

НОВОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

A NEW DEVICE FOR FIELD TESTING OF DISPERSE SOILS TO DETERMINE THEIR STRENGTH CHARACTERISTICS

БОЛДЫРЕВ Г.Г.

Профессор Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, директор по науке и инновациям ООО «НПП «Геотек»», д.т.н., г. Пенза, g-boldyrev@geotek.ru

МЕРКУЛЬЕВ Е.В.

Магистрант Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, г. Пенза, owenmercury@gmail.com

КУБЕЦКИЙ В.Л.

Руководитель Центра мониторинга строительства зданий и сооружений, оснований и фундаментов ГУП «НИИМосстрой», д.т.н., профессор, г. Москва, fundament2009@yandex.ru

BOLDYREV G.G.

Professor of the Penza State University of Architecture and Construction, director for research and innovation of the «NPP «Geotek»» LLC, DSc (doctor of science in Technics), Penza, g-boldyrev@geotek.ru

MERKULYEV E.V.

Graduate student of the Penza State University of Architecture and Construction, Penza, owenmercury@gmail.com

KUBETSKIY V.L.

Head of the Centre of Monitoring of Construction of Buildings and Structures, Ground Bases and Foundations of the «NIIMosstroy» state-run unitary enterprise, DSc (doctor of science in Technics), professor, Moscow, fundament2009@yandex.ru

Ключевые слова: дисперсные грунты; полевые испытания грунтов; прочностные характеристики; круглый штамп; крыльчатка; кольцевой штамп; пробоотборник; метод кольцевого среза.

Аннотация: проанализированы различные методы определения показателей прочности грунтов. Разработано новое устройство для полевых испытаний грунтов с целью определения их прочностных характеристик. Проведены лабораторные и полевые испытания с использованием этого устройства. Выполнен анализ полученных результатов. Выработаны рекомендации по использованию нового метода испытаний.

Key words: disperse soils; integrated field soil tests; strength characteristics; round stamp; shear vane; ring stamp; sampler; ring-shear test method.

Abstract: various methods of determination of soil strength parameters are analysed. A new device for integrated field testing of disperse soils to determine their strength characteristics is developed. Laboratory and field tests using this device are carried out. The obtained results are analysed. Recommendations on use of the new test method are given.

Одним из видов работ при проведении инженерно-геотехнических изысканий являются полевые (штамповые, сдвиговые, прессиометрические, срезные) испытания грунтов с определением их стандартных прочностных и деформационных характеристик. К стандартным прочностным характеристикам относятся угол внутреннего трения ϕ , удельное сцепление c и недренированная прочность c_u , а к деформационным — модуль деформации E и упругий модуль деформации E_0 . Кроме того, одним из видов работ по инженерным изысканиям является обследование состояния грунтов оснований зданий и сооружений, которое выполняется при их реконструкции или усилении их фундаментов. В последнем случае также необходимо определять прочностные и деформационные ха-

рактеристики грунтов, залегающих на глубине заложения фундамента.

Общие требования к полевым испытаниям грунтов приведены в ГОСТ 30672 [4]. В таблице приведена часть этих требований, касающаяся методов определения прочностных и деформационных свойств немерзлых непросадочных грунтов.

В то же время в настоящее время определение прочностных и деформационных характеристик в полевых условиях рекомендуется проводить в соответствии с требованиями ГОСТ 20576-2012 [3]. В данном стандарте приведены два метода определения прочностных характеристик грунтов и несколько методов определения модуля деформации. Опре-

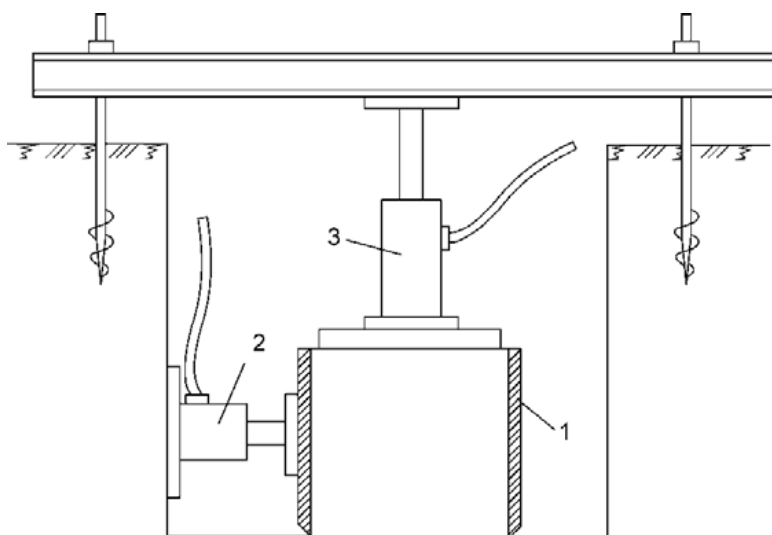


Рис. 1. Испытания блока грунта на сдвиг: 1 — стальной цилиндр; 2 — домкрат горизонтальной нагрузки; 3 — домкрат вертикальной нагрузки

деление показателей прочности рекомендуется выполнять: (1) путем испытаний «целика» грунта нормальной и сдвигающей нагрузками (рис. 1); (2) путем среза грунта крыльчаткой (рис. 2). На практике подготовка в шурфе «целика» в виде цилиндра или призмы очень сложна и трудоемка (причем не для всех грунтов вообще возможна), поэтому первый метод редко применяется в полевых условиях. Второй способ значительно проще, но позволяет определить только недренрованную прочность c_u слабых водонасыщенных глинистых грунтов, а угол внутреннего трения φ' и удельное сцепление c' при этом не определяются.

Цель данного исследования заключается в разработке полевого метода определения прочностных характеристик дисперсных грунтов (угла внутреннего трения и удельного сцепления), для чего необходимо решить следующие задачи:

- выполнить анализ различных методов определения показателей прочности грунтов;
- разработать конструкцию устройства для полевых испытаний грунтов с целью определения их прочностных характеристик;
- используя устройство новой конструкции, провести лабораторные и полевые испытания грунтов;
- провести анализ результатов лабораторных и полевых испытаний и выработать рекомендации по использованию разработанного метода испытаний.

На практике использование стандартного комплекса оборудования и методик инженерно-геологических изысканий (бурения инженерно-геологических скважин с помощью стандартной буровой техники, стандартного статического зондирования и др.) в большинстве случаев либо затруднено, либо невозможно в связи со стесненностью условий (ограниченностью доступа к основанию фундамента, работой в подвальном помещении и т.д.). При обследовании фундаментов отрываются шурфы, из которых отбираются монолиты для последующих лабораторных испытаний. Обычно как отбор качественных монолитов, так и лабораторные испытания занимают много времени.

Одним из полевых методов определения прочностных характеристик грунтов является метод испытаний кольцевым срезом, который отличается от рекомендуемого в ГОСТ 20276. Основное отличие заключается в том, что срез грунта выполняется при помощи штампа в виде полого кольца [5, 6].

Методы определения прочностных и деформационных характеристик немерзлых непросадочных грунтов

Свойство	Показатель	Метод определения	Область применения метода
Сжимаемость и набухаемость	Модуль деформации	Статическое нагружение штампов в горных выработках и в массивах грунтов, нагружение с постоянной скоростью прессиометров и дилатометров в скважинах и в массивах	Крупнообломочные грунты, пески, глинистые, органоминеральные и органические грунты
Прочность	Угол внутреннего трения; удельное сцепление; сопротивление срезу	Консолидированный срез целиков грунта	Крупнообломочные грунты, пески и глинистые грунты с показателем текучести $I_L < 1$ (независимо от степени влажности, в стабилизированном состоянии)
	Угол внутреннего трения; удельное сцепление	Неконсолидированный срез целиков грунта	Водонасыщенные глинистые грунты (при степени влажности $S_r > 0,85$, показателе текучести $I_L \geq 0,5$, в нестабилизированном состоянии)
	Сопротивление срезу	Вращательный срез крыльчаткой	Глинистые, органоминеральные и органические грунты с крупнообломочными включениями размером 2–10 мм не более 15% по массе

Принципиальная схема таких испытаний показана на рис. 3, 4. Этот метод имеет следующие достоинства:

- характеристики прочности и деформируемости грунтов в основании фундамента, в шурфе или на дне котлована определяются в условиях естественного залегания практически без нарушения природного состояния этих грунтов;

- за счет использования кольцевого среза достигается высокая точность определения параметров сопротивления сдвигу;
- имеется возможность отказа от определения характеристик прочности и деформируемости в лабораторных условиях, что значительно снижает сроки и стоимость выполнения изысканий;

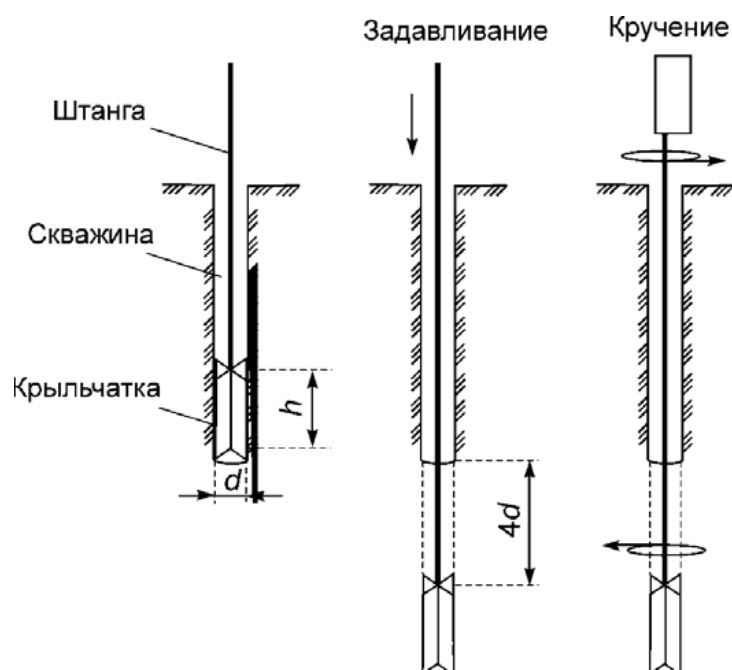


Рис. 2. Схема испытаний грунта методом лопастного среза

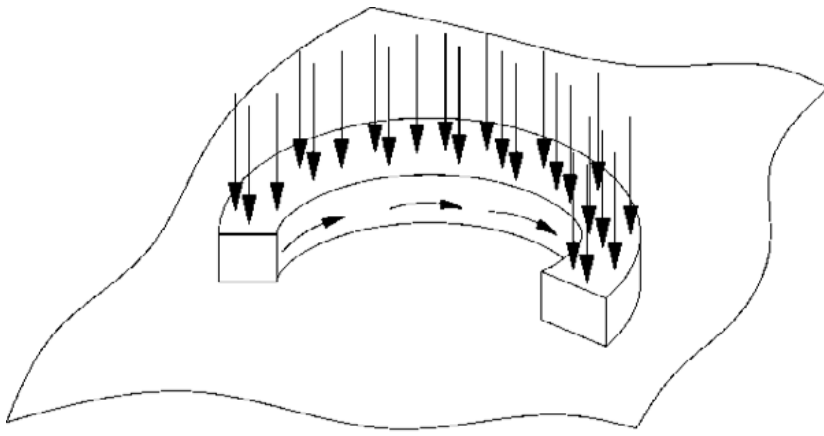


Рис. 3. Принципиальная схема испытаний грунта методом кольцевого среза [6]

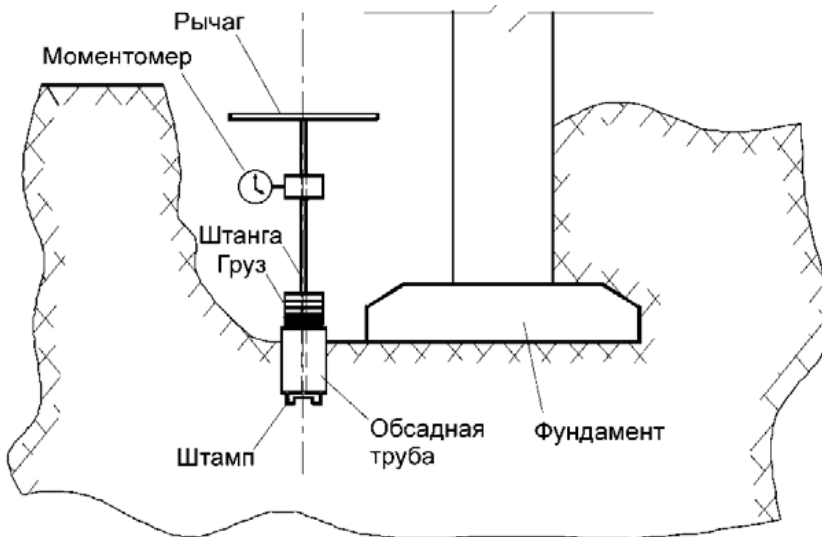


Рис. 4. Схема испытаний грунта в шурфе [5]

- испытания проводятся в открытых шурфах непосредственно при обследовании фундаментов и их оснований; при этом трудоемкость не увеличивается, так как шурфы при обследовании фундаментов проходятся в обязательном порядке;
- имеется возможность определения плотности и влажности грунта в полевых условиях;
- обеспечивается полная автоматизация процесса нагружения, записи данных измерений и их обработки с хранением результатов в базе данных.

Данный метод испытаний аналогичен методу одноплоскостного среза (по ГОСТ 1248-2010). Касательная нагрузка доводится до предельного состояния ($\tau_{пр}$), обеспечивая срез грунта по коль-



Рис. 5. Установка для испытаний с ручным режимом нагружения. Условные обозначения: 1 — устройство для создания крутящего момента; 2 — грузы; 3 — лоток с песчаным грунтом; 4 — измерительная система

цевой плоскости. Испытания проводятся при различных нормальных напряжениях σ , что позволяет построить диаграмму $\tau_{пр} = f(\sigma)$ и определить расчетные прочностные характеристики из условия прочности Кулона (угол внутреннего трения ϕ' , удельное сцепление грунта в условиях естественного залегания c' ; недренированную прочность c_u). Если вместо испытаний кольцевым штампом провести тестирование плоским штампом площадью 600 см^2 , то можно дополнительно определить модуль деформации E и упругий модуль деформации E_0 в цикле «разгрузка — повторное нагружение».

Рекомендуемые характеристики оборудования для испытаний методом кольцевого среза:

- внутренний диаметр кольца $d_g = 6 \text{ см}$; наружный диаметр кольца $d_n = 10 \text{ см}$ (при их соотношении $d_g/d_n = 0,6$ обеспечивается практически равномерное распределение нормальных и касательных напряжений по плоскости среза);
- при указанных выше размерах площадь кольцевой нагрузки составит 60 см^2 , что аналогично размерам образцов, принятым в отечественной практике лабораторных испытаний в приборах одноплоскостного среза;
- нормальное напряжение на плоскости среза обеспечивается путем укладки тарированных грузов на грузовую площадку прибора в ручном устройстве (рис. 5, 6) или путем управления автоматизированной системой осевого нагружения (рис. 7) (в зависимости от программы испытаний нормальное напряжение на плоскости среза может достигать $300\text{--}600 \text{ кПа}$);
- касательное напряжение на плоскости среза обеспечивается путем приложения крутящего момента, который измеряется датчиком;
- при испытаниях в лидерной скважине их глубина может быть до 3 м ниже поверхности грунта или дна котлована/шурфа.

В ООО «НПП «Геотек»» разработаны два варианта установки для комплексных полевых испытаний грунтов, в том числе и методом кольцевого среза. Конструктивно первое устройство содержит два винтовых анкера и складную упорную балку, на которой закреплен винт с датчиком силы для создания осевой нагрузки (см. рис. 6). Датчик измерения крутящего момента посредством штанг соединен с кольцевым штампом (см. рис. 6, б). Устройство содержит набор сменных приспособле-

ний: кольцевой штамп с площадью среза 60 см², круглый штамп площадью 600 см², крыльчатку, пробоотборник.

Испытания данной конструкции показали, что ручной режим нагружения и контроля вертикальной и вращательной нагрузками не обеспечивает стабильность измерений и постоянство нормального давления и касательных напряжений в плоскости среза. Поэтому в дальнейшем был разработан второй вариант установки — с автоматическим управлением силовым нагружением (рис. 7, 8).

Модифицированная установка включает блок силового нагружения, который представляет собой жесткую раму, состоящую из двух вертикальных направляющих штанг и каретки из верхней и нижней опорных пластин, соединенных четырьмя стержнями. Каретка имеет возможность вертикального поступательного перемещения под управлением верхнего шагового двигателя по направляющим из двух стержней. На нижней опорной плите каретки закреплен шаговый двигатель, который используется для создания крутящего момента. Ось шагового двигателя соединена с датчиком крутящего момента. Вертикальная нагрузка и перемещение каретки управляются верхним шаговым двигателем и двумя датчиками силы. К датчику крутящего момента резьбовым соединением присоединяется составная штанга, к которой крепятся цилиндрический пробоотборник, круглый плоский штамп, круглый кольцевой штамп или крыльчатка (в зависимости от выбранного метода испытаний). Блок силового нагружения монтируется на жесткое Т-образное основание, которое устанавливается на три винтовых анкера, закрученных в грунт. Все узлы крепления сделаны с помощью резьбовых соединений, что полностью устраняет люфты, имевшие место в предыдущей конструкции. Шаговый двигатель срезавшей нагрузки снабжен редуктором с коэффициентом передачи 1:50. Шаговые двигатели позволяют создавать нагрузку в автоматическом режиме. Вертикальное перемещение каретки составляет 300 мм. Данное устройство позволяет создавать вертикальную нагрузку до 200 кгс. Второй шаговый двигатель позволяет создавать вращательную нагрузку до 40 кг·м. Кольцевой штамп (рис. 9) состоит из двух колец (диаметрами 114 и 74 мм и высотой 30 мм), соединенных диском. Данная конструкция позволяет сформировать целик грунта, необходимый для проведения испытания путем



Рис. 6. Схема установки для комплексных испытаний грунтов: а — общий вид установки с кольцевым штампом; б — датчики силы для измерения вертикальной нагрузки и крутящего момента. Условные обозначения: 1 — складная упорная балка; 2 — анкера; 3 — датчик вертикальной нагрузки; 4 — датчик крутящего момента; 5 — ручки; 6 — штанга; 7 — кольцевой штамп

вдавливания кольцевого штампа в грунт с контролем усилия и перемещения шаговым двигателем и датчиком перемещений. Подобным образом может быть задавлено в грунт режущее кольцо пробоотборника для отбора мо-

нолита грунта и последующих его испытаний в лабораторных условиях с целью определения физических и механических характеристик. Управление силовым нагружением и регистрация всех данных измерений осуществляют-

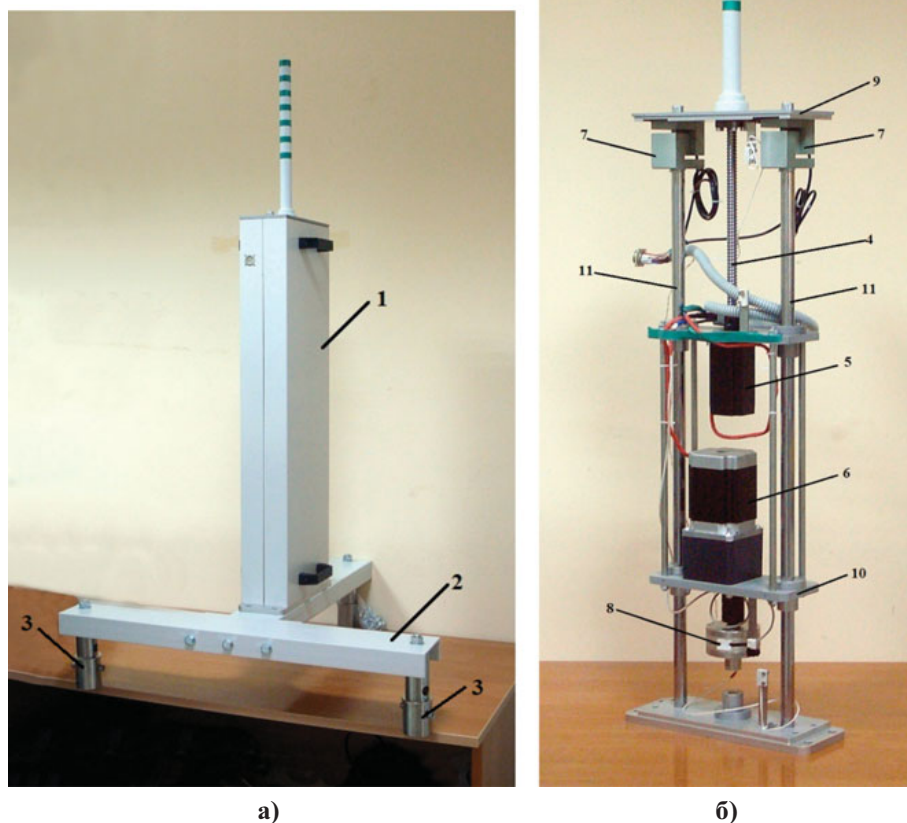


Рис. 7. Автоматизированная установка для комплексных испытаний грунтов: а — общий вид; б — конструктивное решение. Условные обозначения: 1 — блок силового нагружения; 2 — Т-образная рама; 3 — опоры для крепления анкеров; 4 — винт; 5, 6 — шаговый двигатель и датчики силы вертикальной нагрузки; 7, 8 — датчик силы и датчик крутящего момента; 9 — верхняя опорная плита; 10 — нижняя опорная плита; 11 — направляющие штанги

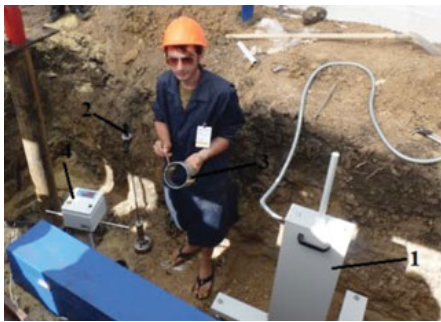


Рис. 8. Испытания грунта в шурфе на полигоне ООО «НПП «Геотек»». Условные обозначения: 1 — установка для комплексных испытаний грунтов; 2 — пробоотборник; 3 — кольцо пробоотборника; 4 — устройство для испытаний грунтов методом лопастного среза

ся с использованием компьютера и программы «АСИС 4.0», разработанной в ООО «НПП «Геотек»». Последнее позволяет проводить испытания по разным схемам — с учетом стабилизации деформации или без него. Возможны программное контролирование и изменение различных параметров испытаний.

Модернизированная модель устройства для комплексных испытаний грунтов работает следующим образом.

Этап 1. Подготовка устройства к испытаниям:

- на поверхности грунта, дне котлована или шурфа в грунт заворачивают три винтовых анкера на расстояниях друг от друга, равных расстоянию между цилиндрическими захватами на Т-образной балке;
- устанавливается и закрепляется винтами на анкерах Т-образная балка, на нее крепится болтами устройство силового нагружения;
- в случае испытаний штампом площадью 600 см² на поверхности грунта устанавливают репер и прикрепляют к нему держатели датчиков вертикальных перемещений; шток датчика перемещений устанавливают в лю-

бом месте на поверхности штампа; датчики силы, крутящего момента и перемещений подключают к блоку управления и компьютеру.

Этап 2. Выбор способа испытаний и последовательность их проведения:

- выбирают тип приспособления для испытаний грунта — круглый штамп, крыльчатка, кольцевой штамп или пробоотборник;
- проводят испытания выбранным способом.

Рассмотрим стадии испытаний указанными методами.

Испытания круглым штампом площадью 600 см². Круглый штамп устанавливают на зачищенную поверхность грунта соосно с винтом осевого нагружения, а датчик перемещений закрепляют на неподвижном репере. Проводят испытания штампом по ГОСТ 20276. Осевую нагрузку создают путем управления шаговым двигателем вертикальной нагрузки. Измерение осадки штампа и управление нагрузкой выполняют автоматически, используя показания датчиков перемещений и силы. Данные измерений заносятся в базу компьютера. Используя результаты измерений, по ГОСТ 20576 находят модуль деформации при нагружении и упругий модуль деформации грунта в цикле «разгрузка — повторное нагружение»:

$$E = \frac{(1 - \nu^2)\omega d \Delta p}{\Delta s}, \quad (1)$$

где ν — коэффициент Пуассона, равный 0,3 для песков и супесей, 0,35 для суглинков и 0,42 для глин; ω — безразмерный коэффициент, равный 0,8 для круглого штампа; d — диаметр штампа; Δp — приращение давления на штамп; Δs — приращение осадки штампа, соответствующее Δp .

Испытания кольцевым штампом. Кольцевой штамп соединяют со штангами и с датчиком крутящего момента,

после чего под управлением шагового двигателя вертикальной нагрузки его опускают до поверхности грунта и медленно вдавливают в грунт до соприкосновения верхнего торца штампа с грунтом. Момент касания определяется показаниями датчиков силы и перемещений. Далее испытания проводятся методом, аналогичным методу одноплоскостного среза (по ГОСТ 12248) при различных нормальных давлениях. Нормальное давление создается шаговым двигателем и измеряется двумя датчиками силы. Измерение касательной нагрузки выполняют автоматически с использованием датчика крутящего момента. Данные измерений заносятся в базу компьютера. Используя результаты измерений, определяют предельное (пиковое) касательное (τ_{max}) и нормальное (σ) напряжение:

$$\tau_{max} = \frac{3M_{max}}{2\pi(r_2^3 - r_1^3)}; \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{N}{\pi(r_2^2 - r_1^2)}, \quad (3)$$

где N — нормальная нагрузка; r_1, r_2 — внутренний и наружный радиусы кольцевого штампа соответственно; M_{max} — максимальный крутящий момент.

Используя условие прочности Кулона, находят угол внутреннего трения и удельное сцепление.

Если продолжить срез грунта вращением кольцевого штампа до остаточных значений крутящего момента $M_{ост}$ (рис. 10), то, используя формулу (2), можно определить остаточное сопротивление грунта срезу $\tau_{ост}$ и из условия прочности Кулона найти остаточные значения угла внутреннего трения $\phi_{ост}$ и удельного сцепления $c_{ост}$. Следует заметить, что это невозможно сделать в приборе одноплоскостного среза из-за ограниченности величины деформации среза по конструктивным причинам. В ГОСТ 12248 рекомендуют использовать для этого срез грунта «плашка по плашке», что несложно, но при этом получается неизвестным истинное значение деформации среза.

Испытания крыльчаткой. Сначала проводят подготовку устройства к испытаниям. Крыльчатку соединяют со штангами длиной, равной расчетной глубине погружения. После этого свободный конец набора штанг соединяют с датчиком крутящего момента (см. рис. 6, б). Погружение крыльчатки в грунт можно выполнять вручную вдавливанием или с использованием блока



а)



б)

Рис. 9. Кольцевой штамп с присоединительной штангой (а) и вид кольца с грунтом после испытаний (б)

силового нагружения. В первом случае фиксация значений крутящего момента выполняется с использованием специального регистратора (см. рис. 7).

Затем проводят испытания грунта на срез крыльчаткой по ГОСТ 20276. Измерение крутящего момента выполняют автоматически с использованием датчика, его значения отображаются на панели цифрового индикатора ручного устройства или на экране компьютера, если применяется блок силового нагружения.

Используя результаты измерений, находят недренированную прочность глинистого грунта:

$$c_u = \frac{M_{кр}}{0,5\pi d^2 (h + 0,33d)}, \quad (4)$$

где d, h — диаметр и высота крыльчатки соответственно; $M_{кр}$ — измеренный максимальный крутящий момент.

Если по достижении пика крутящего момента продолжить вращение крыльчатки (не менее 10 раз), то можно получить остаточное значение крутящего момента $M_{ост}$, соответствующее полному разрушению грунта. Отношение $M_{кр}/M_{ост}$ называется чувствительностью глинистого грунта. Оно используется в качестве одного из классификационных показателей связных грунтов, а также при оценке усилий, необходимых для погружения свай в глинистые грунты.

На рисунке 11 приведены результаты сравнительных испытаний глинистого грунта естественного сложения на опытной площадке ООО «НПП «Геотек»» [2], выполненных Е.В. Меркульевым в слое полутвердого суглинка, имевшего следующие физические характеристики:

Природная влажность	.....	22,0%
Влажность на границе текучести	.....	37,9%
Влажность на границе раскатывания	.....	19,8%
Число пластичности	.....	13,8
Показатель текучести	.....	0,01
Плотность	.....	1,84 г/см ³

На рисунке 11 видны существенные различия между полученными характеристиками прочности. Исследования показали влияние формы кольцевого штампа и скорости среза на сопротивление сдвигу глинистого грунта. В лабораторных условиях скорость консолидированно-дренированного среза составляет сотые доли миллиметра в минуту, тогда как при использовании метода кольцевого среза сам срез про-

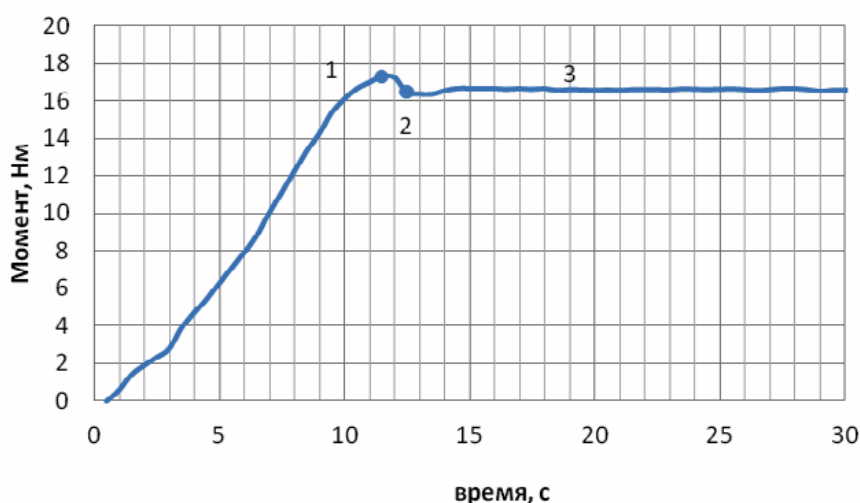


Рис. 10. Зависимость крутящего момента от времени/деформации среза: 1 — пиковое значение момента; 2 — падение момента за счет уменьшения сопротивления грунта; 3 — остаточное значение момента

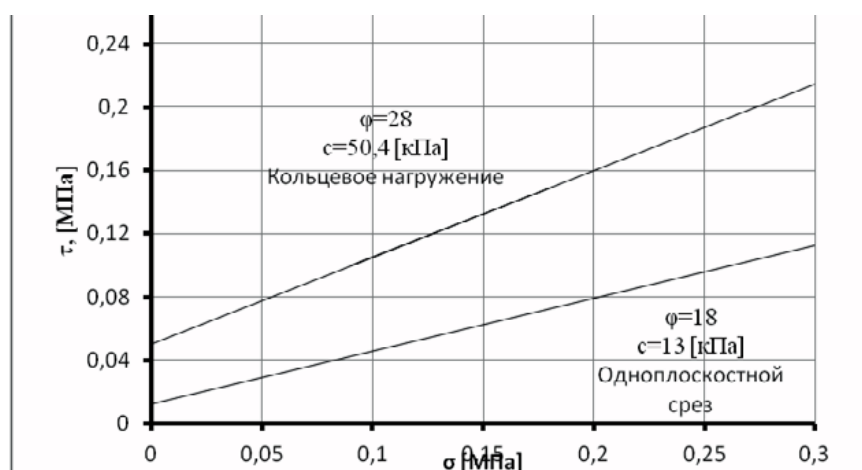


Рис. 11. Графики результатов испытаний грунтов методами кольцевого и одноплоскостного среза

исходит значительно быстрее — за одну-две минуты. Полученные данные указывают на необходимость проведения дополнительных исследований с целью усовершенствования рассмотренного метода испытаний.

На основе изложенного в статье можно сделать следующие основные выводы.

1. Как показывает сравнение, испытания методами кольцевого и одноплоскостного среза дают различные

значения характеристик прочности Кулона. Эта разница может быть объяснена как влиянием скорости среза, так и видом кольцевого штампа.

2. Устройство для испытаний кольцевым нагружением показало свою работоспособность и может быть использовано при дальнейших исследованиях с целью усовершенствования методов комплексных испытаний грунтов в полевых условиях.

Список литературы

1. Болдырев Г.Г. Полевые методы испытаний грунтов (в вопросах и ответах). Саратов: ПАТА, 2013. 356 с.
2. Болдырев Г.Г., Мельников А.В., Меркульев Е.В., Новичков А.Г. Сравнение методов лабораторных и полевых испытаний грунтов // Инженерные изыскания. 2013. № 14. С. 28-46.
3. ГОСТ 20276-2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. М.: МНТКС, 2013.
4. ГОСТ 30672-2012. Грунты. Полевые испытания. Общие положения. М.: МНТКС, 2013.
5. Кубецкий В.Л. Способ испытания грунтов: авторское свидетельство СССР № 657315 А1. Опубликовано 15.04.1979.
6. П-43-89. Рекомендации по определению характеристик реологических свойств скальных и полускальных грунтов методом кольцевого нагружения (мерзлых, оттаивших и немерзлых). Л.: Изд-во ВНИИГ, 1990. 112 с.