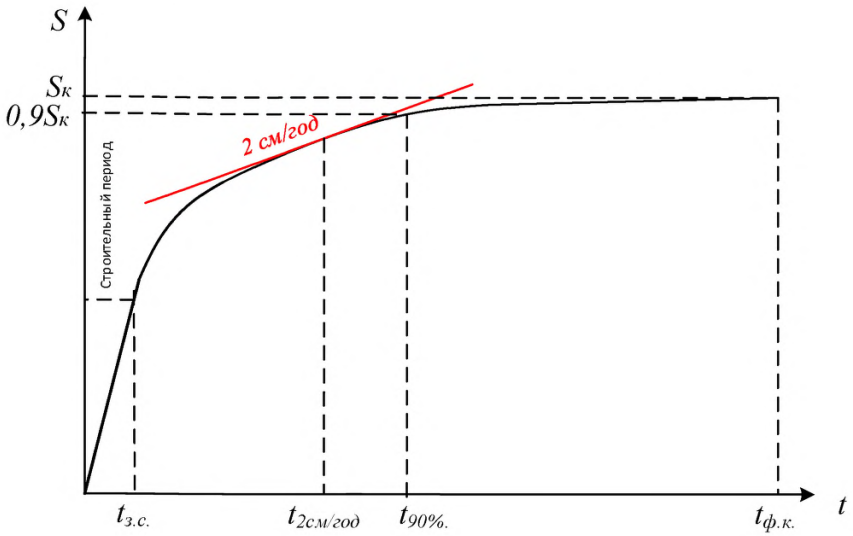

Рисунок 22 – Критерии завершения фильтрационной консолидации: $t_{зс}$ – время завершения строительства; $t_{фк}$ – время завершения фильтрационной части осадки

22.3 Рекомендуемая последовательность

1) Для *генерации избыточного порового давления* производится активация кластеров насыпи (или другой вид нагружения) с указанием продолжительности процесса. Более длительное время моделирования нижних слоев насыпи обеспечивает достижение большего коэффициента устойчивости в строительный период. В общем виде при времени $t \to \infty$ избыточное поровое давление будет отсутствовать (аналогично расчету НДС с режимом расчета Plastic и дренированным поведением). В случае если время расчета $t \to 0$ избыточное поровое давление будет максимальным (аналогично расчету НДС с режимом расчета Plastic и недренированным Undrained B или универсальным типом поведения Undrained A).

2) Для *выполнения расчета времени консолидации* необходимо на предшествующей стадии выполнить расчет избыточного порового давления (режим расчета Plastic и недренированный или универсальный тип поведения

моделей или режим расчета Consolidation с активацией нагружения). После чего производится расчет в соответствии с критерием по разделу 22.2.

В кластерах, моделирующих инженерно-геологические элементы глинистого грунта с условно завершенной степенью консолидации I_L<0.5, рекомендуется запрещать расчет избыточного порового давления (например, типом поведения Non-porous или Cluster dry) для соблюдения границ применимости теории фильтрационной консолидации. На этапе задания граничных условий левая и правая границы схемы закрываются, а нижняя закрывается в случае, если подстилающий грунт – недренирующий (водоупор).

22.4 Для оценки результатов расчета необходимо назначить контрольные точки для построения графиков. Первая точка (т. А на рисунке 23) для зависимости «деформация-время» назначается на подошве насыпи по оси (тип Node, красная круглая на границе конечного элемента); вторая (т. К на рисунке 23) – для зависимости «избыточное поровое давление» - время в середине консолидируемой толщи, в предположительном месте максимальной величины избыточного порового давления по оси насыпи (тип Stress – фиолетовый ромб внутри конечного элемента).

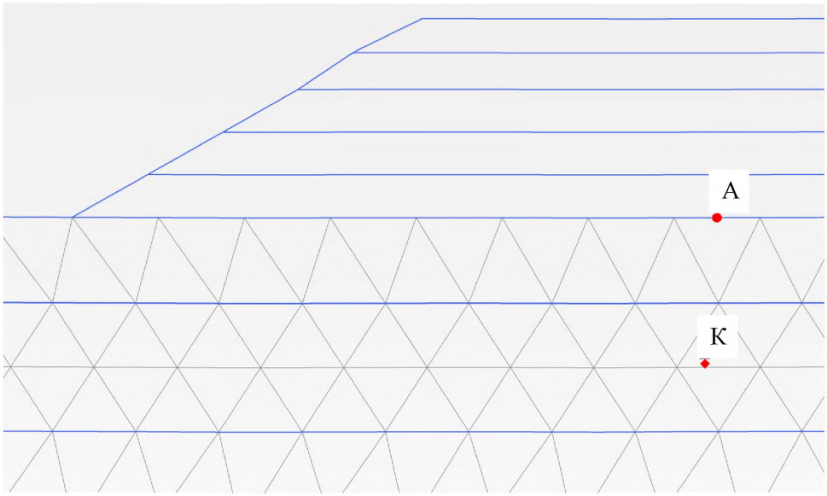

Рисунок 23 – Схема расположения контрольных точек

В процессе расчета необходимо отслеживать изменения следующих параметров (Рисунок 24):

1) P_{excess} – избыточное поровое давление, величина которого должна быть приблизительно равна давлению от сооружения. Если этот параметр существенно превышает давление от насыпи или скачкообразно изменяется в ходе расчета, то необходимо проверить расчетную схему по критерию потери устойчивости.

2) Time – время расчета.

3) ΣM_{stage} – процент выполнения расчетной фазы в долях единиц (ΣM_{stage}=1 соответствует 100%).

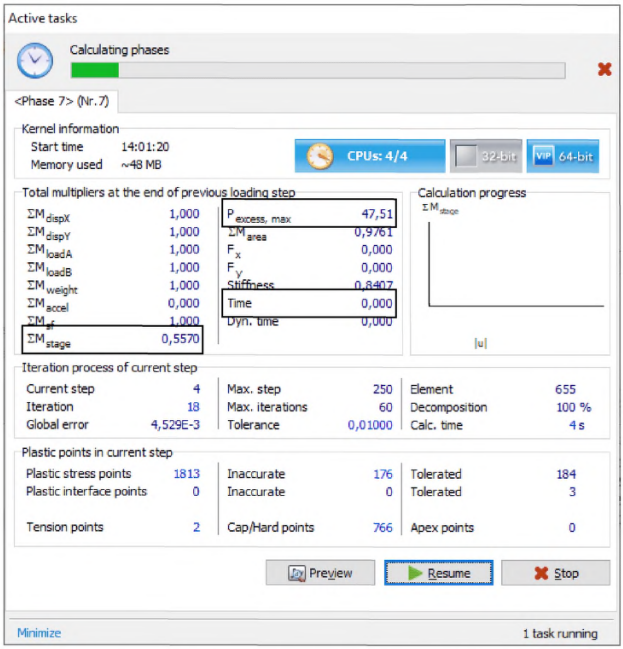

Рисунок 24 – Контролируемые параметры (пример из программы PLAXIS)

22.5 Анализ результатов

После завершения расчета необходимо проверить корректность полученных результатов. Характерные случаи формирования области избыточного порового давления представлены на рисунках 25-27.

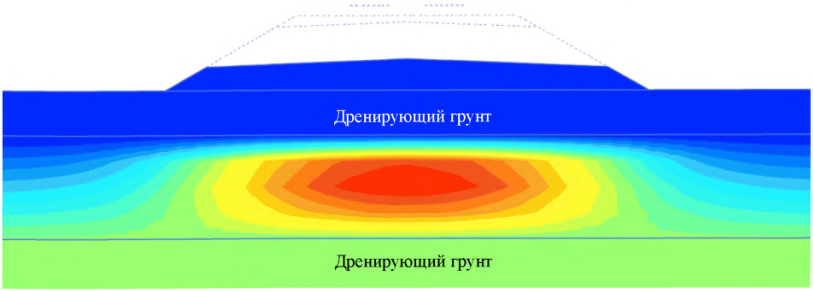

Рисунок 25 – Консолидируемый слой заключен между двумя дренирующими (аналогично пути фильтрации «вверх и вниз»)

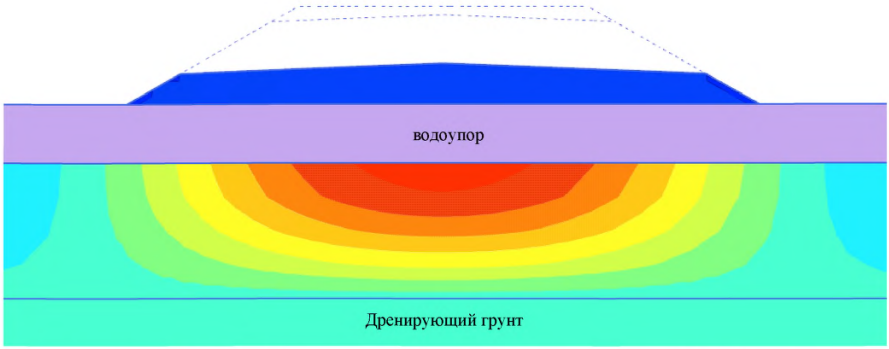

Рисунок 26 – Консолидируемый слой подстилается дренирующим, а перекрыт водоупором (аналогично пути фильтрации «только вниз»)

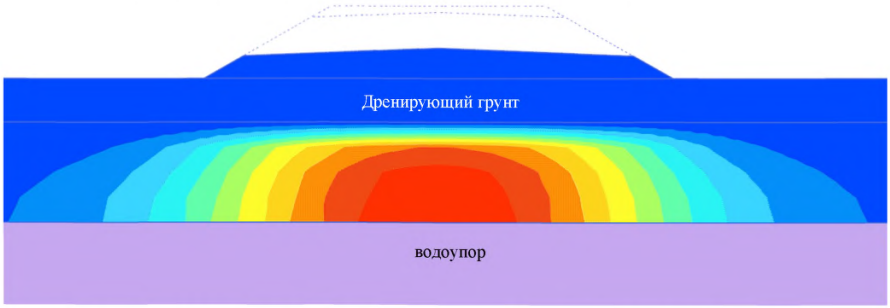

Рисунок 27 – Консолидируемый слой заключен подстилается водоупором, а перекрыт дренирующим (аналогично пути фильтрации «только вверх»)

В результате получают величину максимальной фильтрационной осадки насыпи S_k, которая считается условно конечной или стабилизированной (рисунок 18), и эпюру осадки по подошве (рисунок 19).

По результатам стоится график, аналогичный показанному на рисунке 22 и определяется интенсивность затухания осадки, которая сравнивается с допустимым значением согласно СП 34.13330: для покрытий капитального типа – 2 см/год; для покрытий переходного типа – 5 см/год.

Для анализа также строят график изменения избыточного порового давления P_{excess} во времени для точки К (типа «Stress»), расположенной по оси насыпи в месте максимального избыточного давления (рисунок 28). Этот график используется для геотехнического мониторинга насыпи в процессе строительства.

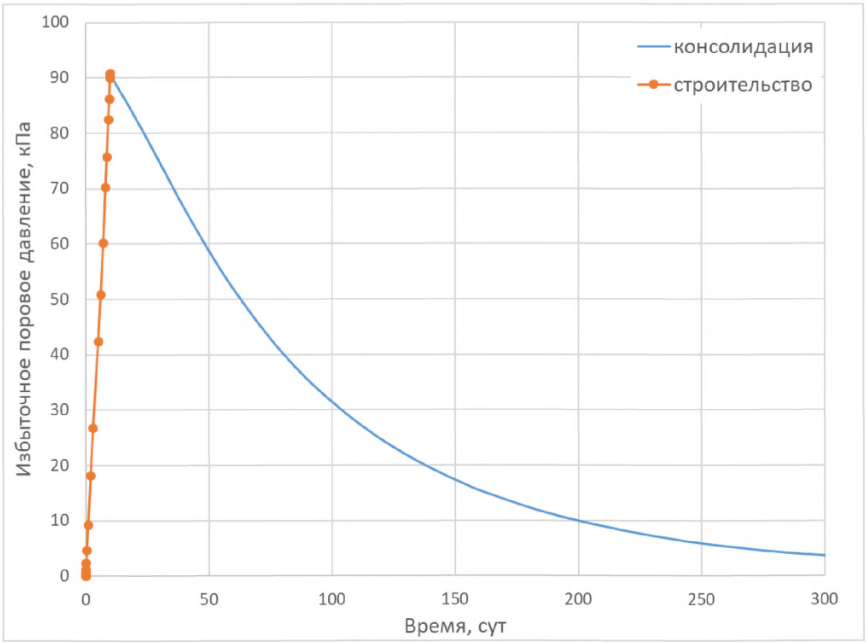

Рисунок 28 – Формирование избыточного порового давления во времени

23 Расчет устойчивости

23.1 Этот режим расчета не является самостоятельным, а наследует напряженное состояние предыдущей стадии расчета и соответствующим образом зависит от предшествующих результатов. Рекомендуется выполнение трех вариантов расчетов устойчивости насыпей на слабых грунтах:

1) **Оценка нестабилизированного состояния (консервативная),** направленная на определение устойчивости насыпи на момент завершения отсыпки или определение максимальной устойчивой высоты насыпи H_{max} при невозможности отсыпать насыпь на полную высоту. Консервативность оценки связана и постоянным значением расчетной прочности в нестабилизированном состоянии, значение которой не изменяется в процессе любой продолжительности отсыпки насыпи (отсутствие упрочнения при консолидации).

Рекомендуемая последовательность: Расчет НДС производится либо с недренированным типом поведения (Undrained B, C), если исходными данными является профиль сопротивления сдвигу по глубине (недренированная прочность Cu), либо с дренированным типом поведения (Drained) с использованием параметров прочности ($C_{нач}$ и $\varphi_{нач}$) при природной плотности-влажности, полученных из прибора одноплоскостного среза по схеме быстрого сдвига (в этом случае необходимо ввести коэффициент бокового давления K_0 вручную). Тип расчета НДС (Plastic), следующая стадия расчета - устойчивость (Safety).

2) **Оценка стабилизированного состояния (при достижении 90% консолидации)**, производится с учетом транспортной нагрузки (эксплуатационный период). Расчет производится только для дренированного поведения для всех грунтов в статической постановке. Недренированное поведение применяется только для динамических расчетов с использованием специальных моделей грунта.

Рекомендуемая последовательность: Расчет НДС (Plastic) при активации транспортной нагрузки производится только с дренированным типом

поведения (Drained или опцией Ignore undrained behavior) и параметрами прочности в эффективных напряжениях: c’ и φ’. Последующий расчет устойчивости осуществляется только с дренированным поведением моделей грунта (опция Ignore undrained behavior) при обязательном контроле избыточного порового давления (величина не должна существенно изменяться).

3) **Оценка частично стабилизированного состояния (степень консолидации менее 90%)**, позволяет оценить устойчивость сооружения в любой момент времени в процессе консолидации с учетом транспортной нагрузки (эксплуатационный период или временные строительные нагрузки). Расчет производится на основании НДС, достигнутого в предыдущей стадии расчета с учетом текущей степени рассеивания избыточного порового давления. Для оценки устойчивости в эксплуатационный период необходимо проверять достижение критериев консолидации: 2 и 5 см/год.

Рекомендуемая последовательность: Расчет производится только с универсальным типом поведения (Undrained A) и параметрами прочности в эффективных напряжениях: c’ φ’. Производится моделирование возведения насыпи, после чего выполняется расчет процесса консолидации (Consolidation) с заданным временем (Staged construction) или степенью консолидации (Degree of consolidation или Minimum pore pressure). Последующий расчет устойчивости осуществляется только с дренированным поведением моделей грунта (опция Ignore undrained behavior) при обязательном контроле избыточного порового давления (величина должна быть постоянной).

23.2 Расчет устойчивости с применением программ, работающих на основе МКЭ должен использовать метод снижения прочности (SRM – shear reduction method). Метод SRM основан на условии прочности Кулона-Мора, которое выражается в простом виде следующей формой:

$$К_{уст} = \frac{\tau_{пред}}{\tau_{действ}} = \frac{\sigma_n \cdot tg\varphi + c}{\tau}, \quad (33)$$

где $\tau_{пред}$ - максимально возможная прочность грунта;

$\tau_{действ}$ – минимальное значение сопротивления сдвигу, необходимое для обеспечения равновесия;

c и φ – исходные параметры прочности и σ_n – фактическое нормальное напряжение.

Поскольку рассматривается состояние предельного равновесия, формула (33) может быть выражена как:

$$\tau = \frac{\sigma_n \cdot tg\varphi}{К} + \frac{c}{К} \quad , \tag{34}$$

где К – итерационный коэффициент снижения параметров прочности, изменяющийся в процессе расчета.

Последовательность расчета следующая: коэффициенту снижения прочности (К) присваивается значение К=1. В ходе расчета К, как правило, увеличивается, при этом сопротивление сдвигу и деформация оцениваются на каждом этапе до наступления разрушения (потеря сходимости решения), что соответствует критерию Кулона-Мора вида:

$$\tau = \sigma_n \cdot tg\varphi_r + c_r, \tag{35}$$

где c_r и φ_r – параметры прочности, сниженные в ходе расчета до минимальных значений, достаточных для поддержания равновесия:

$$c_r = \frac{c}{К} \tag{36}$$

$$tg\varphi_r = \frac{tg\varphi}{К} \tag{37}$$

23.3 Результаты вычислений приводятся в виде графиков (рисунок 31), на которых показано влияние коэффициента снижения прочности (К) на смещение контрольной точки (узла сетки конечных элементов). В качестве расчетной необходимо выбрать точку, расположенную на смещаемой части (например, нижняя бровка потенциально неустойчивого откоса). Если в результате конечно-элементного расчета произойдет потеря сходимости расчета, то график примет горизонтальное положение и коэффициент снижения прочности будет соответствовать коэффициенту устойчивости К=$К_{уст}$. В том случае, если точка для построения графика находится вне области оползневого смещения, величина

коэффициента снижения прочности К должна оставаться неизменной (допускаются небольшие колебания ΔК=±0,1) в течение не менее 50 шагов расчета. Поверхность скольжения при использовании МКЭ формируется во время расчета.

Необходимо контролировать достаточность количества шагов расчета для достижения постоянного значения коэффициента устойчивости (выход графика «К – шаг расчета» на «полку» параллельную оси, соответствующей шагам расчета, см. рис. 29).

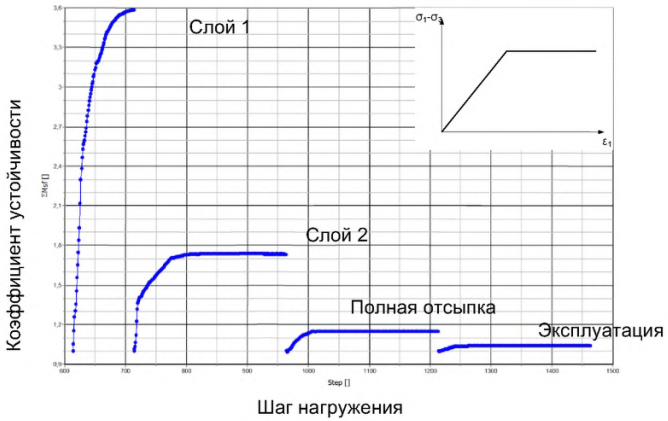

Рисунок 29 – Зависимость перемещения контрольного узла от коэффициента снижения прочности К

Основная краткая информация об этой стадии моделирования приведена в таблице 8.

23.4 Расчеты устойчивости методами предельного равновесия (Моргенштейн-Прайс, Бишоп, Спенсер и др.) в программах численного моделирования, работающих на основе МКЭ, не рекомендуются к использованию, поскольку основаны на природном напряженном состоянии (К0, OCR) и не могут представлять альтернативу методу SRM. Обязательную проверку необходимо производить методами предельного равновесия в аналитической форме (инженерные программы не относящиеся к МКЭ).

Требуемое значение коэффициента устойчивости определяется на основании [3]

Таблица 8 – Расчёт устойчивости (Safety).

Результат	**Особенности**
Общий коэффициент устойчивости	Рекомендуется активировать опцию Ignore undrained behavior при наличии универсального типа поведения (Undrained A) во избежание нереалистичного роста избыточного порового давления и некорректного изменения прочности в процессе расчета. Необходимо контролировать достаточность количества шагов.
Устойчивость при сейсмическом воздействии	Расчет после дополнительной стадии с активированным сейсмическим воздействием
Коэффициенты надежности	Расчет после дополнительной стадии с активированной опцией **Design approaches**

24 Учет армирующих геосинтетических прослоек

24.1 Выбор армирующей геосинтетической прослойки осуществляется в соответствии с рекомендациями ОДМ 218.2.046-2018 и с учетом классификации, изложенной в ГОСТ Р 55028-2012. Поведение геосинтетических материалов при растяжении разнообразно и определяется, прежде всего, исходным сырьем. Оценка поведения геосинтетического материала при растяжении определяется его осевой жесткостью EA, как величиной, включающей две характеристики: усилие F и удлинение ε.

В программах численного моделирования должен присутствовать отдельный элемент, предназначенный для моделирования геосинтетических материалов. Свойства этого элемента должны включать следующее:

- упругое и упругопластическое поведение;

- осевая жесткость EA, при отсутствующей изгибной EI;

- предельное значение уровня напряжений, определяющее переход в состояние пластического течения.

24.2 Для учета работы геосинтетического материала во времени (ползучесть) рекомендуется использовать элемент с такими возможностями как:

- нелинейное поведение (ввод графика «усилия-деформация»);

- кратковременная и долговременная осевая жесткость;

- вязкость для описания деформаций ползучести.

24.3 Параметры расчетного элемента

Расчетное описание поведение геосинтетического материала при моделировании должно быть задано упругопластическим и обязательно включать две характеристики:

- предельное расчетное усилие;

- осевую жесткость ЕА.

24.4 Предельное расчетное усилие в случае расчета на длительный срок принимается равным длительной прочности $T_{дл}$, с учетом всех требуемых коэффициентов снижения прочности и коэффициента ползучести К2 на срок 114-120 лет (ПНСТ 318-2018). В случае кратковременной оценки принимается прочность с учетом требуемых понижающих коэффициентов, учитывающих только факторы, оказывающие влияние в период транспортировки, хранения и укладки, а также коэффициент ползучести К2 для расчетного срока.

24.5 Значение осевой жесткости ЕА является коэффициентом пропорциональности между растягивающим усилием и удлинением (рисунок 30), его применение предполагает линеаризацию графика «усилие-деформация». Осевая жесткость определяется по формуле:

$$\mathrm{EA} = F/\varepsilon\,, \tag{38}$$

где F – растягивающее усилие, кН;

ε – удлинение, соответствующее усилию F, д.е.

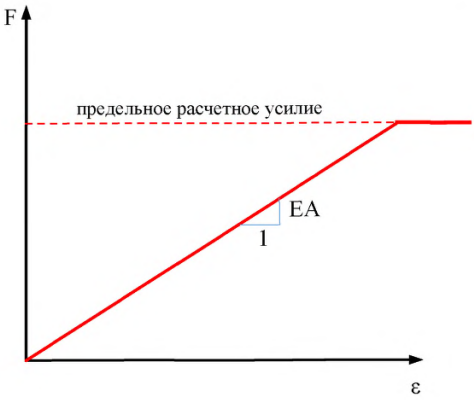

Рисунок 30 – Осевая жесткость EA на графике в осях: растягивающее усилие – относительная деформация

Поведение геосинтетических материалов под нагрузкой, как правило, нелинейно, а величина осевой жесткости подразумевает линеаризацию кривой испытаний, поэтому выбор величины растягивающего усилия для определения осевой жесткости должен быть обоснован степенью точности описания линией с наклоном 1:EA лабораторной кривой.

Выбор расчетного значения осевой жесткости связан с расчетным уровнем напряжений в армирующем элементе, что требует выполнения предварительных расчетов, а также связан с характером кривой графика усилие-деформация для конкретного вида материала и должен быть осуществлен, на основе анализа лабораторных испытаний геосинтетического материла. Для примера на рисунке 31 приведены результаты испытаний геосинтетического материала из полиэфирных нитей с прочностью на разрыв 50 кН/м (относительное удлинение при разрыве 12,5%).

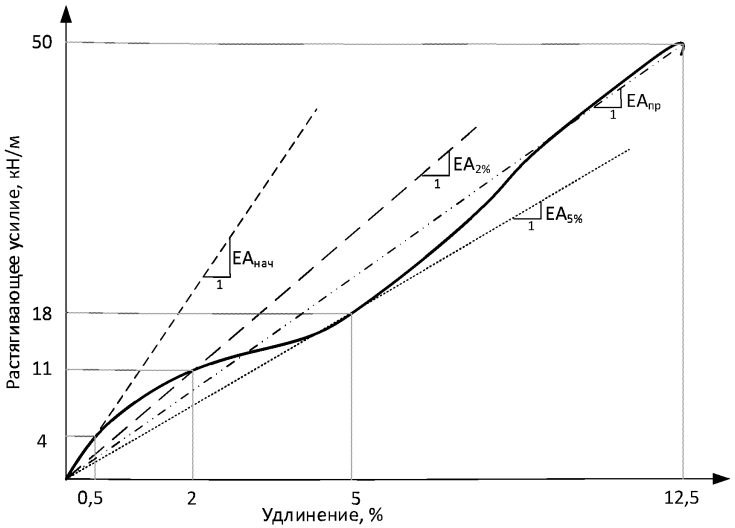

Рисунок 31 – Выбор осевой жесткости ЕА (пример)

Для приведенного примера получены следующие варианты осевой жесткости:

$$EA_{(нач)} = F_{нач}/\varepsilon_{нач} = 4 \text{ кН/м} / 0{,}005 = 800 \text{ кН/м}$$

$$EA_{(2\%)} = F_{2\%}/\varepsilon_{2\%} = 11 \text{ кН/м} / 0{,}02 = 550 \text{ кН/м}$$

$$EA_{(5\%)} = F_{5\%}/\varepsilon_{5\%} = 18 \text{ кН/м} / 0{,}05 = 360 \text{ кН/м}$$

$$EA_{(пр)} = F_{пр}/\varepsilon_{пр} = 50 \text{ кН/м} / 0{,}13 = 384 \text{ кН/м}$$

В рассмотренном случае допустимо выбрать для расчета осевую жесткость при 5% удлинении, линейная зависимость которой обеспечит наибольшие значения удлинения при любых растягивающих усилиях (в запас). Для более точного учета осевой жесткости в конкретном проекте могут быть приняты другие варианты при соответствующем обосновании, например, $EA_{2\%}$ при контроле относительной деформации в армирующем элементе.

24.6 В тех случаях, когда зависимость «усилие-удлинение» для геосинтетического материала имеет явно выраженный нелинейный характер с не аппроксимируется линией, рекомендуется использовать для расчета нелинейное

поведение путем задания этих параметров в наборе свойств элемента, описывающего армирующую прослойку.

При использовании материалов из полиэфирных нитей допускается пользоваться графиками, подобными приведенному на рисунке 32 для назначения параметров армирующего элемента по паспортной прочности. Однако в каждом конкретном случае необходимо определять длительную прочность $T_{дл}$ в зависимости от конкретных условий проекта в соответствии с ПНСТ 318-2018.

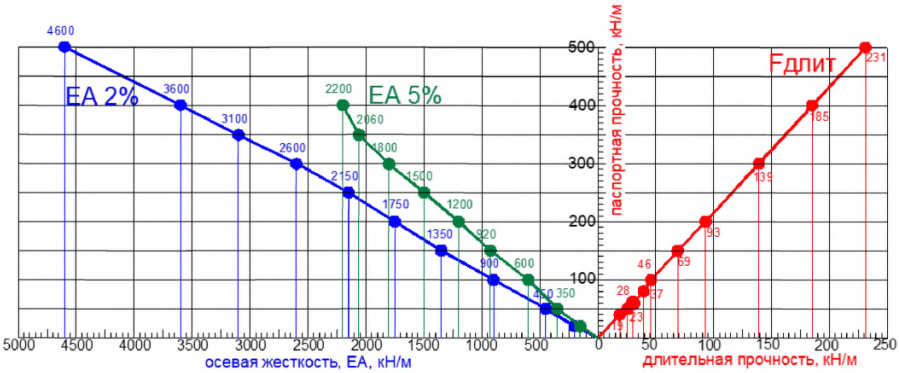

Рисунок 32 – Графики для определения длительной прочности и осевой жесткости, соответствующих определенной паспортной прочности для полиэфирных материалов

Последовательность действий при выполнении расчетов:

1. В первом приближении назначается армирующая прослойка с паспортной прочностью, например, 100 кН/м.
2. В программу вводятся два обязательных параметра – осевая жесткость (для рассматриваемого примера $EA_{5\%}$=600 кН/м) и длительная прочность $T_{дл}$=46 кН/м.
3. Осуществляется расчет напряженно-деформированного состояния и оценка устойчивости.
4. По результатам вычисления коэффициента устойчивости делается вывод: при недостаточном значении Куст выбирается другая паспортная прочность и соответствующие ей осевая жесткость EA и длительная прочность $T_{дл}$, расчет

повторяется до получения величины коэффициента устойчивости более требуемого или равного ему.

24.7 При выполнении моделирования конструкций с использованием геосинтетических армирующих прослоек рекомендуется учитывать их взаимодействие с вмещающим грунтом (контактное взаимодействие элементов). Необходимость учета контактного взаимодействия определяется в каждом конкретном случае на основе сопоставления результатов расчета с учетом контактных элементов и без них.

Контактное взаимодействие задается при помощи специальных контактных элементов (interface), предназначенных для разрыва сплошности конечно-элементной сетки. Это элемент нулевой толщины, отражающий взаимоотношение между контактным напряжением и относительным изменением перемещений вдоль контакта. Для понижения параметров взаимодействия рекомендуется задавать нулевое сцепление и коэффициент трения tgφ с учетом понижающего коэффициента R. Величина коэффициента трения определяется для каждого материала по данным производителя. В случае отсутствия информации могут быть приняты следующие значения:

- георешетка в щебне – R=1;
- георешетка в песчаном грунте – R=0,9;
- геополотно в песчаном грунте – R=0,7;
- геополотно в глинистом грунте – R=0,6;

Применение элементов контактного взаимодействия необходимо при моделировании конструкций усиления в виде полотен, уложенных без устройства обратного анкера.

24.8 Оптимизация прочности армирующей прослойки

Алгоритм выполнения численного расчета для оценки возможности снижения избыточной прочности армирующих прослоек с использованием КГМ и универсального типа поведения по условиям дренирования:

1. Получение в лаборатории дренированных, эффективных параметров прочности (C’ φ') по трехосным консолидировано-дренированным (КД) или консолидированно-недренированным (КН) испытаниям.
2. Выполнение проверки расчетной схемы с использованием для слабого грунта комплексной геомеханической модели (например, SoftSoil) и универсального типа поведения по условиям дренирования (Undrained A) по прочности для верхней (эффективная) и нижней (недренированная) границы.
3. Выполнение расчетов с варьированием временем стадийности отсыпки и параметрами прочности геосинтетических прослоек.

23.9 Пример зависимости прочности армирующей прослойки от времени выдержки первого слоя, для обеспечения устойчивости насыпи (Куст=1,3) показано на рисунке 33.

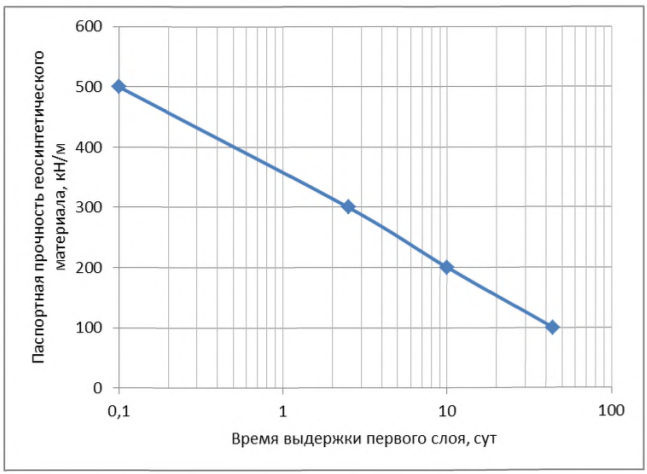

Рисунок 33 – Пример зависимости требуемой прочности армирующей прослойки от времени выдерживания нижних слоев насыпи (полулогарифмические координаты)

25 Рекомендуемая последовательность выполнения расчетов

Анализ исходных данных производится в последовательности, указанной в таблице 9.

Таблица 9 – Последовательность подготовки исходных данных

№ п.п.	Испытание	Параметры	Применение	Описание
1	компрессионные	σ_p	параметры POP, OCR, расчет начальной стадии	природное напряженное состояние
	трехосные (камера тип Б)	K_0		
	полевые: статзондирование, дилатометр	OCR, K_0		
2	компрессионные	λ^* (Cc) κ^*(Cs) E_{oed}^{ref}	расчет осадки	параметры жесткости
	трехосные	E_{50}^{ref}, E_{ur}^{ref}		
3	трехосные (КН, НН)	C_u, ΔC_u (на метр глубины)	расчет устойчивости в строительный период	параметры прочности для нестабилизированного состояния
	крыльчатка			
4	трехосные (КН, КД)	C', φ'	расчет устойчивости в эксплуатационный период	параметры прочности для стабилизированного состояния
5	консолидационные	Cv ($K_ф$ и C_k) Cα	время реализации осадки	первичная и вторичная консолидация

Примечание: все параметры могут быть получены по результатам полевых испытаний.

Расчет производится в следующей последовательности:

1. Расчет природного напряженного состояния в соответствии с рекомендациями пункта 20.

2. Проверка устойчивости насыпи в строительный период производится в соответствии с рекомендациями [3] без учета упрочнения грунта во время возведения насыпи (консервативная оценка). Расчет НДС выполняется в соответствии с рекомендациями пункта 21.2 подпункт 1 (**консервативная оценка**). Определяется возможность возведения насыпи на полную высоту без

мероприятий по усилению (*одностадийный* расчет). Устойчивость определяется по пункту 23.1 подпункт 1 (**консервативная оценка**).

3. Моделирование возведения насыпи с учетом технологического графика производства работ (*многостадийный* расчет) в соответствии с пунктом 22.3 подпункт 1 (**генерация избыточного порового давления**). Расчет производится варьированием длительности моделирования отсыпки насыпи для каждого слоя, нижние слои предпочтительнее отсыпать более продолжительное время (пункт 24.8).

4. Проверка устойчивости насыпи в строительный период после расчета, учитывающего упрочнение грунта (в зависимости от времени отсыпки) производится в соответствии с пунктом 23.1 подпункт 3 (**оценка частично стабилизированного состояния**).

5. Определяется время консолидации в зависимости от выбранного критерия (пункт 22.2) в соответствии с положениями пункта 22.3 подпункт 2 (**расчет времени консолидации**) и пункта 22.4 (**построение графиков**). Этот расчет позволяет определить стабилизированную (условно конечную) осадку.

6. Проверка устойчивости в эксплуатационный период производится в соответствии с рекомендациями пункта 21.2 подпункт 3 (**оценка влияния транспортной нагрузки**) и пункта 23.1 подпункт 2 (**оценка стабилизированного состояния**).

7. Дополнительно может быть выполнен расчет осадки для сопоставления с аналитическим способом (без учета влияния сдвиговых деформаций слабого грунта в процессе отсыпки) в соответствии с пунктом 21.2 подпункт 2 (**вычисление конечной осадки**). Полученные этим способом результаты будут иметь меньшую величину осадки по сравнению с расчетом, учитывающим боковые деформации.

На рисунке 34 показан пример выполнения расчета в программе PLAXIS, включая все требуемые параметры.

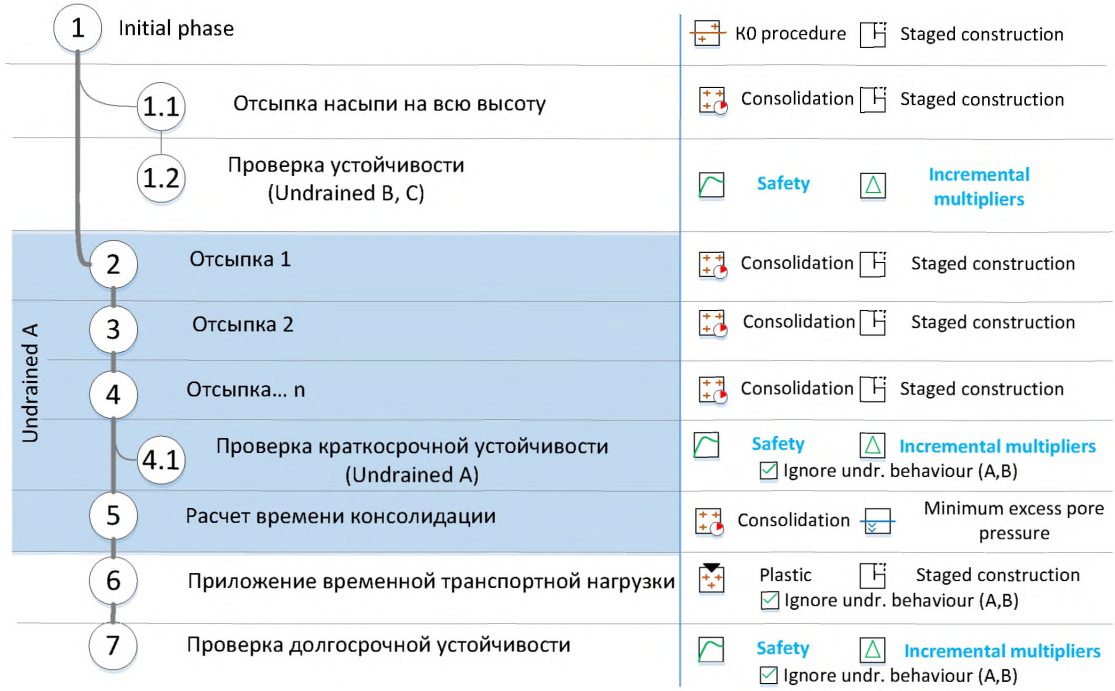

Рисунок 34 – Пример последовательности расчета для программного комплекса PLAXIS

26 Общие рекомендации по учету ленточных геодрен

26.1 При строительстве автомобильных дорог и других инженерных сооружений на слабых водонасыщенных грунтах часто возникает задача ускорения осадки насыпей, сокращения сроков консолидации слабого грунта в основании. Одним из наиболее известных методов ускорения уплотнения слабого грунта является вертикальное дренирование слабой толщи путем образования под подошвой сооружения вертикальных дренажных элементов для выхода воды, отжимаемой из основания под массой насыпи.

Ускорение осадки насыпи происходит за счет сокращения пути фильтрации воды, отжимаемой из слабого грунта под воздействием веса насыпи. В насыпях без геодрен время прохождения полной осадки насыпи может составлять несколько лет, при применении геодрен длина пути фильтрации воды значительно уменьшается и составляет половину расстояния между геодренами, что позволяет сократить время прохождения осадки до нескольких месяцев. При необходимости

может устраиваться дополнительная пригрузка насыпи слоем грунта, который, в последующем, используется для отсыпки насыпи.

26.2 Область применения, принципы выбора и требования к вертикальным дренам изложены в [3]. Шаг расстановки определяется по аналитическим методикам, а в ходе численного моделирования производится оценка влияния вертикального дренирования на скорость осадки и прочностные свойства грунта.

26.3 Одним из отличий численных расчетов от аналитических является распределение избыточного порового давления в слабой толще, в то время как в аналитических методиках предполагается постоянное значение по всей глубине слоя. В зависимости от области формирования избыточного порового давления корректируется длина дрен.

26.4 Фактически, консолидация грунта вокруг отдельной вертикальной дрены происходит радиально или трехмерно. Однако, метод конечных элементов обычно идеализирует условие дренажа в условиях плоской деформации, рассчитывая его эквивалентный поток. Коэффициент перехода из трехмерной задачи для определения эквивалентной горизонтальной проницаемости в условиях плоской модели определяется по формуле:

$$К_{пд} = \frac{0.67}{[\ln(n) - \frac{3}{4}]}, \quad (39)$$

где n – параметр, определяемый по формуле:

$$n = \frac{d_e}{d_w}, \quad (40)$$

где d_e – диаметр зоны воздействия, определяется в зависимости от выбранной схемы установки: для квадратной: $D_e = 1{,}13 \cdot l$; для треугольной: $D_e = 1{,}05 \cdot l$, где l – шаг расстановки; d_w – диаметр дрены, определяется по формуле:

$$d_w = \frac{2(b+t)}{\pi}, \quad (41)$$

где b – ширина геодрены, м;

t – толщина геодрены, м.

При использовании 3D-программ, схема вертикальных дрен вносится в расчетную схему как есть, без необходимости рассчитывать эквивалентный поток в 2D. Расчеты выполняются в соответствии с положениями раздела 25.

Приложение А
(справочное)
Таблица полевых методов

Таблица А.1 – Области применения полевых методов испытаний

Результат	Статическое зондирование, CPTu	Динамическое зондирование, SPT	Крыльчатка	Прессиометр	Дилатометр
Вид грунта	+++	+	++	++	++
Угол внутреннего трения, φ	++	+		+	+
Степень плотности, I_D	+++	++		+	++
Недренированное сопротивление сдвигу, Cu	++	+	+++	+	+
Поровое давление, U	+++				++
Коэффициент переуплотнения, OCR	+++	+	++	+	++
Модуль деформации, E	++			+++	+++
Индекс компресии, Cc	++			++	+
Коэффициент консолидации, Cv	+++				
Коэффициент фильтрации, kф	++				
Разжижаемость	+++	+++		+	++
Разрез	+++	+			+

Примечания: «+++» - метод наиболее предпочтителен, «++» - метод применим, «+» - метод может быть использован в крайнем случае при отсутствии другой возможности.

Приложение Б
(справочное)
Комплексные геомеханические модели грунта

Таблица Б.1 – Основные используемые модели грунтов

№	Модель	Обозначение	Краткое описание
1	Linear Elastic	LE	линейно-упругая, линейно-деформируемая, без критерия прочности
2	Mohr-Coulomb	MC	линейно-упругая, линейно-деформируемая, идеально пластичная, с критерием прочности
3	CamClay, Modified CamClay	CC, MCC	шатровая, с объемным упрочнением, нелинейно-деформируемая, без критерия прочности
4	SoftSoil	SS	шатровая, с объемным упрочнением, нелинейно-деформируемая, с критерием прочности Кулона-Мора
5	HardeningSoil, Hardening Mohr-Coulomb, Modified Mohr-Coulomb, Hardening Mohr-Coulomb	HS, HMC, MMC, HMC	шатровые модели, нелинейно-деформируемые, с упрочнением при объемном сжатии и при сдвиге
6	HardeningSoilSmall, General HardeningSoil	HSS, GHS	шатровые модели, нелинейно-деформируемые, с упрочнением при объемном сжатии и при сдвиге, с учетом области малых напряжений и учетом переуплотнения при разгрузке
7	Sekiguchi-Ohta, S1Clay, NGI ADP	SO, S1C, NGI	анизотропные модели для слабых грунтов
8	SoftSoilCreep, Sekiguchi-Ohta	SSC, SO	шатровые с объемным упрочнением, учитывающие ползучесть (вторичная консолидация)
9	Simplified UnDrained Cyclic Accumulation Model	UDCAM-S	Упрощенная модель для недренированного поведения грунта, снижения прочности и жесткости при циклическом нагружении глинистых грунтов и илов и накопления остаточных деформаций при циклических воздействиях (основана на NGI ADP).

Приложение В
(справочное)
Параметры КГМ

Таблица В.1 – Параметры моделей, учитывающих объемной упрочнение и ползучесть

Название параметра	Обозначение	Размерность	Метод проведения испытаний.
Модифицированный коэффициент первичного сжатия	λ^* (Cc)	-	Компрессионные испытания
Модифицированный коэффициент вторичного сжатия (набухания)	κ^*(Cs)	-	Компрессионные испытания
Модифицированный коэффициент ползучести	μ^*	-	Компрессионные испытания
Удельное сцепление	c’	кПа	Трехосное сжатие по консолидированно-дренированной схеме или сдвиговые испытания с наблюдением за поровым давлением и деформациями
Угол внутреннего трения	φ'	°, град.	Трехосное сжатие по консолидированно-дренированной схеме или сдвиговые испытания с наблюдением за поровым давлением и деформациями
Коэффициент переуплотнения грунта или историческая нагрузка	OCR POP	-	Полевые испытания Компрессионные испытания до давлений выше 7 МПа
Коэффициент Пуассона при разгрузке	υ_{ur}	-	Трехосное сжатие по консолидированно-дренированной схеме с разгрузкой и наблюдением за объёмными деформациями
Коэффициент бокового давления грунта в состоянии покоя	K_0	-	Полевые испытания; трехосное сжатие образца с компенсацией бокового расширения (K0 -консолидация)
Угол дилатансии	ψ	°, град.	Трехосное сжатие по консолидированно-дренированной схеме или сдвиговые испытания с наблюдением за поровым давлением и деформациями

Примечание: в скобках указаны альтернативные варианты задания параметров

Таблица В.2 – Параметры моделей, учитывающих объемное и сдвиговое упрочнение

Название параметра	Обозначение	Размерность	Метод проведения испытаний.
Секущий модуль деформации (жесткости)	E_{50}^{ref}	МПа	Трехосное сжатие по консолидированно-дренированной схеме
Касательный одометрический модуль деформации (жесткости)	E_{oed}^{ref}	МПа	Компрессионные испытания в одометре
Секущий модуль деформации (жесткости) при разгрузке	E_{ur}^{ref}	МПа	Трехосное сжатие по консолидированно-дренированной схеме с разгрузкой или компрессионные испытания в одометре с разгрузкой
Удельное сцепление	c’	кПа	Трехосное сжатие по консолидированно-дренированной схеме или сдвиговые испытания с наблюдением за поровым давлением и деформациями
Угол внутреннего трения	φ'	°, град.	Трехосное сжатие по консолидированно-дренированной схеме или сдвиговые испытания с наблюдением за поровым давлением и деформациями
Коэффициент Пуассона при разгрузке	υ_{ur}	- *	Трехосное сжатие по консолидированно-дренированной схеме с разгрузкой и наблюдением за объёмными деформациями
Коэффициент бокового давления грунта в состоянии покоя	K_0	- *	Полевые испытания; трехосное сжатие образца с компенсацией бокового расширения (K0 -консолидация)
Коэффициент переуплотнения грунта или историческая нагрузка	OCR POP	-	Полевые испытания Компрессионные испытания до давлений выше 7 МПа
Степенной показатель зависимости жесткости от уровня напряжений	m	- *	Трехосное сжатие по консолидированно-дренированной схеме при различных боковых давлениях или компрессионные испытания
Угол дилатансии	ψ	°, град.	Трехосное сжатие по консолидированно-дренированной схеме или сдвиговые испытания с наблюдением за поровым давлением и деформациями

Приложение Г
(справочное)
Пример определения природного напряженного состояния

Для примера на рисунке Г.1 показан грунтовый разрез с нанесенными графиками бытовых напряжений и определенных для каждого слоя в компрессионных испытаниях (справа) значений давления предварительного уплотнения σ_p.

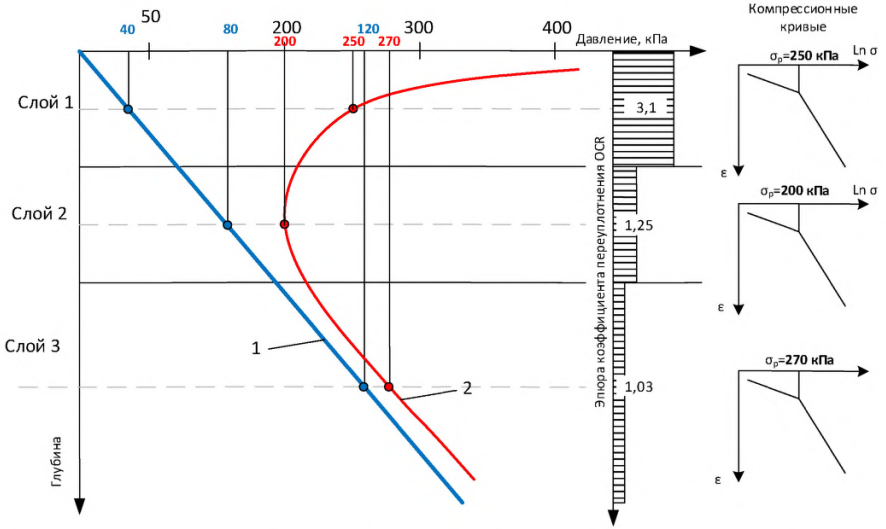

Рисунок Г.1 – Линии бытовых напряжений (1) и исторических напряжений (2) по глубине (а) и схематичные результаты компрессионных испытаний в полулогарифмической шкале для каждого слоя (б)

Далее для средней глубины каждого слоя определяют коэффициент переуплотнения OCR (5) и соответствующее значение коэффициента K_0 (10):

- для первого слоя

$$OCR = \frac{\sigma_p}{\sigma_v} = \frac{250}{80} = 3.1$$

$$K_0 = 0.54\sqrt{3.1} = 0.95$$

- для второго слоя

$$OCR = \frac{200}{160} = 1.25$$

$$K_0 = 0.54\sqrt{1.25} = 0.6$$

- для третьего слоя

$$OCR = \frac{270}{260} = 1.03$$

$$K_0 = 0.54\sqrt{1.03} = 0.54$$

Определенные таким образом значения коэффициента переуплотнения вносятся в соответствующую КГМ грунта для каждого ИГЭ, эпюра коэффициента OCR показана на рисунке Г1.

Приложение Д
(рекомендуемое)
Выбор моделей и параметров расчета

Таблица Д.1 – Рекомендации по совместимости моделей грунта, типов поведения и параметров расчета

Результат	Тип поведения	Тип расчета	Модель грунта	Влияние параметров прочности	Примечание
Конечная осадка (для сопоставления с аналитическим расчетом)	Дренированный (Drained); Универсальный (Undrained A) + Ignore undrained behavior	1) НДС (Plastic)	LE	результаты близкие к аналитическим методам расчета с постоянным модулем деформации и без учета бокового отжатия.	Точность зависит от степени разделения слоев при назначении модуля деформации.
			MC	При использовании начальных параметров прочности ($C_{нач}$, $\varphi_{нач}$) завышает осадку; при использовании эффективных (C', φ') занижает осадку (не учитывает сдвиговые деформации и боковое отжатие слабых грунтов).	
			SS		-
			HS		-

Продолжение таблицы Д1

Результат	Тип поведения	Тип расчета	Модель грунта	Влияние параметров прочности	Примечание
Осадка и время консолидации	Универсальный (Undrained A)	1) Для нагружения - НДС (Plastic), 2) для выдержки - консолидация (Consolidation). Консервативная оценка.	MC	Завышает сопротивление сдвигу в нестабилизированном состоянии (необходим контроль)	Точность зависит от степени разделения слоев при назначении модуля деформации. Только эффективные параметры прочности C', φ'.
			SS	Получаемые высокие значения избыточного порового давления занижают прочность, величина осадки возрастает за счет боковых деформаций.	Только эффективные параметры прочности C', φ'.
			HS		
		1) Для нагружения и выдержки - консолидация (Consolidation)	MC	Завышает сопротивление сдвигу в нестабилизированном состоянии (необходим контроль).	Точность зависит от степени разделения слоев при назначении модуля деформации. Только эффективные параметры прочности C', φ'.
			SS	Наиболее подходящий вариант	Только эффективные параметры прочности C', φ'.
			HS	Наиболее подходящий вариант	

Окончание таблицы Д1

Результат	Тип поведения	Тип расчета	Модель грунта	Влияние параметров прочности	Примечание
Устойчивость	Дренированный (Drained) или универсальный (Undrained A) с опцией Ignore undrained behavior	1)Нагружение - НДС (Plastic), 2) устойчивость (Safety)+Ignore undrained behavior	MC	Все модели имеют одинаковый критерий прочности Кулона-Мора.	Контроль количества шагов для достижения постоянного значения коэффициента К=Куст
			SS		
			HS		
	Недренированный (Undrained B, C) Консервативная оценка	1) Нагружение - НДС (Plastic), 2) устойчивость (Safety)+Ignore undrained behavior	MC	Выполняется для сопоставления с результатами расчетов по аналитическим зависимостям	Поровое давление некорректное, расчет консолидации не выполняется
			HS		
	Универсальный (Undrained A)	1) Нагружение - НДС (Consolidation), 2) устойчивость (Safety)+Ignore undrained behavior	MC	Завышает сопротивление сдвигу в нестабилизированном состоянии (необходим контроль).	Контроль количества шагов для достижения постоянного значения коэффициента К=Куст
			SS	Наиболее подходящий вариант	
			HS	Наиболее подходящий вариант	
Транспортная нагрузка	Дренированный (Drained) или недренированный с опцией Ignore undrained behavior	НДС (Plastic) после расчета времени консолидации	MC, SS, HS	-	-

Библиография

[1] Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. Пенза: ПГУАС, 2008. 696 с.

[2] Основания и фундаменты. Под ред. Леонардаса Д.А., перевод с англ. Гольдштейна М.Н., М.: 1968.

[3] Пособие по проектированию земляного полотна автомобильных дорог на слабых грунтах. - М., 2004. - 205 с.

[4] Рекомендации по методам определения коэффициентов бокового давления и поперечного расширения глинистых грунтов. НИИОСП, Москва, 1978.

[5] Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике /А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

[6] Brinkgreve, R.B.J., Broere, W., Waterman, D. Plaxis 2D-version 9. Finite Element Code forSoil and Rock Analyses. User Manual. 2009 th ed. Rotterdam: Balkema, 2008.

[7] Mayne P.W., Coop M.R., Springman S., Huang A-B., Zornberg J. State-of-the-art paper (SOA-1): Geomaterial behavior and testing //Proceedings of the 17-th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Alexandria, Egypt, 2009. V. 4. P. 2777-2872.

gost.e-ecolog.ru