

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОСТОГО СДВИГА

МИРНЫЙ А.Ю.

Доцент геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, генеральный директор ООО «Независимая геотехника», к. т. н., г. Москва, Россия
nfo@indep-geo.ru

ИДРИСОВ И.Х.

Генеральный директор ООО НПП «Геотек», г. Москва, Россия

МОСИНА А.С.

Научный сотрудник лаборатории изучения состава и свойств грунтов ИГЭ РАН, заместитель генерального директора ООО «Независимая геотехника», к. г.-м. н., г. Москва, Россия
Mosina.A.S@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Испытания методом простого сдвига на протяжении 60 лет применяются за рубежом, однако в РФ практически не известны. Тем не менее ГОСТ Р 56353-2022 предусматривает возможность проведения испытаний на простой сдвиг в динамическом режиме, что позволяет заменить более сложные и дорогостоящие испытания в приборах трехосного сжатия.

В данной статье рассматриваются основные принципы испытаний методом простого сдвига, конструкции приборов, предложенные различными исследователями. Отдельное внимание уделено прибору динамического простого сдвига, разработанному ООО НПП «Геотек». Помимо этого в работе приводится подробная методика проведения подобных испытаний и интерпретации их результатов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

механическое поведение грунта; метод динамического простого сдвига; прибор динамического простого сдвига; прибор кембриджского типа; прибор норвежского типа; российский производитель; требования ГОСТ; условия сейсмического воздействия; вертикальные напряжения; касательные напряжения; консолидированно-дренированный режим; консолидированно-недренированный режим; деформация; дополнительная деформация; виброползучесть; динамическая прочность; разжижение.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Мирный А.Ю., Идрисов И.Х., Мосина А.С. Лабораторные испытания методом динамического простого сдвига // Геоинфо. 2024. Т. 6. № 9. С. 14–24.
DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-9-14-24.

LABORATORY TESTS BY THE DYNAMIC SIMPLE SHEAR METHOD

MIRNYY A.Yu.

Associate professor at the Faculty of Geology of Lomonosov Moscow State University, the head of "Independent Geotechnics" LLC, PhD, Moscow, Russia
info@indep-geo.ru

IDRISOV I.Kh.

Head of "Geotek" LLC, Moscow, Russia

MOSINA A.S.

Researcher at the Laboratory for Studying the Composition and Properties of Soils, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Science; the deputy general director of "Independent Geotechnic" LLC, PhD, Moscow, Russia
Mosina.A.S@yandex.ru

ABSTRACT

Simple shear tests have been used abroad during 60 years, but they are practically unknown in the Russian Federation. Nevertheless, GOST R 56353-2022 provides for the possibility of conducting simple shear tests in dynamic mode, which allows replacing more complex and expensive tests in triaxial compression devices.

This paper discusses the basic principles of simple shear testing, the device structures proposed by various researchers. Special attention is paid to the dynamic simple shear device developed by "NPP Geotech" LLC. In addition, the paper describes a detailed procedure of conducting such tests and interpreting their results.

KEYWORDS:

soil mechanical behavior; dynamic simple shear method; dynamic simple shear device; Cambridge type device; Norwegian type device; Russian manufacturer; GOST requirements; seismic impact conditions; vertical stresses; shear stresses; consolidated-drained mode; consolidated-undrained mode; strain; additional strain; vibrocreep; dynamic strength; liquefaction.

FOR CITATION:

Mirnyy A.Yu., Idrisov I.H., Mosina A.S. *Laboratornyie ispytaniya metodom dinamicheskogo prostogo sdviga* [Laboratory tests by the dynamic simple shear method] // *GeoInfo*. 2024. Vol. 6. № 9. S. 14–24. DOI:10.58339/2949-0677-2024-6-9-14-24 (in Rus.).

Введение ▶

Испытания методом динамического простого сдвига выполняют для исследований механического поведения грунтов в диапазоне деформаций сдвига γ от 10^{-3} до 10^{-1} и более. Подобные циклические испытания хорошо воспроизводят работу грунта в условиях сейсмического воздействия, поскольку позволяют нагружать образец грунта вертикальной статической нагрузкой и одновременно прикладывать к нему знакопеременную касательную силу, физически моделируя распространение волн у поверхности земли. Кроме этого, они позволяют выполнять испытания с вращением осей главных напряжений и/или главных деформаций в условиях плоской деформации, что наблюдается в массивах грунтов под реальными инженерными сооружениями. Следует отметить, что испытания в условиях динамического простого сдвига, как и статического, не предполагают фиксации поверхности среза – она образуется в ходе испытания и зависит от неоднородности строения образца грунта.

В зарубежной литературе испытания методом динамического простого сдвига известны под названием *direct simple shear*, или *DSS* (в дословном переводе –

«прямой простой сдвиг»), что обычно подразумевает проведение в одном приборе двух испытаний – методом обычного прямого среза и методом простого сдвига. Тем не менее большинство приборов простого сдвига на самом деле таковыми не являются – их правильное было бы называть приборами многоплоскостного среза. Это связано с тем, что в грунтах с неоднородностями строения (и, как следствие, с неоднородностями жесткости и прочности) взаимное смещение отдельных сечений – колец обоймы – необязательно будет одинаковым, если между кольцами прибора отсутствует жесткая кинематическая связь. Следовательно, в образце не сформируется однородное деформированное состояние, как это было бы в изотропном сплошном теле. Тем не менее в настоящей статье приборами простого сдвига называются те приборы, в которых между отдельными сечениями отсутствует кинематическая связь, так как к этой категории относится большинство промышленно выпускаемых конструкций.

Метод динамического простого сдвига в общем случае заключается в нагружении образца вертикальным (нормальным) и касательным напряжениями,

действующими на верхней или нижней торцевой поверхности цилиндрического или призматического образца при ограничении перемещений на других границах образца (рис. 1). Испытание начинается с предварительного уплотнения – консолидации, при отсутствии касательных напряжений напряженное состояние в образце подобно условиям компрессионного сжатия. В случае связных грунтов консолидация может проводиться и вне камеры, в приборах предварительного уплотнения. На втором этапе испытания воспроизводят циклический сдвиг грунта при его постоянном объеме, динамическая составляющая нагрузки прикладывается в виде горизонтально направленной силы. Постоянство объема в ходе испытания обеспечивается невозможностью поперечного расширения образца (ему препятствуют жесткие кольца обоймы) и поддержанием постоянной высоты образца путем фиксации перемещений верхнего штампа. При этом, очевидно, вертикальное напряжение будет изменяться в зависимости от протекания процессов дилатансии/контракции. Предполагается, что изменение полного измеряемого вертикального напряжения в ходе сдвига равно изменению по-



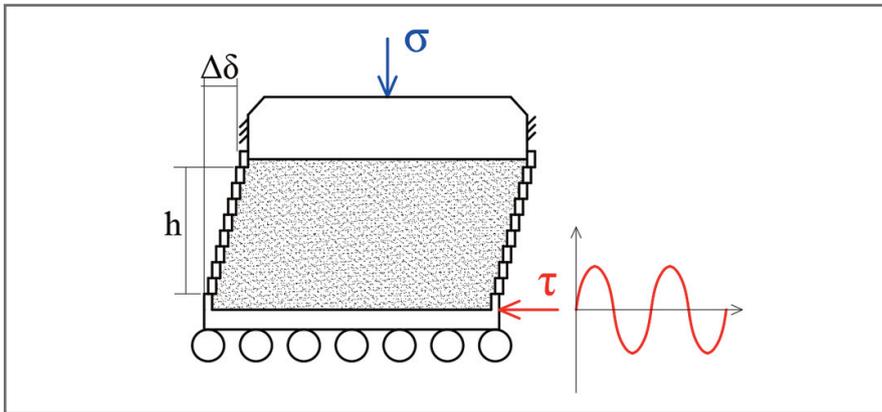


Рис. 1. Схема прибора динамического простого сдвига

рового давления при недренированном испытании. Таким образом, режим испытания – консолидированно-недренированный.

Конструкции приборов для испытаний методом динамического простого сдвига ►

История создания прибора динамического простого сдвига началась в 50-е годы XX века. В 1951 году Чельман (Kjellman) [1] разработал устройство для испытаний цилиндрических образцов в условиях простого сдвига с резиновой оболочкой, армированной проволокой. Динамическая нагрузка в нем прикладывалась в одном горизонтальном направлении к верхнему торцу короткого цилиндрического образца, заключенного в резиновую мембрану и ряд тонких жестких колец. Продолжавшаяся разработка прибора динамического простого сдвига привела к выделению двух типов его конструкции, которые до настоящего момента остаются основными. К ним относятся прибор кембриджского типа (Cambridge University-type, CU-type) и норвежского типа (Norwegian Geotechnical Institute, NGI) (рис. 2).

Создание так называемого кембриджского прибора простого сдвига принято относить к 1953 году. Так, Роско (Roscoe) определил, что устройство, разработанное Чельманом [1], не позволяет создавать однородное напряженное состояние по поперечному сечению образца, потому что напряжения в этом случае должны быть касательными к круговой границе. И Роско [1] предложил жесткий механизм сдвига, а вместо цилиндрической формы образца принял прямоугольную. Образец имел размер в плане 100 мм × 100 мм и высоту 20 мм и ограничивался по боковым сторонам жесткими пластинами, закрепленными на шарнирах и скользящих за-

делках для достижения условий простого сдвига [3, 4]. Боковые стенки, параллельные направлениям деформаций сдвига, были закреплены относительно основания, в результате чего воспроизводились условия плоской деформации. Деформация чистого сдвига реализовывалась путем поворота боковых граней относительно двух шарниров при смещении нижнего штампа в горизонтальном направлении. Однако в этом приборе конструктивно невозможно было реализовать недренированные испытания грунта. Помимо этого недостатком приборов такого типа является прямоугольная форма испытываемых образцов, которая усложняет их подготовку ввиду сложности сохранения ненарушенной структуры. Кроме того, наличие углов приводит к дополнительной неоднородности распределения деформаций. Позже исследователи, являющиеся авторами работ [5–8], усовершенствовали некоторые элементы кембриджского прибора простого сдвига.

Второй, и более распространенный, норвежский тип прибора простого сдвига NGI был разработан в 1966 году в Норвежском институте геотехники [9]. Его конструкция характеризуется более гибкой обоймой – цилиндрический образец размещен в резиновой оболочке и армирован металлической проволокой. Предполагается, что обмотка предотвращает изменение диаметра образца во время испытания, в то же время допуская вертикальные деформации во время уплотнения. В приборе NGI проводили испытания цилиндрического образца высотой 2 см и диаметром 8 см, находящегося в армированной резиновой оболочке, герметично соединенной с верхним штампом и основанием. Однако и этот тип прибора не лишен проблемы неоднородности распределения напряжений и деформаций. Так, исследование, прове-

денное Лаксом (Lucks) с соавторами [10], позволило установить, что 30% объема образца в приборе типа NGI находятся в условиях неоднородного напряженного состояния, которое при росте уровня деформаций увеличивается, что приводит к разрушению образцов при меньших напряжениях [11]. Неравномерность распределения объемных деформаций в приборе была отмечена также Казагранде (Casagrande) [12] – даже поддержание постоянного объема образца при динамическом нагружении не может предотвратить перераспределение поровой влаги в образце. Первоначальная конструкция прибора типа NGI неоднократно модифицировалась. Так, ее доработкой занимались Казагранде (Casagrande) [12], Деальба (de Alba) с коллегами [13], Анселл и Браун (Ansell, Brown) [5] и другие. В 1979 году исследователи из Днепропетровского инженерно-строительного института (ДИИТ) под руководством профессора М.Н. Гольдштейна заменили армирующую стальную проволоку на стопку алюминиевых колец вокруг образца, сдвиг в этом случае осуществлялся перемещением верхней плиты. Образец имел диаметр 6 см и окружался резиновой оболочкой с металлическими плоскими кольцами вокруг, зазоры между которыми составляли 1–2 мм.

В нескольких исследованиях были предприняты попытки измерить радиальное напряжение в приборе DSS типа NGI [14, 15]. Модификация прибора в основном заключалась в реализации возможности контроля боковых сжимающих напряжений в ходе динамического нагружения [16]. Некоторые исследователи заменили армирование проволокой в NGI на приложение в камере бокового давления, что позволило им контролировать поперечное напряжение на этапах консолидации и сдвига [17, 18]. Кроме того, конструкция модифицировалась под отдельные задачи. Например, доработка прибора выполнялась для реализации в ней исследований динамического поведения грунта при малых деформациях [19–21]. Модификации проводились и для испытаний в условиях разнонаправленного нагружения [22–26].

Последние десятилетия выполнялось большое количество модификаций приборов простого сдвига. Многие из них направлены на решения частных задач и разрабатываются отдельными исследователями и университетами. При этом большинство совершенствований приборов простого сдвига основано на

модифицировании двух приведенных типов конструкций.

В настоящее время приборы простого сдвига разработаны и реализуются ведущими крупными производителями лабораторного оборудования. Следует отметить, что они часто используются как альтернатива более дорогим и трудоемким динамическим стабилометрам, так как многие из моделей имеют возможность динамического нагружения. Среди зарубежных производителей можно выделить компании Geocomp (www.geocomp.com), GDS (www.gdsinstruments.com), Controls (www.controls-group.com); VJ Tech (www.vjtech.co.uk), Wille Geotechnik (www.wille-geotechnik.com), а также японские компании (www.marui-group.co.jp, www.seikensha.com).

Например, динамический прибор простого сдвига с возможностью создания бокового давления (до 2 МПа), производимый компанией VJ Tech, использует два электромеханических привода для создания вертикальной и горизонтальной нагрузок на образец (диаметром 70 или 100 мм) и дает возможность проводить как испытания в камере трехосного сжатия, так и стандартные испытания в условиях простого сдвига с использованием ограничивающих колец без всестороннего давления. Вертикальное и горизонтальное перемещения измеряются индуктивными датчиками или энкодерами и являются частью сервомоторов с защитой максимальной величины перемещения по каждой из осей. Вертикальная и горизонтальная нагрузки измеряются внутренними датчиками. Обратное давление контролируется гидравлическим контроллером, а всестороннее давление создается воздухом через интерфейс «воздух – вода».

Прибор производства компании Wille Geotechnik создает статическую вертикальную и динамическую горизонтальную нагрузки с частотой 1 Гц. Образец грунта ограничен стальными кольцами.

Российские производители лабораторного оборудования также конструировали и совершенствовали приборы простого сдвига. Так, накопленный опыт при разработке приборов простого сдвига и динамического оборудования позволил компании ООО НПП «Геотек» выпустить на рынок собственную динамическую сдвиговую установку ГТ 1.2.17. Ее конструкция основана на базе прибора простого сдвига типа NGI. В ГТ 1.2.17 цилиндрический образец помещается в резиновую оболочку, ко-

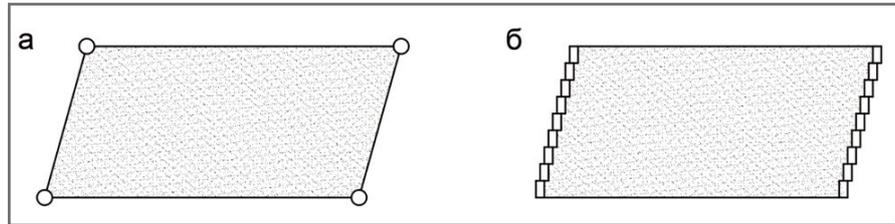


Рис. 2. Схема механизма работы проборов простого сдвига двух типов: а – кембриджского (Cambridge University type, CU type); б – норвежского (Norwegian Geotechnical Institute, NGI)

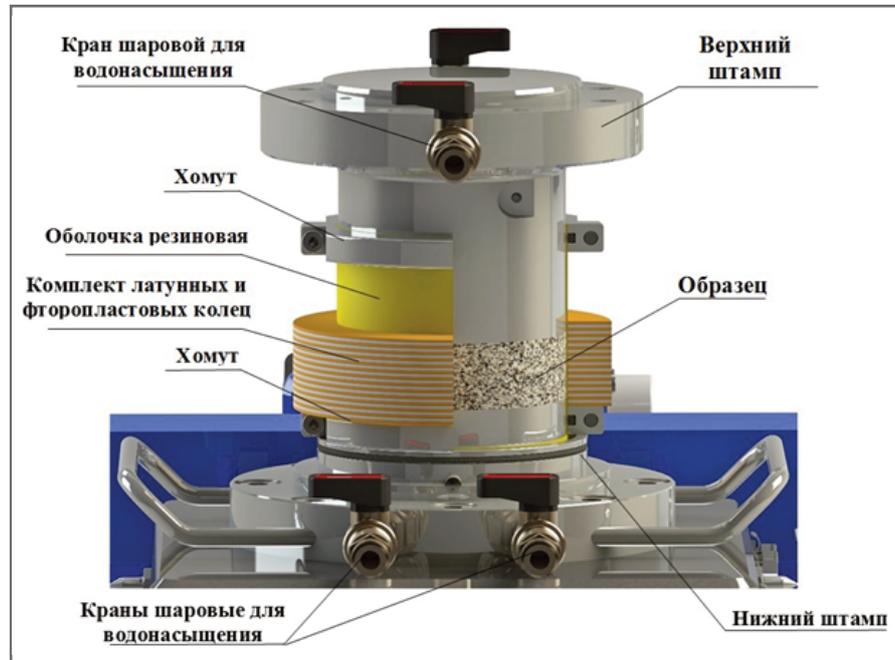


Рис. 3. Конструкция прибора динамического простого сдвига ГТ 1.2.17 производства компании ООО НПП «Геотек»

торая окружена отдельными кольцами. Последние могут соединяться между собой посредством вертикальных скользящих направляющих, наклоняющихся в ходе опыта по мере развития сдвига. Данная конструкция позволяет реализовать однородное напряженно-деформированное состояние в образце грунта на протяжении всего опыта даже при значительных смещениях, как в приборах кембриджского типа. Это означает, что каждая точка образца будет испытывать сдвиг на одну и ту же величину. Следовательно, появляется возможность определения сдвиговой жесткости образца, ведь известны его высота и угол формоизменения (рис. 3).

В динамическом приборе ГТ 1.2.17 сдвиг образца грунта осуществляется путем перемещения нижней каретки прибора относительно неподвижной верхней при передаче на образец вертикальной нагрузки. Он представляет собой рамную настольную конструкцию с вертикальными и горизонтальными электромеханическими силовыми при-

водами. Усилие, создаваемое приводами, измеряется датчиками силы с номинальной нагрузкой 5 кН и 10 кН. Вертикальная нагрузка создается электромеханическим приводом и передается на образец через подвижную traversу. Сдвигающая нагрузка создается под управлением серводвигателя через подвижную каретку (рис. 4). В конструкции привода используются компоненты, обеспечивающие отсутствие люфтов при знакопеременной нагрузке. Системы линейного перемещения верхней обоймы и срезной каретки конструктивно выполнены с преднатягом, что позволяет добиться большей жесткости установки. Для удобства установки и выгрузки образца грунта в приборе предусмотрена возможность горизонтального выдвигания каретки.

Динамический прибор производства компании ООО НПП «Геотек» позволяет выполнять испытания грунтов в консолидированно-недренированном и консолидированно-дренированном режимах. Консолидация грунта с водона-

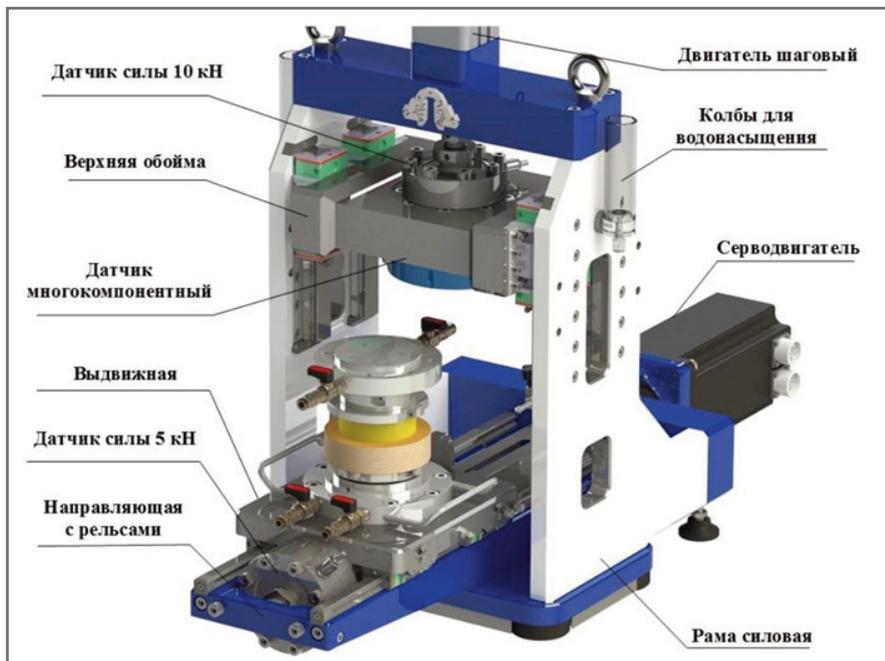


Рис. 4. Конструкция прибора динамического простого сдвига ГТ 1.2.17 производства компании ООО НПП «Геотек»

Таблица 1. Технические характеристики прибора динамического простого сдвига ГТ 1.2.17 производства компании ООО НПП «Геотек»

Техническая характеристика	Значение
Вертикальная нагрузка (в статическом режиме), кН	до 10
Минимальная ступень приращения вертикальной и горизонтальной нагрузок, % от диапазона измерительного канала	не более 0,05
Скорость приложения вертикальной нагрузки в установке, кН/с	до 0,25
Горизонтальная нагрузка (в динамическом режиме), кН	до 5
Частота воздействия сдвигающего усилия, Гц	до 5
Вертикальные деформации образца, мм	до 10
Деформации среза образца, мм	до 20
Размеры образцов (диаметр, мм × высота, мм)	71,4×21,5

сыщением выполняется без противодействия непосредственно в сдвиговом устройстве. Испытания методом динамического простого сдвига в установке ГТ 1.2.17 позволяют: определить потерю прочности грунта, оценить дополнительные деформации грунтов (виброползучесть) с накоплением критической для данного сооружения деформации грунтов в условиях динамического воздействия, изучить возможность динамического разжижения водонасыщенного грунта и др. Испытания грунтов в рассмотренной установке возможны также в стандартном монотонном режиме со статическим и кинематическим способами силового воздействия. Технические характеристики установки динамического простого сдвига производства компании ООО НПП «Геотек» приведены в таблице 1.

Прибор простого сдвига ГТ 1.2.17, производства ООО НПП «Геотек» разрабатывался с учетом требований ГОСТ Р 56353-2022 и полностью им соответствует.

Методика проведения испытаний методом динамического простого сдвига ▶

На территории РФ проведение испытаний методом простого сдвига регламентируется ГОСТ Р 56353-2022, разработанным ООО «Геологический научно-методический центр МГУ имени М.В. Ломоносова», ассоциацией «Инженерные изыскания в строительстве» при участии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Этим методом допускается проводить испытания песчаных, глинистых, органи-

неральных и органических грунтов для определения:

- возможности потери прочности грунтов в условиях динамических нагрузок;
- дополнительных деформаций дисперсных грунтов в условиях наложения динамических нагрузок;
- возможности динамического разжижения водонасыщенного грунта.

Испытания проводятся в консолидированно-дренированном (в случае оценки дополнительной деформации во времени за счет виброползучести) и в консолидированно-недренированном режимах (оценка динамической прочности, возможности разжижения, дополнительных деформаций после разжижения). Консолидацию (предварительное уплотнение) образца проводят по аналогии с требованиями ГОСТ 12248.1-2020 (по методу одноплоскостного среза), ГОСТ 12248.4-2020 (по методу компрессионного сжатия), а также ГОСТ Р 71042-2023 (по методу простого сдвига). Выбор вертикальных напряжений консолидации проводится с учетом условий природного залегания грунта и дополнительной нагрузки (при ее наличии).

Стадия недренированного испытания проводится в условиях постоянного объема образца при открытых в атмосферу дренажах. Поддержание неизменности объема обеспечивается системой механического или электронного контроля высоты образца после завершения консолидации. Измеряемое давление на верхний штамп является эффективным вертикальным напряжением σ'_v .

При проведении дренированных испытаний высота образца в ходе приложения сдвиговой нагрузки может изменяться, вертикальное напряжение поддерживается постоянным. Этот режим используется только при оценке виброползучести.

ГОСТ допускает применение приборов любой конструкции – как с мембранами, армированными проволоочной пружиной, так и со стопкой металлических колец, ограничивающих расширение образца. Особое внимание уделяется жесткости измерительной системы и отсутствию паразитного трения в устройствах передачи вертикальной и горизонтальной нагрузки. При этом допускается проведение испытаний с различными граничными условиями по нагрузке – с контролем напряжений и с контролем деформаций. Диапазон частот приложения нагрузки – не менее 0,01–0,50 Гц. Измеряе-

мыми в ходе опыта величинами являются: вертикальная и горизонтальная силы; горизонтальное смещение (динамическая и постоянная составляющие); изменение высоты в ходе уплотнения (консолидации) и сдвига (для дренированных испытаний). При этом частота регистрации значений измеряемых величин должна составлять не менее 50 измерений за цикл динамического нагружения.

Для испытаний используют образцы грунта ненарушенного сложения с природной влажностью или искусственно сформированные образцы нарушенного сложения с заданными значениями плотности и влажности. Образец должен иметь форму цилиндра с предельным отношением высоты к диаметру не более 0,4. Торцы образца должны быть плоскими и строго перпендикулярными его вертикальной оси. При работе с пылевато-глинистыми грунтами следует уделять внимание возможному развитию набухания при доувлажнении – для набухающих грунтов дополнительное водонасыщение следует проводить только после приложения вертикальной нагрузки, превышающей давление набухания.

Подготовку водонасыщенных образцов песчаных грунтов из проб нарушенного сложения ведут непосредственно на платформе прибора способами осадения в воде, влажного трамбования или сухой послойной отсыпки воздушно-сухого песка с последующим водонасыщением. С учетом того что конструкция прибора чаще всего не предполагает дополнительного измерения избыточного порового давления, дополнительный контроль качества водонасыщения по параметру Скемптона V не выполняется. Это не вызывает снижения качества измерений, так как постоянство объема порового пространства в недренированном режиме обеспечивается конструкцией прибора и условиями испытания.

Недренированные испытания для оценки динамического разжижения

Расчет динамических напряжений, если они не заданы каким-либо иным способом, приведен в приложении Г к ГОСТ Р 56353-2022. Для оценки сейсмических нагрузок при землетрясениях различной интенсивности с неглубоким расположением очага (на глубинах в десятки километров) необходимо определить частоту f , количество циклов N и CSR (отношение динамиче-

Таблица 2. Зависимость ожидаемого количества циклов от магнитуды землетрясения

Параметр	Значения				
	5,25	6,00	6,75	7,50	8,50
Магнитуда	5,25	6,00	6,75	7,50	8,50
Число циклов нагружения N	2–3	5	10	15	26

ских касательных напряжений τ_{av} к статическим нормальным σ'_v):

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_v} = \frac{0,65a_{max}\sigma'_v r_d}{g\sigma'_v}, \quad (1)$$

где τ_{av} – среднее значение ожидаемых циклических касательных напряжений; a_{max} – максимальное ожидаемое горизонтальное ускорение колебаний на поверхности грунта; σ'_v , σ'_v – соответственно полное и эффективное вертикальные напряжения на рассматриваемой глубине; g – ускорение свободного падения; r_d – коэффициент снижения напряжений с глубиной.

Максимальное ожидаемое горизонтальное ускорение колебаний на поверхности грунта a_{max} определяется в ходе инструментальных наблюдений и может приниматься на основании акселерограмм, доступных для данного района. Между этим параметром и параметром PGA (peak ground acceleration) есть смысловая разница. PGA характеризует максимальное ускорение на поверхности, которое не всегда соответствует горизонтальному, особенно вблизи очагов сильных землетрясений. Однако на достаточном удалении вертикальная составляющая ускорения невелика и $PGA \approx a_{max}$. Помимо этого PGA может приводиться как в виде абсолютных величин (в этом случае имеет размерность ускорения m/c^2), так и как коэффициент относительно величины g (в этом случае $a_{max} = PGA \cdot g$).

Коэффициент снижения напряжений с глубиной может определяться по результатам непосредственных сейсмических измерений на площадке. При их отсутствии ГОСТ допускает использование эмпирических зависимостей, в качестве наиболее общей (до глубин z до 23 м) из которых приводится следующая:

$$r_d = \frac{1 - 0,4213z^{0,5} + 0,04052z + 0,001753z^{1,5}}{1 - 0,4117z^{0,5} + 0,05729z - 0,006205z^{1,5} + 0,00121z^2}. \quad (2)$$

Таким образом, на основании сведений об интенсивности землетрясения, глубине рассматриваемой точки и природном напряженном состоянии в этой точке определяется величина CSR , позволяющая для каждого испытания найти соответствующее значение τ_{av} .

Частота воздействия f_0 назначается с учетом нескольких факторов. Во-первых, частота не может быть ниже 0,01 Гц, так как при низких скоростях нагружения могут начать проявляться реологические эффекты. Во-вторых, частота воздействия должна обеспечивать приемлемое количество точек измерений за цикл, за счет чего максимальная частота ограничивается возможностями оборудования. Оптимальным является выбор частоты воздействия на основании преобладающего частотного диапазона воздействия – обычно это величина около 0,5 Гц. ГОСТ не допускает проведение испытаний на сейсмическое нагружение при частотах выше 10 Гц.

Число циклов нагружения N при оценке сейсмической разжижаемости назначается в соответствии с магнитудой ожидаемого землетрясения (таблица 2). Промежуточные значения определяются интерполяцией.

При наличии данных о длительности t и центральной частоте f_0 ожидаемого сейсмического воздействия, число циклов N может быть рассчитано по формуле:

$$N = t \cdot f_0, \quad (3)$$

Если очаги возможных землетрясений расположены на значительном удалении (в сотни километров), в спектре ожидаемого сейсмического воздействия будут преобладать поверхностные волны Рэлея, считающиеся наиболее опасными для сейсмической устойчивости сооружений. В этом случае рекомендуется проводить ориентировочный расчет возможных напряжений в поверхностной волне в соответствии с формулой:

$$\sigma = \rho CV, \quad (4)$$

где σ – напряжение; ρ – плотность грунта; C – скорость распространения волны в данной среде; V – скорость смещения частиц в волне данного типа.

Для случая прибора простого сдвига перейти от нормальных напряжений к касательным можно, предположив, что максимальные касательные напряжения

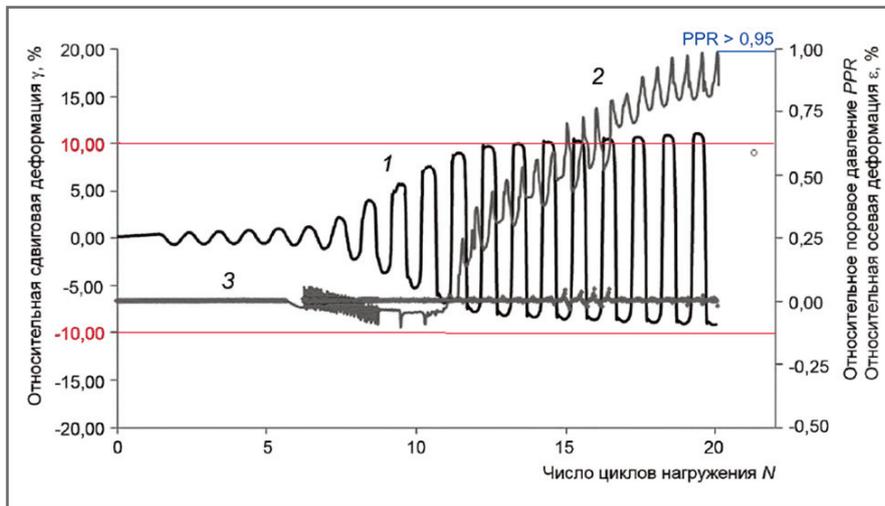


Рис. 5. Определение сейсмической разжижаемости по зависимостям: 1 – деформаций сдвига γ от числа циклов; 2 – относительного порового давления PPR от числа циклов; 3 – относительной осевой деформации ϵ_v от числа циклов

будут действовать на площадках, наклоненных под 45° к оси действия нормальных напряжений. В этом случае $\tau_{cr} = \sigma/2$.

Как источник динамической нагрузки может выступать не только землетрясение, но и воздействие волн в акваториях. В этом случае в качестве входных параметров воздействия используются расчетная высота волны H_w , период волны T_w и расчетная длительность шторма t_w . Эти данные могут быть получены на основании гидрометеорологических наблюдений для конкретного региона.

Амплитуда динамических напряжений σ_d определяется в зависимости от плотности жидкости ρ_w , ускорения свободного падения g и высоты волны H_w по формуле:

$$\sigma_d = 0,5\rho_w g H_w. \quad (5)$$

Как и в случае сейсмического воздействия, для прибора простого сдвига требуется значение амплитуды касательных напряжений, определяемое аналогично.

Частота нагружения и количество циклов принимаются по формулам:

$$\begin{aligned} f_w &= 1/T_w, \\ N &= t_w/T_w. \end{aligned} \quad (6)$$

С учетом того что расчетная длительность штормового воздействия может достигать нескольких часов, испытание будет иметь аналогичную продолжительность.

При определении волнового воздействия на откосные сооружения (например, основания набережных и причаль-

ных стенок) следует руководствоваться требованиями приложений Г и Д к СП 38.13330.2018.

Динамическое нагружение в зависимости от задачи испытания ведут либо до разрушения (при достижении амплитуды сдвиговой деформации более 15%), либо до достижения заданного программой испытаний числа циклов воздействия. При испытании песков на разжижаемость критерием остановки теста служат достижение 100%-ного коэффициента порового давления PPR , амплитуды сдвиговой деформации более 10% либо завершение заданного числа циклов воздействия.

Обработка данных заключается в расчете для всех этапов динамического нагружения значений $\Delta\sigma_v$, τ_d , PPR , осевой (ϵ) и сдвиговой (γ) деформаций образца в зависимости от времени или числа циклов нагружения N . По измеренным в процессе испытания значениям горизонтальной сдвигающей и нормальной вертикальной нагрузок вычисляют касательные и нормальные напряжения в соответствии с ГОСТ 12248.1-2020 и ГОСТ Р 71042-2023. Сдвиговую деформацию рассчитывают по формуле:

$$\gamma = \frac{\Delta l}{h_k}, \quad (7)$$

где Δl – измеренное горизонтальное смещение подвижного торца образца относительно его начального положения после консолидации; h_k – высота образца после консолидации.

При определении сейсмической разжижаемости грунтов (прямая задача) по вычисленным значениям строят зависи-

мости $\gamma=f(N)$ и $PPR=f(N)$ (рис. 5). Факт разжижения фиксируют при достижении величин PPR значения более 0,95 при условии достижения двойной амплитуды (размаха) относительной деформации сдвига более 10%. Этим методом проверяется возможность разжижения при фиксированном значении напряжений и фиксированном количестве циклов.

Для определения критического для возникновения разжижения при данных условиях значения τ_d/σ'_v или PGA (обратная задача) необходимо провести серию опытов (не менее шести) с разными амплитудами касательных напряжений, по результатам которых строят зависимости $\gamma=f(N)$, $\tau_d/\sigma'_v=f(N)$ (рис. 6). За критическое значение принимается полученная интерполяцией амплитуда, обеспечивающая разжижение грунта при расчетном числе эквивалентных циклов воздействия N . Это значение может быть использовано для расчета потенциала разжижения по ГОСТ 25100 при заданных характеристиках ожидаемого сейсмического воздействия. Данное испытание проводится, если при заданном исходно уровне нагрузок разжижение не было достигнуто и необходимо определить критическое значение напряжений, при котором разжижение произойдет.

При определении критического при заданных условиях значения τ_d (или τ_d/σ'_v) проводят серию испытаний (не менее шести) с разными амплитудами, по результатам которых строят зависимости $\gamma=f(N)$, $PP=f(N)$ (см. приложение П ГОСТ 56353-2022). Последующий анализ заключается в определении способом интерполяции минимального значения τ_d , достаточного для разрушения грунта, которое фиксируется по достижении $\gamma=15\%$ при заданном числе циклов воздействия N . Данное испытание целесообразно выполнять, если при заданном исходно уровне напряжений разжижение зафиксировано и необходимо выяснить, при каком уровне напряжений образец разжижаться не будет – например, для проектирования мероприятий по снижению уровня касательных напряжений при сейсмическом воздействии.

В случае зафиксированного факта разжижения песчаного грунта следует провести расчет последующей осадки поверхности массива (см. приложение Е ГОСТ 56353-2022) и оценить возможность латерального растекания грунтов при разжижении (см. приложение Ж ГОСТ 56353-2022).

Недренированные испытания для оценки динамической жесткости и поглощения ▶

Метод динамического простого сдвига позволяет определять динамический модуль сдвига грунта G и коэффициент поглощения D в ходе циклического нагружения аналогично тому, как это делается в приборах динамического трехосного сжатия и в резонансной колонке.

После завершения предварительной консолидации при открытых дренажах и фиксированной высоте образца прикладывается динамическая касательная нагрузка. Частота динамического нагружения выбирается аналогично выбору по ранее рассмотренной методике, а амплитуда касательных напряжений τ_d – в виде доли от давления консолидации (например, 2%, 5% и 10%).

Динамический модуль упругости G определяется по зависимости изменения касательных напряжений τ_d от сдвиговой деформации γ (рис. 7). Полученная величина G соответствует достигнутой амплитуде деформации сдвига γ_{\max} – изменение амплитуды напряжений вызовет изменение деформации и позволит получить модуль сдвига при другом уровне деформации.

По этой же схеме может быть определен начальный модуль сдвига G_0 – однако точность его определения будет зависеть от измерительной системы применяемого оборудования.

Коэффициент поглощения D определяется путем расчета площади замкнутой петли за один цикл колебания (ΔW) и отнесения ее к удельной работе упругой деформации (W). Как и модуль сдвига, полученный коэффициент поглощения будет соответствовать достигнутой деформации γ_{\max} . При необходимости по результатам серии испытаний при различных амплитудах напряжений может быть получена зависимость модуля сдвига G и коэффициента поглощения D от уровня деформации сдвига γ .

Данный метод испытаний не предусмотрен ГОСТ 56353-2022, однако может применяться для оценки передаточной характеристики грунтов основания для последующих сейсмических расчетов конструкций.

Дренажные испытания для оценки виброползучести ▶

В консолидированно-дренированном режиме в приборах простого сдвига проводятся испытания дисперсных грунтов на виброползучесть при длительных динамических воздействиях

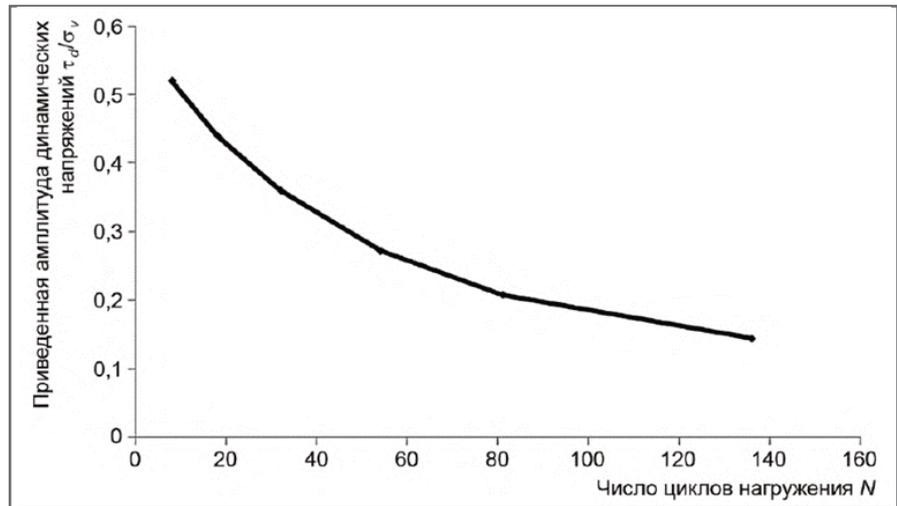


Рис. 6. Определение критического отношения τ_d/σ'_v для заданного числа циклов N

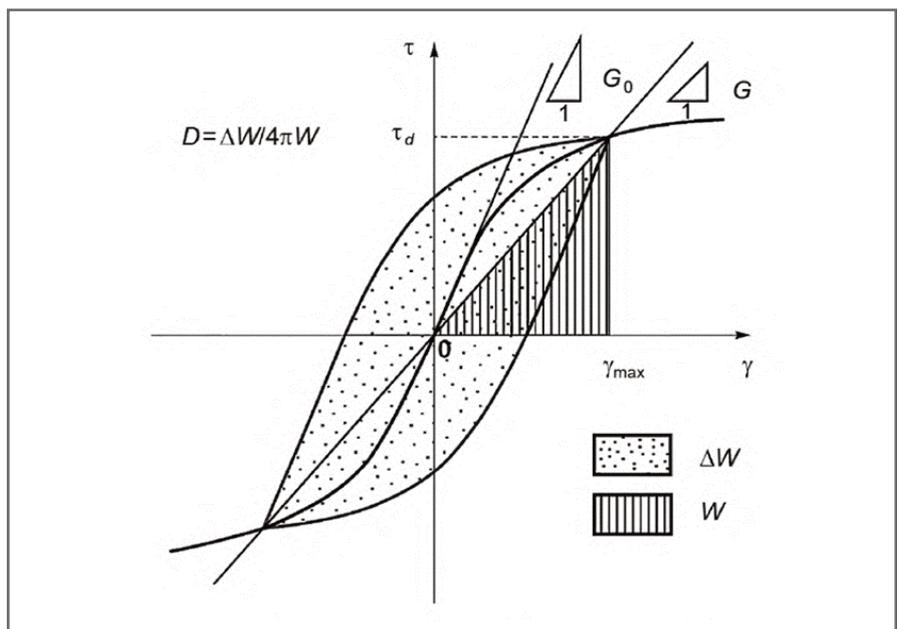


Рис. 7. Схема определения динамического модуля сдвига G и коэффициента поглощения D

умеренной интенсивности и в условиях возможности оттока влаги. Испытание проводят при открытом дренаже и постоянном вертикальном напряжении по завершении стадии предварительной консолидации.

Величину деформации за счет виброползучести ϵ_d определяют при статическом вертикальном напряжении $\sigma_v = \sigma'_v$, соответствующем глубине, для которой прогнозируется длительная деформация от совместного действия статических и динамических нагрузок.

Выбор динамических нагрузок при испытании на виброползучесть определяется источником воздействия – промышленного или технологического оборудования, транспортных сооружений. Для расчета динамических нагрузок необходимы либо значения виброскоростей

колебаний частиц от интересующего источника V_s , по которым далее возможно рассчитать виброускорения или амплитуды динамических напряжений, либо значения напряжений τ_d , возникающие в грунтах при распространении волн.

Следует отметить, что необходимая информация может быть получена только по результатам полевых сейсмических наблюдений вблизи источника вибраций на объектах-аналогах либо по результатам численного моделирования распространения колебаний. При проведении полевых измерений следует выполнять:

- измерения вибраций по трем компонентам вблизи площадок размещения объектов для получения скоростей смещения частиц грунта в сейсмических волнах;

- малоглубинные сейсмические наблюдения;
- измерения вибраций в скважинах для определения зависимости интенсивности колебаний от глубины.

Для расчета пиковых напряжений на фронте волны от рассматриваемого источника измеренные значения скоростей смещения частиц V (м/с) следует пересчитать в напряжения σ аналогично тому, как это делалось для поверхностных волн при сейсмическом воздействии.

Для проектируемых фундаментов оборудования с динамическими нагрузками ожидаемые воздействия на подстилающие грунты следует рассчитывать по характеристикам ожидаемого силового воздействия, которые указываются в паспорте оборудования изготовителем. Исходными параметрами являются масса, рабочая частота и амплитуда колебаний установки, а также конструктивные характеристики фундамента (геометрия, масса, площадь, глубина заложения). Следует отметить, что уровень напряжений и амплитуда колебаний, возникающих в основании фундамента в этом случае, определяются в динамическом режиме в соответствии с СП 26.13330.2012 и должны предоставляться в техническом задании.

Как и в случае сейсмического нагружения, при испытании на виброползучесть частота нагружения должна быть выше 0,01 Гц. Число циклов нагруже-

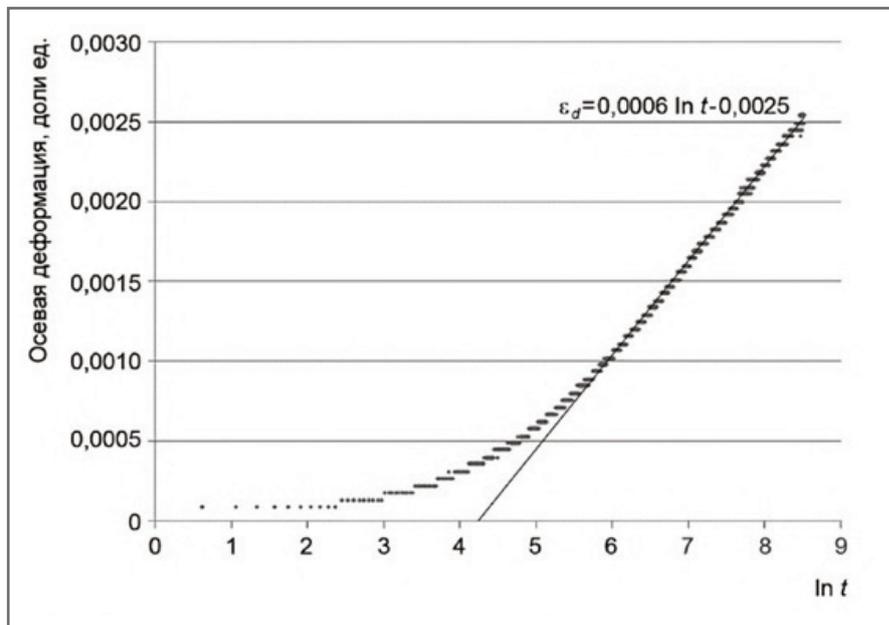


Рис. 8. Логарифмическая зависимость деформации виброползучести от времени при динамическом воздействии

ния при испытании на виброползучесть должно составлять не менее 500 для получения надежного тренда накопления деформаций во времени по результатам испытаний. Критерием завершения испытания в этом случае является достижение заданного программой числа циклов либо разрушение – достижение амплитуды сдвиговой деформации более 15%.

По результатам испытания строят зависимость осевых деформаций от вре-

мени нагружения $\epsilon_d=f(\ln t)$ (рис. 8). На график выносят значения максимальных осевых деформаций не менее чем для каждого десятого цикла нагружения. Экспериментальные значения аппроксимируются функцией вида $\epsilon_d=a\ln t+b$, где a и b – эмпирические параметры. Полученная функция позволяет рассчитать прогнозное значение дополнительной относительной деформации виброползучести при заданном периоде эксплуатации сооружения.

Таблица 3. Выбор режима и необходимых исходных данных в зависимости от цели испытания методом динамического простого сдвига

Цель испытания	Режим опыта*	Необходимые исходные данные	Метод расчета параметров испытания	Результаты опыта
Оценка возможности динамического разжижения при заданных амплитуде напряжений и числе циклов	КН	σ_v и σ_v^* , a_{max} , z , f_0 , M	Проверка достижения $PPR > 0,95$ за заданное число циклов N (п. 9.6.4 ГОСТ 56353-2022)	да/нет
Определение критической амплитуды касательных напряжений для разжижения при заданном числе циклов	КН	либо ρ , C , V , M (удаленное землетрясение),	Определение по серии опытов критической амплитуды, вызывающей разжижение (п. 9.6.5 ГОСТ 56353-2022)	τ_d/σ_v^* или PGA
Определение минимальной амплитуды касательных напряжений для разжижения при заданном числе циклов	КН	либо H_w , T_w , t_w (штормовое воздействие)	Определение по серии опытов минимального значения амплитуды, вызывающей разжижение (п. 9.6.6 ГОСТ 56353-2022)	$\tau_{d,min}$
Определение динамического модуля сдвига и коэффициента поглощения	КН		Графически, по экспериментальной замкнутой петле за один цикл (рис. 7)	$G=f(\gamma)$ $D=f(\gamma)$
Оценка виброползучести	КД	V_s либо τ_d , M , F , a_{max} , f , E	По экстраполяции зависимости $\epsilon_d=f(\ln t)$, путем вычисления значения ϵ_d при времени t , соответствующем сроку службы сооружения	ϵ_d , E_{red}

* КН – консолидированно-недренированный режим; КД – консолидированно-дренированный режим.

Полученное значение относительной деформации виброползучести следует использовать для расчета длительных осадок основания от совместного действия статических и динамических нагрузок в соответствии с СП 22.13330.2016 (пункт 6.14.4). Это значение следует также использовать для расчета уменьшенного значения модуля деформации грунта с учетом проявления виброползучести.

Уменьшенное значение модуля деформации E_{red} следует определять по формуле:

$$E_{red} = \frac{E}{1 + \frac{E\varepsilon_d}{\beta\sigma_z}}, \quad (8)$$

где E – модуль деформации, МПа, определяемый в соответствии с ГОСТ 12248.3; β – безразмерный коэффициент учета невозможности бокового расширения в соответствии с

СП 22.13330.2016, $\beta=0,8$; σ_z – статическое вертикальное напряжение.

Выводы ►

Метод динамического простого сдвига позволяет изучать механическое поведение грунта при уровнях деформаций сдвига от 10^{-3} до 10^{-1} и более, что хорошо воспроизводит его работу в условиях сейсмического воздействия. Данный метод представляет собой нагружение образца вертикальными и касательными напряжениями, действующими с торцевой части образца при ограничении перемещений на других границах. За более чем полувековую историю создания и модернизации приборов динамического простого сдвига выделилось две их основные конструкции – кембриджского и норвежского типов. К последнему относится динамическая сдвиговая уста-

новка ГТ 1.2.17, созданная российским производителем – ООО НПП «Геотек». В статье приведено подробное описание данного прибора, разработанного с учетом требований ГОСТ Р 56353-2022.

Метод динамического простого сдвига позволяет проводить испытания в консолидированно-дренированном и консолидированно-недренированном режимах. В общем случае первый из них применяется для оценки дополнительной деформации во времени за счет виброползучести, второй – для оценки динамической прочности, возможности разжижения и дополнительных деформаций после разжижения. Итоговое обобщение методов испытаний динамическим простым сдвигом, принципов их выбора, а также необходимых исходных данных в зависимости от цели исследований приведено в таблице 3. 

Список литературы ►

1. Kjellman W. Testing the shear strength of clay in Sweden // *Geotechnique*. 1951. Vol. 2. № 3. P. 225–232.
2. Roscoe K.H. An Apparatus for the application of simple shear to soil samples // *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, Switzerland, 1953*. Vol. 1. P. 186–191.
3. Airey D.W., Budhu M., Wood D.M. Some aspects of the behaviour of soils in simple shear // *Developments in soil mechanics and foundation engineering. Vol. 2: Stress-strain modelling of soils* (ed. by P.K. Banerjee, R. Butterfield). Elsevier, 1985. P. 185–213. URL: http://library.dundee.ac.uk/F/?func=direct&local_base=DUN01&doc_number=376353.
4. Budhu M., Britto A. Numerical analysis of soils in simple shear devices // *Soils and Foundations*. 1987. Vol. 27. № 2. P. 31–41.
5. Ansell P., Brown S.F. A cyclic simple shear apparatus for dry granular materials // *Geotechnical Testing Journal*. 1978. Vol. 1. № 2. P. 82–92.
6. Finn W.D.L., Pickering D.J., Bransby P.L. Sand liquefaction in triaxial and simple shear tests // *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1971. Vol. 97. № SM4. Paper 8039. P. 639–659.
7. Peacock W.H., Seed H.B. Sand liquefaction under cyclic loading simple shear conditions // *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1968. Vol. 94. № SM3. Paper 5957. P. 689–708.
8. Roscoe K.H., Burland J.B. On the generalized stress-strain behavior of 'wet' clay. Cambridge: Cambridge University Press, 1967. P. 535–609.
9. Bjerrum L., Landva A. Direct simple-shear test on a Norwegian quick clay // *Geotechnique*. 1966. Vol. 16. № 1. P. 1–20.
10. Lucks A.S. et al. Stress conditions in NGI simple shear test // *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*. 1972. Vol. 98. № 1. P. 155–160.
11. Seed H.B., Peacock W.H. Test procedures for measuring soil liquefaction potential // *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1971. Vol. 97. № SM8. P. 1099–1119.
12. Casagrande A. Liquefaction and cyclic deformation of sands – a critical review. Cambridge: Harvard University, 1976. 88 p.
13. De Alba P., Chan C.K., Seed H.B. Sand liquefaction in large scale simple shear tests // *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1976. Vol. 102. № GT9. P. 909–927.
14. Dyvik R., Zimmie T.F., Floess C.H.L. Lateral stress measurements in direct simple shear device // *ASTM International. ASTM STP 740. Laboratory Shear Strength of Soils*. 1981. STP28752S. P. 191–206.
15. Youd T.L., Craven T.N. Lateral stress in sands during cyclic loading // *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1975. Vol. 101. № 2. P. 217–221.
16. Budhu M. Lateral stresses observed in two simple shear apparatus // *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1985. Vol. 111. № 6. P. 698–711.
17. Kang X., Kang G. Modified monotonic simple shear tests on silica sand // *Journal of Marine Georesources and Geotechnology*. 2015. Vol. 33. № 2. P. 122–126.
18. Selig E.T. et al. A new direct simple shear device // *Geotechnical Testing Journal*. 1979. Vol. 2. № 4. P. 190–199.

19. Doroudian M., Vucetic M. A direct simple shear device for measuring small-strain behavior // Geotechnical Testing Journal. 1995. Vol. 18. № 1. P. 69–85.
20. Mortezaie A.R., Vucetic M. Small-strain cyclic testing with standard NGI simple shear device // Geotechnical Testing Journal. 2012. Vol. 35. № 6. P. 935–948.
21. Vucetic M., Lanzo G. Damping at small strains in cyclic simple shear test // Journal of Geotechnical and Environmental Engineering. 1998. Vol. 124. № 7. P. 585–594.
22. Cabalar A.F. Cyclic behavior of various sands and structural materials interfaces // Geomechanics and Engineering. 2016. Vol. 10. P. 1–19.
23. Cabalar A.F., Dulundu K., Tuncay K. Strength of various sands in triaxial and cyclic direct shear tests // Engineering Geology. 2013. Vol. 156. P. 92–102.
24. Silver M.L., Seed H.B. Deformation characteristics of sands under cyclic loading // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1971. Vol. 97. P. 1081–1098.
25. Silver M.L., Seed H.B. Volume changes in sands during cyclic loading // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1971. Vol. 97. P. 1171–1182.
26. Youd T.L. Compaction of sands by repeated shear straining // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1972. Vol. 98. № 7. P. 709–725.

Независимый электронный журнал ГеоИнфо

С 2022 года журнал «ГеоИнфо»
выходит в формате *PDF.
10 выпусков в год.



WWW.GEOINFO.RU