

ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ГРУНТОВ. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

ВОЗНЕСЕНСКИЙ Е.А.

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.г.-м.н.

eugene@geol.msu.ru

Аннотация

В статье рассматриваются существующие экспериментальные методы оценки динамических свойств дисперсных грунтов, определяется круг решаемых ими задач и формулируется подход автора к разработке, структуре и содержанию первого российского стандарта по лабораторным динамическим испытаниям дисперсных грунтов

Ключевые слова

Динамические свойства грунтов; полевые и лабораторные испытания; стандарты; малые деформации; динамическое трехосное сжатие; резонансные колонки; крутильный сдвиг

Введение

Под динамическими свойствами грунтов принято понимать группу их физико-механических свойств, определяющих их реакцию на действие динамических нагрузок. При этом динамические свойства грунтов характеризуют их и как среду распространения колебаний (обладающую упругими, демпфирующими и фильтрующими свойствами) и определяют их динамическую неустойчивость, проявляющуюся как увеличение деформируемости и снижение прочности при динамическом нагружении по сравнению со статическим. Природа и механизм этой неустойчивости различны для разных грунтов (табл. 1).

Табл. 1

Подразделение дисперсных грунтов по механизму их динамической неустойчивости

Группы грунтов	Типы грунтов	Подтипы грунтов по составу	Виды грунтов по механизму динамической неустойчивости	Разновидности грунтов по особенностям проявления динамической неустойчивости
НЕСВЯЗНЫЕ	крупнообломочные	заполнителя менее 30%	Дилатантные	способные к динамическому уплотнению и разуплотнению
	песчаные	гравелистые и крупные		уплотняющиеся
		средней крупности		
		мелкие	Дилатантно-тиксотропные	с преобладанием уплотнения

СВЯЗНЫЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ И ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫЕ		пылеватые		с преобладанием тиксотропных эффектов
		преобладают пылеватые, глинистых менее 5%		частично восстанавливающиеся
	пылеватые		Квазитиксотропные	
	глинистые	глинистых \geq 5%		упрочняющиеся

Потребность в экспериментальной количественной оценке динамических свойств грунтов для выбора правильной конструкции фундамента, метода прокладки трубопровода, конструкции земляного полотна, мер инженерной защиты сооружений и т.д. возникает в следующих основных ситуациях:

- 1) при расчетах колебаний сооружений, работающих в условиях динамических нагрузок;
- 2) при оценке сейсмических характеристик грунтов и приращений сейсмической балльности;
- 3) для прогнозных расчетов дополнительных осадок и кренов сооружений при действии динамических нагрузок;
- 4) для оценки возможности разрушения, в том числе разжижения грунтов и определения его возможных последствий.

В соответствии с этим основные задачи экспериментальной оценки динамических свойств грунтов можно разделить на два блока.

1. Основные задачи экспериментальной оценки динамической неустойчивости грунтов заключаются:

- в определении возможности разрушения или накопления критических для данного сооружения деформаций грунтов основания при известных параметрах динамического воздействия;
- в определении возможности динамического (обычно сейсмического) разжижения грунтов и оценке его последствий;
- в оценке дополнительных деформаций грунтов и земляных сооружений в условиях динамических нагрузок.

2. Основные задачи определения упругих и диссипативных характеристик грунтов основания заключаются:

- в определении динамических модулей (Юнга и сдвига) и коэффициента Пуассона;
- в определении коэффициента поглощения грунтов;
- в исследовании изменений жесткости и поглощения в диапазоне малых сдвиговых деформаций 10^{-6} --- 10^{-4} д.е.

Для решения перечисленных задач в зависимости от поставленной цели и возможностей экспериментатора могут использоваться: полевые методы оценки динамических свойств грунтов; лабораторные методы динамических испытаний грунтов; лабораторные методы динамических испытаний физических моделей (главным образом методы центробежного моделирования с возможностью создания дополнительных динамических нагрузок, испытания на вибростолах).

Полевые методы оценки динамических свойств грунтов

Перечень применяющихся сегодня методов оценки динамических свойств грунтов в массиве приведен в табл. 2. Подробно все перечисленные методы рассматриваются в работе [1]. Среди полевых методов определения динамических свойств грунтов наиболее часто применяются четыре: сейсмическое зондирование, динамическое зондирование, стандартная пенетрация и статическое зондирование с пьезоконусным зондом. Они предназначены главным образом для оценки возможности сейсмического разжижения песчаных грунтов, хотя в последнее время появляются работы, в которых обосновываются подходы к полевой оценке динамической неустойчивости и связных грунтов [7]. Современное состояние полевых методов оценки разжижаемости дисперсных грунтов подробно рассмотрено в работе [3].

Табл. 2

Полевые методы определения динамических свойств грунтов*

Методы		
сейсмоакустические	вибрационные	геотехнические
<ul style="list-style-type: none"> • сейсмическое зондирование, • сеймопросвечивание, • сейсмокаротаж, • метод поверхностных волн 	<ul style="list-style-type: none"> • резонансного фундамента, • водяной пушки, • цилиндра в массиве, • измерения свободных и вынужденных колебаний фундаментов 	<ul style="list-style-type: none"> • динамическое зондирование, • стандартная пенетрация (SPT), • вибронзондирование, • статическое зондирование (CPT), • Беккер-пенетрация, • вибропенетрация, • динамические испытания свай, • динамическое нагружение штампов, • динамическая прессиометрия

* Жирным шрифтом в таблице выделены наиболее часто применяемые методы.

Как известно, для оценки сейсмической разжижаемости грунтов в современной мировой практике используется величина потенциала разжижения (F_L), имеющего физический смысл коэффициента запаса, а перечисленные методы основываются на представлении о том, что, поскольку сопротивление грунта разрушению как при статическом или ударном проникновении

зонда, так и при сейсмическом воздействии определяется прочностью его структурных связей, то существует физическая основа для оценки его сопротивления разжижению по противодействию внедрению зонда. Основу такой оценки составляет аналогия с исходной методикой определения потенциала сейсмического разжижения песков по данным стандартной пенетрации по Г.Б. Сиду -- на базе фактически наблюдавшихся случаев разжижения песков или его отсутствия при сильных инструментально зафиксированных землетрясениях в историческом прошлом в сопоставлении с лабораторными динамическими испытаниями тех же грунтов [12].

Все указанные полевые методы базируются на эмпирических корреляционных зависимостях между непосредственно измеряемыми характеристиками грунтов в массиве и их сопротивлением разжижению без моделирования ожидаемых сейсмических воздействий в массиве, то есть без проведения собственно эксперимента по динамическому нагружению.

Подробно методики определения потенциала сейсмического разжижения песков по данным статического и сейсмического зондирования изложены в работах [2, 10, 14]. Исследования, выполненные авторами работы [11] на 19 полевых площадках, показали, что надежность определения потенциала разжижения по данным статического зондирования с пьезоконусом составляет не менее 85%. Исходя из этого за критическое значение потенциала разжижения следует принимать величину 1,15, а все дисперсные грунты целесообразно разделить на три категории:

- I -- разжижаемые (при $F_L \leq 1,15$);
- II -- неразжижаемые (при $F_L > 1,15$);
- III -- возможно, чувствительные к сейсмическим нагрузкам и требующие лабораторного изучения на образцах ненарушенного сложения (к этой категории относятся грунты, для которых в соответствии с современными представлениями F_L по данным статического или сейсмического зондирования не определяется, например для водонасыщенных пылеватых и глинистых грунтов).

Это деление создает основу для классифицирования дисперсных грунтов по сейсмической разжижаемости по результатам статического зондирования, а существование некоторых пороговых с точки зрения возможности разжижения песка значений скоростей поперечных волн также открывает возможность для их использования в таком классифицировании грунтов.

Предложенная недавно в работе [3] первая классификация водонасыщенных песков по сейсмической разжижаемости позволяет: по результатам полевых работ обоснованно выделить те геологические тела (слои, линзы, горизонты), для которых необходима экспериментальная оценка разжижаемости и возможных последствий разжижения; обеспечить отбор проб для этих исследований; обоснованно исключить из рассмотрения и дополнительного опробования неразжижаемые грунты; определить рациональный состав экспериментальных исследований.

Определение категории песков по разжижаемости позволяет принять следующие решения.

- При отнесении песков к категории *легко разжижаемых (пывунных)* разжижение следует полагать неизбежным. Целесообразно провести инженерную оценку последствий разжижения с учетом особенностей строения массива и рельефа местности на основе ряда экспериментально определяемых показателей.
- При отнесении песков к категории *разжижаемых* возможность их разжижения при заданных параметрах землетрясений требует обязательной экспериментальной проверки.
- При отнесении песков к категории *практически неразжижаемых* достаточно результатов полевых работ, а лабораторные динамические испытания проводить нецелесообразно.

Для связных и слабосвязных водонасыщенных грунтов в любом случае необходимо проведение лабораторных динамических испытаний.

Такова научно-практическая сторона применения полевых методов для оценки сейсмической разжижаемости грунтов.

Вместе с тем нормативно-методическая база использования этих методов весьма неопределенна. Так, СП 11-105-97, где в части I имеется приложение И, допускает оценку разжижаемости песчаных грунтов по *диапазонам* условного сопротивления динамическому зондированию. Принципиальным недостатком этой, по существу, весьма упрощенной частной классификации песков по сейсмической разжижаемости является отсутствие учета величины сейсмического воздействия. Таким образом, и без того чисто качественная оценка возможности разжижения дается «вообще», что противоречит самой сущности инженерной оценки явлений.

Новый ГОСТ 25100-2011 стараниями автора данной статьи разделяет водонасыщенные песчаные грунты по величине потенциала разжижения на две разновидности -- разжижаемые при $F_L \leq 1,15$ и неразжижаемые при $F_L > 1,15$ (вариант предложенной в работе [3] классификации, усеченный до неузнаваемости рабочей группой, разрабатывавшей ГОСТ 25100-2011). При этом полагается, что сам потенциал разжижения должен определяться, а точнее рассчитываться, по результатам испытаний грунтов статическим или сейсмическим зондированием. Однако ни ГОСТ 19912-2012, ни какой-либо другой из отечественных стандартов не предусматривают порядок его определения, и, таким образом, сам потенциал разжижения может быть определен только на основании работы [1], на которую и ссылается ГОСТ 25100-2011 исключительно по причине опубликованной в ней принятой международной методики расчета F_L по данным статического и сейсмического зондирования на русском языке.

Таким образом, современные методы полевых изысканий в принципе позволяют количественно оценивать сейсмическую разжижаемость водонасыщенных песчаных грунтов, однако порядок определения этого показателя не предусмотрен ни одним из действующих российских стандартов.

Лабораторные методы определения динамических свойств грунтов

Наиболее распространенные в современной практике лабораторные методы определения динамических свойств грунтов, в том числе и для оценки их разжижаемости, приведены в табл. 3. Их основу составляет измерение реакции грунта в величинах возникающих в грунте деформаций и порового давления при условии корректного моделирования начального напряженного состояния и динамической нагрузки, эквивалентной в энергетическом отношении ожидаемому воздействию.

Табл.3

Основные лабораторные методы динамических испытаний грунтов

Метод	Разновидности установок
Динамическое трехосное сжатие	электрогидравлические, электропневматические, электромеханические, электропневмогидравлические
Динамические испытания по схеме простого сдвига	типа NGI, типа Кембриджского университета
Динамический крутильный сдвиг	с полыми образцами, со сплошными образцами
Малоамплитудные динамические испытания на резонансных колонках	с полыми образцами, со сплошными образцами (всего около 10 модификаций)
Динамический кольцевой сдвиг	с кольцевыми образцами, с дисковыми образцами

Состояние дел с динамическими лабораторными испытаниями грунтов характеризуется в России полным отсутствием каких-либо регламентирующих их документов и тем более стандартов, несмотря на то что проведение таких работ и использование их результатов при проектировании инженерных сооружений предусматривается целым рядом действующих нормативных документов (СП 22.13330.2011, СП 26.13330.2012, СП 11-114-2004, СП 11-105-97). В результате такие исследования проводятся только в рамках специальных требований технических заданий на инженерные изыскания для проектирования отдельных сооружений по различным методикам, не согласующимся между собой и часто недостаточно корректным. Поэтому качество получаемых материалов определяется только квалификацией автора той или иной методики, затрудняется использование таких данных при проектировании и не обеспечивается в достаточной мере безопасность зданий и сооружений.

Кроме того, отсутствие стандарта на динамические испытания грунтов, определяющего однозначно и необходимые для определения количественные показатели, затрудняет корректное составление технических заданий на изыскательские работы и создает неблагоприятные условия для эффективного использования финансовых ресурсов. Разработка такого национального стандарта необходима для регламентации инженерно-геологических изысканий, обеспечивающих учет специфических особенностей дисперсных грунтов, которые могут иметь большое значение для безопасной эксплуатации сооружений, но не учитываются пока ни одним из действующих нормативных, в том числе отраслевых и территориальных, документов. Техническая и социальная эффективность введения национального стандарта на лабораторные динамические испытания грунтов заключается в повышении качества и безопасности проектных решений при возведении сооружений в условиях динамических нагрузок различной природы и интенсивности. Кроме того, введение такого стандарта создаст необходимую базу для разработки обоснованных расценок на соответствующие виды работ и включения их в сборник базовых цен на инженерно-геологические изыскания для строительства.

Исходя из востребованности тех или иных определений, а также сложившейся практики лабораторных динамических испытаний грунтов в России стандарт должен устанавливать следующие методы лабораторных испытаний дисперсных грунтов для определения их динамических свойств: динамическое трехосное сжатие; малоамплитудные динамические испытания методом резонансной колонки; крутильный сдвиг. Использование этих методов позволяет решить все указанные выше задачи определения динамических свойств грунтов. Вместе с тем стандарт должен сохранить возможность применения по специальному заданию и других методов испытаний и конструкций приборов, обеспечивающих моделирование процесса динамического нагружения грунта. Стандарт должен регламентировать требования к оборудованию, описывать порядок подготовки образцов и проведения испытаний, а также цели и способы обработки результатов всех видов испытаний. Совершенно необходимо привести в нем также указания или рекомендации по расчету динамических напряжений, возникающих от разных динамических нагрузок как природного, так и технического происхождения.

Для динамических испытаний на практике наиболее распространен **метод динамического трехосного сжатия**. Испытания песчаных, глинистых, органоминеральных и органических грунтов этим методом проводятся для определения:

- возможности разрушения грунтов в основаниях сооружений в условиях динамических нагрузок (количественной характеристикой здесь является критическая при заданных условиях величина амплитуды динамических касательных напряжений τ_d или ее приведенная величина);
- дополнительных деформаций дисперсных грунтов в условиях наложения динамических нагрузок, в том числе возможности накопления критической для данного сооружения деформации грунтов основания в условиях динамического воздействия (количественной характеристикой является величина относительной деформации виброползучести ε_d для заданного периода эксплуатации сооружения);

- возможности динамического разжижения грунта (количественными характеристиками являются: величина приведенного порового давления $PPR = \Delta u / \sigma_m$, где Δu -- избыточное поровое давление, σ_m -- среднее нормальное напряжение; критическая для разжижения при заданных условиях величина амплитуды сейсмических ускорений PGA_{cr} либо количество циклов воздействия N_L с ожидаемой амплитудой динамических напряжений до возникновения разжижения);
- последствий динамического разжижения грунтов (количественными характеристиками являются: величина дополнительной осадки поверхности массива грунтов после разжижения; абсолютная величина латерального растекания грунтов при наклонной поверхности массива).

Эти характеристики определяют по результатам испытаний образцов грунта в камерах трехосного сжатия, дающих возможность бокового расширения образца грунта в условиях трехосного осесимметричного статического нагружения при $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$ с одновременным дополнительным вертикальным динамическим нагружением (где σ_1 -- максимальное главное напряжение; σ_2, σ_3 -- минимальные, они же промежуточные, главные напряжения).

Динамические трехосные испытания дисперсных грунтов следует проводить по консолидированно-недренированной схеме с обязательным измерением порового давления.

В обоснованных случаях (при моделировании динамического воздействия на грунты, находящиеся в нестабильном состоянии под действием как природной, так и дополнительной нагрузки от сооружения) допускается использование неконсолидированно-недренированной схемы опыта.

Использование консолидированно-дренированной схемы испытания в режиме динамического трехосного сжатия не допускается в связи с неравномерностью оттока поровой влаги из разных сечений образца из-за высоких скоростей деформации в динамическом режиме нагружения.

Испытания песчаных, глинистых, органоминеральных и органических грунтов **методом малоамплитудных динамических испытаний в резонансной колонке** проводят для определения: скорости поперечных волн V_s (м/с), динамического модуля сдвига G (МПа) и коэффициента поглощения (демпфирования) D (%) грунта в диапазоне деформаций сдвига порядка 10^{-4} – 10^{-20} %, а также для изучения изменений этих показателей в диапазоне малых сдвиговых деформаций (не более 0,1%) в целях расчета колебаний сооружений и сейсмического микрорайонирования территории.

Эти характеристики определяют по результатам испытаний образцов грунта в резонансных колонках -- камерах трехосного сжатия, дающих возможность бокового расширения образца грунта в условиях трехосного осесимметричного статического нагружения при $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$ (где σ_1 -- максимальное главное напряжение; σ_2, σ_3 -- минимальные, они же промежуточные, главные напряжения) с одновременным возбуждением в образце малоамплитудных крутильных колебаний заданного диапазона частот. Метод основан на теории распространения колебательного движения в упругом стержне, нижний торец которого закреплен, а деформации сдвига на этом торце равны нулю.

Подготовленные образцы (нарушенного или ненарушенного сложения) в форме цилиндра (сплошного или трубчатого) помещаются в камеру трехосного сжатия и после предварительной изотропной или анизотропной консолидации с заданным соотношением главных напряжений в массиве подвергаются действию динамической нагрузки путем приложения крутильных колебаний переменной частоты к верхнему (свободному) торцу образца. В процессе колебаний грунт испытывает деформацию простого сдвига. Амплитуда деформации сдвига определяется на каждой частоте заданного диапазона, что позволяет получить амплитудный спектр реакции грунта и определить резонансную частоту образца (рис. 1). По первой собственной частоте образца рассчитывается скорость сдвиговой волны в нем (V_s), а затем динамический модуль сдвига (G).

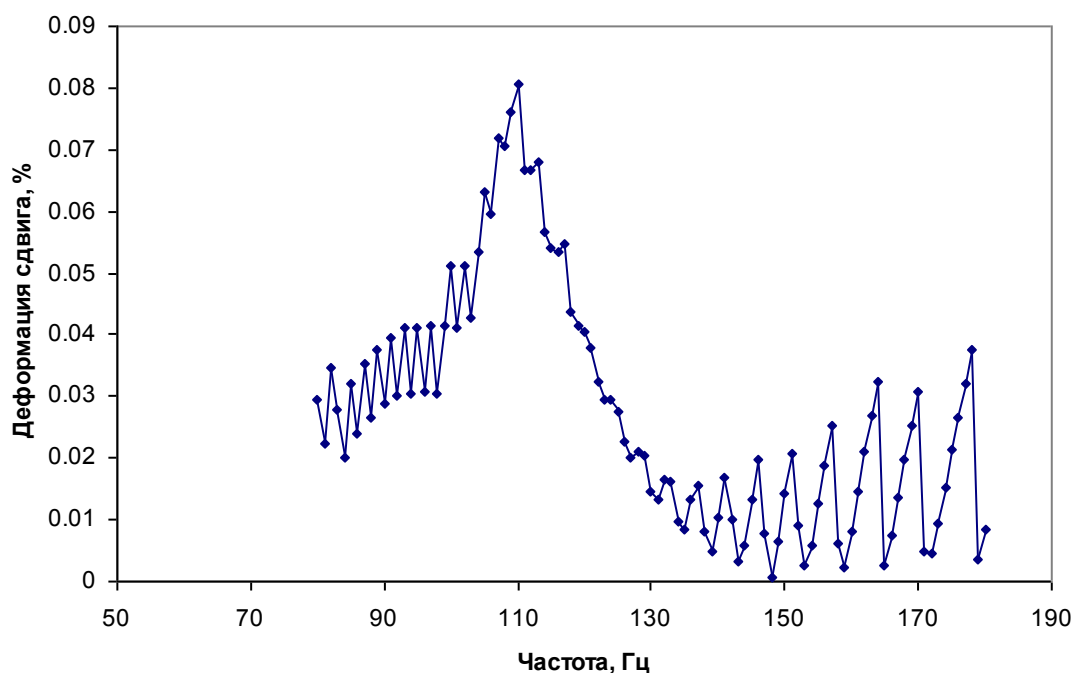


Рис. 1. Характерный вид резонансной кривой глинистого грунта при деформациях сдвига менее 10^{-3} (плотность грунта $\rho = 2,0 \text{ г/см}^3$, влажность $w = 0,22$)

Коэффициент поглощения грунта D определяется по затуханию свободных колебаний (рис. 2) либо по ширине резонансной кривой вблизи резонанса при вынужденных колебаниях, при этом поглощение полагается «классическим» по своей природе. В ходе каждого опыта амплитуда динамической нагрузки постепенно увеличивается, что позволяет определять изменения модуля сдвига (снижение) и коэффициента поглощения (повышение) с увеличением достигаемой амплитуды сдвиговых деформаций (рис. 3).

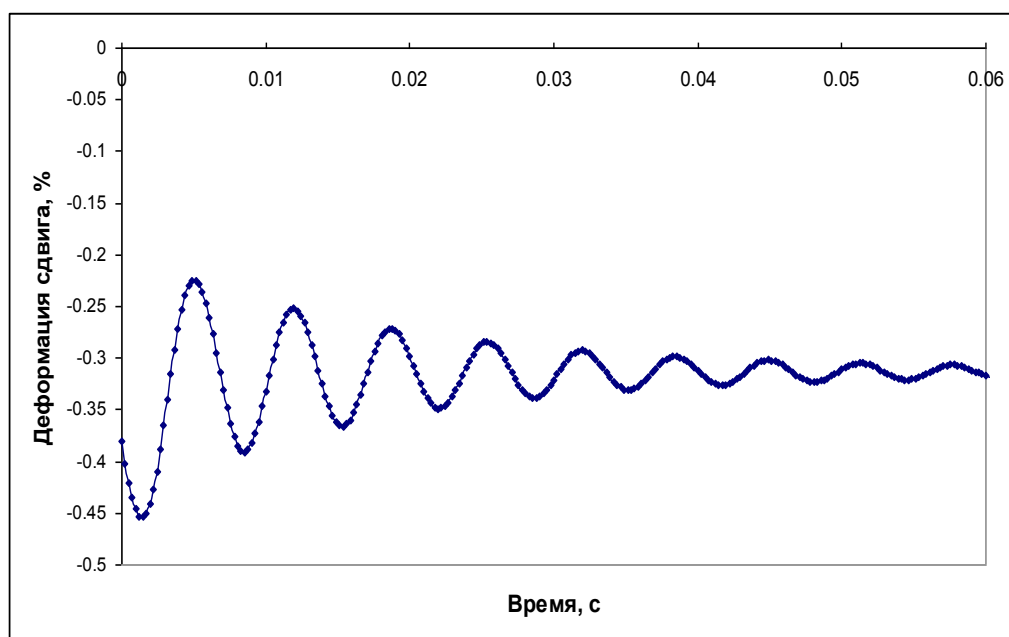


Рис. 2. Пример затухания свободных колебаний образца глинистого грунта во времени

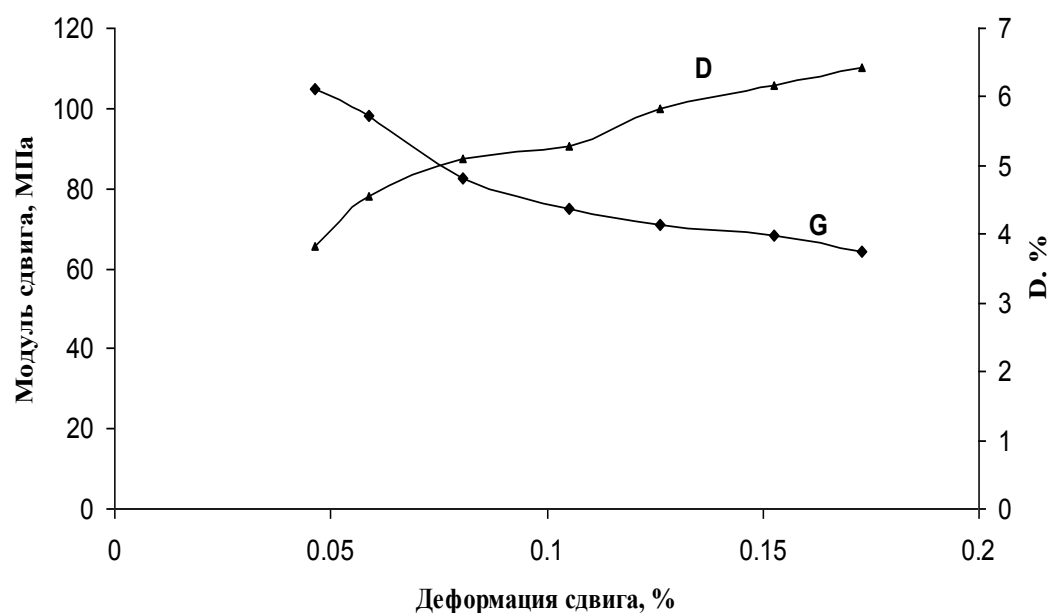


Рис. 3. Пример зависимости упругих и диссипативных характеристик глинистого грунта от уровня сдвиговых деформаций по результатам одного испытания на резонансной колонке

Динамические испытания дисперсных грунтов методом резонансной колонки следует проводить только по консолидированно-недренированной схеме, поскольку любое изменение формы или массы образца в процессе испытания изменяет его момент инерции и искажает итоговый результат.

Испытания песчаных, глинистых, органоминеральных и органических грунтов **методом крутильного сдвига** проводятся для оценки деградации динамического модуля сдвига и роста коэффициента поглощения с увеличением деформации сдвига в диапазоне 0,1---1,0%. Эти характеристики определяют по результатам тестирования образцов грунта в приборах крутильного сдвига или резонансных колонках, имеющих техническую возможность создания значительных вращательных усилий и измерения соответствующих деформаций. Принцип этого метода в целом аналогичен таковому для метода резонансной колонки, однако образец подвергается крутильным колебаниям с постоянной частотой и возрастающим усилием.

Динамические испытания дисперсных грунтов методом крутильного сдвига проводят по консолидированно-недренированной схеме.

Обработка данных заключается в расчете для всех циклов динамического нагружения относительных сдвиговых деформаций γ и касательных напряжений τ с последующим определением динамического модуля сдвига G и коэффициента поглощения D . По результатам расчета строится серия петель гистерезиса для каждого цикла (рис. 4).

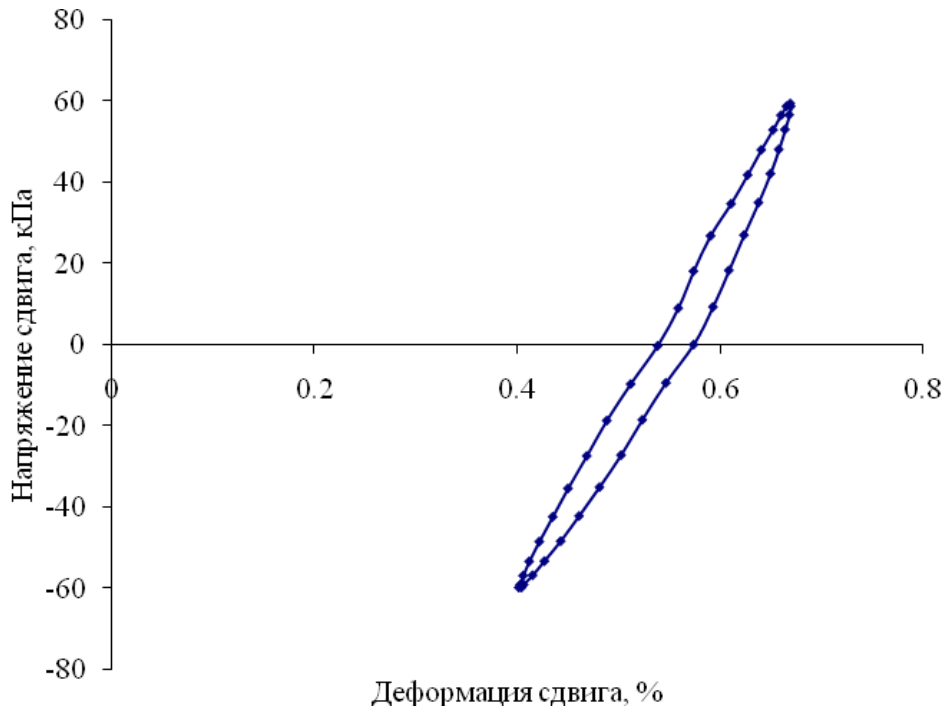


Рис. 4. Пример деформирования грунта в 1-м цикле при крутильном сдвиге

Динамический модуль сдвига G рассчитывается по среднему наклону осевой («скелетной») линии петли гистерезиса (рис. 5):

$$G = \Delta \tau / \Delta \gamma. \quad (1)$$

Коэффициент поглощения D рассчитывается также по петле гистерезиса из соотношения общего количества рассеянной грунтом за один цикл энергии воздействия ΔW и энергии упругих деформаций W :

$$D = \Delta W / 4\pi W. \quad (2)$$

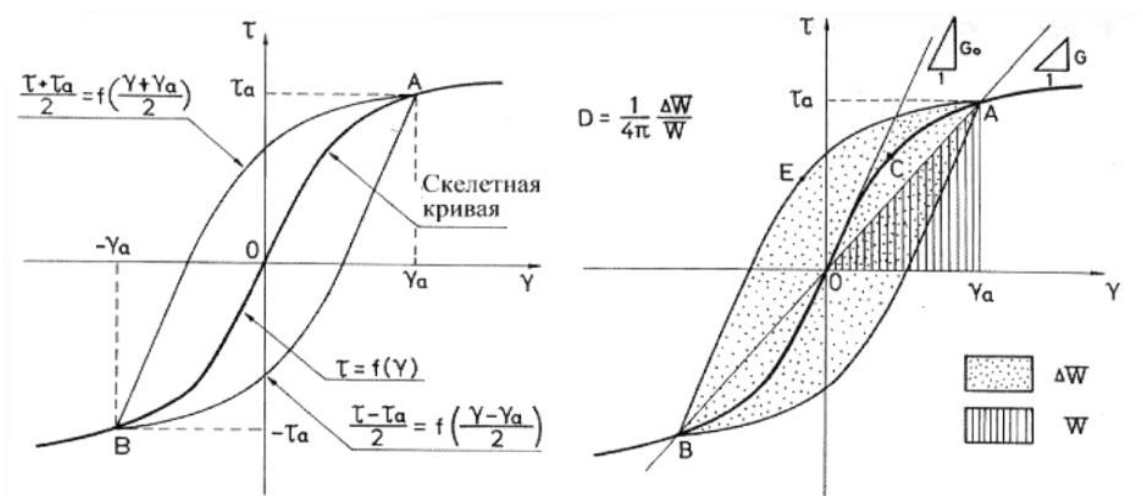


Рис. 5. Определение динамического модуля сдвига G и коэффициента поглощения D по петле гистерезиса [6]: τ -- касательное напряжение; γ -- деформация сдвига; ΔW -- общее количество рассеянной грунтом за один цикл энергии воздействия; W -- энергия упругих деформаций

Выводы

1. Полевые методы оценки динамических свойств грунтов базируются на эмпирических корреляционных зависимостях между непосредственно измеряемыми характеристиками грунтов в массиве и их сопротивлением разжижению без моделирования ожидаемых сейсмических воздействий в массиве, то есть без проведения собственно эксперимента по динамическому нагружению грунта. Эти методы в принципе позволяют количественно оценивать сейсмическую разжижаемость водонасыщенных песчаных грунтов, однако порядок определения этого показателя не предусмотрен ни одним из действующих российских стандартов.

2. В России отсутствуют стандарты, регламентирующие лабораторные динамические испытания грунтов, несмотря на необходимость использования их результатов при проектировании инженерных сооружений в соответствии с требованиями нормативных документов. В результате такие исследования проводятся в рамках специальных требований технических заданий на инженерные изыскания для проектирования отдельных сооружений по различным, не согласующимся между собой и часто недостаточно корректным методикам. Поэтому качество получаемых материалов определяется только квалификацией автора той или иной методики и использование таких данных при проектировании является затрудненным.

3. Существует настоятельная необходимость в принятии национального стандарта на лабораторные динамические испытания дисперсных грунтов. Исходя из востребованности и частоты использования разных методов таких испытаний в России он должен устанавливать требования к испытаниям дисперсных грунтов методами динамического трехосного сжатия, малоамплитудных динамических испытаний в резонансных колонках и крутильного сдвига. Использование этих методов позволяет решить все задачи определения динамических свойств грунтов. Данный стандарт должен регламентировать требования к оборудованию, описывать порядок подготовки образцов и проведения испытаний, а также цели и способы обработки результатов всех видов испытаний.

-

Исследования автора в области динамических свойств грунтов в диапазоне малых деформаций, некоторые результаты которых представлены в данной статье, частично поддержаны грантом РФФИ № 13-05-01048-а «Закономерности деформирования дисперсных грунтов в диапазоне малых деформаций».

Список литературы

1. Вознесенский Е.А. Динамическая неустойчивость грунтов. М.: УРСС Эдиториал, 1999. 264 с.
2. Вознесенский Е.А., Коваленко В.Г., Кушнарева Е.С., Фуникова В.В. Разжижение грунтов при циклических нагрузках. М.: МГУ, 2005. 134 с.
3. Вознесенский Е.А., Кушнарева Е.С. Сейсмическая разжижаемость грунтов: инженерная оценка и классифицирование // Инженерная геология. 2012. № 4. С. 11---23.
4. ГОСТ 19912-2012. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием. М.: МНТКС, 2012.
5. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: МНТКС, 2011.
6. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях. СПб.: НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2006. 383 с.

7. Коваленко В.Г., Вознесенский Е.А. Подходы к управлению динамической устойчивостью массивов дисперсных грунтов на территории нефтегазовых месторождений Среднего Приобья // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2007. № 3. С. 82---85.
8. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть I: Общие правила производства работ. М.: Госстрой России, 1997.
9. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть IV: Правила производства работ в районах с особыми природно-техногенными условиями. М.: Госстрой России, 2000.
10. Andrus R.D., Stokoe K.H. (II). Liquefaction resistance of soils from shear wave velocity // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, 2000. V. 126. № 11. P. 1015---1025.
11. Gilstrap S.D., Youd T.L. CPT based liquefaction resistance analyses using case histories: Technical Report CEG-90-01. Provo, Utah, USA: Department of Civil and Environmental Engineering, Brigham Young University, 1998.
12. Seed H.B., Idriss I.M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential // Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE, 1971. V. 97. № SM9. P. 1249---1273.
13. Seed H.B., Tokimatsu K., Harder L.F., Chung R. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations // Journal of Geotechnical Engineering. ASCE, 1985. V. 121. № 12. P. 856---869.
14. Youd T.L. et al. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2001. V. 127. № 10. P. 817---833.

Выходные данные: Журнал «Инженерные изыскания», №5/2013, С. 20-27