

Об определении параметров жесткости грунта при малых деформациях. Обзор работы Криса Клейтона



Для строительства зданий и сооружений, спроектированных с достаточным запасом прочности, необходимы как можно более реалистичные прогнозы параметров жесткости их грунтовых оснований при малых деформациях. В этом отношении представляет интерес обзор «Жесткость при малых деформациях: исследования и практика», выполненный Крисом Клейтоном – профессором Института гражданского строительства и окружающей среды Университета Саутгемптона (Великобритания) [1]. В этом обзоре подробно рассматриваются достоинства, недостатки и возможности разных методов и приборов для определения параметров жесткости грунтов при малых деформациях, используются практические примеры, предлагаются необходимые наборы параметров и формулы.

Здесь мы приводим краткое содержание указанной большой работы.

Представляя подобные обзоры работ ведущих зарубежных исследователей, мы стремимся к тому, чтобы они стали известны широкому кругу российских специалистов в области инженерной геологии и геотехники, а не только узким специалистам, которые изучали их на английском языке.

Аналитическая Служба Геоинфо
info@geoinfo.ru

Введение

Для зданий и сооружений, спроектированных с достаточным запасом прочности, деформации грунта основания невелики. Если необходимо сделать их реалистичные прогнозы, важно надежное знание параметров жесткости при малых деформациях. В этом отношении очень интересен подробный обзор «Жесткость при малых

деформациях: исследования и практика», выполненный профессором Института гражданского строительства и окружающей среды Университета Саутгемптона (Великобритания) Крисом Клейтоном [1]. Здесь мы приведем краткое содержание этой большой работы. Ссылки на большое количество первоисточников, подробные описания методов и приборов можно найти в самом обзоре [1].

Жесткость тела (грунтового основания, сооружения, конструкции) определяется как сопротивление этого тела деформации под действием приложенной силы. В геотехнической практике жесткость обычно определяется в контексте математической теории упругости.

Наиболее часто в практической геомеханике рассматривается поведение грунта при изотропной линейной упругости. Для расчетов напряжения или деформации изотропного упругого твердого тела требуется определение только двух параметров – модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν или модуля сдвига G и модуля объемной упругости K .

Однако грунт будет в основном анизотропным или по крайней мере поперечно-изотропным. Во многих случаях бывает достаточно принять поперечную изотропию, для которой имеется семь измеряемых параметров и еще два (например, наклон и направление падения), необходимые для определения ориентации плоскости изотропии, если она не горизонтальна. Семь параметров упругости для поперечно-изотропного материала при горизонтальной плоскости изотропии представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры упругости для поперечно-изотропного материала с горизонтальной плоскостью изотропии (по [1])

Обозначение параметра	Расшифровка
E_v	модуль Юнга для нагрузки в вертикальном направлении
E_h	модуль Юнга для нагрузки в горизонтальном направлении
ν_{vh}	коэффициент Пуассона относительно горизонтальной деформации, вызванной вертикальной нагрузкой
ν_{hv}	коэффициент Пуассона относительно вертикальной деформации, вызванной горизонтальной нагрузкой
ν_{hh}	коэффициент Пуассона относительно горизонтальной деформации, вызванной горизонтальной нагрузкой в нормальном направлении
G_v	модуль сдвига в вертикальной плоскости
G_h	модуль сдвига в горизонтальной плоскости

Жесткость скелета несцементированного дисперсного грунта является функцией эффективного напряжения и часто является низкой по сравнению с жесткостью воды, которую можно считать несжимаемой. Поэтому для водонасыщенного грунта могут потребоваться два случая (и два соответствующих набора параметров жесткости) – «недренированный» и «дренированный».

Жесткость изотропного грунтового материала может быть определена с использованием различных наборов параметров, наиболее часто используемых в механике грунтов, которые показаны в таблице 2. Набор параметров 1 может быть легко измерен (при условии изотропии) при трехосных испытаниях. Удобство

вычислений для набора 2 заключается в том, что модуль сдвига G остается одним и тем же в недренированных и дренированных условиях, так как он включает в себя изменение формы без изменения объема, а вклад в жесткость модуля сдвига воды можно считать пренебрежимо малым при низких скоростях деформации.

Таблица 2. Наборы параметров для изотропного грунта [1]

Случай	Набор параметров			
	1		2	
Недренированный	Недренированный модуль Юнга E^u	Недренированный коэффициент Пуассона ν^u	Модуль сдвига G	Недренированный модуль объемной упругости K^u
Дренированный	Эффективный модуль Юнга E'	Эффективный коэффициент Пуассона ν'	Модуль сдвига G	Дренированный модуль объемной упругости K'

Хотя зависимость «напряжение – деформация» для грунтов не является линейной, параметры жесткости дисперсных и слабых скальных грунтов являются достаточно постоянными при очень малых деформациях, не превышающих 0,001% (поэтому в этом диапазоне и измеряются значения эталонных модулей E_0 или G_0), но можно ожидать, что они уменьшатся при увеличении деформаций.

Поскольку уровни деформаций вокруг хорошо спроектированных геотехнических сооружений, таких как подпорные стенки, фундаменты и тоннели, как правило, невелики (рис. 1), в этих случаях необходимы измерения для определения наборов параметров при очень малых деформациях (например, E_0 , ν_0 и G_0), а также при увеличении деформаций и при изменении уровней нагрузки во время нагружения или разгружения.

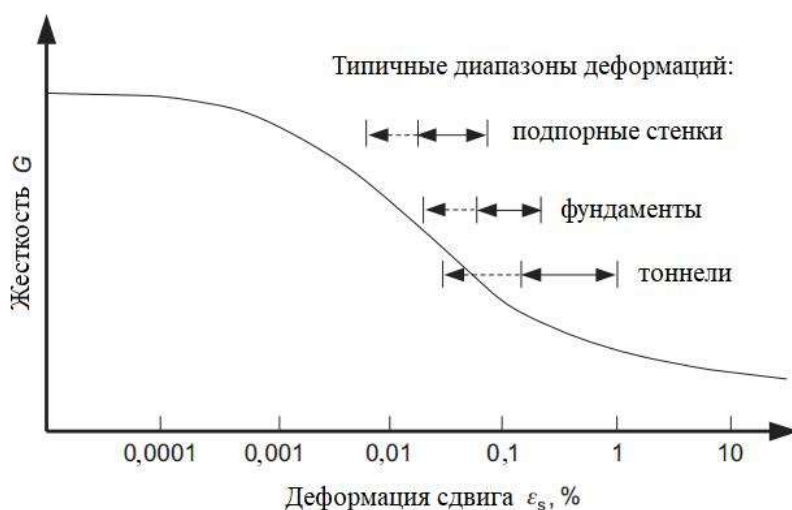


Рис. 1. Типичные изменения жесткости и диапазоны деформаций для различных геотехнических сооружений [1]

На модуль сдвига дисперсного грунта при очень малых деформациях фундаментально влияют три фактора – коэффициент пористости, жесткость контактов между частицами и деформации отдельных частиц (хотя, конечно, существуют и другие влияющие на жесткость факторы, например расположение частиц). Если влияние жесткости связей между частицами удалить (например, цементацией), то при заданной форме и минералогии частиц будет наблюдаться

комбинированное влияние коэффициента пористости и деформаций частиц, а также среднего эффективного напряжения.

Предварительные оценки модуля сдвига могут быть сделаны на основе среднего эффективного напряжения, коэффициента пористости, истории нагружений, гранулометрического состава и формы частиц.

Типичные уровни деформаций вокруг геотехнических сооружений (подпорных стенок, сплошных фундаментов, свай, тоннелей), попадают в диапазон, в котором жесткость грунта изменяется с деформациями наиболее резко (для многих сооружений – это диапазон 0,01–0,1%) (см. рис. 1). Таким образом, для прогнозирования смещений дисперсного или слабого скального грунта требуются не только оценки жесткости при очень малых деформациях, но и данные по деградации жесткости (рис. 2).

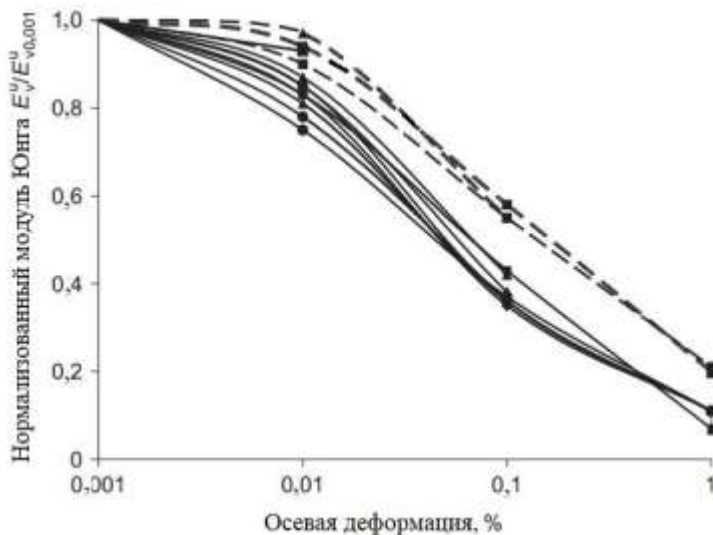


Рис. 2. Деградация нормированного вертикального модуля Юнга с увеличением осевой деформации по результатам трехосного сжатия ненарушенного мела, деструктурированного мела и ненарушенных глин (значения E_0 при очень малых уровнях деформаций варьировали от 24 до 4800 МПа для разных материалов). Видна хорошая согласованность результатов [1]

Факторы, влияющие на жесткость и смещения грунта

Естественно, на жесткость в разных направлениях влияет анизотропия материала (рис. 3, 4).

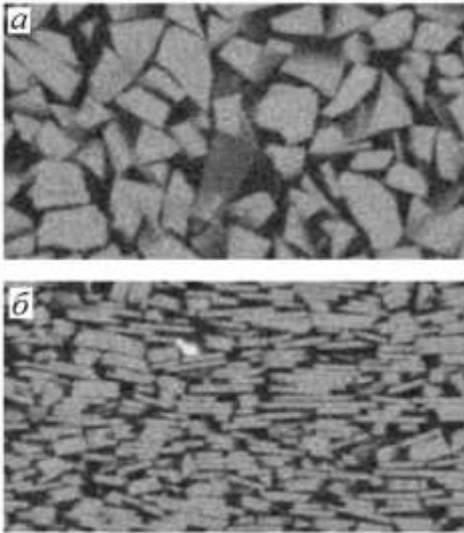


Рис. 3. Результаты компьютерного томографического сканирования, показывающие предпочтительную ориентацию рыхло насыпанных пластинчатых частиц размером 1 мм: а – горизонтальный разрез (вид сверху); б – вертикальный разрез (вид сбоку). Ясно, что в этом случае жесткость будет выше в горизонтальной плоскости, чем в вертикальной [1]



Рис. 4. Структурированный мел. На снимке хорошо видна предпочтительная ориентация разрывов сплошности [1]

Собственная анизотропия обусловлена характеристиками зерен, процессами осадконакопления.

Индукцированная анизотропия вызвана изменениями напряжения или деформацией в разных направлениях после осаждения (в том числе при трещинообразовании, карсте, выветривании, снятии напряжения).

В результате большинство геоматериалов проявляют анизотропную жесткость. В больших масштабах (например, при рассмотрении объема грунта, нагруженного крупным фундаментом или разгруженного при выемке грунта при строительстве котлована или тоннеля) многие дисперсные и слабые скальные грунты демонстрируют неоднородность в виде слоистости.

В поперечно-изотропном материале модуль горизонтального сдвига G_h является функцией только эффективного горизонтального напряжения, а модуль вертикального сдвига G_v является функцией как вертикального, так и горизонтального эффективного напряжения.

Влияние нагрузки и в конечном итоге разрушения на анизотропию жесткости остается предметом некоторых дискуссий.

Результаты определения параметров жесткости грунта сильно зависят от скорости, с которой он испытывается. Однако при очень малых уровнях деформаций это влияние в настоящее время считается относительно небольшим. Например, по результатам испытаний полутвердых глин и аргиллитов, жесткость практически не зависит от скорости деформаций, если они меньше 0,001%. При более высоких деформациях уровень упругого «плато» возрастает с ростом скорости их увеличения, жесткость на сдвиг становится более чувствительной к скорости нагружения, а при циклическом нагружении деформация может быть более «жесткой», чем при равномерной нагрузке (поэтому испытания на резонансных колонках, где скорости циклических деформаций высоки, не очень подходят для измерений статической равномерной деградации жесткости).

Обратный анализ поведения геотехнических сооружений показал, что грунт основания должен рассматриваться как поперечно-изотропный материал с нелинейным поведением, для которого требуется знание значительного количества параметров жесткости, но в конкретных случаях может доминировать важность тех или других из них. Например, модуль Юнга по горизонтали будет особенно важен при контроле горизонтальных смещений удерживающих конструкций (подпорных стенок), а по вертикали – при прогнозировании осадок сплошных фундаментов.

В таких случаях при разных профилях жесткости для определения смещений грунта и конструкций и чувствительности ключевых выходных данных к неопределенностям в эталонных модулях жесткости (E_0 и G_0) и в скорости деградации жесткости очень помогают численные эксперименты в сопоставлении с результатами полевых наблюдений.

Обычно смещения наиболее чувствительны к жесткости при очень малых деформациях, скорости деградации жесткости с ростом деформаций и к анизотропии. В более жестких материалах деформации могут быть намного меньше и ближе к упругому плато. В более мягких материалах может иметь место значительная деструкция – тогда упругий подход к моделированию деформации может быть неприемлемым.

Приоритетом при любом исследовании должно быть определение надежного профиля жесткости.

Выбор методов определения жесткости

Определение необходимых методов испытаний является одним из наиболее важных решений, которые должны быть приняты во время планирования и проведения инженерных изысканий.

Выбор методов нахождения жесткости на любой конкретной площадке должен быть сделан с учетом изменчивости грунта, относительных достоинств полевых и лабораторных методов измерений, предыдущего опыта их использования для аналогичных грунтовых условий, наличия необходимого оборудования и персонала, необходимости в дополнительных данных.

Неоднородность грунта важна, поскольку маловероятно, что на участке изысканий будет отобрано или механически исследовано более одной миллионной доли от объема грунта, который будет затронут строительством. Если вертикальная изменчивость высока, но поперечная изменчивость является относительно небольшой, то целесообразно определить жесткость различных слоев. Но если невозможно установить их горизонтальную выдержанность, то необходимо выполнить профилирование и вывести жесткость из простых и приблизительных корреляций (например, между СРТ или SPT и модулем Юнга).

Лабораторные исследования могут быть непрактичными, потому что длительное время тестирования может задержать процесс проектирования. Кроме того, образцы грунта всегда хотя бы в некоторой степени нарушены бурением и отбором проб и испытывают напряжения, отличающиеся от таковых *in situ*, что может сделать результаты испытаний нерепрезентативными. Если говорить о преимуществах, то лабораторные испытания проводятся в лучшей регулируемой обстановке и имеют контролируемые граничные условия, поэтому могут использоваться для получения более широкого диапазона параметров, чем при исследованиях *in situ*.

Применение же методов испытаний *in situ* в большинстве случаев помогает избежать наихудших последствий взятия образцов.

При использовании полевых сейсмических исследований на результаты определения жесткости могут значительно повлиять фоновые шумы. Но, поскольку эти методы применяются на уровне напряжений *in situ*, могут быть очень эффективными при определении геометрии и неоднородности грунта и охватывать большие его объемы, они все равно весьма привлекательны для крупных проектов, например при создании глубоких котлованов, высотных и сейсмически чувствительных ответственных сооружений.

При всех испытаниях решающее значение имеют: наличие испытательного оборудования, опытного персонала, письменных стандартов и прописанных методик исследований. Важен и опыт испытаний в сходных грунтовых условиях.

Когда наиболее важны достоверные определения параметров жесткости грунта, часто возникает необходимость в избыточных испытаниях, чтобы была возможность выявить и проигнорировать самые нерепрезентативные результаты. В этом отношении следует использовать сочетание полевых и лабораторных испытаний на разных уровнях деформаций и определение различных параметров жесткости.

Существует множество методов, с помощью которых могут быть получены параметры жесткости, – от «простого» динамического зондирования (SPT) до сложных испытаний самозабуривающимся прессиометром.

Полевые сейсмические методы испытаний

Во многих ситуациях очень ценными являются такие методы полевой геофизики, как использование непрерывных поверхностных волн Рэлея (CWS), скважинных и межскважинных сейсмических исследований на S-волнах (рис. 5).

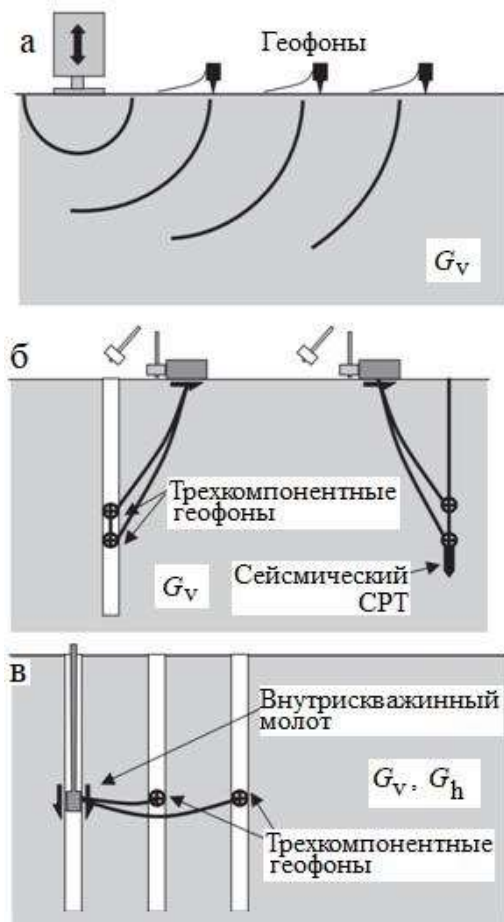


Рис. 5. Три общепринятых метода полевых сейсмических исследований: а – испытания с использованием системы непрерывных поверхностных волн Рэлея (CSW); б – скважинные сейсмические исследования; в – межскважинные сейсмические исследования [1]

Преимуществами метода непрерывных поверхностных волн Рэлея (CWS) являются его относительная малозатратность, неинтрузивность, возможность использования для малых глубин и на небольшом свободном пространстве, в сильно выветренных и трещиноватых грунтах, при наличии твердых включений в виде камней и т.п. Но у него есть и следующие недостатки: возможность оценки только одного параметра (G_v) при очень малых деформациях, трудности работы на «шумных» участках, ограниченность глубины исследований, упрощенность интерпретации данных при более сложной инверсии, трудность распознавания вибраций грунта в разных режимах, возможность значительных эффектов в ближнем поле, значительность ошибок в определении жесткости из-за неопределенности коэффициента Пуассона, неопределенность интерпретации из-за эффектов наложения спектров, влияние на распространение волн Рэлея и последующую интерпретацию со стороны неровностей поверхности земли.

Для исследований до относительно небольшой глубины методы CSW и скважинного сейсмического профилирования могут дать неплохое соотношение «сигнал/шум» и хорошую сходимость данных для получения достаточно достоверных результатов (рис. 6).

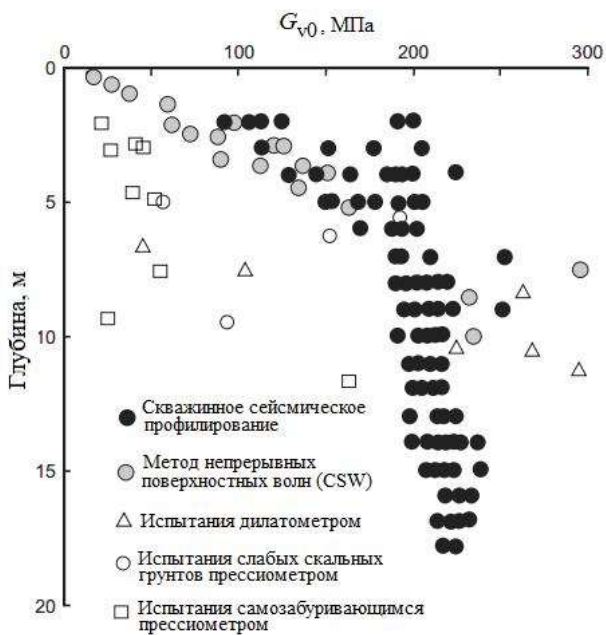


Рис. 6. Сравнение результатов измерений жесткости разными методами для «зашумленного» участка, сложенного слабыми скальными грунтами со сложной геометрией поверхности. Видно, что метод CSW хорош до глубины 5–7 м, скважинное сейсмическое профилирование – для несколько большей глубины, а дилатометрические и прессиометрические испытания в скважинах на малых глубинах дают слишком большой разброс результатов [1]

Хорошие результаты для разной глубины дают и межскважинные сейсмические исследования (рис. 7), но в этом случае приходится отбрасывать многие данные из-за влияния шума и проводить исследования, например, рано утром – до начала активного движения по дорогам и пр.

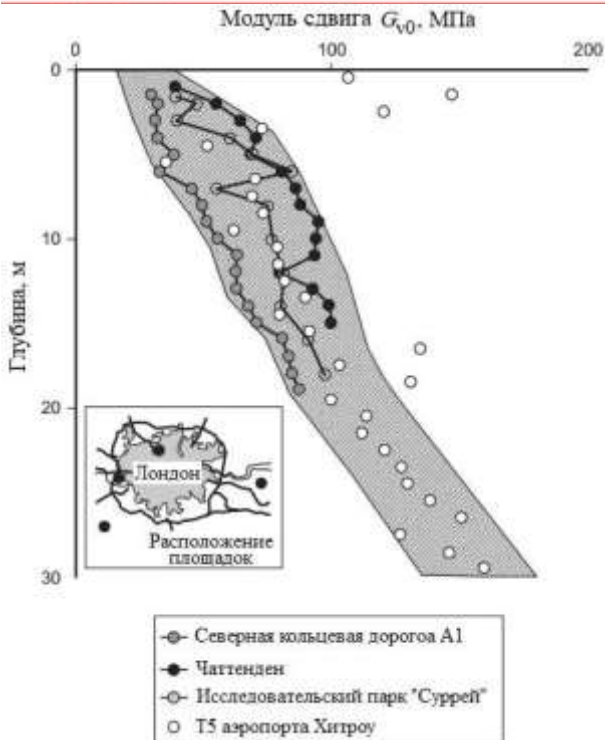


Рис. 7. Вертикальные модули сдвига (G_v) в зависимости от глубины по результатам четырех межскважинных сейсмических исследований в лондонской глине вокруг Лондона. Видна хорошая согласованность данных. Исключения составляют некоторые точки для района аэропорта Хитроу предположительно из-за наличия слоя гравия на поверхности земли [1]

При сопоставлении результатов лабораторных, полевых геофизических исследований и результатов обратного численного анализа измеренных смещений фундаментов и подпорных стенок видно (рис. 8), что лабораторные параметры жесткости получаются слишком заниженными (прежде всего из-за нарушения образцов), а геофизические данные – несколько завышенными. Однако результаты использования геофизических методов, особенно при очень малых деформациях, достаточно близки к данным, полученным обратным анализом реальных смещений, поэтому полевые сейсмические исследования неплохо подходят для оценок жесткости, которые могут даже служить в качестве эталонных при сравнении с оценками, полученными другими методами.

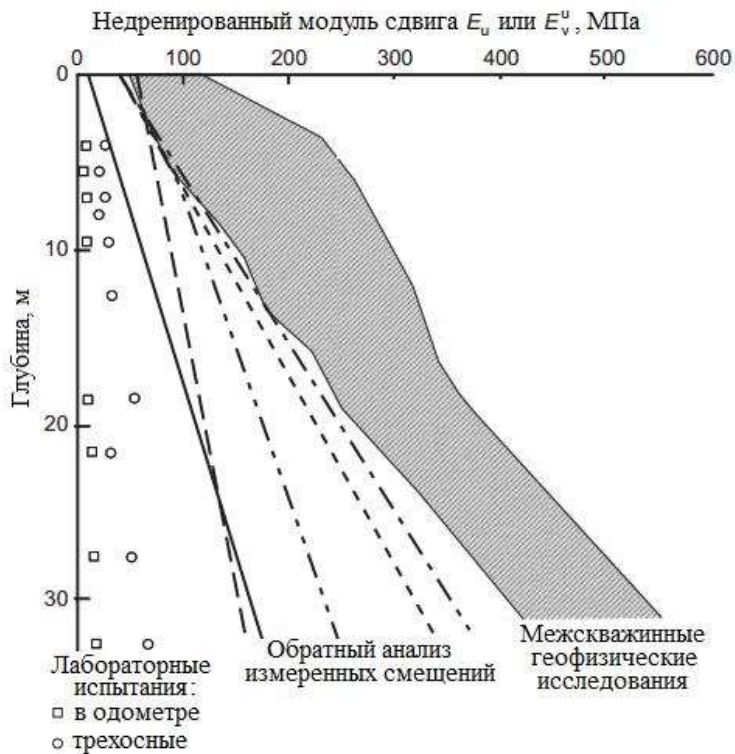


Рис. 8. Модули Юнга в зависимости от глубины для лондонской глины по результатам межскважинных геофизических исследований, обратного анализа измеренных смещений и обычных лабораторных испытаний [1]

Скважинные и межскважинные исследования дают схожие оценки вертикального модуля сдвига G_v , хотя результаты первых почти всегда несколько ниже, чем вторых (рис. 9). Это объясняется тем, что измеренное время прохождения волны при скважинных испытаниях является результатом усреднения скоростей в пластах слоистого грунта, а при межскважинных исследованиях измеренная жесткость скорее всего будет представлять самые жесткие слои, а не среднюю величину.

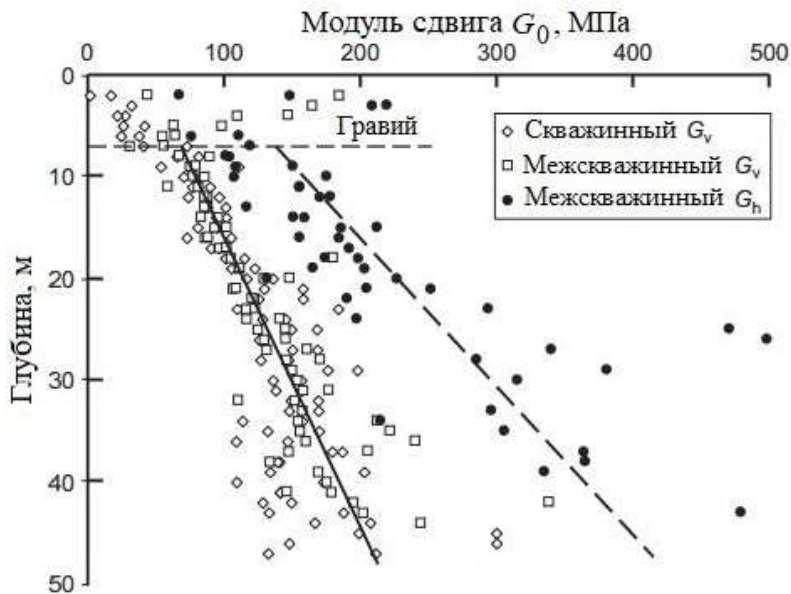


Рис. 9. Данные скважинных и межскважинных сейсмических исследований в лондонской глинистой формации с использованием молотов для возбуждения поперечных волн Bison и BRE. Нижний индекс v означает вертикальное направление, h – горизонтальное [1]

Лабораторные испытания

Лабораторные испытания играют жизненно важную роль в определении параметров жесткости геоматериалов, но могут страдать от различных недостатков.

Для большей достоверности их результатов необходим отбор образцов для исследования репрезентативного объема грунта на площадке, что может быть и неосуществимо, если, например, жесткость грунта контролируется широко разнесенными прерываниями сплошности или если он содержит очень грубые материалы, такие как булыжники и валуны.

Образцы должны быть как можно менее нарушенными, однако даже самые «ненарушенные» из них претерпят некоторые изменения как девиаторного, так и среднего эффективного напряжения, которые необходимо каким-то образом компенсировать.

Кроме того, расширенные лабораторные испытания могут занять много недель или даже месяцев и требуют сложного оборудования и опытного технического персонала.

В то время как проводится много передовых испытаний в условиях квазистатического нагружения (например, при усовершенствованных трехосных испытаниях), полезными могут быть и лабораторные динамические испытания с использованием пьезоэлементов с изгибными колебаниями, приборов с резонансными колонками (RCA), а также циклические трехосные испытания.

Для испытаний с применением *изгибных пьезоэлементов* для определения модулей сдвига по скорости распространения в образце сейсмических волн обычно требуется набор из двух таких элементов, генератор сигналов и осциллограф. Компактные пьезоэлементы устанавливают в различных конфигурациях в одометрах, приборах прямого простого сдвига, в образцах для трехосных испытаний (рис. 10),

внутри приборов с резонансными колонками, на неограниченных образцах сразу после их извлечения из скважин.

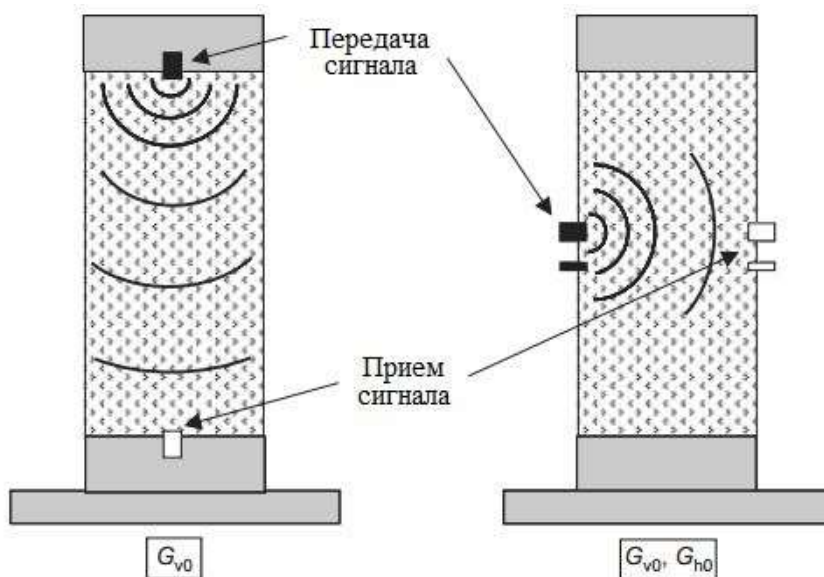


Рис. 10. Варианты установки изгибных пьезоэлементов при трехосных испытаниях для определения вертикального (G_{v0}) и горизонтального (G_{h0}) модулей сдвига [1]

Ценность испытаний с использованием изгибных пьезоэлементов заключается в их простоте, относительно низкой стоимости и возможности определения анизотропии модуля сдвига. Однако при этом могут возникнуть сложности с интерпретацией данных, особенно из-за шума, эффектов в ближнем поле и трудностей выявления первых вступлений сдвиговых волн на записях, особенно при низких входных частотах. Поэтому для большей согласованности результатов рекомендуют использовать входной сигнал в виде одиночного синусоидального импульса и определять не только времена первых вступлений, но и «межпиковые» времена (при условии, что приемник находится на расстоянии не менее 2–3 длин волн от передатчика, а полученные «на выходе» периоды будут примерно такими же, как и «на входе»).

Целесообразно рассматривать тесты с использованием изгибных пьезоэлементов как полуэмпирические, требующие проверки при каждом новом материале и каждой новой схеме испытаний путем сравнения с результатами других видов исследований (например, испытаний на резонансных колонках и полевых геофизических исследований), а также с данными других лабораторий и предыдущих испытаний на аналогичном геоматериале.

Полезны испытания образцов грунта *на резонансных колонках* – в камерах трехосного сжатия, дающих возможность бокового расширения образца грунта в условиях трехосного осесимметричного статического нагружения при приложении к верхнему торцу образца малоамплитудных крутильных или других колебаний переменной частоты в заданном диапазоне. В процессе колебаний грунт испытывает деформации. На каждой частоте заданного диапазона определяются амплитуды деформаций, что позволяет получить амплитудный спектр реакции грунта и определить резонансную частоту образца. По первой собственной частоте образца

рассчитывается скорость распространения в нем волны, а затем динамический модуль сдвига G и модуль Юнга E . Динамические испытания дисперсных грунтов на резонансной колонке рекомендуют проводить по консолидированно-недренированной схеме.

Прибор с резонансной колонкой обеспечивает определение модуля сдвига G и модуля Юнга E дисперсных и слабых скальных грунтов при очень малых деформациях и получение оценок скорости деградации их жесткости с увеличением деформации. Различные конфигурации прибора допускают вибрации образца грунта при кручении, изгибе и в осевом направлении. Испытания могут проводиться в условиях эффективного изотропного напряжения в приборе Stokoe или в условиях эффективного анизотропного напряжения в устройстве Hardin. Преимущества прибора Stokoe состоят в том, что он относительно простой и может прикладывать высокие уровни крутящего момента при условии неподатливости прибора за счет повышенной жесткости его поперечного плеча.

Сопоставление результатов определения вертикального модуля сдвига при очень малых деформациях при использовании резонансной колонки, прессиометрических испытаний и межскважинных сейсмических исследований представлено на рисунке 11.

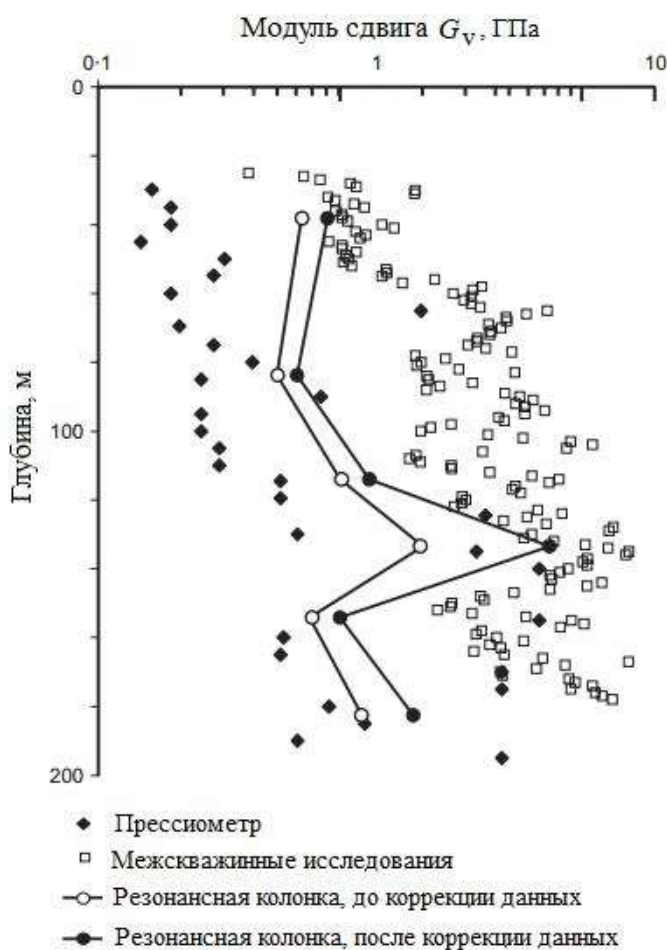


Рис. 11. Сопоставление результатов определения вертикального модуля сдвига при очень малых деформациях при использовании резонансной колонки, прессиометрических испытаний и межскважинных сейсмических исследований для гипсоносных алевроито-глинистых пород с соленой поровой водой в районе Дубая [1]

Разработка более качественных методов бурения, улучшенных пробоотборников, современных трехосных приборов с минимальной податливостью для расширенных испытаний за последние 30–40 лет привели к значительному улучшению качества данных для определения жесткости грунта по результатам *трехосных испытаний*. Этому способствует использование современных улучшенных датчиков нагрузки, порового давления, погружных бесконтактных датчиков, измерительных преобразователей линейных перемещений для определения локальных деформаций (LVDT), электромагнитных датчиков деформаций на основе эффекта Холла, изгибных пьезоэлементов, систем непрерывной компьютерной записи данных.

Наиболее высокое разрешение дают LVDT. Датчики на основе эффекта Холла имеют более низкое разрешение, но очень просты в использовании, поэтому многие коммерческие лаборатории выбирают именно их.

Отметим, что при трехосных испытаниях нагрузка должна прикладываться достаточно медленно, чтобы обеспечить высокую степень уплотнения и достаточное выравнивание порового давления между средней высотой образца и его основанием к моменту достижения разрушения, хотя современные приборы позволяют значительно ускорить этот процесс.

Поскольку измерения жесткости будут выполнены неточно, если будут допущены значительные деформации ползучести во время нагружения, надо использовать периоды отдыха (до 2 недель) до тех пор, пока скорость ползучести не будет менее 1% от последующей внешней скорости нагружения.

При осторожном применении, высококачественном оборудовании и хорошем контроле температуры трехосные испытания могут помочь качественно определить параметры жесткости образца грунта при очень малых деформациях для разных траекторий нагружения.

Сопоставление возможностей разных методов

В таблице 3 показаны рассмотренные методы с указанием диапазонов глубин, для которых они могут дать хорошие данные, и параметров, которые они позволяют определить.

Таблица 3. Методы получения различных параметров жесткости [1]

Параметр	Методы испытаний					
	с использованием непрерывных поверхностных волн	связанные на поперечных волнах	межсвязанные на поперечных волнах	с использованием изгибных элементов	на резонансной колонке	усовершенствованные трехосные
Максимальная глубина по профилю, м	8–10	20–40	100	-	-	-
Исходная жесткость	G_{v0}	G_{v0}	$G_{v0}, G_{h0}?$	G_{v0}, G_{h0}	G_v, G_h	E_v^u, E_h^u
Краткосрочная эксплуатационная жесткость	-	-	-	-	G_{v0}	E_v^v, E_h^v
Долгосрочная эксплуатационная жесткость	-	-	-	G_{v0}, G_{h0}	G_v, G_h	E_v^l, E_h^l, ν_{vh}^l

Обозначения: G – модуль сдвига; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; *нижние индексы:* 0 – эталонный при очень малых деформациях; v – в вертикальной плоскости, h – в горизонтальной плоскости, vh – относительно горизонтальной деформации, вызванной вертикальной нагрузкой; *верхние индексы:* ^l – эффективный в дренированных условиях, ^u – в недренированных условиях.

Таким образом, существует относительно большое количество методов определения вертикального модуля сдвига при очень малых деформациях (G_{v0}). Некоторые из рассмотренных методов (например, межскважинные, скважинные сейсмические исследования, испытания с помощью изгибных пьезоэлементов) имеют особую ценность, поскольку они могут использоваться для обнаружения и оценки анизотропии жесткости.

Из таблицы 3 видна необходимость проведения трехосных испытаний, несмотря на их сложность и длительность, – для измерения как недренированных, так и дренированных модулей Юнга и их деградации при росте деформации. Если предполагается изотропия, то с помощью усовершенствованного недренированного трехосного испытания можно оценить и величину G_0 .

Оценка степени анизотропии жесткости требует хороших технических условий и использования горизонтально поляризованного источника при межскважинных сейсмических исследованиях или при испытаниях с помощью горизонтально поляризованных изгибных элементов.

Определение изменений параметров жесткости в зависимости от деформации остается сложной задачей. Они могут быть измерены в статических условиях при усовершенствованном трехосном испытании или в динамических условиях при циклическом трехосном испытании, а также в приборе с резонансной колонкой.

Определение деградации жесткости при увеличении деформации должно происходить как при сжатии, так и при растяжении, поскольку скорости разрушения при этом будут различными.

С учетом сроков тестирования и необходимости объединения результатов различных типов испытаний, определение полного набора параметров дренированной (долгосрочной) анизотропной жесткости для ненарушенных природных грунтов может быть осуществимо только для крупных проектов.

Заключение

В конце своего обзора [1] Крис Клейтон делает следующие общие выводы.

Нелинейная упругость – удобная основа для определения смещений для многих типов грунтов при решении геотехнических задач. Однако большинство дисперсных и слабых скальных грунтовых оснований обладает анизотропией жесткости, что требует определения по меньшей мере трех параметров для расчета смещений в краткосрочных (недренированных) условиях и пяти – в долгосрочных дренированных условиях.

Несмотря на то что диапазона линейного поведения зависимости «нагрузка – деформация» не существует, для практических целей удобно определять параметры жесткости при очень малых деформациях (менее 0,001%) и использовать их в качестве эталонов при получении профилей жесткости.

Изменения параметров жесткости с ростом деформаций и степень анизотропии жесткости оказывают существенное влияние на расчетные смещения и изгибающие моменты в геотехнических конструкциях. Однако для тех проектов, где деформации будут оставаться низкими, эксплуатационная жесткость не будет сильно отличаться от жесткости при очень малых деформациях.

Методы определения параметров жесткости при очень малых деформациях в полевых условиях с использованием сейсмических геофизических методов и в

лабораторных условиях с помощью изгибных элементов, испытаний на резонансной колонке и в трехосном приборе имеют большие перспективы, хотя и не лишены проблем.

Использование различных методов определения параметров жесткости при очень малых деформациях дает неодинаковые результаты из-за разных объемов грунтового основания, охватываемых испытаниями, слоистости, нарушений образцов при их отборе, влияния деталей испытаний, различий в методах интерпретации и пр.

Различные методы сейсмических исследований *in situ* охватывают разные диапазоны глубины и ограничиваются определением модуля сдвига.

Лабораторные исследования, хотя они сложны, занимают много времени и подвержены влиянию нарушенности образцов, могут обеспечить больший диапазон данных по жесткости, чем полевые испытания, и необходимы, если требуется определить деградацию жесткости с ростом деформации. Но надо учитывать, что скорости уменьшения жесткости при увеличении деформации, определяемые с помощью усовершенствованных трехосных тестов, испытаний на резонансной колонке и циклических трехосных испытаний, не будут одинаковыми.

Если предполагается изотропия жесткости, то необходимые параметры жесткости могут быть определены как для недренированных, так и для дренированных условий с использованием ограниченного диапазона траекторий нагружения при усовершенствованных трехосных испытаниях.

Если предполагается анизотропия жесткости, то в недренированном случае может быть целесообразной оценка влияния роста деформации с использованием комбинации испытаний на резонансной колонке, усовершенствованных трехосных испытаний с непрерывным приложением нагрузки и циклических трехосных испытаний на горизонтально и вертикально вырезанных образцах.

Определение полного набора параметров поперечно-изотропной дренированной жесткости, особенно значений коэффициента Пуассона, остается сложной задачей.

Точность результатов испытаний на жесткость зависит от множества деталей. Но прежде всего требуются более полные спецификации методов исследований и максимально качественный отбор проб.

Для проверки целостности данных по жесткости и окончательных общих оценок ее параметров необходимо сравнение результатов использования различных полевых и лабораторных испытаний и ранее опубликованных результатов для сходных грунтовых условий, для чего необходима высокая инженерная квалификация.

Использованная литература

1. Clayton C.R.I. Stiffness at small strain: research and practice // *Geotechnique*. 2011. Vol. 61. № 1. P. 5–37.