

Г.Г. Болдырев

**МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ
С КОММЕНТАРИЯМИ К ГОСТ 12248-2010**

Москва
2014

УДК 624.131.43
ББК 38.58
Б79

Рецензент доктор технических наук, профессор А.Н. Богомолов
(Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет)

Болдырев, Г.Г.

Б79 Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248-2010 [Текст]: монография / Г.Г. Болдырев. 2-е изд., доп. и испр. – М.: ООО «Прондо», 2014. – 812 с.

ISBN 972-5-905463-45-7

Рассмотрено поведение песчаных и глинистых грунтов в процессе их непрерывного деформирования. Описаны конструкции приборов для испытания грунтов с целью определения их механических свойств, в том числе и применяемые в настоящее время информационно-измерительные системы. Приведены отечественные и зарубежные методы испытаний грунтов. Представлены результаты испытаний грунтов в приборах различной конструкции. Даны рекомендации по использованию данных испытаний при решении различных задач геотехники и фундаментостроения. Рассмотрены основные положения ГОСТ 12248-2010 с объяснением его требований и рекомендаций.

Для инженерно-технических работников изыскательских и проектных организаций, а также студентов и аспирантов вузов строительного профиля.

ISBN972-5-905463-45-7

© ООО «Прондо», 2014
© Болдырев Г.Г., 2014

Введение

Эта монография появилась в результате чтения автором курса лекций, предназначенных для сотрудников трестов инженерно-строительных изысканий и других геотехнических лабораторий, в Пензенском государственном университете архитектуры и строительства с использованием производственной базы ООО «НПП Геотек» (www.geotek.ru/learning/).

При подготовке материала лекций автор столкнулся с неожиданной проблемой доступа к отечественным и иностранным литературным источникам. Если основы механики грунтов, инженерной геологии (Н.А. Цытович, Н.Н. Маслов, Н.М. Гольдштейн, З.Г. Тер-Мартirosян) и грунтоведения (под редакцией В.Т. Трофимова) достаточно полно, доступно и системным образом изложены отмеченными авторами в учебниках и монографиях, которые имеются в библиотеках вузов, то вопросы испытания грунтов, в особенности интерпретация данных испытаний, практически отсутствуют в отечественной литературе.

Последняя отечественная монография, в которой приведены сведения о приборах и методах испытания грунтов, в том числе и при трехосном нагружении, была написана коллективом авторов под руководством А.К. Бугрова в 1987 году. Ранее, в 1972 году, Н.Н. Сидоров и В.П. Сипидин описали конструкции различных приборов и методы определения характеристик механических свойств грунтов. Практически в это же время вышла в свет книга С.Р. Месчяна (1978), в которой сделан обширный обзор применяемых в различных лабораториях конструкций приборов и методов испытания грунтов, по состоянию до 1978 года. Еще большей библиографической редкостью является монография Е.И. Медкова (1959). в этой работе впервые в отечественной практике систематически изложены методы испытания грунтов в условиях осесимметричного трехосного сжатия в приборе, который впоследствии стали называть стабилометром. За рубежом подобные устройства классифицируются как приборы трехосного сжатия. Первый (и последний!) перевод на русский язык классической монографии авторов Bishop and Henkel (1957) был сделан в 1961 году.

С момента издания отмеченных работ прошло более 30 лет, за это время появились новые методы испытания грунтов как в лабораторных, так и полевых условиях. Эти методы и приборы описаны преимущественно в научных статьях, которые опубликованы в различных журналах или сборниках конференций. Оказалось, что большинство иностранных научных статей, диссертаций и монографий можно найти в электронном виде, используя Интернет. Отечественные периодические издания, как правило, не сканируются, и обычно сами авторы размещают их на своих сайтах. Это привело к тому, что при написании настоящей монографии автор вынужден был использовать в основном иностранные, а не отечественные источники.

За рубежом наибольшее применение на практике находят испытания грунтов в условиях сложного напряженного состояния. Для этой цели разработаны

приборы трехосного сжатия, являющиеся частью измерительных систем. Испытания в условиях трехосного сжатия позволяют более полно моделировать в лаборатории поведение грунта в будущем основании зданий или сооружений. В отечественной практике испытания грунтов в условиях трехосного сжатия пока еще не нашли должного применения, по всей видимости, из-за более сложной методики и техники испытаний, по сравнению с компрессионными испытаниями и испытаниями на прямой срез.

Несмотря на это, следует отметить, что в России испытания грунтов в приборах трехосного сжатия стали проводиться примерно с 1934 года благодаря работам Н.Н. Давиденкова и Г.Б. Яппу (1934, 1936). в этих работах рассмотрена методика определения коэффициента внутреннего трения и сцепления грунтов методом трехосного сжатия в приборе конструкции Н.Н. Давиденкова (1934). Этот же метод определения коэффициента внутреннего трения и сцепления в приборе конструкции В.Г. Булычева был применен Р.С. Шеляпиным (1939) при испытании лессовидных грунтов. в работе А.И. Боткина (1940) приведено описание конструкции прибора при разработке которой была реализована идея дальнейшего развития приборов Н.Н. Давиденкова и Г.Б. Яппу. Позднее Е.И. Медков (1952) предложил конструкцию стабилметра, которая выпускалась небольшими партиями мастерскими МИИТ (Московский институт инженеров транспорта) в 60-х годах прошлого столетия. За рубежом первые работы с использованием приборов трехосного сжатия были выполнены в 1950 году Bishop A.W.

В 1966 году И.И. Большедоновым и рядом других ученых были сформулированы основные принципы конструирования приборов и установок с программным управлением, и на этой основе предложены конструктивные и электрические схемы следующих приборов и установок: а) прибора трехосного сжатия (стабилметр) с программным управлением; б) прибора для испытания грунтов на сдвиг; в) прибор для компрессионных испытаний грунтов; г) установки с программным управлением для испытания грунтов в скважине; д) установка с программным управлением для испытания грунтов в шурфах. Конструкции этих приборов и установок базируются на функциональных схемах систем дискретного действия. Следует заметить, что эти принципы были реализованы позднее за рубежом в 70-х годах, а в России в конце 90-х годов прошлого столетия.

За прошедшие годы в практике лабораторных механических испытаний грунтов произошли существенные изменения. За это время были разработаны измерительные системы, включающие персональный компьютер, устройства сбора информации и механические устройства для испытания грунтов. Испытания стали проводить в автоматическом режиме с использованием микропроцессора или персонального компьютера. Сегодня один персональный компьютер обладает возможностью контролировать одновременно несколько независимых испытаний в реальном масштабе времени с регистрацией и обработкой результатов испытаний. Испытания образцов грунтов стали проводиться с нагружением по различным траекториям напряжений, выбираемым в зависимости от условий поведения грунта в основании зданий и иных сооружений. в связи с развитием средств измерения

стоимость испытаний постоянно снижается, а точность измерения деформаций и напряжений повышается.

В 1982 году М.Н. Гольдштейн в статье, посвященной совершенствованию методов определения механических свойств грунтов, высказал следующее пожелание: «...Для испытаний на прочность необходимо оснастить лаборатории приборами, позволяющими реализовать необходимые натурные граничные условия и проектные траектории загрузки и деформирования, от которых в значительной мере зависят результаты испытаний. Лаборатории должны располагать не только приборами для осесимметричного трехосного сжатия (стабилометрами), но и для плоского и чистого сдвига, для испытания на неограниченный кольцевой сдвиг с получением надежного значения установившейся прочности, на сдвиг при кручении, что очень важно при тонкослоистом строении грунта. Все эти приборы должны быть снабжены аппаратурой для измерения порового давления, для автоматического программированного нагружения и регистрации напряжений и деформаций. Кроме того, необходимо располагать семейством каждого вида приборов с различными типоразмерами...».

Прошло 25 лет, и сегодня можно с уверенностью сказать, что это время наступило, наши лаборатории стали оснащаться подобным оборудованием, которое выпускается отечественными предприятиями, среди которых следует отметить ООО «НПП «Геотек» (www.geotek.ru) и ЗАО «Геотест» (www.geotest.ural.ru). Первое предприятие выпускает приборы для лабораторных испытаний грунтов, а второе – оборудование для полевых исследований свойств грунтов.

В настоящей работе рассмотрены вопросы определения механических характеристик грунтов, которые отражают прочностные и деформационные свойства песчаных и пылевато-глинистых грунтов. Методы определения физических характеристик грунтов практически не изменились к настоящему времени и достаточно полно описаны в соответствующих ГОСТах и монографиях (В.Г. Чаповский, 1966; В.Д. Ломтадзе, 1972; ПО «Стройизыскания», 1976, и др.).

В данной работе автор попытался обобщить исследования, которые были выполнены за последние 30 лет. Значительное развитие вычислительной техники и средств автоматизации за этот период времени позволило перейти от традиционных средств и методов испытаний грунтов к более совершенным, точным и в то же время уменьшающим затраты на определение механических свойств грунтов.

Данное издание является вторым, первое вышло в 2008 году. За это время в России введен в действие новый ГОСТ 12248-2010, в котором приведены основные методы определения прочностных и деформационных свойств дисперсных грунтов. Данный ГОСТ был приведен в соответствие с рядом зарубежных стандартов, которые неизвестны большинству читателей. Поэтому автор взял на себя работу по разъяснению основных положений ГОСТ 12248-2010, что и сделано в 18 главе.

Автор надеется, что данная монография будет полезна не только сотрудникам практических геотехнических лабораторий и аспирантам, но и студентам при изучении основ современных методов механических испытаний грунтов в лабораторных условиях.

Глава 1. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ МЕТОДАМИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ И МЕТОДАМИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГРУНТОВ

1.1. Методы расчета оснований и используемые в них параметры механических свойств грунтов

В настоящее время расчет оснований зданий и сооружений выполняется с использованием аналитических решений строительных норм и правил (СНиП), а в последнее время – свода правил (СП) и численных методов расчета. Механические параметры грунтов, необходимые при расчете оснований зданий и сооружений с применением решений СНиП, СП, приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Механические параметры, применяемые при проектировании оснований зданий и сооружений

Наименование СНиП, СП, рекомендаций	Проектируемый тип фундаментов, оснований, сооружений	Используемые параметры механических свойств грунтов
СП 50-101-2004 «Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений»	Фундаменты мелкого заложения в обычных и структурно-неустойчивых грунтах; основания опор линий электропередачи; искусственные основания	Деформационные: E, E_e, ν Прочностные: Φ, c, c_u
СП 50-102-2003 «Проектирование и устройство свайных фундаментов»	Сваи и свайные фундаменты	Деформационные: E, G, ν Прочностные: Φ, c
СНиП 2.02.02-85 «Основания гидротехнических сооружений»	Основания гидротехнических сооружений	Деформационные: E, E_e, ν, c_v Прочностные: Φ, c, c_u Дополнительные: $k, m_o, \delta_{ср}, \delta_{1,ср}, R_c, R_t$
СНиП 2.05.02-85 «Автомобильные дороги»	Проектирование земляного полотна автомобильных дорог	Деформационные: $E, \nu; e_p^c, c_\alpha$ Прочностные: $\Phi, c, p_{ср}$

Решения, приведенные в 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 (при

соответствующем обосновании) 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. в эти нелинейные зависимости, называемые определяющими уравнениями или моделями грунтов, входят не только механические параметры, приведенные в табл. 1.1, но и ряд других дополнительных параметров. Вид дополнительных параметров и их количество зависят от типа принятой модели грунта. в табл. 1.2 представлены некоторые модели грунтов, их параметры и ряд известных программ, в которых они применяются.

Таблица 1.2

Модели грунта и их параметры

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; КЭП (Сар); Кэм-Клей (Сам-Clay)	Деформационные: E, ν, k, λ, e_0 Прочностные: φ, c, ψ Дополнительные: $R, \varepsilon_s, \alpha, K$
ANSYS www.cadfer.com	Линейно- и нелинейно-упругие; модели идеальной пластичности – условия прочности Друкера – Прагера, Треска; КЭП; вязкопластическая	Деформационные: E, ν Прочностные: φ, c, ψ Дополнительные: $\alpha, \gamma, \beta, \theta, W, D$
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	Деформационные: E, ν, k, λ, e_0 Прочностные: φ, c, ψ Дополнительные: $\sigma', p_c, R, e^{pv}, h, K_c$
SLOPE/W SIGMA/W www.geoslope.com	Линейно- и нелинейно-упругие, анизотропно упругая; Кэм-Клей; модифицированная Кэм-Клей; разупрочняющаяся; модель идеальной пластичности; гиперболическая	Деформационные: $E_i, E_s, \nu, k, \lambda, e_0$ Прочностные: φ, c, c_u, ψ Дополнительные: R_f, p_c, OCR
PLAXIS www.plaxis.com	Линейно- и нелинейно-упругие; модель идеальной пластичности – условие прочности Мора – Кулона; гиперболическая упрочняющаяся; модель ползучести	Деформационные: $E_0, E_{50}, E_{ur}, E_{oed}, m, p^{ref}, \nu$ Прочностные: $\varphi, \varphi_m, \varphi_{cv}, c, \psi$ Дополнительные: $R_f, \sigma_t, \alpha, \beta, p_p$
SAGE-CRISP www.mycrisp.com	Линейно и нелинейно-упругие; модели идеальной пластичности – условие прочности Мора – Кулона; Кэм-Клей; модифицированная Кэм-Клей; модель Шофильда (Schofield); трехповерхностная кинематически упрочняющаяся; Дункана-Ченга гиперболическая	Деформационные: E, ν, k, λ, e_0 Прочностные: $\varphi_i, \varphi_f, \psi_i, \psi_f, c_i, c_f, h_c$ Дополнительные: $p_c, G_{ec}, T, S, \psi, n, m$

При проектировании оснований зданий и сооружений используются решения математической теории упругости для определения напряжений в массиве грунта. в теории упругости рассматривается поведение под нагрузкой идеально упругой среды и среды, в которой отсутствуют остаточные деформации. в реальных грунтах возникают как упругие, так и остаточные деформации, причем доля упругих деформаций по сравнению с остаточными значительно меньше.

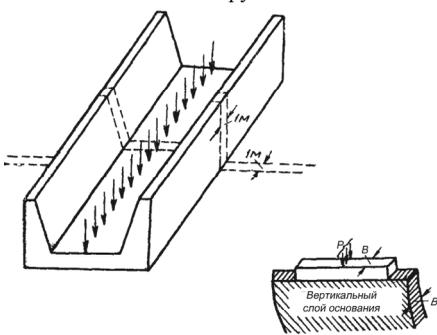
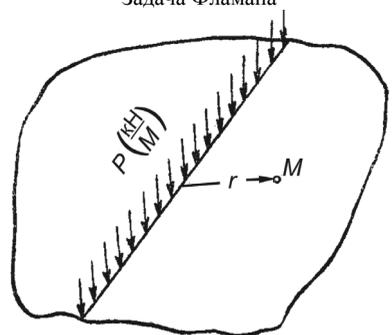
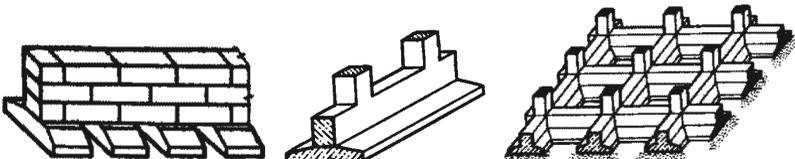
Вид нагрузки и тип фундамента определяют выбор решений теории упругости. в зависимости от условий нагружения на поверхности грунта в последнем могут возникнуть различные виды напряженного состояния. Различают напряженное состояние в условиях пространственной деформации, осесимметричной деформации и плоской деформации. Вид напряженного состояния определяется соотношением между компонентами напряжений и деформациями, которые они вызывают. Для каждого из видов напряженного состояния в теории упругости получены решения, которые позволяют определить как компоненты напряжений внутри упругой среды, так и деформацию ее поверхности.

При определении напряжений в основании протяженных в плане фундаментов, насыпей, выемок, плотин, подпорных стен используются решения плоской задачи теории упругости (табл. 1.3). Условия плоской задачи (деформации) имеют место в случае, когда напряжения распределяются в одной плоскости (x, o, z), в направлении же перпендикулярном (ось y) они постоянны. Деформация возможна только по направлению осей x, z и отсутствует по направлению оси y . Определение напряжений в массиве от погонной нагрузки в условиях плоской задачи выполняется с использованием решения Фламана. Выражение для определения осадки поверхности в точке M от действия погонной равномерно распределенной нагрузки интенсивностью P приведено в табл. 1.3. в данное выражение входят деформационные параметры: модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν . Эти параметры следует определять при испытании образцов грунта в условиях плоской деформации с помощью специальных приборов (глава 7).

В том случае, если при сооружении зданий применяются квадратные или прямоугольные в плане фундаменты с соотношением длины к ширине $l/b < 10$, при определении напряжений используются решения пространственной задачи теории упругости. Условия пространственной задачи имеют место в случае, когда напряжения распределяются различным образом по направлению всех трех осей (x, y, z). Определение напряжений в массиве от сосредоточенной нагрузки в условиях пространственной задачи выполняется с использованием решения Буссинеска. Выражение для определения осадки поверхности в точке M от действия сосредоточенной нагрузки интенсивностью P приведено в табл. 1.4. в данное выражение также входят деформационные параметры: модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν . Однако эти параметры следует определять при испытании образцов грунта, нагружая их в условиях пространственной деформации с помощью специально разработанных приборов (глава 8).

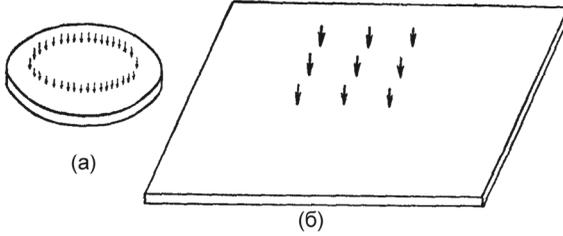
Таблица 1.3

Плоская деформация

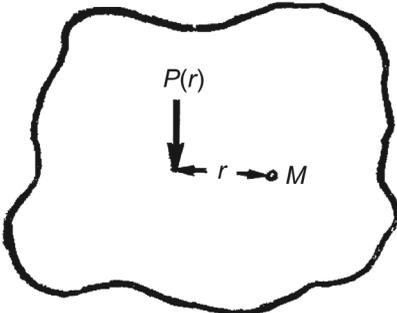
<p>Схема нагружения</p> 	 <p>Система координат</p>
<p>Задача Фламана</p> 	$w(r) = -\frac{2}{\pi} P \frac{1-\nu^2}{E} \ln \frac{r}{d}$
 <p>Конструкции фундаментов, грунты оснований которых работают в условиях плоской деформации</p>	

Осесимметричная и пространственная деформация

Схема нагружения



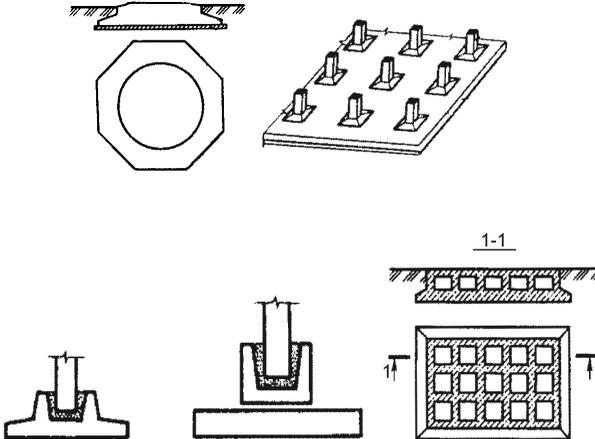
а – круглые плиты; б – прямоугольные или квадратные плиты



Задача Буссинеска

$$w(r) = P \frac{1-\nu^2}{\pi E r}$$

Зависимость перемещения поверхности упругого полупространства от действия сосредоточенной силы



Конструкции фундаментов, грунты оснований которых работают в условиях пространственной деформации

В механике грунтов выдвинуто предположение о том, что если напряжения под подошвой фундамента не превышают расчетного сопротивления грунта основания, то при определении напряжений и деформаций в грунтовых основаниях можно применять решения теории упругости. При этом модуль упругости в решениях Фламана и Буссинеска заменяется модулем общей деформации, который учитывает не только упругое, но и неупругое поведение грунтов. Модуль общей деформации значительно (до 5-10 раз) меньше упругого модуля. в то же время модуль общей деформации, определенный в условиях плоской деформации, оказывается больше модуля общей деформации, полученного из испытаний образцов грунтов в условиях пространственной деформации. Точно такие же различия наблюдаются и в коэффициентах Пуассона.

Частными случаями решений теории упругости для условий пространственной деформации являются решения, полученные для условий осесимметричной деформации. Условия осесимметричной деформации (задачи) имеют место в основании круглых или кольцевых в плане фундаментов (см. табл. 1.4). в этом случае напряжения распределяются по направлению всех трех осей координат, но в горизонтальной плоскости по направлениям осей x , y они равны и меньше напряжений в вертикальном направлении по оси z . При определении напряжений используется также решение Буссинеска. Модуль упругости и модуль общей деформации определяются путем испытания цилиндрических образцов в приборах трехосного сжатия. Эти модули также отличаются от модулей, которые определяются в условиях плоской и пространственной деформаций.

1.2. Основные требования СП 22.13330 и СП 11-105-97 к инженерно-геологическим изысканиям

Вышедший в 2011 году свод правил СП 22.13330 «Основания зданий и сооружений» является актуализацией СНиП 2.02.01-83* «Основания зданий и сооружений». в новом СП более детально прописаны требования к инженерным изысканиям для определения параметров механических свойств грунтов. Эти параметры используются при проектировании оснований по двум предельным состояниям: несущей способности и деформациям. в результате этих расчетов можно разработать конструкцию фундаментов мелкого заложения, используя аналитические решения, приведенные в СП 22.13330.

Вторым нормативным документом, в котором регламентированы требования к инженерно-геологическим изысканиям, является свод правил СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть I». в этом СП установлены общие технические требования и правила производства инженерно-геологических изысканий, в том числе и требования к проведению лабораторных и полевых определений прочностных и деформационных свойств грунтов.

Рассмотрим основные положения данных СП, касающиеся определения и применения механических параметров грунтов. Далее в тексте *курсивом* будут приведены выдержки из СП 22.13330 и СП 11-105-97, а обычным шрифтом – необходимые пояснения.

5.3.1. Основными параметрами механических свойств грунтов, определяющими несущую способность оснований и их деформации, являются прочностные и деформационные характеристики грунтов (угол внутреннего трения φ , удельное сцепление c и модуль деформации дисперсных грунтов E , предел прочности на одноосное сжатие скальных грунтов R_c). Допускается применять другие параметры, характеризующие взаимодействие фундаментов с грунтом основания и установленные опытным путем (удельные силы пучения при промерзании, коэффициент жесткости основания и пр.)

Таким образом, для расчета фундаментов по несущей способности (первая группа предельных состояний) и деформации (вторая группа предельных состояний) достаточно определить три механические характеристики (φ , c , E) и ν – коэффициент Пуассона. Первые два параметра называются прочностными, а вторые – деформационными.

Деформационные параметры грунтов (модуль деформации E и коэффициент Пуассона ν) необходимы при расчете осадки фундаментов.

Расчет осадки фундамента выполняется с использованием расчетной схемы (рис. 1.1) и выражения:

$$s = \beta \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{z\gamma,i}) h_i}{E_i} + \beta \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{z\gamma,i} h_i}{E_{e,i}}, \quad (1.1)$$

где E_i – модуль деформации i -го слоя грунта по ветви первичного нагружения, кПа; $E_{e,i}$ – модуль деформации i -го слоя грунта по ветви вторичного нагружения, кПа.

В примечаниях к формуле (1.1) говорится о том, что при отсутствии опытных данных по определению модуля деформации $E_{e,i}$ для сооружений II и III уровней ответственности допускается принимать $E_{e,i} = 5E_i$. Однако в большинстве случаев это выражение дает ошибочные результаты. Значения упругого модуля деформации $E_{e,i}$, определяемого при разгрузке образца грунта в компрессионном приборе или стабилometре от давления, соответствующего природным напряжениям, могут оказаться значительно больше $5E_e$. Это видно из рис. 1.2, на котором приведены результаты компрессионных испытаний песка и тугопластичной глины с нагрузкой и разгрузкой образцов грунта.

Разгрузка при определении упругого модуля была выполнена с 50 кПа. Модуль общей деформации определялся в интервале 100-200 кПа. Для песка $E_e = 24$ МПа, а модуль деформации $E = 18$ МПа. Для глины $E_e = 33$ МПа, а модуль деформации $E = 3,4$ МПа. в первом случае упругий модуль больше общего модуля в 1,33 раза, а во втором случае – в 9,7 раза.

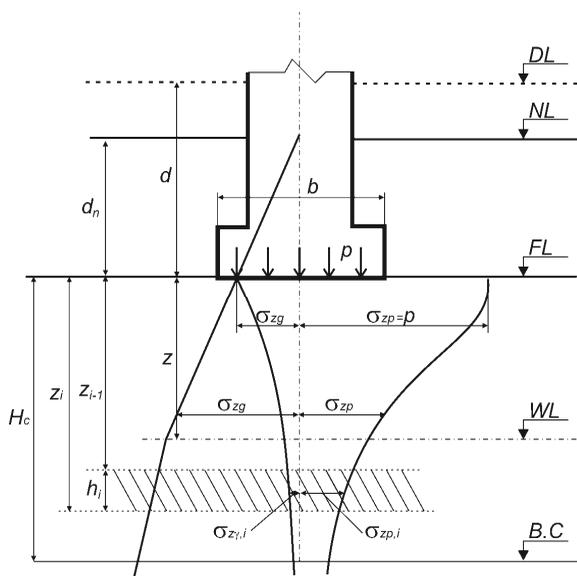


Рис. 1.1. Расчетная схема к определению осадки фундаментов

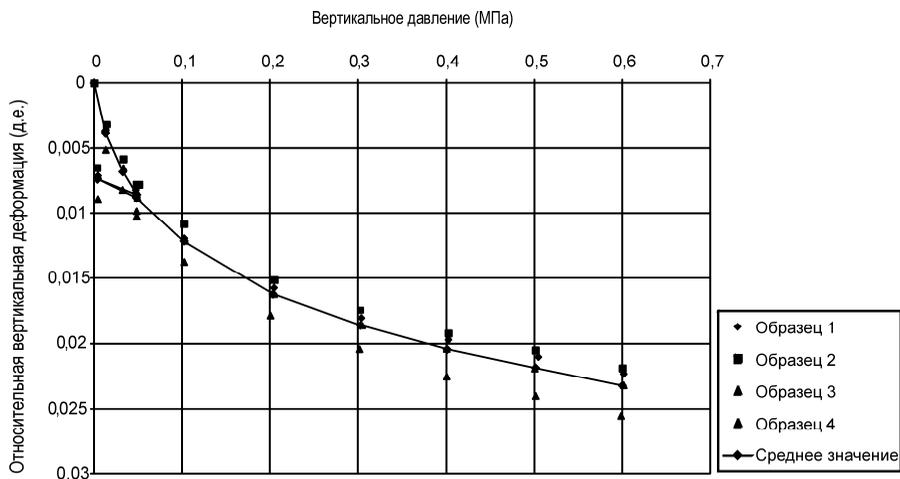
Упругий модуль деформации E_i определяется углом наклона секущей цикла «нагрузка–разгрузка–повторная нагрузка» образца грунта. Используя найденное значение коэффициента сжимаемости $m_{o,e}$, упругий модуль находят из выражения

$$E_e = \frac{\beta(1 + e_o)}{m_{o,e}}, \quad (1.2)$$

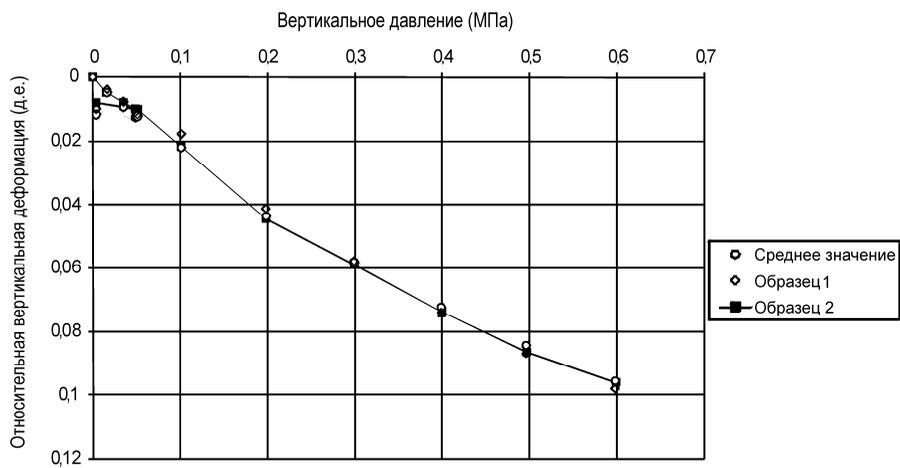
где параметр β определяется через коэффициент Пуассона следующим образом:

$$\beta = 1 - \frac{2\nu^2}{1 - \nu}. \quad (1.3)$$

Точно также определяется и модуль общей деформации E , но с использованием интервала давлений, соответствующего давлению под подошвой будущего фундамента здания или сооружения. Например, для фундамента 5–9-этажного здания с давлением под подошвой, равным 200 кПа, модуль общей деформации, найденный по компрессионной кривой (рис. 1.2, а), составляет 18 МПа, а для 25-этажного здания с давлением под подошвой в 400 кПа, этот же модуль общей деформации уже равен 20 МПа.



(а)



(б)

Рис. 1.2. Испытания песка (а) и тугопластичной глины (б)

Отсюда при одной и той же глубине котлована, например 5 м, бытовое давление будет равно 90 кПа для глины с удельным весом $18,0 \text{ кН/м}^3$ и упругий модуль, найденный из испытаний при полной разгрузке, $E_e = 50 \text{ МПа}$.

Однако общий модуль деформации E будет зависеть от интервала давлений, выбранного на компрессионной кривой. Если использовать примечание СП, то упругий модуль в первом случае составляет: $E_e = 5E = 5 \cdot 10 = 50 \text{ МПа}$, а во втором случае – 100 МПа, при этом упругий модуль, найденный из опытов, оказывается равным 50 МПа для обоих фундаментов при одной глубине разработки котлована, т.е он не зависит от дополнительной нагрузки и размеров фундамента. Фактически значение упругого модуля надо определять из опытов даже для сооружений II и III уровня ответственности.

Исследования, выполненные в институте «Фундаментпроект» (А.А. Добровольский), показали, что между модулем упругости и модулем деформации имеется зависимость (рис. 1.3), которая получена путем испытания различных грунтов в стабилометре. Эта зависимость может быть представлена в виде следующего выражения:

$$E_e \approx 8E. \quad (1.4)$$

Как видно из выражения (1.4), значение упругого модуля также отличается от предлагаемого в СП 22.13330.

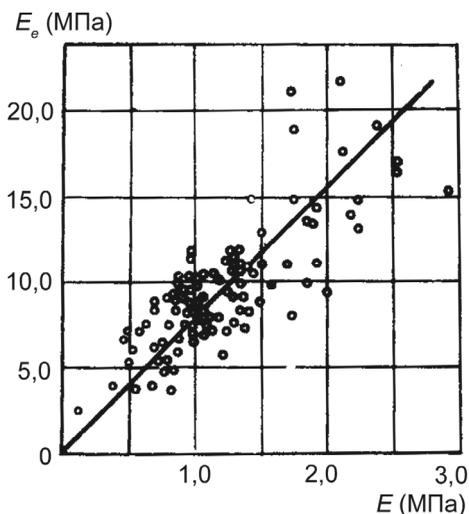


Рис. 1.3. Зависимость между модулем деформации и модулем упругости (Баркан Д.Д. и др., 1974)

При определении размеров подошвы фундаментов мелкого заложения применяется расчетное сопротивление грунтов, которое определяется из следующего выражения с использованием как физических, так и прочностных параметров грунтов:

$$R = \frac{\gamma_{c1}\gamma_{c2}}{k} \left[M_{\gamma} k_z b \gamma_{II} + M_q d_1 \gamma'_{II} + (M_q - 1) d_b \gamma'_{II} + M_c c_{II} \right], \quad (1.5)$$

где коэффициенты M_{γ}, M_q, M_c определяются по табл. 5.3 СП-50-101-2004 с использованием угла внутреннего трения ϕ , а в само выражение (1.5) входит параметр c , характеризующий силы сцепления глинистых грунтов. Эти два параметра ϕ и c также определяются путем лабораторных и реже полевых испытаний грунтов.

Расчет несущей способности оснований производится с использованием прочностных параметров ϕ и c и выражения

$$F = b l' (N_y \xi_y b' \gamma_1 + N_q \xi_q \gamma_1 d + N_c \xi_c c_1), \quad (1.6)$$

где N_y, N_q, N_c – безразмерные коэффициенты несущей способности, определяемые по табл. 5.12 СП 22.13330 в зависимости от расчетного значения угла внутреннего трения грунта. Несущая способность зависит также от других параметров, входящих в выражение (1.6): ширины и длины фундамента, глубины заложения, угла наклона внешней нагрузки и расчетных значений сил сцепления и удельного веса грунта. Расчетная схема к определению несущей способности по методу В.Г. Березанцева (1970) показана на рис. 1.4.

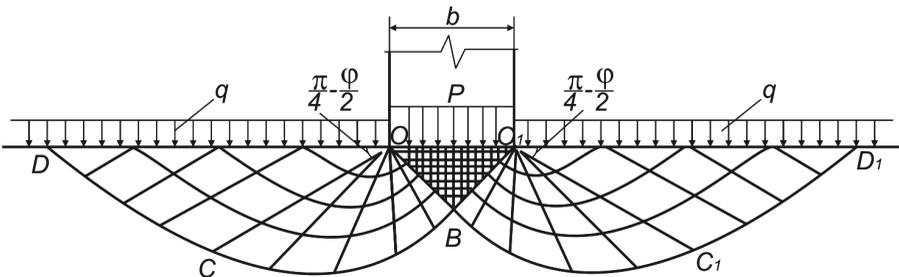


Рис. 1.4. Расчетная схема определения несущей способности основания центрально нагруженного фундамента

Для оснований в условиях стабилизированного состояния и возможности дренирования при нагружении основания внешней медленно возрастающей нагрузкой, силы сцепления и угол внутреннего трения определяются из условия прочности Кулона $\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi_1 + c_1$ методом одноплоскостного среза или трехосного сжатия в условиях консолидированно-дренированного сдвига.

Если на водонасыщенное глинистое основание ($S_r \geq 0,85$) передаются нагрузки, при которых возникает избыточное поровое давление u , то расчетные значения параметров прочности φ_1 и c_1 определяются из испытаний образцов глинистых грунтов в условиях трехосного консолидированно-недренированного сдвига. Эти испытания проводятся с измерением порового давления, а прочность грунта оценивается из выражения $\tau = (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi_1 + c_1$. Из последнего выражения видно, что учет порового давления приводит к уменьшению прочности грунта.

При быстром возведении сооружения или сейсмических нагрузках и отсутствии в основании дренирующих слоев грунта избыточное поровое давление u не успевает рассеиваться и равно полному напряжению $u = \sigma$, а прочность грунта определяется из выражения $\tau = c_1$. Параметр c_1 устанавливается из результатов трехосных испытаний в условиях неконсолидированно-недренированного сдвига ($c_1 = c_u$). Выражение для определения несущей способности глинистого основания (1.6) принимает вид

$$F = b' l' (\xi_g \gamma'_1 d + 5,14 \xi_c c_1). \quad (1.7)$$

5.3.2. Характеристики грунтов природного сложения, а также искусственного происхождения должны определяться, как правило, на основе их непосредственных испытаний в полевых или лабораторных условиях с учетом возможного изменения влажности грунтов в процессе строительства и эксплуатации сооружений, так как для неполностью водонасыщенных ($S_r < 0,8$) глинистых грунтов и пылеватых песков ... возможно снижение их прочностных и деформационных характеристик вследствие повышения влажности. Для определения прочностных характеристик φ и c грунтов ... образцы грунтов предварительно насыщают водой до значений влажности, соответствующей прогнозу ...

Важно отметить, что замачивание образцов грунта рекомендуется выполнять только при определении параметров прочности. Согласно общепринятой методике испытаний при определении деформационных параметров грунтов в компрессионном приборе одометр помещается в ванночку с водой так, чтобы образец был полностью покрыт водой; при этом не допускаются деформации набухания с помощью арретирного винта. Так как высота столба воды равна высоте образца грунта, то замачивание выполняется при градиенте напора равном единице. Изменить степень водонасыщения образца подобным образом практически невозможно – при длительном замачивании образец просто «раскисает». На практике применяется иная методика водонасыщения, когда образец грунта насыщается водой, которая подается под определенным

давлением, называемым обратным. Эта методика используется в стандартах ASTM и будет рассмотрена позднее, в главе 7.

5.3.3. 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 винтовой лопасти-штампа площадью 600 см² (ГОСТ 20276).

5.3.5. 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 используют таблицы, приведенные в СП 11-105 (ч. I), а при наличии статистически обоснованных региональных данных, приведенных в территориальных строительных нормах, и для сооружений II уровня ответственности.

Таким образом, деформационные характеристики грунтов оснований большепролетных зданий и зданий высотой более 25 этажей рекомендуется определять путем проведения полевых штамповых испытаний, прессиометрами и методом трехосного сжатия, полагая, что их значения по сравнению с лабораторными модулями деформации являются более реальными. Следует заметить, что в предыдущей редакции СП 50-104-2004 метод трехосного сжатия и прессиометрия отсутствовали.

5.3.6. в лабораторных условиях модули деформации глинистых грунтов могут быть определены в компрессионных приборах и приборах трехосного сжатия (ГОСТ 12248).

Для сооружений I и II уровней ответственности значения E по лабораторным данным 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. Для сооружений III уровня ответственности допускается определять значения E только по результатам компрессионных испытаний, корректируя их с помощью повышающих коэффициентов γ , приведенных в таблице 5.1. Эти коэффициенты распространяются на четвертичные глинистые грунты с показателем текучести $0 < I_L \leq 1$, при этом значения модуля деформации по компрессионным испытаниям следует вычислять в интервале давлений 0,1–0,2 МПа, а значение коэффициента β , учитывающего отсутствие поперечных деформаций грунтов, принимать в соответствии с рекомендациями ГОСТ 12248.

Из рекомендаций (пп. 5.3.3–5.3.6) следует, что достоверным методом определения модуля деформации грунта оснований большинства проектируемых зданий (I и II уровни ответственности) является только испытание штампом площадью 2500–5000 см². Все другие виды определений модуля деформации требуют корректировки результатов с результатами штамповых испытаний.

в табл. 1.5 приведены рекомендуемые СП 11-105-97 значения модуля деформации, получаемые из результатов статического зондирования.

Таблица 1.5

Определение параметров прочности и модуля деформации по результатам лобового сопротивления

q_3 , МПа	Нормативные значения модуля деформации E , угла внутреннего трения ϕ и удельного сцепления c суглинков и глин (кроме грунтов ледникового комплекса)				
	E , МПа	Суглинки		Глины	
		ϕ , град	c , кПа	ϕ , град	c , кПа
0,5	3,5	16	14	14	25
1	7	19	17	17	30
2	14	21	23	18	35
3	21	23	29	20	40
4	28	25	35	22	45
5	35	26	41	24	50
6	42	27	47	25	55

Согласно СП 11-105-97 «определение физико-механических характеристик грунтов по результатам статического и динамического зондирования следует производить на основе установленных в конкретных регионах для определенных видов грунтов корреляционных зависимостей, связывающих параметры, полученные при зондировании, с характеристиками, полученными прямыми методами, а при отсутствии региональных таблиц, согласованных в установленном порядке, – в соответствии с табл. 5». Фактически СП 11-105-97, в отличие от СП 50-101-2004 (п.5.3.5), не ограничивает уровнем ответственности зданий и сооружений применение результатов статического зондирования для определения прочностных и деформационных показателей грунтов.

5.11. Выбор вида и состава лабораторных определений характеристик грунтов следует производить в соответствии с табл. 1.6 с учетом вида грунта, этапа изысканий (стадии проектирования), характера проектируемых зданий и сооружений, условий работы грунта при взаимодействии с ними, а также прогнозируемых изменений инженерно-геологических условий территории (площадки, трассы) в результате её освоения.

При соответствующем обосновании в программе изысканий следует выполнять специальные виды исследований, методы проведения которых не указаны в табл. 1.6, но используются в практике изысканий для оценки и прогнозирования поведения грунтов в конкретных природных и техногенных условиях (методы определения механических свойств грунтов при динамических воздействиях, характеристик ползучести, тиксотропии, типа и характера структурных связей и др.).

Виды лабораторных определений механических свойств грунтов
при инженерно-геологических изысканиях

Лабораторное определение	Грунты				ГОСТ
	Скальные	Крупнообломочные	Песчаные	Глинистые	
Коэффициент фильтрации	-	-	С	С	25584-90
Компрессионное сжатие	-	С	С	+	12248-96
Трехосное сжатие	-	С	С	+	12248-96
Сопротивление срезу (прочность)	-	С	С	+	12248-96
Сопротивление одноосному сжатию	+	С	-	С	12248-96

Обозначения: «+» – определения выполняются;
«-» – определения не выполняются;
«С» – определения выполняются по дополнительному заданию.

Из приведенной табл. 1.6 видно, что показатели прочностных свойств песчаных и крупнообломочных грунтов определяются по дополнительному заданию. Поэтому на практике при определении угла внутреннего трения песчаных грунтов используются нормативные значения прочностных и деформационных характеристик грунтов, приведенные в табл. Б.1 (прил. Б СП 22.13330); при этом в СП 22.13330 (пп. 5.3.18) отмечено, что эту таблицу можно использовать для окончательных расчетов сооружений не только III, но и II уровня ответственности. Следует заметить, что механические свойства песчаных грунтов зависят не только от их плотности, но и от метода испытаний. Испытания в условиях трехосного сжатия по сравнению с прямым срезом дают большие значения угла внутреннего трения. Кроме того, испытания плотных песчаных грунтов с контролем деформации сдвига позволяют определить не только пиковую и критическую прочность, но и остаточную прочность. Поэтому для сооружений II уровня ответственности применять табл. Б.1 надо с осторожностью.

В п. 7.16 СП 11-105-97 записано: «*Определение прочностных и деформационных характеристик грунтов в лабораторных условиях следует производить, как правило, методом трехосного сжатия (ГОСТ 12248), и их результаты использовать для корректировки данных испытаний методами компрессионного сжатия и одноплоскостного среза*».

Словосочетание «как правило» означает, что трехосные испытания по своему усмотрению можно проводить или не проводить, в то же время рекомендуется использовать результаты трехосных испытаний для корректировки данных испытаний в компрессионном приборе и приборе одноплоскостного среза. Ранее отмечались различия в параметрах прочности из условий трехосного сжатия и одноплоскостного среза, еще большие различия наблюдаются при определении модуля деформации из результатов трехосных и компрессионных испытаний.