

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГРУНТОВ В МОСКОВСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ СТРОИТЕЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ (МГСУ-МИСИ)

ТЕР-МАРТИРОСЯН А.З.

Доцент кафедры механики грунтов, оснований и фундаментов (МГрОиФ), руководитель НОЦ «Геотехника» Московского государственного строительного университета (МГСУ), к.т.н.,

г. Москва

gic-mgsu@mail.ru

МИРНЫЙ А.Ю.

Старший преподаватель кафедры МГрОиФ, научный сотрудник НОЦ «Геотехника» МГСУ,

г. Москва

reg@oconnor.ru

СИДОРОВ В.В.

Старший преподаватель кафедры МГрОиФ, научный сотрудник НОЦ «Геотехника» МГСУ,

г. Москва

vitsid@mail.ru

Аннотация

В статье рассматриваются лабораторные методы испытаний грунтов оснований сооружений, разработанные и применяемые в Московском государственном строительном университете (МГСУ-МИСИ). Представлена методика трехосных испытаний однородных и неоднородных отложений различного происхождения (в том числе глинистых с крупным заполнителем). Показана также методика испытаний для определения параметров модели упрочняющегося грунта и динамических параметров грунта в вибростабилометре. Рассмотрен опыт решения различных задач в научно-образовательном центре «Геотехника» МГСУ. Дан анализ актуальной нормативной документации

Ключевые слова

Лабораторные испытания; трехосные испытания; модель упрочняющегося грунта; динамические испытания; виброползучесть; паспорт прочности грунта; нормативная документация; инженерные изыскания; Московский государственный строительный университет (МГСУ-МИСИ)

Введение

Обеспечение безопасности и надежности любого сооружения является комплексной задачей, в решении которой принимают участие изыскатели, проектировщики и производители работ, особенно в случае геотехнического строительства. Достоверная классификация и оценка свойств грунтов, слагающих основание, обоснованный учет этих данных при проектировании и выбор оптимальной технологии позволяют не только удовлетворить все требования по надежности сооружения, но и снизить сметную стоимость его строительства.

Наличие современной приборной базы и сочетание научной и производственной работы позволяют развивать методики проведения испытаний с учетом современных теорий и применяемых моделей, а также требований конечного потребителя результатов любых изысканий - проектировщика. Очень часто непонимание связи конкретных испытаний с проводимыми расчетами приводит к ложным аварийным ситуациям - завышенным значениям перемещений, кренов конструкций, неоправданно высоким значениям внутренних напряжений и т.п. Как следствие, это ведет к изменению типа применяемых конструкций, например к переходу от более

дешевого и быстро возводимого плитного фундамента к заведомо более дорогому свайному или плитно-свайному. Это ведет к завышенным в несколько раз сметам и срокам строительства.

Авторы настоящей статьи не раз сталкивались с тем, что только правильная интерпретация результатов некоторых испытаний, качественное проведение дополнительных опытов и выполнение соответствующих расчетов с использованием адекватных грунтовых моделей приводили к отмене ненужных, очень дорогих и долго выполняемых мероприятий по устранению «опасных» ситуаций. Представляется, что только комплексный подход к решению проблем геотехнического строительства позволит повысить качество конечного продукта и снизить сметную стоимость строительных работ.

На протяжении последних нескольких лет специалисты-геотехники все чаще указывают на необходимость совместной работы изыскателей и проектировщиков при составлении технического задания на изыскания. К сожалению, изыскатели зачастую не определяют достаточного количества параметров для применения современных расчетных грунтовых моделей, что ограничивает возможности проектировщиков. В ряде случаев техническое задание на проведение инженерных изысканий составляется заказчиком, который не уделяет внимания необходимым деталям, свойственным конкретному объекту или району застройки. В качестве примера можно привести широко распространенную ситуацию, когда давление под подошвой фундамента превышает верхнюю границу диапазона напряжений, в котором проводилось определение механических характеристик. Эта ошибка приводит к занижению значения модуля общей деформации и существенному удорожанию строительства.

Несмотря на то что в последней редакции основного нормативного документа на определение механических свойств немерзлых грунтов - ГОСТ 12248-2010 [1] - присутствуют дополнительные параметры, которые могут быть определены в ходе испытания, изыскательские лаборатории предпочитают работать по привычной схеме, сводя определение механических характеристик к установлению модуля общей деформации, угла внутреннего трения и удельного сцепления. Однако этих характеристик недостаточно для достоверной оценки напряженно-деформированного состояния основания сооружения с учетом всех действующих факторов. При этом попытки затребовать определение дополнительных характеристик при испытаниях зачастую встречают серьезное сопротивление со стороны изыскательских организаций.

Лабораторные испытания грунтов в Московском государственном строительном университете (МГСУ-МИСИ) в 60-70-х годах прошлого столетия были предназначены для определения параметров нелинейных моделей грунтов, разработанных на основе упругопластических, упруговязкопластических, упрочняющихся сред Друкера - Прагера и др. Осложнение заключалось в том, что учитывались пластические объемные деформации грунтов, которые в отличие от деформаций конструкционных материалов (0,1%) для грунтов составляют до 10% и более.

Выяснилось, что деформационные и прочностные свойства грунтов зависят не только от их плотности и влажности, но и от их исходного напряженного состояния в условиях естественного залегания и от истории его формирования, а также от режима (скорости) и траектории нагружения, вида напряженного состояния (по параметру Надаи - Лоде). Учет этих и других факторов при определении деформационных и прочностных свойств потребовал разработки новых нестандартных методик и приборов для испытаний грунтов: несимметричного трехосного сжатия для испытаний кубических образцов песчаных (А.Л. Крыжановский [6]) и глинистых (З.Г. Тер-Мартиросян [6]) грунтов; компрессионного сжатия с гибкими вертикальными стенками для испытаний водонасыщенных глинистых грунтов высотой до 20 см; кольцевого сдвига полых цилиндрических образцов в условиях трехосного сжатия и компрессии (И.Н. Иващенко, З.Г. Тер-Мартиросян [6]); сжатия-растяжения для испытаний глинистых грунтов гантелеобразной формы (З.Г. Тер-Мартиросян, Е.А. Воробьев [6]).

Результаты многочисленных испытаний на вышеперечисленных приборах по различным методикам позволили получить экспериментальное подтверждение упругопластической теории упрочняющейся среды Друкера - Прагера и совершенствовать ее применительно к грунтовой среде. В частности, были предложены новые формы поверхности нагружения (гидростатического

обжатия), разделяющей области упругого и неупругого поведения грунтов в пространстве напряжений $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (Л.Н. Рассказов, В.А. Иоселевич, Ю.К. Зарецкий [6]), в том числе по оси $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ («колпачковая» модель). Получила экспериментальное подтверждение теория вторичной консолидации (З.Г. Тер-Мартirosян [6]).

Использование этих моделей грунтов в расчетах напряженно-деформированного состояния (НДС) оснований было связано с математическими трудностями и отсутствием соответствующей вычислительной техники (ЭВМ). Сегодня это стало возможным благодаря наличию программных комплексов Plaxis, Ansys, Abacus, Flac и др. Поэтому возникла необходимость создания новой лабораторной базы в МГСУ, позволяющей проводить испытания грунтов по методикам, необходимым для определения параметров нелинейных моделей грунтов. В 2011 году в МГСУ была создана и оборудована лаборатория, оснащенная самой современной приборной базой для испытаний грунтов в условиях симметричного и несимметричного трехосного сжатия в статическом и динамическом режимах, компрессионного сжатия, одноплоскостного сдвига с автоматизированным управлением и записью результатов испытаний.

Цели и задачи НОЦ «Геотехника»

Указанная выше геотехническая лаборатория (научно-образовательный центр «Геотехника»), открывшаяся в МГСУ в октябре 2011 года, с самого начала проектировалась как подразделение, предоставляющее проектировщикам полный комплекс геотехнических услуг - от проведения лабораторных испытаний до математического моделирования системы «основание - сооружение», научного сопровождения строительства и последующего мониторинга. И если в области научного сопровождения сотрудниками лаборатории уже был накоплен значительный опыт, то проведение лабораторных испытаний потребовало глубокого изучения вопроса при закупке и последующей эксплуатации оборудования.

В настоящее время НОЦ «Геотехника» укомплектован оборудованием, необходимым для выполнения всех нормативных видов испытаний талых грунтов. Помимо полного комплекса приборов для определения показателей физических свойств грунта в лаборатории имеются: 10 автоматизированных компрессионных приборов; 4 срезовых коробки с кинематическим приводом, позволяющим определять как пиковую, так и остаточную прочность грунта; 4 трехосных прибора с камерами типа «Б» под образцы диаметром 50,0 и 71,4 мм с предельным вертикальным усилием 25 кН; 2 трехосных прибора с камерами типа «А» под образцы диаметром от 38 до 100 мм с предельным вертикальным усилием 45 кН. Все это оборудование является автоматизированным, что позволяет выполнять большие объемы испытаний в кратчайшие сроки.

Кроме того, в лаборатории имеется два динамических прибора трехосного сжатия, произведенных компанией Wille Geotechnik (Германия). Эти установки являются уникальными и собраны по специальному заказу МГСУ. Одна из них позволяет проводить испытания образцов грунта в режиме трехосного сжатия по любой траектории нагружения с возможностью динамического нагружения с частотой до 100 Гц при осевом усилии до 63 кН (рис. 1). Такая высокая частота достигается за счет применения сервогидравлического привода, в котором направление течения масла под высоким давлением (280 атм) изменяется с помощью сервоклапана. Эти технические параметры позволяют оценивать подверженность грунтов виброползучести и разжижению при любых промышленных частотах, создаваемых, например, работой метрополитена, дизель-генераторов или наземного транспорта. При этом возможность испытывать образцы диаметром до 100 мм позволяет избегать масштабных эффектов и получать достоверные результаты даже для грунтов с крупными включениями.



Рис. 1. Общий вид установки трехосного сжатия с возможностью динамического нагружения

Вторая установка более компактна и предназначена для исследований при низкочастотных (до 15 Гц) воздействиях на грунты. Электромеханический привод для статического и кинематического нагружения совмещен с пневматическим приводом, позволяющим создавать динамические нагрузки. Сравнительно низкая частота обусловлена применением в приводе сжимаемой среды, но для моделирования сейсмического воздействия этого вполне достаточно.

В дополнение к этому по особому заказу МГСУ в ООО «НПП «Геотек»» был спроектирован и изготовлен прибор истинного трехосного сжатия, позволяющий испытывать кубические образцы размером 100×100×100 мм при трех независимых главных напряжениях с возможностью измерения объемных деформаций и порового давления. Принципиальное устройство и опытные образцы данного прибора уже давно разрабатывались и применялись на кафедре механики грунтов, оснований и фундаментов МГСУ. Сочетание накопленного опыта и современных технологий производства испытательного оборудования позволило создать уникальный научно-исследовательский прибор с гибкими характеристиками и высокой точностью.

Все имеющееся в НОЦ «Геотехника» оборудование широко применяется как для научной деятельности, так и для хозяйственных работ. Далее хотелось бы рассмотреть наиболее интересные примеры его использования.

Трехосные испытания глинистого грунта с крупным заполнителем

Одной из наиболее интересных задач можно назвать трехосные испытания материала тела грунтовой плотины Рогунской ГЭС (Таджикистан) [2]. Проектирование этого сооружения началось в 1980-е годы, но было приостановлено в связи с отсутствием финансирования. Тело плотины высотой 330 м предполагалось выполнить из местного суглинистого грунта с включениями щебня с размером частиц до 20 мм. Высокие внутренние напряжения в сооружении, а также его класс ответственности требовали максимально достоверного определения механических характеристик материала. Задача усложнялась высокой плотностью скелета грунта ($2,2 \text{ г/см}^3$), а также неокатанными включениями. При этом для наиболее достоверной оценки его свойств необходимо было испытывать грунт с заданным гранулометрическим составом, для чего

потребовалось изготавливать образцы высотой 200 мм и диаметром 100 мм из отдельных составляющих при определенных плотности и влажности (рис. 2).

Необходимо подчеркнуть, что использование образцов малого диаметра при наличии в них крупных включений недопустимо в связи с влиянием этих включений на их механические свойства, а широко распространенная практика проведения испытаний мелкодисперсного заполнителя приводит к занижению прочностных характеристик грунта и удорожанию проекта.

Испытания проводились по схеме раздавливания в камерах трехосного сжатия типа «А» при максимальном гидростатическом обжатии силой до 1,2 МПа. По их результатам был составлен «паспорт прочности» композитного грунта (рис. 3), позволяющий определить полный комплекс механических характеристик образца.

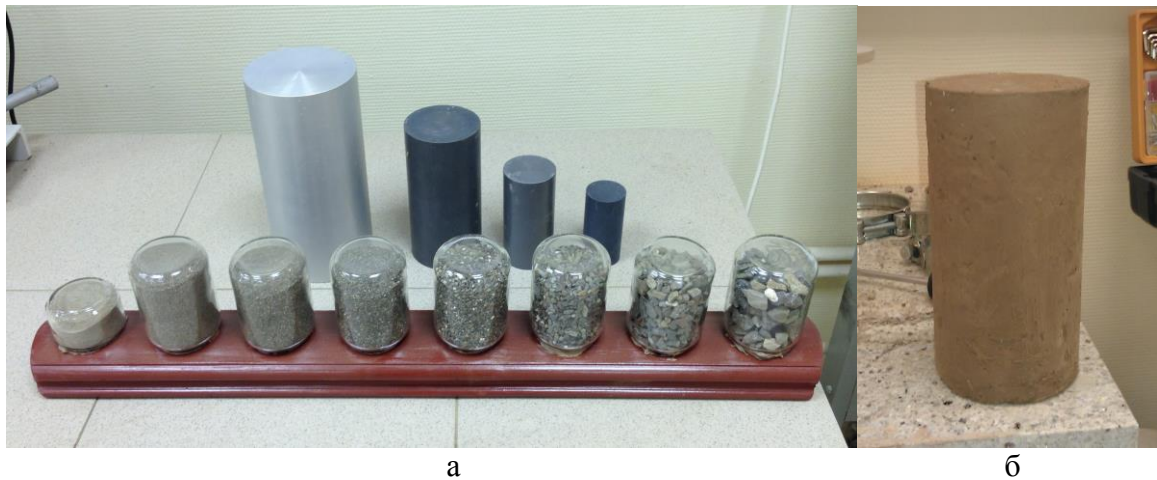


Рис. 2. В первом и втором ряду соответственно - «рассев» гранулометрического состава грунтов тела плотины Рогунской ГЭС, использованный для создания образцов, и макеты образцов стандартных размеров (диаметром 38÷100 мм), показанные для наглядности в полном составе, (а); готовый образец для испытаний высотой 200 мм и диаметром 100 мм (б)

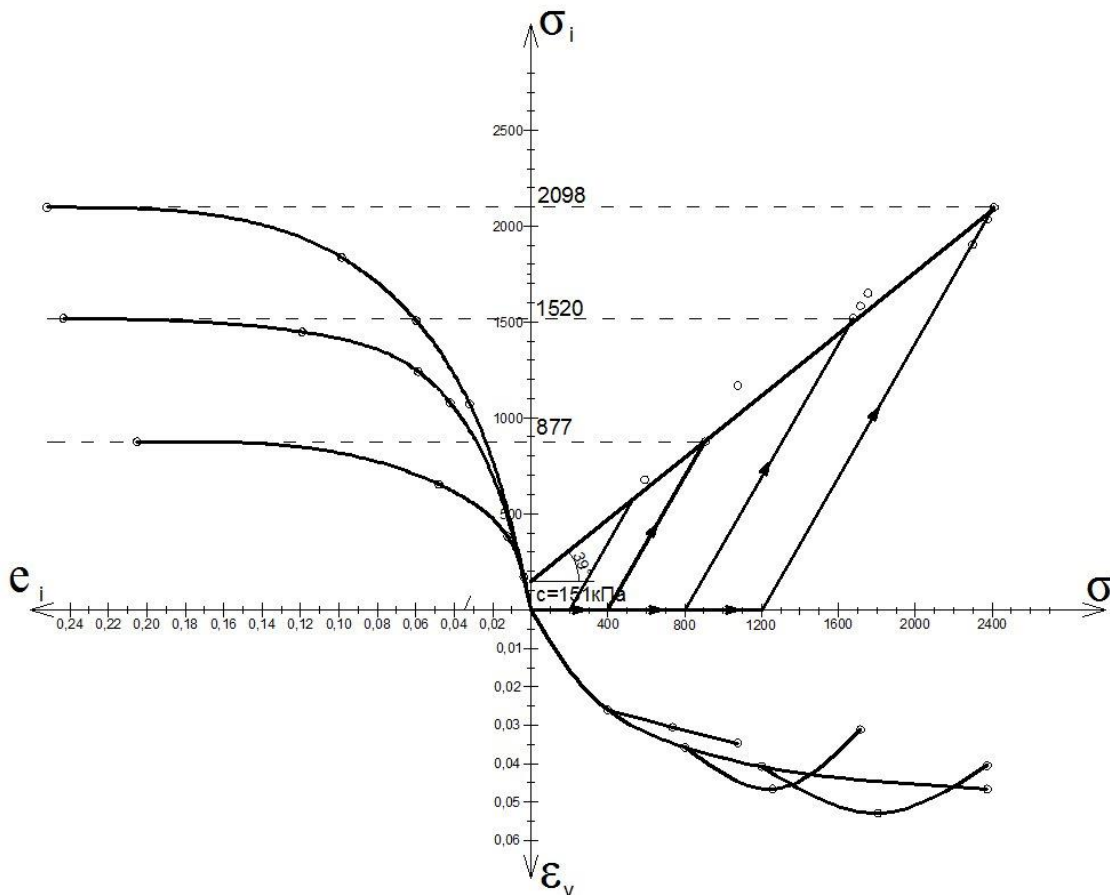


Рис. 3. «Паспорт прочности» исследуемого грунта: e_i - интенсивность деформаций сдвига; ϵ_v - относительная объемная деформация; σ_i - интенсивность касательных напряжений, кПа; σ' - среднее напряжение, кПа; c - удельное сцепление, кПа

В настоящее время в случае неоднородности гранулометрического состава грунта изыскатели зачастую определяют его механические характеристики по наихудшей составляющей, которой оказывается вмещающий глинистый материал. Проведенные же в МГСУ эксперименты выявили армирующее действие включений как на деформационные, так и на прочностные характеристики грунта. Глубокое изучение и учет этого эффекта позволят усовершенствовать методы оценки свойств природных грунтов с существенной неоднородностью, а также уточнить проектирование искусственных оснований.

Определение параметров грунта для модели **Hardening Soil**

Необходимо отметить, что нередко приходится сталкиваться с ситуацией, когда в результате испытаний необходимо определить больше параметров, чем это оговорено в нормативных документах. В качестве примера можно привести модель грунтовой среды **Hardening Soil**, хорошо известную пользователям программных комплексов **Plaxis**, **Z-soil**, **Midas** и др. Несмотря на то что в руководствах пользователя к этим программным комплексам приведены приблизительные формулы для определения параметров этой модели на основании только модуля общей деформации и прочностных характеристик, опыты показали, что более подробное определение этих параметров для отдельного образца грунта позволяет добиться лучшей сходимости результатов моделирования с лабораторными испытаниями и, следовательно, повысить достоверность расчетов. В этом отношении сотрудниками НОЦ «Геотехника» было проведено исследование, результаты которого были представлены в 2013 году на конференции «Геотехника: теория и практика» в г. Санкт-Петербурге [5].

Практически всегда основными потребителями результатов испытаний являются проектировщики и расчетчики. И в зависимости от полноты этих результатов расчетчики должны

выбрать адекватную модель поведения грунта, слагающего площадку строительства. В настоящее время при инженерно-геологических изысканиях чаще всего определяются только стандартные параметры упругопластической модели Мора - Кулона (идеально-пластической модели) - модуль общей деформаций E , коэффициент Пуассона ν , угол внутреннего трения φ и сцепление c . Тем не менее эта модель не вполне удовлетворяет современным требованиям математического моделирования, а в случае строительства значительно заглубленных зданий и сооружений, в том числе тоннелей и др., дает неудовлетворительные результаты. Это связано с невозможностью правильного учета разгрузки и повторного нагружения основания сооружения, а также неучета уплотнения грунта при значительных нагрузках (повышения его деформационных характеристик по мере нагружения).

Модель Hardening Soil лишена этих недостатков, так как она использует модуль разгрузки при снижении напряжений в элементе. Кроме того, зависимость деформаций от девиаторных напряжений в ней принимается гиперболической, что точнее соответствует реальному поведению грунта. В общей сложности данная модель использует следующие основные входные параметры:

- p_{ref} - опорное всестороннее давление при консолидированно-дренированных трехосных испытаниях;
- E_{oed}^{ref} - опорный модуль жесткости, полученный по результатам компрессионных испытаний при давлении, равном p_{ref} ;
- E_{50}^{ref} - секущий модуль жесткости при половине предельного значения девиатора напряжений;
- E_{ur} - модуль разгрузки (модуль упругости);
- m - показатель степени для зависимости жесткости от уровня напряжений;
- c - сцепление;
- φ - угол внутреннего трения;
- ψ - угол дилатансии.

Эти параметры в явном виде обычно не определяются в ходе инженерно-геологических изысканий, однако могут быть определены с помощью трехосных испытаний в консолидированно-дренированном режиме при значении бокового давления, равном p_{ref} .

В лаборатории НОЦ «Геотехника» проводятся испытания по определению всех необходимых для расчета параметров с использованием модели Hardening Soil. Сотрудники лаборатории обращают особое внимание на диапазон напряжений, в котором проводятся испытания, в зависимости от глубин отбора образцов и степени их прогнозируемого нагружения от веса строящегося здания или сооружения (дополнительного давления). К сожалению, специалистам по геотехническим расчетам нередко приходится сталкиваться не только с неполнотой выполнения изысканий, но и с некорректной областью напряжений при испытаниях, что делает их результаты неприменимыми при решении поставленных задач численными методами.

Определение параметров динамических свойств грунтов (виброползучести)

Динамические испытания также занимают значительное место в общем объеме работы лаборатории.

Оценка виброползучести грунтов оснований в условиях высокой транспортной нагрузки в современном строительстве играет важную роль. Однако, несмотря на то что актуализированные нормативные материалы требуют обязательной оценки виброползучести [3], до сих пор не существует документов, регламентирующих порядок проведения подобных испытаний.

В Москве в настоящее время есть только три лаборатории, в которых могут проводиться подобные испытания, и одна из них - НОЦ «Геотехника». В 2010 году на кафедре механики

грунтов, оснований и фундаментов МГСУ была защищена диссертационная работа А.З. Тер-Мартirosяна [4], в которой было подтверждено применение коэффициента виброползучести, позволяющего оценить снижение деформационных характеристик грунта при динамическом воздействии с различной частотой.

Такие испытания проводятся в камерах типа «А» в режиме трехосного сжатия. Они состоят из трех основных этапов: (1) консолидации (изотропной или анизотропной); (2) статического девиаторного нагружения; (3) вибрационного нагружения. Параметры первых двух этапов устанавливаются в зависимости от природного напряженного состояния образца и дополнительных нагрузок от проектируемого сооружения. Частота и амплитуда вибрационного воздействия устанавливаются в зависимости от его доминирующего источника. Испытания могут проводиться при различных частотах вплоть до 100 Гц, любой амплитуде девиаторной нагрузки и любом количестве циклов. В результате в ходе третьего этапа образец получает дополнительные деформации, на основании которых вычисляется коэффициент виброползучести, численно равный отношению деформаций, накопленных в процессе динамического нагружения к деформациям при статическом нагружении. Получаемые при этом зависимости представлены на рис. 4.

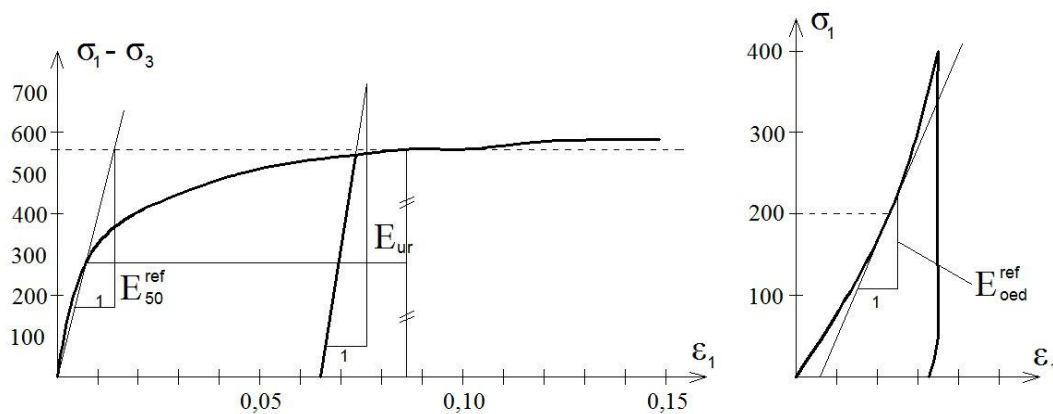


Рис. 4. Результаты испытаний с указанием параметров модели Hardening Soil: σ_1 , σ_3 - максимальное и минимальное главное нормальное напряжение соответственно; ϵ_1 - относительная вертикальная деформация

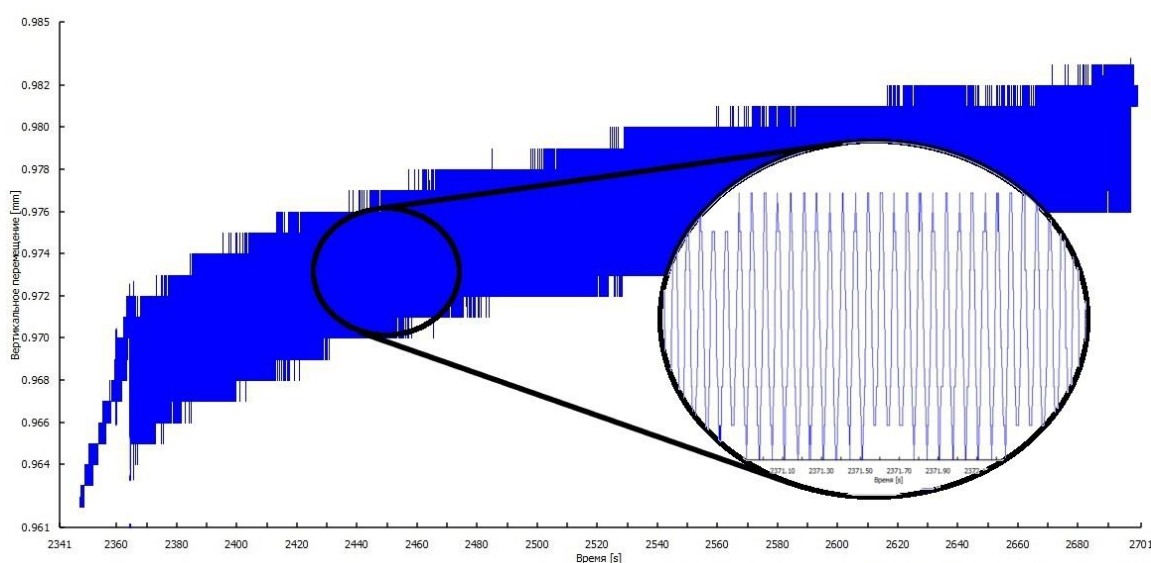


Рис. 5. Зависимость вертикальных деформаций от напряжений при вибрационных трехосных испытаниях. В большом овале - увеличенное изображение участка графика, показанного малым овалом

Как было сказано выше, вопрос нормативного обоснования тех или иных испытаний стоит достаточно остро. Основные виды лабораторных тестов, такие как компрессионное сжатие, одноплоскостной срез и раздавливание в трехосном приборе, достаточно хорошо проработаны и описаны. Но для ряда уникальных испытаний какие-либо стандарты отсутствуют, и изыскатели не имеют возможности подкрепить результаты своих опытов ссылками на соответствующую нормативную документацию.

В НОЦ «Геотехника» в настоящее время идет разработка внутреннего стандарта предприятия на оценку подверженности песчаных грунтов виброползучести по результатам трехосных испытаний. Накопленный в этом отношении опыт, подтвержденный научным обоснованием, приведенным в диссертационной работе [4], в дальнейшем позволит предложить этот внутренний документ в качестве отраслевого стандарта.

Определение параметров прочности грунта по результатам компрессионных испытаний

На основании проведенных исследований в НОЦ «Геотехника» был разработан метод определения прочностных характеристик песчаных и глинистых грунтов по данным компрессионных испытаний, зарегистрированный в МГСУ как результат интеллектуальной деятельности № 141/2013/ХД (который пока является коммерческой тайной, поэтому более подробная ссылка не дается). Он позволяет по результатам испытаний в стандартных компрессионных приборах с высокой достоверностью получать значения прочностных характеристик грунтов - угла внутреннего трения и сцепления. Применение этого метода не отменяет необходимости проведения испытаний на одноплоскостной срез или раздавливание в трехосном приборе, однако позволяет оценить все механические характеристики образца по результатам одного теста, что снижает стоимость начального этапа испытаний. В настоящее время идет оформление патентного свидетельства на данную разработку и составление стандарта предприятия по определению прочностных характеристик грунтов с помощью компрессионных испытаний.

Заключение

Необходимо отметить, что отсутствие нормативной документации на проведение нестандартных испытаний наблюдается не только в нашей стране. Коллеги из Германии также указывают на отсутствие у них в стране действующего документа, регламентирующего динамические испытания. Однако в Европе в целом действует другой подход к проведению изысканий: диплом специалиста дает право проводить любые испытания без ссылок на нормативные документы при условии, что в результате данных тестов обеспечивается безопасность возводимого сооружения. Но в России, для того чтобы проект прошел государственную экспертизу, этого явно недостаточно.

В настоящее время на рынке предлагается высококачественное оборудование как отечественного, так и зарубежного производства, позволяющее определять механические параметры грунта не только быстрее, но и с более высокой точностью. При этом немалая часть этих испытаний уже регламентирована нормативными документами, в частности последней редакцией ГОСТ 12248-2010 [1]. К сожалению, специалисты-изыскатели зачастую пренебрегают современными возможностями, хотя спрос со стороны проектировщиков на определение параметров более современных грунтовых моделей уже есть. Это связано с недостаточной подготовкой кадрового состава испытательных лабораторий и зачастую с излишне формальным подходом к работе.

Опыт работы НОЦ «Геотехника» в отношении изысканий под сложные нестандартные объекты энергетики, гражданского строительства и предстоящей Олимпиады в Сочи позволяет утверждать, что можно и нужно определять как можно большее количество параметров, что позволит проектировщикам точнее моделировать напряженно-деформированное состояние системы «основание - сооружение», снизит сметную стоимость проекта и повысит надежность сооружения.

Список литературы

1. ГОСТ 12248-2010. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: МНТКС, 2010.
2. Исследование физико-механических характеристик материала ядра плотины Рогунской ГЭС: технический отчет. М.: Изд-во МГСУ, 2013.
3. МГСН 2.07-01. Основания, фундаменты и подземные сооружения, М.: Правительство Москвы, 2003.
4. *Тер-Мартirosян А.З.* Взаимодействие фундаментов с основанием при циклических и вибрационных воздействиях с учетом реологических свойств грунтов: автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. М.: МГСУ-МИСИ, 2010.
5. *Тер-Мартirosян А.З., Мирный А.Ю., Сидоров В.В., Соболев Е.С.* Определение параметров модели Hardening Soil по результатам лабораторных испытаний // Сборник трудов конференции «Геотехника: теория и практика». СПб., 2013. С. 27-31.
6. *Тер-Мартirosян З.Г.* Механика грунтов. М.: АСВ, 2009.

Выходные данные: Журнал «Инженерные изыскания», №8/2013, С. 60-65