

Введение

Полевые испытания грунтов являются одним из этапов инженерно-геологических исследований. Они проводятся для определения физических и механических характеристик природных грунтов или контроля качества работ и проектных значений характеристик грунтов при устройстве земляных насыпей, плотин, дамб, откосов, обратных засыпок котлованов, подпорных стен и др. Вследствие многообразия природных грунтов и условий их залегания, используются различные методы испытаний для дисперсных, скальных и мерзлых грунтов (область применения методов полевых испытаний грунтов приведена в прил. А, Б).

В одной из своих работ Ребрик Б.М. (1973) приводит сведения об объемах и видах полевых исследований в СССР по состоянию на 1969 год «...В 1969 году из 200 обследованных организаций полевые методы применяли не более 60. Почти весь комплекс полевых исследований выполняют ПНИИИС, КазГИИЗ, тресты инженерно-строительных изысканий Госстроя РСФСР, Мосгоргеотрест, Гидропроект». Он также отметил основные причины незначительных объемов использования полевых методов:

1. Отсутствие единых методик проведения и интерпретации получаемых результатов испытаний;
2. Отсутствие необходимых технических средств;
3. Отсутствие утвержденных нормативных документов.

Сегодня производители, как отечественные, так и зарубежные, предлагают разнообразные технические средства, включающие современное оборудование и измерительные системы, в том числе и с применением беспроводной связи. Можно считать, что данная проблема решена, вопрос только в стоимости оборудования.

Проблема отсутствия нормативной документации также практически решена. Разработаны вновь или перерабатываются уже существующие ГОСТы на полевые испытания грунтов. Однако, если сравнить российские стандарты и стандарты ряда зарубежных стран (см. табл. 1.3), то можно увидеть, что в России до сих пор не используются некоторые методы полевых испытаний, которые широко применяются за рубежом. Далее, если просмотреть содержание наших и зарубежных стандартов, то можно сделать вывод об их существенном различии. В последних более детально прописана процедура полевых испытаний. Для сравнения можно взять проект последнего актуализируемого ГОСТ 20276 и стандарты США ASTM D 4719, D5778. Они различны не только по содержанию, но и по объему. Так, стандарт США D 4719 «Прессиометрические испытания» состоит из 9 страниц и 11 графиков, а стандарт D 5778 на испытания элект-

трическим и пьезоконусом – из 19 страниц и 8 графиков, то в нашем ГОСТ 20276 раздел «Метод испытания радиальным прессиомером» содержит 6 страниц и ни одного графика. Фактически, перерабатываемый вариант ГОСТ ничем не отличается от предыдущего, несмотря на то, что с момента введения его в действие прошло 14 лет.

К сожалению, следует добавить, что за последние 20 лет не разработано ни одного руководства или методического пособия по полевым методам испытаний грунтов. До сих пор нет стандарта на статическое зондирование с измерением порового давления и оценкой текучести песчаных грунтов.

Значительно хуже выглядит ситуация с интерпретацией результатов полевых испытаний. Сегодня практически все наши изыскатели применяют метод статического зондирования, за что надо выразить «благодарность» государственной экспертизе из-за необоснованной обязательности его применения. На практике этот метод используется только для выделения слоев грунтов и иногда для оценки несущей способности свай. Это объясняется тем, что нет рекомендаций по интерпретации данных измерений при проведении испытаний методом статического зондирования с целью определения физических, деформационных и прочностных характеристик грунтов. В то же время имеется большое количество руководств (FHWA-TS-78-209, 1978; Mayne et al., 2001c; Fugro, 2004; FHWA NHI-05-037, 2006; Robertson, 2006; NCHRP, 2007; SCDOT, 2008; Campanella and Howie, 2008; NYSDOT, 2012; Hunter and Crow, 2012; www.greggdrilling.com и технических публикаций (см. список литературы), которые используют в своей практике зарубежные изыскатели. Опять же, к сожалению, они написаны на английском, а переводы с обзором состояния вопроса не делаются.

В предлагаемой читателю книге рассмотрены только методы полевых испытаний дисперсных грунтов, характерных для Европейской части России, Сибири и Дальнего Востока. Методы полевых испытаний скальных и мерзлых грунтов в данной работе не рассматриваются. Однако читатель может найти их самостоятельно: для скальных грунтов в стандартах США (приложение Б); для мерзлых грунтов – в стандартах России.

В отечественной и зарубежной практике при проведении полевых испытаний дисперсных и скальных грунтов используются национальные стандарты, а в Европейском союзе, кроме национальных стандартов, применяются общие для всех 28 стран единые требования, изложенные в Еврокодах ENV 1997-2 (2007), ENV 1997-1 (1994) и ENV 1998-1. Перечень основных отечественных и зарубежных стандартов полевых испытаний грунтов приведен в приложении В.

Материал книги основан на публикациях из различных отечественных, и преимущественно, зарубежных источников. В первую очередь, это национальные стандарты различных стран, рекомендации и руководства, по

проведению самих испытаний и интерпретации их результатов для целей проектирования.

Автор настоящей работы предлагает читателям постепенно, шаг за шагом, изучить основные методы, приборы и оборудование, а также способы интерпретации результатов испытаний, применяемые при проведении полевых испытаний грунтов в России и за рубежом. Книга представляет собой справочное пособие и может быть полезна как при изучении методов полевых испытаний грунтов, так и при проведении реальных инженерно-геологических изысканий.

Формат книги в виде вопросов и ответов выбран для краткого, но в тоже время, полноценного знакомства читателей с основными технологиями, которые применяются в настоящее время при проведении полевых исследований грунтов. Большинство приведенных вопросов являются ответами на вопросы слушателей курсов повышения квалификации по направлению «Инженерно-геологические изыскания», которые проводит автор данной работы в течение последних 10 лет при Пензенском государственном университете архитектуры и строительства. Автор взял на себя смелость познакомить отечественных изыскателей с современными зарубежными методами полевых испытаний грунтов, которые изложены в многочисленных научных статьях, рекомендациях и стандартах.

Автор работы выражает свою признательность д-ру техн. наук В.В. Лушникову и канд. техн. наук В.И. Каширскому за материалы, любезно предоставленные ими для включения в данную работу.

Полагаем, что данная книга будет полезна не только сотрудникам изыскательских компаний, но и студентам и аспирантам при изучении курса «Механика грунтов, основания и фундаменты».

Глава 1. Общие положения

1.1. Почему в России непопулярны полевые испытания грунтов?

Несмотря на то что полевые испытания дают более достоверные значения определяемых характеристик грунтов, в России они применяются в ограниченном объеме, за исключением, быть может, испытаний методом статического зондирования. В тоже время, при проведении испытаний зондированием за рубежом, исследователи получают больший объем информации по сравнению с подобными исследованиями в Российской Федерации.

Нежелание проводить полевые испытания объясняется сравнительно просто. Заказчик не хочет нести дополнительные затраты, так как стоимость и продолжительность некоторых полевых испытаний значительно выше по сравнению с лабораторными испытаниями. В тоже время, и сами изыскатели ведут себя пассивно при составлении технического задания на инженерно-геологические изыскания, идя на поводу у заказчика. Из наших опросов, проводимых на курсах повышения квалификации сотрудников изыскательских организаций при Пензенском государственном университете архитектуры и строительства, следует, что сами изыскатели не могут убедительно доказать заказчику целесообразность проведения полевых испытаний грунтов.

Однако убедить заказчика не представляет сложности в том случае, если вы хорошо знаете, как и для чего вы проводите полевые и лабораторные испытания грунтов. Дело в том, что полученные в ходе полевых исследований грунтов значения физических и механических характеристик отличаются от получаемых лабораторными методами. Например, модуль деформации грунтов, определенный в лаборатории в условиях компрессионного сжатия оказывается до 6 раз меньше модуля деформации, найденного из испытаний грунта плоским штампом площадью 5000 см^2 . Так сложилось, что в России полевые испытания штампами являются эталоном при определении деформационных свойств грунтов. В Еврокоде 7, часть 2 (EN 1997-2, 2007) прямо говорится о том, что значения той или иной характеристики грунтов должны находится из корреляционных связей различных типов испытаний, включая, в том числе, лабораторные и полевые испытания грунтов.

Большинство опрошенных на курсах слушателей не используют при обосновании необходимости проведения полевых испытаний требования СП 22.13330 (2011) «Основания зданий и сооружений» и СП 24.1333 (2011) «Свайные фундаменты». Самое удивительное, что при проведении государ-

ственной экспертизы инженерно-геологических изысканий эксперты, в большинстве случаев, не принимают во внимание требования данных СП, в части обязательности штамповых испытаний. Обязательным, по их мнению, является применение метода статического зондирования, который не применим без привязки известных корреляционных зависимостей для определения прочностных и деформационных свойств грунтов на исследуемой площадке изысканий. Напротив, метод испытаний штампами без всяких переходов дает значение модуля деформации, который используют при расчете осадки фундаментов для всех уровней ответственности зданий и сооружений. В настоящее время требования СНиП 2.02.01-83* (СП 22.13330.2011) и СНиП 2.02.03-85 (СП 24.13330.2011) никто не отменял. Мало того, 21 июня 2010 года за № 1047-р вышло распоряжение Правительства РФ, в котором в соответствии с частью 3 статьи 42 Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» приведен перечень национальных стандартов и сводов правил, применение которых обязательно в России. В этот перечень включен СНиП 2.02.01-83*, требования которого обязательны к выполнению по Закону № 384 от 30 декабря 2009 года «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». Этот СНиП положен в основу СП 22.13330. В последнем, в разделе 5.3, четко говорится о необходимости проведения полевых испытаний грунтов с целью уточнения результатов лабораторных испытаний грунтов.

Далее, при убеждении заказчика, следует ему показать, что из результатов только лабораторных испытаний, если отказаться от штамповых испытаний, будут получены заниженные значения модуля деформации и далее, исходя из полученных «плохих грунтовых условий», при проектировании конструктор разработает «наилучший», более дорогой вариант фундаментов. Практика показывает, что при затратах на полевые испытания винтовым штампом в 120000 рублей на площадку изысканий можно избежать затрат на нулевой цикл в несколько миллионов рублей. В любом случае, экономия составит не менее 2-3 млн на 12-16 этажный жилой дом.

1.2 Какие требования следует учитывать при составлении технического задания на полевые изыскания?

В первую очередь, это требования отмеченных выше нормативных документов: СП 47.13330, СП 22.13330, СП 24.13330, как наиболее часто применяемые при изысканиях и проектировании оснований зданий и сооружений.

Из СП 47.13330 можно получить информацию об основных требованиях и к объему инженерно-геологических изысканий, а из СП 22.13330, СП 24.13330 найти, какие физические и механические характеристики необходимо определить для расчета оснований по двум группам предельных состояний по несущей способности или деформации основания. Расчет по

деформации основания или осадки фундаментов выполняется во всех случаях, за исключением скальных грунтов, в то время, как расчет несущей способности выполняется только при действии наклонных или горизонтальных нагрузок на фундаменты и при проектировании зданий на природных склонах грунта. В первом случае достаточно определить модуль деформации для слоев грунта на глубину активной зоны сжатия и прочностные характеристики: дренированный угол внутреннего трения и силы удельного сцепления только для слоя грунта под подошвой фундамента. Во втором случае, необходимо определить прочностные характеристики: дренированный угол внутреннего трения и силы удельного сцепления для слоев грунта в пределах предполагаемой призмы выпора (фундамент) или сползания (склон, дамба, насыпь). В связи с тем, что размер призмы разрушения изыскателю неизвестны, то определяющим при назначении глубины изысканий является глубина активной зоны сжатия, которая используется при расчете осадки всех фундаментов. Отсюда, определяющей расчетной характеристикой грунта является модуль деформации и от достоверности его определения зависит надежность будущих расчетов осадки.

Ниже приведены выдержки из новой редакции СП 47.13330, подтверждающие необходимость полевых исследований и отражающие основные требования к полевым испытаниям грунтов:

«...6.3.9 Полевые испытания грунтов выполняют в соответствии с ГОСТ 30672. Выбор метода полевых испытаний зависит от состава, строения и состояния изучаемых грунтов, целей исследований, категории сложности инженерно-геологических условий, проектных нагрузок, глубины заложения, условий эксплуатации оснований зданий и сооружений, типов проектируемых фундаментов и методов их расчета. Общие рекомендации по выбору методов и соответствующие стандарты приведены в приложении Ж.

Комментарий 1. Выбор метода полевых испытаний зависит в первую очередь от того, какие методы расчета оснований будет использовать проектировщик. Как было отмечено выше, это зависит от вида расчета по предельным состояниям. В СП 22.13330 и СП 24.13330 приведены формулы для расчета: осадки, расчетного сопротивления грунта, предельной нагрузки на основание, несущей способности свай и др., которые являются аналитическими или инженерными решениями, рекомендуемые к применению. В эти формулы входят параметры, характеризующие физические, деформационные и прочностные свойства грунтов. Следует иметь в виду, что в существующих стандартах на испытания грунтов эти параметры называются характеристиками. Список параметров приведен в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Параметры, применяемые при проектировании оснований зданий и сооружений с использованием решений СП и СНиП

Наименование СНиП, СП, рекомендаций	Проектируемый тип фундаментов, оснований, сооружений	Используемые параметры механических свойств грунтов
СП 22.13330.2011 «СНиП 2.02.01-83* Основания зданий и сооружений»	Фундаменты мелкого заложения в обычных и структурно-неустойчивых грунтах; основания опор линий электропередачи; искусственные основания	– модуль общей деформации E_0 ; упругий модуль E ; коэффициент Пуассона ν ; дренированный угол внутреннего трения φ ; силы удельного сцепления c
СП 24.13330.2011 «СНиП 2.02.03-85 Свайные фундаменты»	Сваи и свайные фундаменты	То же и: – упругий модуль сдвига G
СП 26.13330.2012 «СНиП 2.02.05-87 Фундаменты машин с динамическими нагрузками»	Фундаменты машин с динамическими нагрузками	То же
СП 23.13330.2011 «СНиП 2.02.02-85 Основания гидротехнических сооружений»	Основания гидротехнических сооружений	То же и коэффициент консолидации, c_v давление предварительного уплотнения, σ_p ; параметры ползучести
СП 39.13330.2012 «СНиП 2.06.05-84* Плотины из грунтовых материалов»	Проектирование плотин из грунтовых материалов	То же и коэффициент фильтрации k ; прочность на одноосное растяжение; коэффициент консолидации; коэффициент порового давления

Решения, приведенные в отмеченной нормативной литературе, допускают проектирование оснований зданий и сооружений при давлениях на основание, не превышающих предела пропорциональности зависимости «напряжение – деформация» или, как принято при проектировании оснований, при давлении не более расчетного сопротивления грунта основания. Однако в настоящее время проектирование оснований зданий и сооружений допускается выполнять при давлении на основание более расчетного сопротивления грунта с использованием нелинейных зависимостей между напряжениями и деформациями. В этом случае расчет оснований выполняется с применением численных методов таких, как метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод граничных элементов, метод дискретных элементов. В эти нелинейные зависимости, называемые определяющими уравнениями или моделями грунтов, входят не только параметры, приведенные в табл. 1.1, но и ряд других дополнительных параметров (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Модели грунта и их параметры, применяемые при нелинейном расчете оснований зданий и сооружений

Наименование программы	Модели грунта	Используемые параметры механических свойств грунтов
ABAQUS www.abaqus.com	Линейно и нелинейно-упругие; модели идеальной пластичности – условия прочности Друкера – Прагера, Мора – Кулона; колпачковые модели: Кэм-Клей (Cam-Clay)	Физические, деформационные и прочностные и дополнительные (см. описание моделей в руководствах программ)
ANSYS www.cadfer.com	Линейно- и нелинейно-упругие; модели идеальной пластичности – условия прочности Друкера – Прагера, Треска; КЭП; вязкопластическая	То же
FLAC www.itascacg.com	Линейно и нелинейно-упругие; модели идеальной пластичности – условия прочности Друкера – Прагера; Мора – Кулона; Кэм-Клей; модифицированная Кэм-Клей; вязкопластические; модели ползучести	То же
SLOPE/W SIGMA/W www.geolope.com	Линейно и нелинейно-упругие, анизотропно упругая; Кэм-Клей; модифицированная Кэм-Клей; разупрочняющаяся; модель идеальной пластичности; гиперболическая	То же
PLAXIS www.plaxis.com	Линейно и нелинейно-упругие; модель идеальной пластичности – условие прочности Мора – Кулона; гиперболическая упрочняющаяся; модель ползучести	То же

Параметры моделей грунтов определяют путем испытания образцов грунтов в приборах при различном виде напряженного состояния: компрессионное сжатие, одноплоскостной сдвиг, простой сдвиг, кольцевой сдвиг, трехосное сжатие, истинное трехосное сжатие и др. (Болдырев, 2008; Болдырев и Малышев, 2008). В тоже время, не все, но ряд отмеченных параметров можно определить из полевых испытаний грунтов (см. табл. 1.3).

6.3.10 Полевые испытания необходимо сочетать с другими способами определения состава, состояния и свойств грунтов (лабораторными, геофизическими) для интерпретации данных, выявления взаимосвязей между

характеристиками грунта, определяемыми различными методами, и оценки их достоверности.

Комментарий 2. Классическим примером выявления взаимосвязей между характеристиками грунта, определяемыми различными методами являются полевые испытания с применением метода статического зондирования. Для интерпретации результатов испытаний песчаных и в особенности глинистых грунтов используют корреляционные зависимости между данными статического зондирования и лабораторными испытаниями грунтов. Более подробно об этом говорится в главе 12. Поэтому, применять на практике корреляционные зависимости полученные другими авторами и для других грунтов при определении различных характеристик надо с осторожностью и только с целью предварительной оценки их значений. Вторым примером являются компрессионные и штамповые испытания грунтов. Без использования переходного коэффициента (m_k) результаты компрессионных испытаний применять в расчетах нельзя, так как они явно занижены (Агишев, 1957; Игнатова, 1966, 1968). Однако следует с осторожностью использовать рекомендованные в СП 22.13330 (табл. 5.1) коэффициенты перехода, так как они получены для конкретного типа грунтов, который может не совпадать с исследуемыми на площадке изысканий.

6.3.11 Прочностные характеристики дисперсных грунтов определяют, как правило, методом статического и динамического зондирования в соответствии с ГОСТ 19912. Для ориентировочной оценки разжижения песков применяют динамическое зондирование (см. таблицу И.8). Динамическое зондирование допускается выполнять в соответствии с [8], приложение F.

Несущая способность свай определяется статическими испытаниями свай, динамическими испытаниями свай, испытаниями грунтов эталонной сваей, испытаниями грунтов статическим зондированием.

Комментарий 3. То же самое, что и в комментарии 2. Невозможно достоверно определить прочностные характеристики дисперсных грунтов методом статического и тем более методом динамического зондирования. В главах 2, 3, 12 приведены формулы, рекомендуемые в зарубежной литературе для определения отмеченных характеристик используя данные статического и динамического зондирования. Все они получены путем сопоставления результатов полевых и лабораторных испытаний. Можно предложить другие зависимости аппроксимирующие результаты полевых испытаний, например, экспоненциальную, параболическую, квадратичную т.е., практически любую и все они с определенной достоверностью могут быть применены для анализа данных полевых измерений. Однако, без сопоставления данных лабораторных и полевых испытаний в проводимых исследованиях, полученные зависимости можно использовать только как оценочные и ни в коем случае для стадии разработки рабочих чертежей.

Надежными являются только испытания свай статической нагрузкой, что и рекомендуют на практике опытные проектировщики, предлагая проводить натурные испытания нескольких свай в составе свайного поля. Определяя несущую способность сваи по данным статического зондирования, можно совершить грубую ошибку.

6.3.12 Для определения характеристик грунтов при расчете устойчивости склонов или прочностных свойств массива, сложенных крупнообломочными или неоднородными грунтами, используют срез целиков грунта методом поступательного (одноплоскостного) среза. Количество определений показателей прочности для каждого инженерно-геологического элемента следует устанавливать не менее трех (или двух, если они отклоняются от среднего не более чем на 25 %).

Комментарий 4. Этот вид испытаний проводится редко из-за присущей ему сложности и трудоемкости. На практике, определяют параметр, называемый недренированной прочностью c_u , который характеризует меньшую прочность связных грунтов по сравнению с прочностью, получаемая из испытаний целика грунта, что и дает большую надежность проектируемому сооружению. Основным методом полевых испытаний является методом лопастного среза, называемый часто, как испытания крыльчаткой.

При полевых исследованиях гравелистых и крупнообломочных грунтов определяют их сжимаемость, а не прочность. Поэтому проводят испытания штампом или динамическое зондирование. Прочность, оценивают в лабораторных условиях, из испытаний в условиях трехосного сжатия (диаметр 300 мм) и прямого сдвига используя образцы большого диаметра от 300 до 500 мм (FHWA-HRT-04-094, 2004).

6.3.13 Прочностные характеристики органоминеральных и глинистых грунтов текучепластичной и текучей консистенции определяют методом вращательного среза в соответствии с ГОСТ 20276.

Комментарий 5. Этот метод отмечен в предыдущем комментарии и применяется в том случае, когда практически невозможно отобрать качественные образцы грунта. Данный метод испытаний рассмотрен подробно в главе 9.

6.3.14 Основными методами получения деформационных показателей в массиве грунта являются испытания штампом, прессиометрия, а также в сочетании с ними статическое зондирование.

Комментарий 6. Согласно пункта 5.3.3 СП 22.13330 «Наиболее достоверными методами определения деформационных характеристик дисперсных грунтов являются полевые испытания статическими нагрузками в шурфах, дудках или котлованах с помощью плоских горизонтальных штампов площадью 2500–5000 см², а также в скважинах или в массиве с помощью плоского штампа или винтовой лопасти-штампа площадью 600 см² (ГОСТ 20276)».

Ниже в пункте 5.3.5 дается дополнительное разъяснение «Модули деформации E песков и глинистых грунтов могут быть определены методом статического зондирования, а песков (кроме пылеватых водонасыщенных) – методом динамического зондирования (ГОСТ 19912), используя таблицы, приведенные в СП 47.13330, или региональные таблицы, приведенные в территориальных строительных нормах. Для сооружений I и II уровней ответственности значения модуля деформации E по данным зондирования должны уточняться на основе их сопоставления с результатами параллельно проводимых испытаний того же грунта штампами, прессиометрами (см. 5.3.3, 5.3.4), а также в приборах трехосного сжатия (ГОСТ 12248). Для зданий и сооружений III уровня ответственности допускается определять значения E только по результатам зондирования, используя таблицы, приведенные в СП 47.13330, а при наличии статистически обоснованных региональных данных, приведенных в территориальных строительных нормах, и для сооружений II уровня ответственности».

Таким образом, результаты статического зондирования можно применять только для сооружений III уровня ответственности при определении модуля деформации. Для сооружений I и II уровней ответственности значения модуля деформации допускается определять, используя результаты статического зондирования, но сделав сопоставления с результатами испытаний штампами. Напрашивается следующий вопрос: «Зачем проводить статическое зондирование, если обязательным являются только штамповые испытания?» На практике так и поступают, проводя только испытания плоским или винтовым штампом (Каширский, 2003, 2005). Следует только иметь в виду, что чем больше площадь штампа, тем выше модуль деформации.

Испытания в условиях трехосного сжатия дают меньшие значения модуля деформации по отношению к испытаниям штампом. До сих пор нет четких указаний на сколько и для каких грунтов.

6.3.15 Для зданий и сооружений повышенного уровня ответственности испытания грунтов статическими нагрузками штампами площадью 2500 и 5000 см² следует осуществлять в шурфах (дудках) на проектируемой глубине (отметке) заложения фундаментов, а в пределах активной зоны взаимодействия зданий и сооружений с основанием – штампами площадью 600 см² или винтовой лопастью в скважинах. При глубине исследований, ограничивающей использование штампа, следует выполнять испытания прессиометром и/или трехосным сжатием.

Комментарий 7. Аналогично, предыдущему комментарию.

6.3.16 Для зданий и сооружений нормального (при нагрузках на фундаменты менее 0,25 МПа) и пониженного уровней ответственности прочностные и деформационные свойства допускается определять методом статического и динамического зондирования по приложению И, а также

лабораторными методами (см. ГОСТ 12248), для объектов нормального и повышенного уровня ответственности при нагрузках на фундамент более 0,25 МПа деформационные показатели следует подтверждать штамповыми или прессиометрическими испытаниями.

Комментарий 8. Правильнее говорить не о нагрузке на фундамент (кН или кН/м), а о давлении на грунт под подошвой фундамента (МПа). В остальном требования данного пункта совпадают с требованиями пункта 5.3.5 СП 22.13330.

6.3.17 Количество испытаний грунтов штампом для каждого характерного инженерно-геологического элемента следует устанавливать не менее трех (или двух, если определяемые показатели отклоняются от среднего не более чем на 25 %), а испытаний прессиометром – не менее шести. По результатам полевых испытаний уточняют значения модуля деформации грунтов, определенных лабораторными методами, согласно требованиям СП 22.13330....».

Комментарий 9. Следует отметить, что впервые в СП по инженерным изысканиям дается ссылка на необходимость учета требований других нормативных документов, которые используются при проектировании оснований фундаментов, в частности речь идет о СП 22.13330.

6.3.7 Глубины выработок на площадках зданий и сооружений должны быть на 2 м ниже активной зоны взаимодействия зданий и сооружений с грунтовым массивом. Толщину активной зоны рассчитывают по СП 22.13330.

Комментарий 10. Для того чтобы определить толщину активной зоны сжатия по СП 22.13330, надо знать размеры фундамента, величину давления под подошвой фундамента, инженерно-геологические и гидро-геологические условия; значения модуля деформации, плотности каждого слоя грунта, – всей этой информации не имеет геолог на стадии составления технического задания и программы испытаний. Понимая это, в п. 6.3.8 СП 47.13330 рекомендуется практический способ определения глубины изысканий, который приведен ниже.

«6.3.8 При отсутствии данных об активной зоне глубину горных выработок следует устанавливать в зависимости от типов фундаментов и нагрузок на них (этажности):

- 1) для ленточных и столбчатых фундаментов по таблице 6.3;*
- 2) для свайных фундаментов по 5.11 СП 24.13330;*
- 3) для плитных фундаментов – 1/2 ширины фундамента, но не менее 20 м от его подошвы;*
- 4) для свайно-плитных фундаментов по максимальной глубине требований перечислений 2) и 3);*
- 5) на участках распространения специфических грунтов не менее 30 % горных выработок необходимо проходить на полную их мощность или до*

глубины, где наличие таких грунтов не будет оказывать влияния на устойчивость проектируемых зданий и сооружений;

б) при изысканиях на участках развития геологических и инженерно-геологических процессов выработки следует проходить на 3-5 м ниже зоны их активного развития и учитывать дополнительные требования соответствующих пунктов настоящего свода правил;

7) для массивов скальных грунтов глубина горных выработок устанавливается программой инженерных изысканий исходя из особенностей инженерно-геологических условий и характера проектируемых объектов».

Комментарий 11. В приложении С приведены рекомендации из ENV 1997-2 (2007), аналогичные предыдущим, для определения глубины изысканий.

1.3. Какие методы полевых испытаний грунтов используются при проведении инженерно-геологических изысканий?

К полевым методам испытаний грунтов относятся следующие виды механических испытаний:

- плоским штампом в шурфах или на дне котлована (рис. 1.1, а);
- плоским штампом в скважине (рис. 1.1, б);
- винтовым штампом ниже забоя скважины (рис. 1.1, в);
- винтовым штампом в массиве (рис. 1.1, г);
- радиальным прессиомером (рис. 1.1, д);
- лопастным прессиомером в стенке скважины (рис. 1.1, е);
- лопастным прессиомером ниже забоя скважины (рис. 1.1, ж);
- лопастным прессиомером в массиве (рис. 1.1, з);
- динамическим зондированием (рис. 1.1, и);
- конусным стандартным или пьезометрическим зондом (рис. 1.1, к);
- дилатометром (рис. 1.1, л);
- крыльчаткой в массиве ниже забоя скважины (рис. 1.1, м);
- плоским динамометрическим зондом (рис. 1.1, н);
- радиоизотопным влаго-плотномером;

В отдельную группу испытаний входят испытания с использованием эталонных свай, как для определения механических свойств грунтов, так и несущей способности свайных фундаментов.

В последние годы разработаны методы определения длины существующих свай как отдельно стоящих, так и в составе свайного фундамента, применяемые при реконструкции зданий.

К полевым методам относятся также следующие виды геофизических испытаний, которые нормированы в ряде стран и практически не применяются при проведении инженерно-геологических изысканий в России:

1. Исследование грунтов с помощью поверхностных волн – сейсмическая рефракция (Seismic Refraction Method, ASTM D5777);

2. Измерения скорости распространения упругих волн с использованием источника возмущения на поверхности грунта и приемника в скважине (Crosshole Seismic Testing, ASTM D 4428);

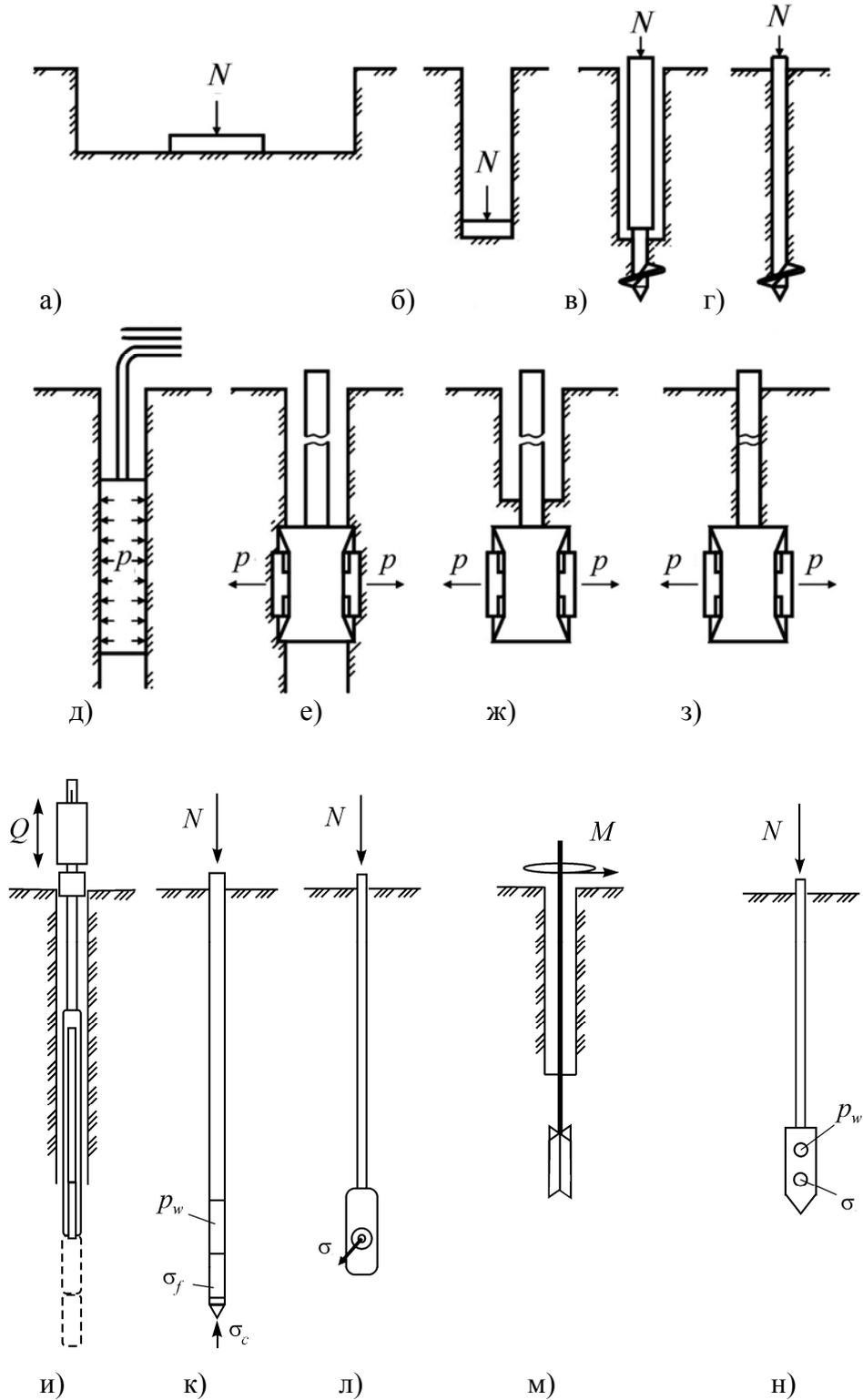


Рис. 1.1. Виды испытаний грунтов в полевых условиях:
 N – осевая нагрузка; M – крутящий момент; Q – масса груза;
 p_w – поровое давление; σ – боковое давление; σ_f – касательное
напряжение; σ_c – нормальное напряжение

3. Измерения скорости распространения упругих волн с использованием источника возмущения в скважине и приемника в соседней скважине (Crosshole Seismic Testing, ASTM D 4428);
4. Измерение электрической проводимости (Direct Current Resistivity Method, ASTM D 6431);
5. Георадары (Ground Penetrating Radar Method, ASTM D 6432);
6. Измерение гравитации (Gravity Method, ASTM D 6430);
7. Гаммокартаж (ASTM D 6427);
8. Электромагнитные методы измерений (Frequency Domain Electromagnetic Method, ASTM D 6639; Time Domain Reflectometry, ASTM D 6780; Time Domain Electromagnetic Method, ASTM D 6820).

В одной из своих последних обзорных работ Р. Майне (2007, 2009) приводит более обширную классификацию методов полевых испытаний, которая показана на рис. 1.2.

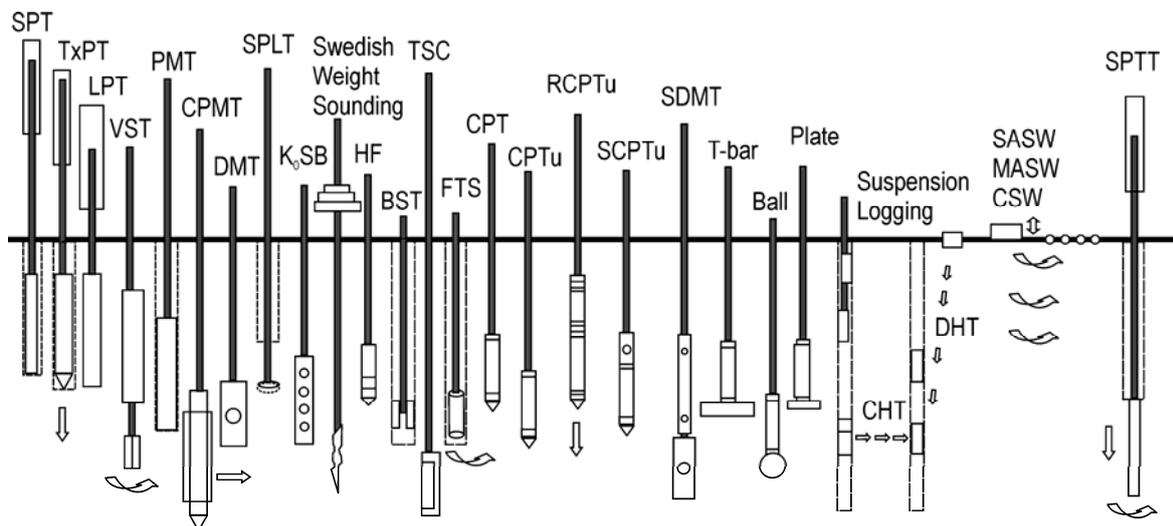


Рис. 1.2. Методы полевых испытаний дисперсных и скальных грунтов (Myne, 2006):

SPT – зондирование пробоотборником; TxPT – пенетрометр штата Техас; LPT – зондирование пробоотборником массивным молотом; PMT – балонный прессиометр; CPMT – комбинация конического зонда и прессиометра; DMT – дилатометр; SPLT – срез плоским штампом; K_0 SB – динамометрический зонд; SWS – Шведский винтовой штамп; HF – испытания с гидравлическим разрывом (ASTM D 4645); BST – лопастной прессиометр; TSC – камера для измерения компонент напряжений; FTS – кольцевой сдвиг; CPT – стандартный конический пенетрометр; CPTu – то же, с измерением порового давления; RCPTu – то же, и с измерением электрической проводимости; SCPTu – аналог CPTu, но с измерением скорости поперечных волн; SDMT – сейсмический дилатометр; T-bar – т-образный пенетрометр; Ball – шаровый пенетрометр; Plate – плоский пенетрометр; SL – измерения в одиночной и группе скважин; SASW- спектральный анализ поверхностных волн; MASW – модальный анализ поверхностных волн; CSW – рефракция поверхностных волн; SPTT – зондирование пробоотборником с вращением

1.4. С какой целью проводятся полевые испытания грунтов?

Основное назначение полевых испытаний грунтов заключается в определении прочностных и деформационных характеристик. Значительно реже – для определения естественной влажности и плотности грунтов, в основном, из-за неопределенности разработанных методов и сложности проведения испытаний, особенно, если используются радиоактивные изотопы.

Полевые испытания позволяют определить следующие физические и механические характеристики грунтов:

- плотность грунта ρ , г/см³;
- влажность w , %;
- модуль упругости и модули деформации при нагрузке и разгрузке E , МПа;
- упругий модуль сдвига G , МПа;
- недренированная прочность c_w , кПа;
- угол внутреннего трения φ , град.;
- силы удельного сцепления c , кПа;
- показатель относительной плотности I_D ;
- коэффициент бокового давления грунта в состоянии покоя K_0 ;
- давление предварительного уплотнения σ_p ;
- коэффициент переуплотнения OCR;
- коэффициент консолидации в горизонтальном направлении c_h (см²/год);
- коэффициент фильтрации k_f , см/год.

В табл. 1.3 приведен ряд дополнительных характеристик, которые также определяются при проведении полевых испытаний грунтов.

Перечисленные выше характеристики грунтов можно определить как из полевых, так и лабораторных испытаний. Большинство лабораторных методов испытаний являются прямыми методами, так как при интерпретации результатов используются решения теории упругости и условия прочности. Ряд полевых методов, например, испытания штампами и прессиометрические испытания можно также отнести к категории прямых методов, так как опять же используются решения теории упругости при определении модулей деформации. Методы статического и динамического зондирования не являются прямыми, так как для определения прочностных и деформационных свойств грунтов используются корреляционные связи между результатами полевых и лабораторных испытаний. К непрямым методам можно отнести также и численные методы с использованием решений теории упругости и пластичности. В этом случае характеристики находят путем решения обратной задачи, определяя параметры грунта путем численного решения с использованием различных

моделей грунтов и подгонки результатов решения к данным полевым или лабораторных испытаний.

Таким образом, для определения прочностных и деформационных параметров (характеристик) грунтов необходимо использовать различные методы испытаний, в том числе и их комбинации. Подобную концепцию исследования свойств грунтов (рис. 1.3) развивает в своих работах профессор Р. Маэне (Пауль Мейн, США, 2000, 2001а, 2001с, 2006, 2009).

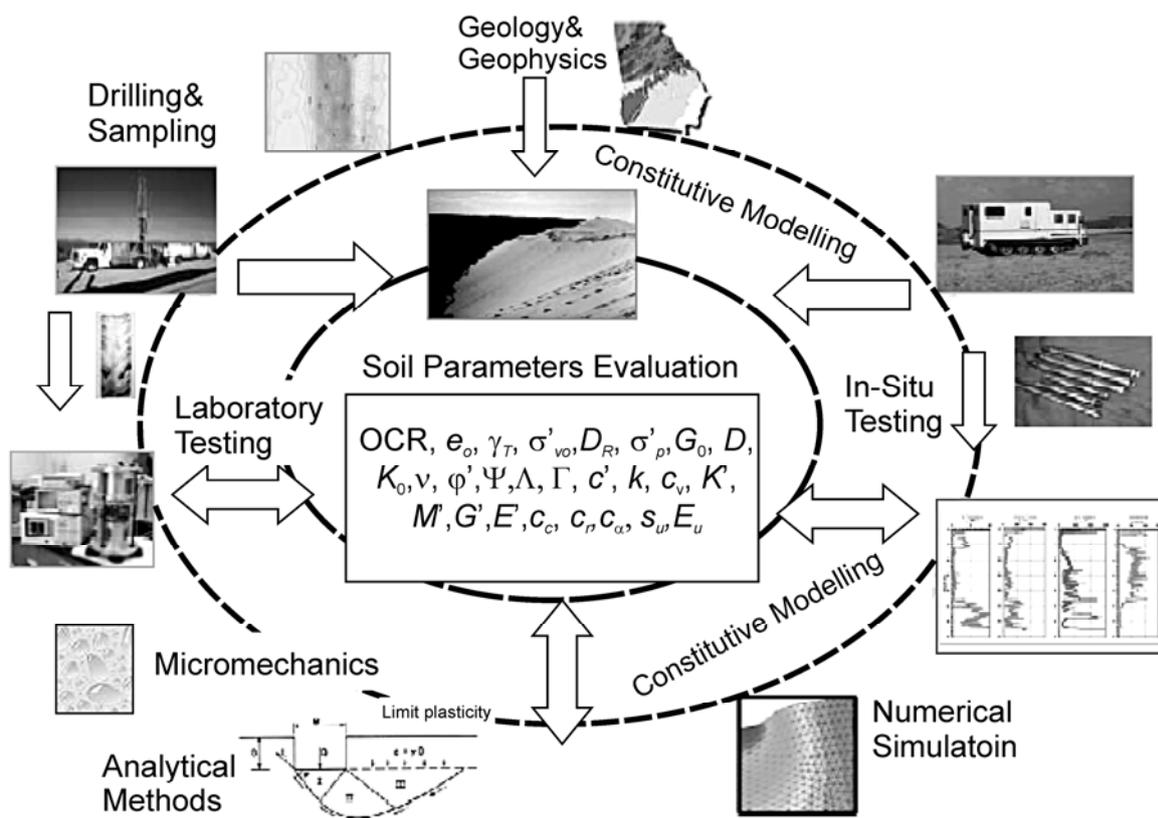


Рис. 1.3. Концепция объединенных исследований свойств грунтов (Mayne, 2009)

1.5. Какие стандарты и методы используются при проведении полевых испытаний грунтов?

Общие требования к полевым испытаниям изложены в ГОСТ 30672 «Грунты. Полевые испытания. Общие положения». Область применения методов полевых испытаний грунтов в зависимости от вида грунта приведена в приложениях А, Б, Д.

К настоящему времени разработано десятки различных устройств и методов для проведения полевых испытаний грунтов. Основные типы широко применяемых на практике методов в России и за рубежом приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Основные виды полевых испытаний грунтов

Метод испытаний	Условное обозначение	Стандарт	Измеряемые физические величины	Определяемые характеристики грунтов
1	2	3	4	5
Динамическая пенетрация	SPT	ASTM D 1586 ISO 22476-2 ГОСТ 19912-2001 СТБ ISO 22476-2-2009	– количество ударов (N_{60})	– вид грунта – мощность слоя – c_u, E_u, p_d
Вращательный срез	VST	ASTM D 2573 ISO 22476-9 ГОСТ 20276-99	– крутящий момент; – угол поворота	– c_u
Поступательный и кольцевой срез	BST	ГОСТ 20276-99 ISO 22476-7	– крутящий момент – нормальное давление – касательное давление – деформация сжатия и среза	– c_u, c, φ
Пенетрация тензозондом	CPT	ASTM D 3441 ISO 22476-3 ГОСТ 19912-2001 СТБ Fpr EN ISO 22476-1-2009	– лобовое сопротивление – силы трения	– вид грунта – мощность слоя – c_u, φ, E_{oed}
Пенетрация пьезозондом	CPTU	ISO 22476-1 ASTM D 5778 СТБ Fpr EN ISO 22476-1-2009	– лобовое сопротивление – силы трения – поровое давление – боковое давление	– вид грунта – мощность слоя – $c_u, \varphi, OCR, K_o, E_{oed}, \rho, e_o, I_D, S_t$
Пенетрация сейсмозондом	SCPTU		– лобовое сопротивление – силы трения – поровое давление – боковое давление – скорость волны сдвига	– вид грунта – мощность слоя – $G, c_u, \varphi, OCR, K_o, E_{oed}, \rho, e_o, D_R, S_t$
Радиальный прессиометром	PMT	ASTM D 4679 ISO 22476-4 ГОСТ 20276 СТБ Fpr EN ISO 22476-4-2009	– деформация – напряжения – боковое давление	p_L, E_{PMT}, K_o, c_u
Лопастной прессиометр	BPMT	ГОСТ 20276	– давление – перемещение	E_{PMT}
Самозабуривающийся прессиометр	SPMT	ASTM D 4679 ГОСТ 20276 ISO 22476-6	– давление – перемещение	E_{PMT}

Окончание табл. 1.3

1	2	3	4	5
Плоский dilatометр	DMT	ASTM D 6635 ISO 22476-5 СТБ Fpr EN ISO 22476-5-2009	– давление – перемещение	E_{DMT}, K_o
Динамометрический зонд	K_o SBT	–	– горизонтальное давление; – поровое давление; – осадка	E_{DMT}, K_o
Плоский штамп	PLT	ГОСТ 20276 ISO 22476-13	– давление – перемещение	E_{PLT}, p_L, c_u
Винтовой штамп	SPLT	ГОСТ 20276	– давление – перемещение	E_{SPLT}, p_L, c_u
Шведский винтовой зонд	SWST	ISO 22476-10 ENV 1997-2	– нагрузка – момент вращения – перемещение	E, φ
Лопастной прессиометр для испытаний скальных грунтов		ISO 22476-7 ASTM D 4971	– радиальная деформация – давление	E
Горячий штамп		ГОСТ 20276	– давление – перемещение – температура	– мерзлые грунты – A_{th}, m
Нейтронно - радиоизотопный		ГОСТ 23061-90	– регистрация плотности потока гамма-квантов	w, ρ
Срез целиков грунта		ГОСТ 20276	– касательное напряжение – нормальное напряжение – вертикальная деформация – горизонтальная деформация	τ_f, c, φ
Испытания на проницаемость		СТБ ISO 22476-3-2009		k

E – модуль упругости; G – упругий модуль сдвига; E_{PLT} – штамповый модуль деформации; E_{PMT} – прессиометрический модуль деформации; E_{SPLT} – модуль деформации определенный винтовым штампом; E_u – недренированный модуль деформации; E_{oed} – компрессионный модуль деформации; K_o – коэффициент бокового давления в состоянии покоя; c_u – недренированная прочность; p_L – предельное давление; p_d – динамическое сопротивление грунта; w – влажность; ρ – плотность; A_{th} – коэффициент оттаивания; m – коэффициент сжимаемости; τ_f – предел прочности; c – удельное сцепление; φ – угол внутреннего трения; OCR – коэффициент переуплотнения; e_o – коэффициент пористости; I_D – относительная плотность; S_t – чувствительность; k – коэффициент фильтрации.

В работе Мауне (2000a) приведена подобная классификация методов полевых испытаний грунтов. Пауль Мейн является одним из ведущих специалистов в области полевых испытаний грунтов. В настоящее время он работает профессором в «The Georgia Institute of Technology – School of Civil and Environmental Engineering». Список основных работ ученого можно найти по адресу: <http://geosystems.ce.gatech.edu/Faculty/Mayne/Research/index.html>.) Следует отметить, что Р. Муне проводит регулярные семинары с целью обучения методам полевых испытаний и читатели могут посетить его курсы.

1.6. Где можно найти информацию о методах интерпретации данных полевых испытаний?

Методы проведения различных полевых испытаний описаны в соответствующих национальных стандартах. В частности, в России переизданы практически без изменений разработанные еще в СССР ГОСТ 20276-2012 взамен ГОСТ 20276-99 и ГОСТ 30672-2012 взамен ГОСТ 30672-99.

В США используются стандарты ASTM, практически для всех видов испытаний подобные действующим в Евросоюзе (см. табл. 1.3). Для стран Евросоюза требования к проведению полевых испытаний приведены в Еврокоде 7, часть 2. В правилах Еврокода-7 для проведения полевых испытаний приведены 9 методов испытаний. В тоже время в стандарте ISO 22476 даны методы 14 полевых испытаний. В России требования ГОСТ распространяются на 12 методов испытаний немерзлых грунтов. По сравнению с Евросоюзом и США в России сегодня не используется несколько методов. Это метод испытаний винтовым конусом (WST, ISO 22476-10), метод испытаний пенетрометром с измерением порового давления (CPTU, ISO 22476-1), метод испытания грунтов легким динамическим пенетрометром (LWDP), метод испытаний плоским дилатометром (DMT, ISO 22476-11) и геофизические методы (приложение В).

Интерпретация результатов испытаний отсутствует в перечисленных стандартах. Для этой цели используются методические руководства или технические публикации. Методические руководства разрабатываются различными организациями, которые специализируются на проведении инженерно-геологических изысканий. Здесь, в первую очередь, следует отметить руководства, разработанные федеральным агентством скоростных дорог США (FHWA-SA-91-044, FHWA-TS-78-209, FHWA NHI-05-037, FHWA-HRT-04-094, FHWA-NI-97, FHWA NHI-06-088 и др.), которые можно найти на сайте www.fhwa.dot.gov.

Для интерпретации результатов методов статического и динамического зондирования следует изучить работы Lunne et al. (1997), Roberston and Campanella (1988), Robertson (2006), Campanella and Howie (2008), Schnaid (2009), Robertson and Cabal (2010), Рыжков и Исаев (2010). Очень хорошо

интерпретация данных полевых испытаний, изложена в серии публикаций Р. Майне (1999-2009).

1.7. В чем отличие модуля общей деформации от упругого модуля деформации?

Этот вопрос требует отдельных пояснений, так как существует множество методов определения модуля деформации, как лабораторных так и полевых.

Из лабораторных испытаний при статическом нагружении мы имеем: компрессионный модуль деформации; одометрический модуль деформации; дренированный и недренированный модули деформации из трехосных испытаний. Эти модули получены путем испытания образцов грунта в условиях одномерной и осесимметричной деформаций. Если провести испытания образцов грунта в условиях плоской деформации, то получим значение модуля деформации, отличающееся от предыдущих. Если дополнительно провести испытания образцов в условиях истинного трехосного сжатия, то мы получим еще один модуль деформации. Эти различия обусловлены видом напряженного состояния, которое возникает в образцах грунта при их испытании в приборах различной конструкции (Болдырев, 2009). Таким образом, мы насчитали шесть модулей деформации.

Полевые испытания также дают различные величины модуля деформации. Наибольшее значение получим, если проведем испытания плоским круглым штампом с кольцевой пригрузкой, при этом модуль деформации зависит от площади штампа, возрастая с ее увеличением. Испытания другими полевыми методами: прессиометром, динамическое и статическое зондирование, винтовой или плоский штампы в скважинах также показывают неэквивалентные значения. Если учесть, что на практике наибольшее применение находят методы испытаний винтовым штампом, прессиометрия и статическое зондирование, то получаем еще три дополнительных значения модуля деформации. Таким образом, имеем девять величин модуля деформации. Однако если учесть, что грунты по своей природе являются анизотропной средой, то следует еще добавить модуль деформации, характеризующий сжимаемость грунта в горизонтальном направлении.

Отсюда и вытекает основной вопрос, какие же модули деформации следует определять и применять в расчетах оснований?

В теоретической механике грунтов, как и в механике сплошной среды, также используется несколько модулей деформации. Общим для них является то, что они являются параметрами закона Гука:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma, \quad (1.1)$$

где ε – линейная деформация; σ – напряжение (кПа); E – модуль деформации (кПа).

Пример данной зависимости показан на рис. 1.1. Как видно из уравнения (1.1), модуль сдвига является коэффициентом пропорциональности зависимости деформации от напряжения и его можно найти из опытов используя выражение:

$$\Delta \epsilon = \frac{1}{E} \Delta \sigma, \quad (1.2)$$

где $\Delta \epsilon$ – приращение линейной деформации; $\Delta \sigma$ – приращение напряжения.

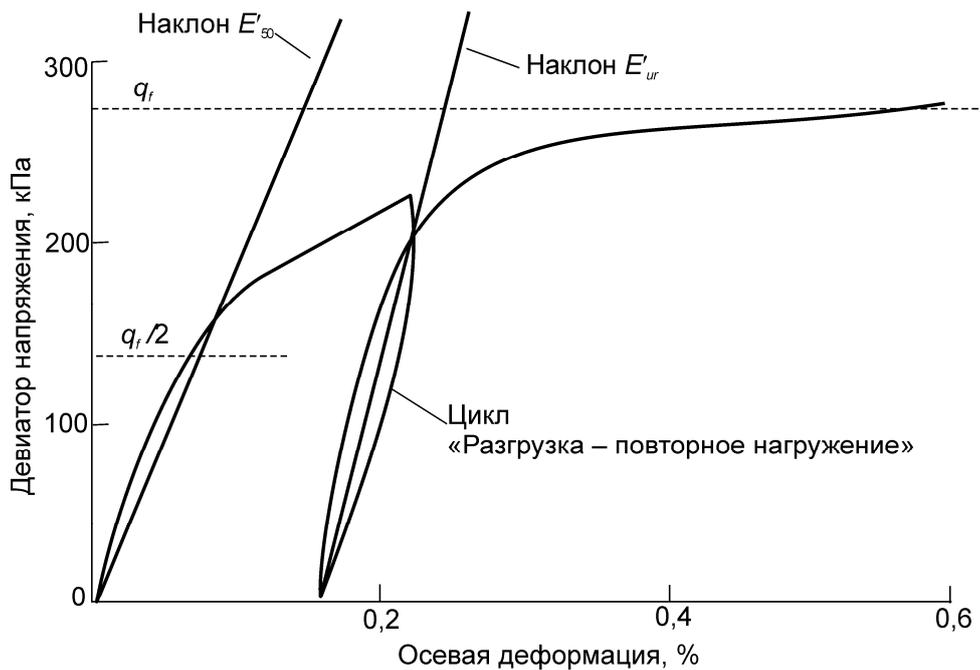


Рис. 1.4. К определению модулей деформации

Как видно из рис. 1.4, модуль деформации является тангенсом угла наклона в рассматриваемой точке диаграммы деформирования грунта и зависит от уровня деформации. Чем больше деформация, тем меньше модуль деформации. Наибольшее значение модуля деформации получают при уровне деформации, соответствующая начальному участку деформирования. Этот модуль называют упругим модулем деформации. Обычно его обозначают индексом E_0 . В зарубежных источниках его часто называют модулем Юнга и обозначают индексом E .

Таким образом, упругий или начальный модуль деформации находят в пределах линейного участка зависимости «деформация – напряжение» исходя из предположения, что при уровне относительной деформации менее 10^{-2} грунт ведет себя как упругое тело, без возникновения остаточных деформаций на цикле нагрузка – разгрузка – повторная нагрузка.