

УДК624.131.43

***СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ***

Петрукович Е.И.

магистрант

*ФГБОУ ВО Пензенский государственный университет архитектуры и
строительства*

Россия, г. Пенза

Хрянина О. В.

канд. технических наук, доцент

*ФГБОУ ВО Пензенский государственный университет архитектуры и
строительства*

Россия, г. Пенза

Аннотация

Выполнен сравнительный анализ основных методов, применяемых для определения механических характеристик грунтов. Проведены серии опытов на автоматизированных приборах конструкции НПП "Геотек" с целью достоверного определения параметров грунтов необходимых для расчета и проектирования фундаментов спортивно-оздоровительного комплекса по двум группам предельных состояний. Сделаны соответствующие выводы и предложения.

Ключевые слова: грунт, механические характеристики, образцы-близнецы, компрессионное сжатие, одноплоскостной срез, трехосное сжатие, основание.

***COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR DETERMINING THE
MECHANICAL PROPERTIES OF SOILS IN LABORATORY CONDITIONS***

Petrukovich E.I.

undergraduate

FGBOU VO Penza State University of Architecture and Construction

Russia, Penza

Hryanina O.V.

Ph.D, Associate Professor

FGBOU VO Penza State University of Architecture and Construction

Russia, Penza

Abstract

A comparative analysis of the main methods used to determine the mechanical characteristics of soils is carried out. A series of experiments were carried out on automated devices designed by Geotek NPP in order to reliably determine the soil parameters necessary for calculating and designing the foundations of a sports and recreation complex for two groups of limiting states. The corresponding conclusions and proposals are made.

Keywords: soil, mechanical characteristics, twin specimens, compression compression, single-plane cut, triaxial compression, base.

В рамках выполнения выпускной квалификационной работы магистрантом кафедры "Геотехника и дорожное строительство" Пензенского ГУАС проведены исследования на автоматизированных приборах конструкции НПП «Геотек» (www.geotek.ru) [1] с целью отработки методик проведения испытаний и достоверного определения необходимых параметров грунтов для

дальнейших расчетов основания и фундаментов спортивно-оздоровительного комплекса по двум группам предельных состояний.

Известно, что грунт это любые горные породы, почвы, осадки и технологические образования, ведущие себя как многофакторные динамические системы, являющиеся частью геологической среды. Грунт, находящийся под механическим влиянием расположенных на нем зданий и сооружений, называется основанием.

В качестве образцов-близнецов грунта, моделирующих напряженное состояние основания под строящимся спортивно-оздоровительным комплексом, использовался песок фракции 0,1 – 0,2 мм, в сухом состоянии, получен методом высушивания до постоянной массы при помощи духового шкафа, просеянный, без примесей. Формирование образцов-близнецов грунта происходило весовым методом непосредственно в рабочей камере приборов. Данная методика подготовки подробно описана в [10].

Механические свойства грунтов фактически неодинаковы в разных направлениях, что делает его анизотропным телом. Также грунт фактически не может быть полностью описан математической моделью закона Гука, однако для удобства моделирования и расчета в методиках ГОСТ и СП грунт рассматривается как *Гуково тело* (линейные законы деформации). Это достигается путем введения дополнительного ограничения максимально возможной нагрузки на площадь основания: давление под площадью подошвы фундамента не должно превышать расчетного сопротивления грунта. При нарушении данного условия грунт сохраняет свою прочность еще некоторое продолжительное время, но описывается уже другими – нелинейными – законами.

Задача инженерно-геологических изысканий и лабораторных испытаний грунта – определить некоторые физические и механические характеристики грунта, необходимые для правильного построения его математической модели [2, 6, 7, 9].

В методиках строительных норм принято моделирование строительных конструкций по двум предельным состояниям. Основания не являются исключением.

К первой группе предельных состояний оснований (по несущей способности) относятся деформации неустановившейся ползучести, чрезмерные пластические деформации, резонансные колебания, потеря устойчивости формы и положения, вязкое или хрупкое разрушение [8].

Ко второй группе предельных состояний (по деформациям) относятся такие состояния оснований, при которых затрудняется нормальная эксплуатация здания или сооружения или снижается его долговечность в результате недопустимых осадок, прогибов углов поворота, а также колебаний, трещин и т. д. [8].

Проще говоря, для проверки грунта по первой группе предельных состояний его необходимо разрушить или «сломать» в лабораторной установке, а по второй группе – достаточно его установленным образом деформировать.

Таким образом, для расчета фундаментов по несущей способности (первая группа предельных состояний) и деформации (вторая группа предельных состояний) достаточно определить три механические характеристики (φ , c , E) [5].

Для решения данных задач существуют три базовых метода испытаний образца грунта: компрессионное сжатие, одноплоскостной срез и трехосное сжатие. Остальные методы испытаний являются органичным продолжением этих трех [3, 4, 7].

Испытание образцов песка методом компрессионного сжатия

Одной из основных и главных деформационных характеристик грунта является модуль деформации. Модуль деформации – это отношение напряжения, созданного в образце, к деформации (осадке) этого образца.

Самым простым способом определить данную характеристику моделирование напряженного состояния грунта в приборе, где будут ограничены перемещения по двум взаимно перпендикулярным осям и с одной стороны третьей оси, а с другой стороны третьей оси будет прикладываться заданное давление. Такое состояние трехосного напряжения при одноосном сжатии называется компрессией, а сам опыт – *компрессионным сжатием*.

Установка компрессионного сжатия (рис.1) состоит в первую очередь из металлической камеры – компрессионный одометра – моделирующей вышеописанное состояние. Также в этой камере предусмотрен механизм водонасыщения грунта. К верхней подвижной части одометра может быть приложена некоторая нагрузка, которая создается специальной установкой [1].



Рис.1 – Компрессионный прибор со статическим нагружением конструкции
НПП «Геотек» (www.geotek.ru), [1]

Выбор последовательности нагружения в компрессионном приборе зависит не только от вида испытываемого грунта, но и от типа проектируемых надземных зданий или сооружений, которые вызывают тот или иной вид напряженного состояния в массиве грунта основания. Например, фундаменты мелкого заложения, насыпи, дамбы и т.п.

Количество ступеней нагружения и их значения должны быть больше эффективных напряжений, которые используются при расчете осадки фундаментов, т.е. максимальное значение нормального давления на образец грунта должно быть выше давления под подошвой проектируемого фундамента.

Процесс проведения опыта интуитивно понятен: ступенями прикладывая некоторую нагрузку (ступенчатое приложение нагрузки моделирует реальный процесс строительства, где нагрузка возрастает этаж за этажом) мы получаем график зависимости перемещения, совершенного верхней частью одометра от каждой ступени нагрузки. Это перемещение и будет осадкой грунта. Поделив заданную нагрузку на осадку, мы получим искомый модуль деформации.

Результаты исследований песка на компрессионное сжатие приведены на рис.2, одна серия – на песке в сухом состоянии, вторая – в увлажненном.

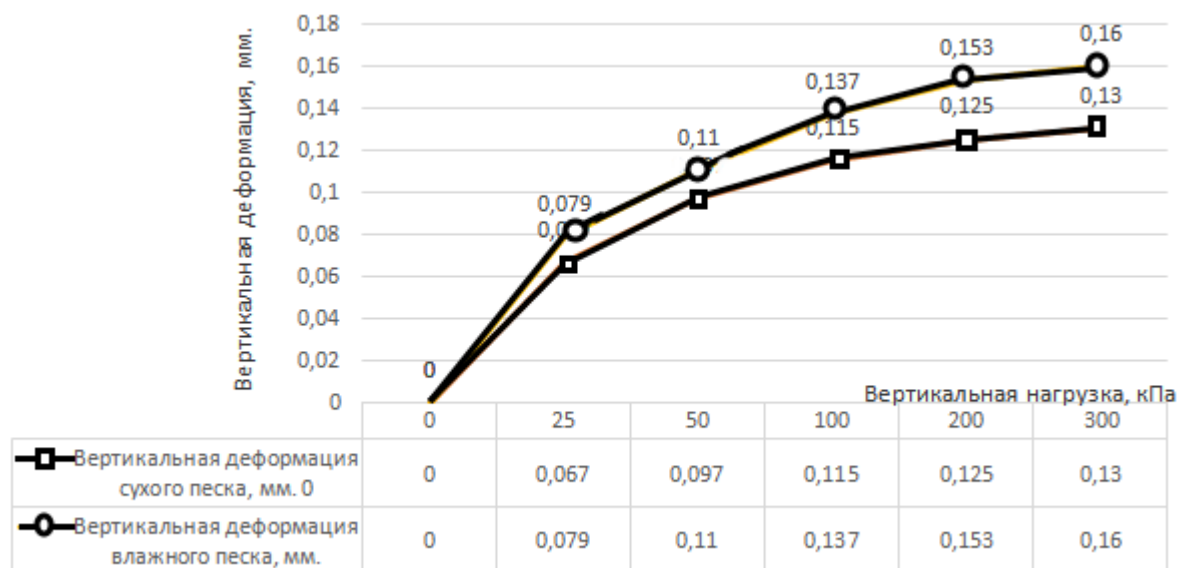


Рис.2 – Графики зависимости вертикальных деформаций от вертикальной нагрузки по результатам испытаний образцов песка в сухом и увлажненном состоянии в компрессионном приборе (авторская разработка)

В результате в интервале давлений 200-300 кПа получены следующие деформационные показатели: модуль деформации $E_{\text{сух.песка}}=23$ МПа, $E_{\text{влаж.песка}}=19$ МПа.

Однако возникает несколько специфических моментов. Как было сказано ранее, для проверки по первой группе предельных состояний грунт необходимо "разрушить". Однако "разрушение" грунта невозможно в условиях стеснения его перемещений по двум осям. Действительно, образец может только «бесконечно» уплотняться под бесконечно нарастающей нагрузкой. Приложив нагрузку в миллион МПа мы все равно получим некоторое значение модуля деформации, однако очевидно, что грунт в реальных условиях уже потеряет прочность с некоторыми резкими деформационными процессами. Возможность образца перемещаться в трех перпендикулярных направлениях (следовательно, сломаться) учтена в опыте трехосного сжатия, о котором мы поговорим позже. Однако, до недавнего времени считалось, что существует некоторая достоверная корреляция между модулем деформации, полученным в стабилометре (другое название установки трехосного сжатия) и таким же модулем, полученном на одомере. В последних ГОСТ наличие этой корреляции подверглось сомнению, что фактически обязало проводить эксперименты на трехосное сжатие.

Возникает вопрос, почему в таком случае опыты на одомере не прекратили за ненадобностью? Дело в том, что компрессионное сжатие всё-таки моделирует некоторое реальное состояние грунта. Когда фундамент представляет собой плиту большой площади, некоторый единичный объем грунта, расположенный внутри контура плиты на достаточном расстоянии от периметра, испытывает именно компрессионное сжатие. Он ограничен с двух перпендикулярных осей такими же участками грунта под таким же распределенным давлением, а снизу – условно бесконечной толщей грунта. Для больших массивных сооружений вроде дамб справедливо ориентироваться именно на одометрические показания модуля деформации.

Также может возникнуть вопрос: а нельзя ли провести в компрессионном сжатии обратный эксперимент? Не задавшись нагрузкой искать деформацию, а наоборот – задаться определенной деформацией и найти соответствующую ей нагрузку? С точки зрения теории такое возможно, ведь за пластическую модель грунта мы принимаем Гуково тело. Однако, мы помним, что в реальности грунт анизотропен, и данные от обратного опыта могут отличаться от первоначального. Первоначальный опыт с заданной нагрузкой таким образом более выгоден, потому что моделирует реальную ситуацию: известная нагрузка здания ступенчато прикладывается к основанию.

Второй базовый метод испытания грунта – *одноплоскостной срез* (рис.3).



Рис. 3 – Прибор одноплоскостного среза со статическим нагружением конструкции НПП «Геотек» (www.geotek.ru), [1]

С одной стороны, любой грунт представляет из себя целый массив. С другой, все грунты, кроме скальных, так или иначе состоят из отдельных обособленных частиц. Это означает, что при создании в едином массиве некоторого напряжения, внутри они распределяются с учетом сил трения частиц друг о друга. Возникают так называемые касательные напряжения, которые увязываются с нормальными посредством закона Мора-Кулона:

$$\tau = \delta \tan \varphi + C$$

где τ – касательное напряжение, σ – нормальное напряжение, φ – угол внутреннего трения грунта, C – удельное сцепление грунта.

На практике, наиболее простой способ смоделировать процесс трения грунта друг о друга – это задание одной горизонтальной плоскости среза. Именно для этого существует установка одноплоскостного среза, которая представляет из себя камеру, разделенную горизонтально пополам. Внутри камеры помещается образец грунта, затем при помощи специальной установки одну из половин камеры «толкают» относительно другой с установленным усилием – нормальным напряжением. При этом определяется величина ε – горизонтальная деформация, соответствующая конкретной величине нормального напряжения, а также касательное напряжение τ .

Строится график зависимости касательных напряжений от нормальных, из геометрии которого определяются угол внутреннего трения и удельное сцепление.

Испытания образцов песка методом одноплоскостного среза

Были проведены две серии опытов на приборе одноплоскостного среза. В первой серии испытывался песок в сухом состоянии, во второй – в увлажненном. Результаты исследований приведены ниже (таблицы 1, 2) и (рис.4).

Таблица 1 – Серия опытов А – сухой песок

№ Опыта	Касательное напряжение τ , кПа (фактическое значение)	Касательное напряжение τ , кПа (расчетное значение после аппроксимации)	Нормальное напряжение σ , кПа (заданное для опыта значение)	Горизонтальная деформация ε , мм
Опыт 1	77	72	100	4,5
Опыт 2	124	128	200	4,8
Опыт 3	188	184	300	5
Опыт 4	244	240	400	5,5

Таблица 2 – Серия опытов Б – увлажненный песок

№ Опыта	Касательное напряжение τ , кПа	Касательное напряжение τ , кПа	Нормальное напряжение σ , кПа	Горизонтальная деформация ε , мм
---------	-------------------------------------	-------------------------------------	--------------------------------------	--

ЭЛЕКТРОННЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ДНЕВНИК НАУКИ»

	(фактическое значение)	(Расчетное значение после аппроксимации)	(Заданное для опыта значение)	
Опыт 1	65	65,5	100	4,2
Опыт 2	106	104,5	200	4,45
Опыт 3	142	143,5	300	5
Опыт 4	181	182,5	400	5,5

Строим графики зависимости касательных напряжений τ от нормальных напряжений σ (рис. 4).

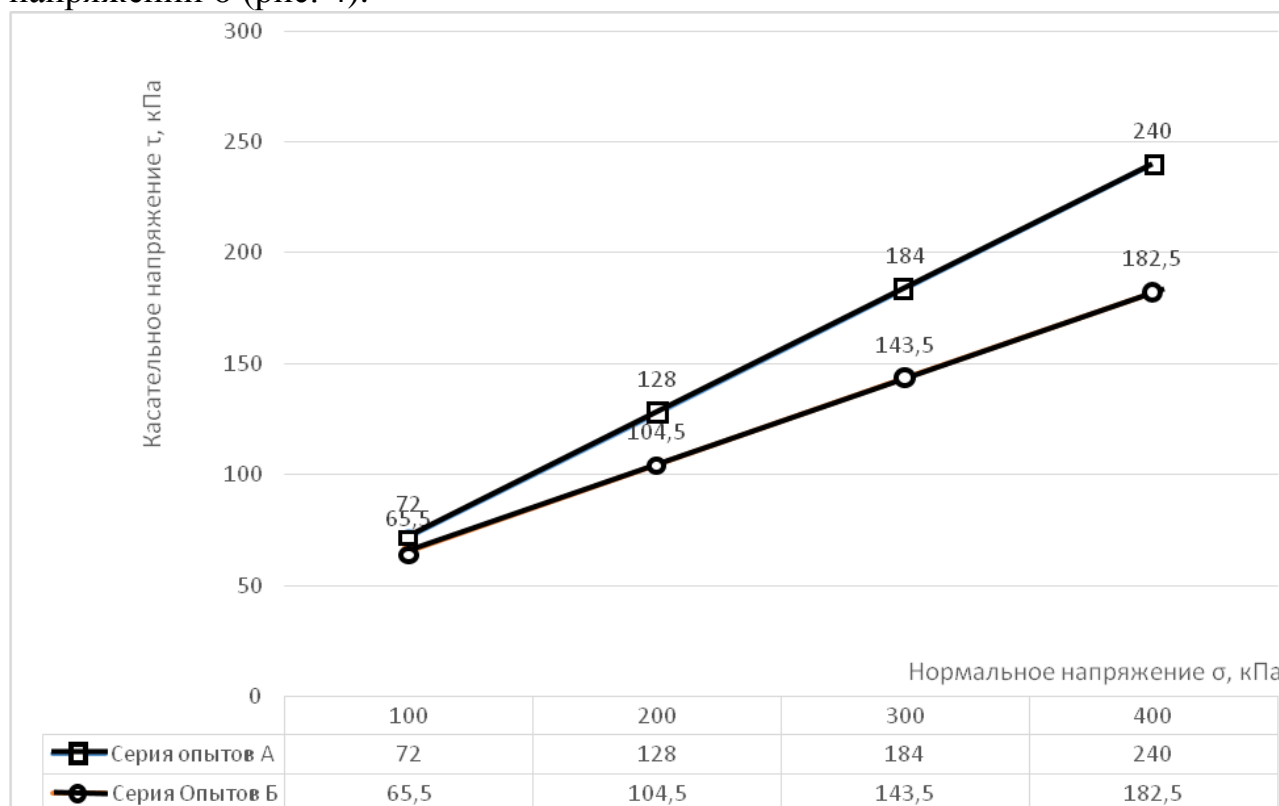


Рис. 4 – Результаты испытаний песка на одноплоскостной срез (авторская разработка)

Согласно закону Кулона, из построенного графика определяем угол внутреннего трения φ (отношения $\Delta\tau$ к $\Delta\sigma$ являются тангенсом искомого угла) и удельное сцепление C . Следует отметить, что фактическое наличие у песка некоторого удельного сцепления объясняется эффектом зацепления частиц песка и не несет физического смысла (таблица 3).

$$\tau = \delta \tan \varphi + C$$

Таблица 3 – Угол внутреннего трения и удельное сцепление для серий опытов

Вид грунта	Угол внутреннего трения φ , град	Удельное сцепление C , кПа
Серия А. Сухой песок	29	16
Серия Б. Увлажненный песок	21,3	26,5

Последним, наиболее трудным в исполнении, но одновременно наиболее полным испытанием грунта является его испытание на *трехосное сжатие* в стабилометре.

Стабилометр (рис. 5) представляет из себя камеру, заполняемую внутри жидкостью (водой). Внутри камеры помещается сформованный образец, камера монтируется в прибор, внутрь камеры устанавливается шток, передающий осевую нагрузку σ_1 . После этого камера заполняется водой, при необходимости производится дополнительное водонасыщение образца грунта.



Рис. 5 – Автоматизированный прибор для испытаний дисперсных грунтов методом осесимметричного трехосного сжатия конструкции НПП «Геотек»

(www.geotek.ru), [1]

Прибор предназначен для проведения испытаний образцов дисперсных грунтов методом осесимметричного трехосного сжатия с целью исследования прочностных и деформационных характеристик в соответствии с [5].

Давление воды в камере будет создавать нагрузку на образец в двух перпендикулярных плоскостях: $\sigma_2 = \sigma_3$. Это давление задается изначально для проведения каждого испытания. После того, как необходимое давление воды в камере было ступенчато набрано, происходит активная стадия эксперимента: прикладывание ступенчато нарастающей нагрузки σ_1 .

Нагрузка нарастает до тех пор, пока не произойдет разрушение образца грунта. В идеале две части грунта сместятся друг относительно друга по плоскости среза, наклоненной под углом. Однако может произойти разрушение «бочкой», с неявным углом плоскости среза.

Главный показатель, полученный из данного опыта, носит название девиатор. Девиатор – это разница между приложенной осевой нагрузкой σ_1 и заданной нагрузкой от давления в камере $\sigma_2 = \sigma_3$. За искомое значение принимается тот девиатор, при котором произошел слом образца грунта.

По результатам испытаний строим такой же график зависимости касательных напряжений τ от нормальных напряжений σ . Затем на оси нормальных напряжений откладываем напряжение давления в камере и от этой точки откладываем полученный девиатор. Затем между двумя точками строится полуокружность диаметра девиатора – так называемый круг Мора. Построение нескольких кругов Мора по нескольким испытаниям с разным давлением воды в камере позволит нам провести касательную к нескольким окружностям. Полученная касательная является аналогом графика, начерченного по опыту одноплоскостного среза, и позволит узнать из закона Мора-Кулона угол внутреннего трения и удельное сцепление грунта. При этом разделив девиатор на осадку на момент начала слома грунта, мы получим модуль деформации, заменив тем самым опыт компрессионного сжатия.

В зависимости от типа грунта и его условий работы существуют три вариации испытания на стабилометре: неконсолидировано-недренированный, консолидировано–дренированный, консолидированно-недренированный. Недренированные испытания проходят по быстрой схеме, без обязательной стабилизации давлений. При этом не измеряется поровое давление. Консолидированно-дренированное испытание дает характеристики грунта без учета порового давления (поровое давление в опыте равно нулю). Консолидированно-недренированное испытание проводят в случае, когда важно узнать влияние порового давления на несущую способность грунта. В первую очередь это имеет смысл для зданий, в которых происходит многократное резкое изменение больших значений нагрузок (например, для резервуаров). В случае резкого увеличения нагрузки она может нарасти быстрее, чем произойдет естественный дренаж жидкости из основания, и тогда поровое давление сработает на ослабление несущей способности.

Испытание образцов песка методом трехосного сжатия

Первая серия опытов была проведена консолидировано-недренированным способом, с образцами песка, увлажненными в камере прибора.

Было проведено две серии таких опытов. Вторая серия проведена с открытым краном в нагнетатель давления, но закрытым краном из нагнетателя в дегазатор, что является незначительным нарушением методики испытаний. Первая серия опытов проведена в строгом соответствии с методикой: кран в нагнетатель при проведении опыта закрыт.

Цель опыта – определить, являются ли потери в давлениях на включённый в систему испытания нагнетатель пренебрежительно малыми, и такой способ проведения испытания является допустимым, или нет.

Таблица 4 – Результаты испытаний песка консолидировано-недренированным способом, серия 1 «с закрытым краном»

№ Опыта	Боковое давление $\sigma_2=\sigma_3$, кПа	Девиатор $\sigma_1 - \sigma_3$, кПа	Поровое давление (max) кПа	Поровое давление (min) кПа	Относительная верт. деформ. мм
Опыт 1	100	91	180	- 175	0,11
Опыт 2	200	120	194	- 181	0,14
Опыт 3	300	156	160	- 60	0,14
Опыт 4	400	560	220	- 200	0,07

Таблица 5 – Результаты испытаний песка консолидировано-недренированным способом, серия 1 «с открытым краном»

№ Опыта	Боковое давление $\sigma_2=\sigma_3$, кПа	Девиатор $\sigma_1 - \sigma_3$, кПа	Поровое давление (max) кПа	Поровое давление, (min) кПа	Относительная верт. деформ. мм
Опыт 1	100*	–	–	–	–
Опыт 2	200	69	121	- 50	0,135
Опыт 3	300	66	114	- 9	0,085
Опыт 4	400	260	109	- 27	0,0768

* – результаты признаны недостоверными

Построение графиков методом «кругов Мора» и графический их анализ удобно произвести в масштабе с помощью ПО «AutoCAD». Аппроксимация результатов таким образом – графическая.

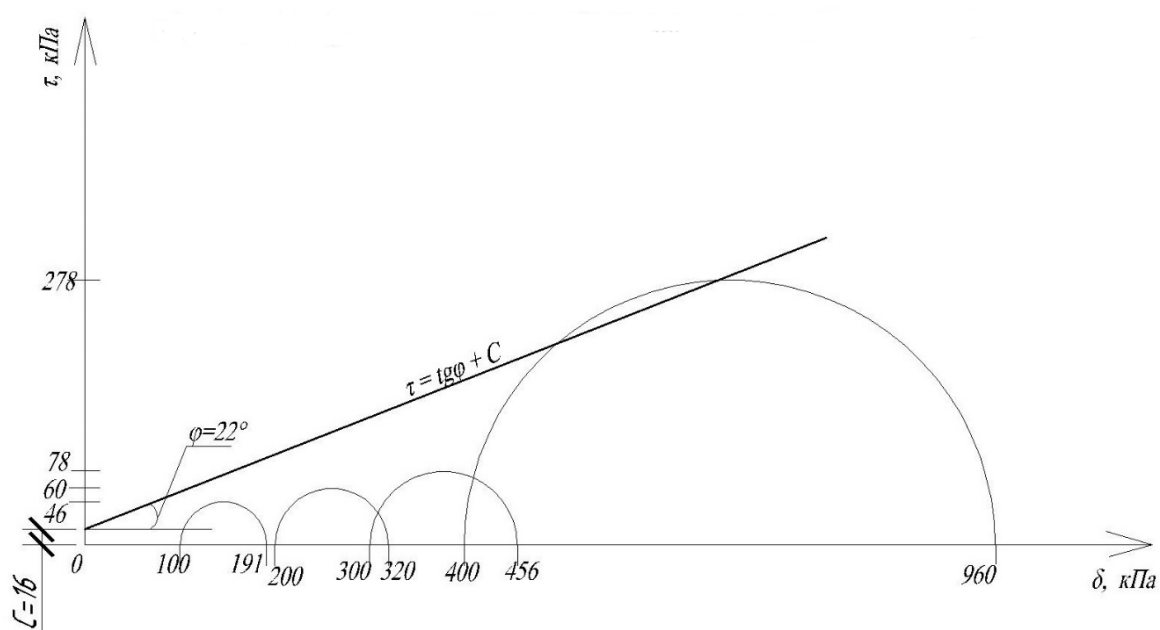


Рис. 6 – Результаты консолидировано-недренированных испытаний песка влажного на трехосное сжатие по схеме "кран закрыт" (авторская разработка)

Таблица 6 – Модули деформации, полученные из первой серии опытов на стабилометре

Опыт, боковое давление	Модуль деформации E_0 , мПа	Модуль деформации E_{50} , мПа
Опыт 1, 100 кПа	17,36	11,4
Опыт 2, 200 кПа	29,3	13
Опыт 3, 300 кПа	35,8	15,8
Опыт 4, 400 кПа	52,5	25

В результате испытаний для данного песка получаем значения $\varphi=22^\circ$ и $C=16$ кПа, что подтверждается проделанными ранее испытаниями на одноплоскостной срез.

Ввиду потери герметичности латексными резинками при формировании песчаных образцов грунта весовым методом [10] (острые кварцевые зерна повреждают латекс), вторая серия опытов не позволила однозначно построить график. Серия опытов признана недостоверной. Впоследствии резинки будут заменены. Рекомендуется в дальнейшем провести серию уточняющих испытаний на трехосное сжатие.

Проведение всех вышеперечисленных методов исследования грунта, отобранного в основании под спортивно-оздоровительным комплексом, дает возможность получить все основные механические характеристики грунта необходимые для дальнейшего расчета и проектирования фундаментов по двум группам предельных состояний.

Библиографический список:

1. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248-2010 [Текст]: монография. 2-е изд., доп. и испр. – М.: ООО «Прондо», 2014. – 812 с.
 2. Болдырев Г.Г., Барвашов В.А., Идрисов И.Х., Хрянина О.В. Комплексная технология инженерно-геологических изысканий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8. № 3. С. 22-33.
 3. Богданов Е.Н. Состояние проблемы с определением физико-механических свойств грунтов // Грунтоведение. 2015. Т. 1. № 1 (6). С. 54-67.
- Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМИ Эл № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

4. Ван Пинь, Цимбельман Н.Я., Кузнецов И.Г. Исследование прочностных свойств нескальных грунтов методами трёхосного сжатия и прямого среза // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2013. № 4 (17). С. 67-75.
5. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. [Электронный ресурс] – URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-12248-2010>. Дата введения 2012-01-01.
6. Мальцев А.В., Труфанова Н.А. Исследование влияния количества и качества инженерно-геологических изысканий на надежность и безопасность зданий и сооружений // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре: материалы 71-й Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР / СГАСУ. Самара, 2014. С.906-907.
7. Савинова Е.В., Астафьева Н.С. Проблемы неточности исходных инженерно-геологических данных при проектировании и строительстве // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство: сборник статей. Самарский государственный технический университет. Самара, 2017. С. 317-320.
8. СП 22.13330.2016. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* Основания зданий и сооружений. [Электронный ресурс] – URL: <http://docs.cntd.ru/document/СП 22.13330.2016>. Дата введения 2017-07-01.
9. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. Дата введения 2017-07-01. [Электронный ресурс] – URL: <http://docs.cntd.ru/456045544/document/СП 47.13330.2016>. Дата введения 01.07.2017.
10. Хрянина, О. В. Экспериментально-теоретическая оценка совместной работы конструкции гибкого фундамента с армированным основанием: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01/О.В. Хрянина. -Пенза, 2005. -223 с.

Оригинальность 89%