

УДК 624.131.53

DOI: 10.34753/HS.2023.5.1.75

**ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ГРУНТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ОБЪЕКТОВ ЛЕСНОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ****STRENGTH CHARACTERISTICS OF
SOIL IN THE DESIGN OF FOREST
INFRASTRUCTURE FACILITIES**А.Ю. Виноградов^{1,2}, О.В. Зубова²

¹ ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия; ² ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», г. Санкт-Петербург, Россия
gd@npogtp.ru

Alexey Yu. Vinogradov^{1,2}, Oksana V. Zubova²
¹Scientific and Industrial Research Association
Gidrotehproekt, Valday, Russia; ² Saint Petersburg
State Forest Technical University, St. Petersburg,
Russia
gd@npogtp.ru

Аннотация. Сопротивление грунта сдвигу – одна из ключевых характеристик грунта, влияющих на его несущую способность как при строительстве лесных дорог, так и при устройстве оснований водопропускных сооружений, производственных площадок и т.п. Погрешности в его определении приводят к существенному экономическому ущербу. Завышение экспериментально определяемых значений показателей сдвига ведет к проектным ошибкам, недолговечности оснований и разрушению сооружений, а занижение – к дополнительным расходам при проектировании и строительстве.

В статье рассматриваются вопросы обоснованности применения различных методик определения прочности грунта на сдвиг, точности измерений по данным методикам, интерпретации результатов. Проведен анализ определения показателей сцепления и угла внутреннего трения по методу консолидированно-дренированного среза и неконсолидированного (быстрого) среза. Сравнительные результаты лабораторного определения прочностных свойств разными методами (каждый из которых регламентирован действующими нормативными документами обязательного и добровольного применения) показывают, что сцепление одних и тех же образцов отличается в несколько раз, а также не всегда коррелирует с полевыми значениями. Кроме того, отмечено, что в лабораторных условиях практически невозможно добиться условий «ненарушенной» структуры грунта, т.е.

Abstract. Soil shear resistance is one of the key characteristics of soil that affect its bearing capacity. Errors in its definition can lead to significant economic damage. Overestimation of experimentally determined values of shear indicators leads to the fragility of foundations and the destruction of structures, and underestimation leads to additional construction costs.

The article discusses the validity of the application of various methods used to determine the shear strength of soil, the accuracy of measurements obtained through these methods, and the interpretation of the results. The analysis focuses on the determination of the indicators of adhesion and the angle of internal friction using the method of consolidated-drained cut and unconsolidated (fast) cut is carried out. The comparative results of laboratory determination of strength properties using different methods (each regulated by GOST standards) show that the adhesion of the same samples differs several times, and also does not always correlate with field values. Additionally, it is worth noting that replicating the "undisturbed" soil structure, which is akin to natural conditions (i.e. reproducibility of conditions of natural occurrence), is nearly impossible in laboratory settings., The difference in density and humidity of laboratory and field samples in sandy soils is especially significant. At the same time, the difference in the measured adhesion indicators for field and "prepared" samples was in some cases thousands of percent, the angle of internal friction was tens of percent. The article also reveals inconsistencies in the dimensional aspects of

воспроизводимости условий естественного залегания. Особенно существенна разница плотности и влажности лабораторных и полевых проб у песчаных грунтов. При этом отличие в измеренных показателях сцепления у полевых и «подготовленных» образцов составляло в отдельных случаях тысячи процентов, угла внутреннего трения – десятки процентов. Также в статье отражены выявленные несоответствия в размерности применяемого для определения касательного напряжения уравнения Кулона, показаны ошибки определения сдвиговых характеристик, возникающие из-за несоответствия размеров образца (высоты и диаметра) природным условиям. Проанализированы недостатки полевых испытаний грунтов на сдвиг по стандартным методикам.

Ключевые слова: консолидированно-дренированный срез; неконсолидированный (быстрый) срез; угол внутреннего трения грунта; сцепление грунта; пористость грунта; закон Кулона для грунтов.

Введение

Разрушение грунта происходит при преодолении тангенциальным (сдвигающим) напряжением предела прочности на срез, обусловленного внутренним сопротивлением. Поэтому характеристиками грунта, определяющими его несущую способность, являются прочностные характеристики.

К прочностным характеристикам грунта, согласно общепринятому подходу, относятся сцепление c и угол внутреннего трения φ . Сцепление c , численно равно касательным напряжениям τ , которые нужно приложить к грунту, чтобы разрушились внутренние связи (*при нулевом нормальном напряжении*) [Петраков А.А., Яркин В.В. и др., 2004]. Угол внутреннего трения φ учитывает затраты внешней силы на внутреннее сопротивление начальному перемещению частиц грунта и последующее их взаимное трение.

Сцепление грунта характеризует сопротивление структурных связей срезу связываемых ими частиц. Величина удельного

the Coulomb equation used to determine the tangential stress, and shows errors in determining shear characteristics that arise due to the discrepancy between the sample dimensions (height and diameter) and natural conditions. The drawbacks of conducting field tests of soils for shear according to standard methods are analyzed.

Keywords: consolidated-drained cut; unconsolidated (fast) cut; angle of internal friction of the soil; soil adhesion; porosity of the soil; Coulomb's law for soils.

сцепления определяется как отрезок, отсекаемый прямой зависимости сопротивления грунта срезу от вертикального давления на оси ординат при нулевом вертикальном давлении [Крамаренко В.В., 2011].

Угол внутреннего трения грунта характеризует сопротивление взаимному перемещению частиц грунта. Определяется как тангенс угла наклона прямой зависимости сопротивления грунта срезу от вертикального давления к оси абсцисс [Крамаренко В.В., 2011].

Сцепление и угол внутреннего трения увязаны между собой законом Кулона в тангенциальное напряжение: $\tau_{\text{сопр}} = \sigma \tan \varphi + c$ [Цытович Н.А., 1963]. С физической точки зрения [Виноградов Ю.Б., 1982] данное напряжение является напряжением, удерживающим грунтовое тело от среза. Чем выше значения сцепления и угла внутреннего трения, тем более устойчивым является грунт.

Исходя из приведенных определений ясно, что прочностные свойства грунта определяют стабильность его состояния и способность

противостоять внешним воздействиям и нагрузкам.

Однако, такой подход, к сожалению, неоднозначен, методики оценки прочностных свойств вызывают обоснованные вопросы, полученные в результате полевых и лабораторных работ значения, не выдерживают критики и зависят от той или иной интерпретации.

Постановка задачи

В данной статье, первой из цикла о прочностных характеристиках грунтов, поднимаются и рассматриваются вопросы объективности, точности измерений прочностных характеристик, обоснованности методик и т.п.

Большинством грунтоведов в настоящее время прочностные характеристики грунта воспринимаются как значащие обоснованные параметры, характеризующие физические свойства грунта.

Точность определения

Общая относительная погрешность лабораторного определения значения сцепления при одноплоскостном срезе в диапазоне от 0,005 до 0,08 МПа меняется от 95 до 34% (от 0,0048 до 0,027 МПа) [Дмитриев В.В., Ярғ Л.А., 2008]. При $c=0,08$ МПа относительная составляющая случайной погрешности 22%, систематической – 25%. Точность лабораторной оценки прочностных свойств песчаных и глинистых грунтов приведена в таблице 1.

Таблица 1. Точность лабораторной оценки прочностных свойств песчаных и глинистых грунтов [Дмитриев В.В., Ярғ Л.А., 2008].

Table 1. Accuracy of laboratory assessment of strength properties of sandy and clay soils.

Вид грунта	Среднее сцепление с, МПа	Погрешность определения с, МПа/%		
		внутрилабораторная	межлабораторная	лабораторная
Песок	0,008	0,005/57	0,004/47	0,006/80
	0,018			
	0,052			
	0,370			
Супесь	0,018	0,006/36	0,006/33	0,008/47
Суглинок	0,052	0,013/25	0,014/26	0,019/37
Глина	0,037	0,01/27	0,01/28	0,014/38
Вид грунта	Средняя величина угла внутреннего трения, град	Погрешность определения ϕ , град/%		
Песок	30,4	2,0/6	2,7/9	3,4/11
Супесь	29,3	2,0/7	2,8/9	3,4/12
Суглинок	16,5	2,6/16	3,4/21	4,3/26
Глина	16,7	2,6/16	3,4/20	4,3/26

В числителе абсолютная погрешность, в знаменателе – относительная (с. 363, с. 374) [Дмитриев В.В., Ярғ Л.А., 2008]

Выполненные нами, в соответствии с требованиями ГОСТ 12248.1-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза¹, ГОСТ 12248.2-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноосного сжатия², ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом

трехосного сжатия³ расчет угла внутреннего трения и сцепления по протоколам лабораторных испытаний в сравнении с обобщенными результатами трехосных консолидировано-дренированных испытаний грунтов, сделанными на основании тех же протоколов, представлен в таблице 2. Расчет проведен согласно раздел 9 «Обработка результатов» ГОСТ 12248.3-2020,

¹ ГОСТ 12248.1-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза

² ГОСТ 12248.2-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноосного сжатия

³ ГОСТ 12248.3-2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия

Раздел 7 Вычисление нормативных и расчетных значений угла внутреннего трения и удельного сцепления грунтов. ГОСТ 20522–2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний⁴. Средние сдвиговые показатели

сцепления для песков экстраполированы согласно таблице А.1. СП 22. 13330–2016 «Основания зданий и сооружений». Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83⁵.

Таблица 2. Расчет угла внутреннего трения и сцепления по протоколам лабораторных испытаний.

Table 2. Calculation of the angle of internal friction and adhesion according to laboratory test protocols.

Инженерно-геологический элемент (ИГЭ)	Скв.	Глубина взятия пробы h, м	Бытовое давление σ_v , МПа	Сцепление, с		Погрешность определения с, МПа/%	Угол внутреннего трения, φ		Погрешность определения φ , град/%
				Наш расчет	Принято в табл.		Наш расчет	Принято в табл.	
17	14	11,2	0,18	0,0028	0,003	0,0002/7	45,8	42	3,8/9
	14	10,8	0,2						
	14	11,9	0,24						
	14	11,5	0,175						
	14	13,5	0,25						
15	14	8,5	0,16	0,010	0,011	0,001/9	38,9	33	5,9/18
	14	9	0,18						
	14	9,5	0,2						
	14	9,9	0,21						
	14	10,0	0,22						
	14	10,4	0,24						
16	1	15,7	0,15	0,0057	0,006	0,0003/5	41,2	36	5,2/14
	2	12	0,12						
	2	13,5	0,13						
	2	15,7	0,19						
	3	12,9	0,24						
	6	9	0,16						
	6	8,9	0,1						
20	6	17,4	0,278	0,027	0,045	0,018/40	30,4	19	11,4/60
	14	15,5	0,3						
14	3	17,2	0,2	0,024	0,044	0,02/44	38,9	31	7,9/25
	3	17,6	0,3						
	7	19,9	0,34						
23а	3	17,2	0,2	0,071	0,083	0,012/14	35,0	28	7/25
	3	17,6	0,3						
	7	19,9	0,34						
23б	12	38,8	0,63	0,389	0,175	0,214/122	26,1	28	1,9/7
	12	39,7	0,54						
	12	40,8	0,56						
23в	4	43,4	0,585	0,039	0,049	0,01/20	26,2	14	12,2/14
	12	43,1	0,7						
	12	43,9	0,8						

⁴ ГОСТ 20522–2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний

⁵ СП 22. 13330–2016 «Основания зданий и сооружений». Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83

Продолжение таблицы 2

11	15	9,4	0,18	0,107	0,048	0,059/ 123	18,9	19	0,1/1
	16	9,9	0,19						
21	15	17,6	0,4	0,320	0,041	0,279/ 680	16,8	25	8,2/32
	16	20,4	0,5						
	13	9,5	0,8						
	13	9,9	0,9						
18	11	9,0	0,7	0,002	-	-	48	43	5/12
	11	9,3	0,8						

Относительная погрешность в определении сцепления в ряде случаев превышает 100 % (инженерно-геологический элемент (ИГЭ) 23б – супесь и 11 – глина) и для ИГЭ-21 (супесь) достигает 680 %. Несколько лучше ситуация с оценкой угла внутреннего трения (ИГЭ-14, 23а – супесь) погрешность составляет 25%, ИГЭ-21 (супесь) – 32% и ИГЭ-20 (глина) – 60%. Причина таких расхождений проста: при получении «неправильных» расчетных значений сцепления и угла внутреннего трения, производится заимствование из таблиц А.1. – А.2., приведенных в СП 22. 13330-2016. Причем, подобный подход всегда имеет место на практике, но *нигде* не регламентирован. Этот факт удручает и ставит под сомнение саму необходимость таких дорогостоящих исследований, как трехосные консолидировано-дренированные испытания.

С другой стороны, при трехосных испытаниях могут оцениваться прочностные характеристики «подготовленных» песчаных грунтов, поскольку методика одноплоскостного среза (ГОСТ 12248.1.), по непонятным причинам, такой возможности не предоставляет в принципе.

Нами лабораторные эксперименты на неконсолидированный быстрый одноплоскостной срез с несвязными грунтами проводились массово, полученные значения вполне вписываются в общепринятые рамки и не требуют вышеприведенных приемов.

Пробоподготовка

Как указано в п. 4.4 ГОСТ 30416-2020⁶: «Испытания проводят на образцах грунта ненарушенного сложения с естественной

влажностью и в водонасыщенном состоянии или на искусственно приготовленных пробах и образцах с заданными плотностью и влажностью, значения которых устанавливают в программе испытаний».

Однако даже связные грунты, отобранные в виде монолитов, не имеют, строго говоря, ненарушенной структуры. Известно, что извлечение образца грунта из скважины или шурфа сопровождается уменьшением напряжений в скелете образца грунта и снижением до нуля давления в поровой воде [Пыхтева Н.Ф., Букша, В.В. и др., 2018]. Попыток пересчета прочностных характеристик, полученных в лабораторных (или полевых) условиях в истинные значения, которые бы проводились с учетом этих изменений, в литературе нами не обнаружено. Оценка погрешности измерения прочностных характеристик на искусственно подготовленных пробах по сравнению с монолитами также отсутствует.

По меньшей мере, песчаные грунты *практически* не исследуются на прочностные свойства в естественном залегании. Если нам необходимо посчитать несущую способность песчаных грунтов, залегающих под фундаментом проектируемого нами здания, то мы априори этого сделать не можем. Например, природное сцепление песчаника, слежавшегося где-нибудь в Ленинградской области под историческим воздействием ледниковых масс, может составлять сотни КПа, что категорически не соответствует общепринятым оценкам.

Измеренное значение сцепления слежавшегося мелкозернистого песчаника,

⁶ ГОСТ 30416–2020 Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения

исследованного на прочностные свойства в разрезе на берегу р. Порусья Поддорского района Новгородской области с глубины залегания 6—7 м плотностью 2,30 г/см³, коэффициенте пористости 0,15, составило 1,56 МПа. «Подготовленные» пробы с того же горизонта при трехосных испытаниях показали значения $c=0,011$ МПа при угле внутреннего трения $\varphi=36^\circ$ (таблица 4). Надо иметь в виду, что нам не удалось воссоздать искусственно первоначальную плотность рассматриваемого грунта.

К сожалению, литературных источников с результатами измерений прочностных свойств песчаных грунтов непосредственно в полевых условиях крайне мало [Литвинов И.М., 1951]. Одно из немногих литературных свидетельств самой возможности существования настолько значительных величин сцепления для песчаных грунтов приведено в [Дмитриев В.В., Ярг Л.А., 2008].

Полученные нами прочностные характеристики отобранных монолитов и подготовленных проб при одинаковой влажности непосредственно в поле приведены в таблице 3.

Таблица 3. Измеренные значения сцепления и угла внутреннего трения монолитов и «специально подготовленных проб» одного и того же грунта.

Table 3. Measured values of adhesion and internal friction angle of monoliths and "specially prepared samples" of the same soil.

Проба	Супесь легкая, влажность 17 %			Песчаник, влажность 9 %		
	Плотность, г/см ³	$tg\varphi$	c , МПа	Плотность, г/см ³	c , МПа	
МОНОЛИТ	1,83	0,35	0,044	2,30	1,56	
«ПОДГОТОВЛЕННАЯ»	1,83	0,40	0,033	2,08	0,01	
Проба	Суглинок, влажность 14 %			Супесь, влажность 18 %		
	Плотность, г/см ³	$tg\varphi$	c , МПа	Плотность, г/см ³	$tg\varphi$	c , МПа
МОНОЛИТ	2,03	0,45	0,174	1,95	0,45	0,064
«ПОДГОТОВЛЕННАЯ»	2,04	0,35	0,108	1,98	0,25	0,087

Разброс в определении прочностных свойств составил (таблица 4):

Таблица 4. Погрешность определения значений сцепления и угла внутреннего трения между монолитами и «специально подготовленными пробами».

Table 4. Error in determining the values of adhesion and the angle of internal friction between monoliths and "specially prepared samples".

Вид грунта	Погрешность определения c , МПа / %	Погрешность определения $tg\varphi$ / %
Песчаный (цементированный)	1,55/15500	-
Супесь	0,023/51	0,2/44
Супесь легкая	0,011/25	0,05/14
Суглинок	0,066/38	0,1/22

Погрешность при пробоподготовке превышает максимальную межлабораторную по [Дмитриев В.В., Ярг Л.А., 2008] для всех видов грунтов как по сцеплению, так и для угла внутреннего трения.

Методы испытания грунтов

Различают два основных вида испытаний грунтов на сдвиг как в полевых, так и в лабораторных условиях:

1. Консолидированно-дренированный или медленный срез. При таком испытании, уплотняющее нормальное давление выдерживается до стабилизации деформаций в грунте, после чего производится сдвиг грунта.

2. Неконсолидированно-недренированный или быстрый срез. При этом, характеристики грунта (плотность и влажность) не изменяются, то есть консолидация, которая связана с отжатием воды из грунта, отсутствует как при нормальном нагружении, так и при сдвиге [Алексеев В.М., 2011].

«В практике исследований грунтов применяют метод среза грунта по фиксированной плоскости в приборах одноплоскостного среза. Различают две основные схемы опыта:

медленный срез предварительно уплотненного до полной консолидации образца грунта (консолидировано-дренированное испытание) и быстрый срез без предварительного уплотнения, но всегда нагруженного (!) грунта – наше примечание – (неконсолидировано-недренированное испытание)» [Горбунов-Посадов М.И., Ильичев В.А. и др., 1985].

Нами проводились массовые опыты по схеме быстрого среза. Во всех случаях, после приложения нормальной нагрузки, рекомендованной таблицей 1 ГОСТ 20276.4⁷, образец менял свои характеристики – плотность и влажность. В качестве иллюстрации приведем следующие данные (таблица 5).

Таблица 5. Изменения плотности и влажности супеси при проведении неконсолидированного (быстрого) среза при приложении нормального давления 0,15 МПа.

Table 5. Changes in the density and humidity of sandy loam during unconsolidated (fast) cutting when applying a normal pressure of 0.15 MPa.

Плотность, г/см ³		Весовая влажность, %	
До опыта	После опыта	До опыта	После опыта
1,39	1,52	10	9
1,29	1,40	20	18
2,01	2,10	25	21
1,83	1,95	25	20

Лабораторные методы

Наиболее часто в практике для определения прочностных характеристик используются лабораторные методы. Сравнительный анализ (таблица 6) показал, что результаты определения сцепления одного и того же монолита методами трехосных консолидировано-дренированных испытаний и одноплоскостного среза даже связных грунтов различаются в разы. Опять вынуждены констатировать, что не имеет смысла проводить дорогостоящие лабораторные исследования для получения недостоверных данных.

При проведении стандартного, описанного соответствующим ГОСТ 12248.1–2020, сдвигового определения прочностных характеристик, строят зависимость $\tau = f(\sigma)$

путем определения сдвигающего напряжения при не менее чем трех различных значениях σ_z (п.5.3).

Угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c определяют как параметры полученной линейной зависимости $\tau = f(\sigma)$ (п. 9.2 ГОСТ 12248.1-2020).

При испытаниях в статическом режиме срезающая нагрузка передается ступенями по 5 % от значения нормальной нагрузки, при которой проводят срез. Не реже чем через каждые 2 мин после передачи ступени нагрузки проводится измерение деформации среза, уменьшая интервал между измерениями до 1 мин в период затухания деформаций до ее условной стабилизации. Критерием завершения ступени нагружения является достижение скорости деформации среза, не превышающее 0,01 мм/мин. (п. 8.10 ГОСТ 12248.1–2020).

⁷ ГОСТ 20276.4-2020 Грунты. Метод среза целиков грунта

Таблица 6. Сравнительные результаты лабораторных определений прочностных свойств грунтов различными методами.

Table 6. Comparative results of laboratory determinations of strength properties of soils by various methods.

ИГЭ	Грунт	Скв.	h, м	Трехосные консолидировано-дренированные испытания		Консолидированный одноплоскостной срез		Прил. 1 Таблица 2 СНиП 2.02.01	
				с, МПа	φ, град	с, МПа	φ, град	с, МПа	φ, град
20	Глина полутв.	14	15,5	0,045	19	0,088	20	0,059	19
14	Супесь	3	17,6	0,044	31	0,108	32		
11	Глина полутв.	15	9,4	0,048	19	0,079	19	0,059	19
21	Супесь полутв.	H-13	9,9	0,041	25	0,092	22	0,015	27
21	Супесь твердая	H-13	9,5	0,041	25	0,154	24	0,021	30
15а	Песок пылеватый	3	12,9	0,011	33	0,018	24,5	0,005	32

При испытаниях в кинематическом режиме горизонтальные нагрузки и деформации среза фиксируют через 0,25—0.5 мм та, чтобы накопилось 15—20 отсчетов от начала до конца среза (п. 8.11 ГОСТ 12248.1–2020).

На рисунке 1 приведен график смещений сдвижной обоймы при проведении быстрого среза монолита супеси прибором Литвинова. Согласно методике проведения испытаний [Петраков А.А., Яркин В.В. и др., 2004] за начало разрушения образца грунта принимается либо резкое нарастание незатухающих деформаций среза, либо в случае, при котором полное перемещение среза превышает в опыте 4 мм (в примере сдвигающее напряжение 0,05 МПа). По первому варианту вопросов нет (примерно 10% случаев проведения опытов с различными грунтами). Применительно к остальным 90% случаев данная методика не содержит пояснений о причинах выбора величины критерия разрушения в размере 4 мм. Как видно из рисунка 1, а, срез идет по степенному закону, если предположить, что тенденция продолжится, как минимум, до центра образца (2,8 см), то простая экстраполяция дает окончательное значение тангенциального напряжения 0,12 МПа.

Подобная проблема имеет место и при проведении полевых испытаний, по методике приведенной, например, в ГОСТ 20276—2012. В этом случае, испытания прекращаются при смещении кольца-обоймы на 2—3 см [Алексеев В.М., 2011]. При опытах на ПЛЛ-9 (полевая лаборатория Литвинова) абсолютное смещение должно превысить 4 мм при радиусе

обоймы 28,2 мм; во втором – 2—3 см при радиусе – 20 см. В обоих случаях, достаточным считается относительное смещение по отношению к диаметру на 14% и больше, хотя в ГОСТ 20276 считается достаточным, если общая деформация среза превысит 10 % (п. 8.4.5). В литературе объяснения этому мы не нашли.

При проведении лабораторных опытов возникают еще два трудноразрешимых вопроса.

Первый. Давление (напряжение) σ_z достигается приложением нормальной силы F_z площади поверхности S испытуемого образца. Тангенциальное сдвиговое напряжение определяется отношением силы, приложенной к сдвигаемой обойме, отнесенной к площади среза. Однако, давление в общем понимании равно $\tau = F_t/S$, в данном случае использовать нельзя, поскольку мы имеем дело не с площадью воздействия (среза), а с некоторым объемом, на который воздействует сдвигающая сила. При проведении опыта в лаборатории, воздействию (сжатию и срезу) подвергается значительная часть объема грунта (в зависимости от влажности и связности грунта – от 50 до 100%), т.е. мы имеем дело с внутренними – объемными – характеристиками [Лужнов Ю.М., Александров В.Д., 2013]. Сцепление и внутреннее трение преодолевается во всем *объеме* образца. Таким образом, в зависимости Кулона налицо несоответствие размерностей.

В левой части уравнения тангенциальная (сдвигающая) сила, отнесенная к объему разрушаемой (и сминаемой) части пробы с физической точки зрения является плотностью

силы; свободный член уравнения – сцепление – имеет ту же размерность ($\text{кг}/(\text{м}^2\text{с}^2)$). Нормально действующая сила приложена к верхнему срезу пробы, т.е. к площади и имеет размерность давления.

Для соответствия размерностям запишем уравнение Кулона в следующем виде:

$$\tau_i = (tg\varphi) \cdot \sigma_{zi}/h + c$$

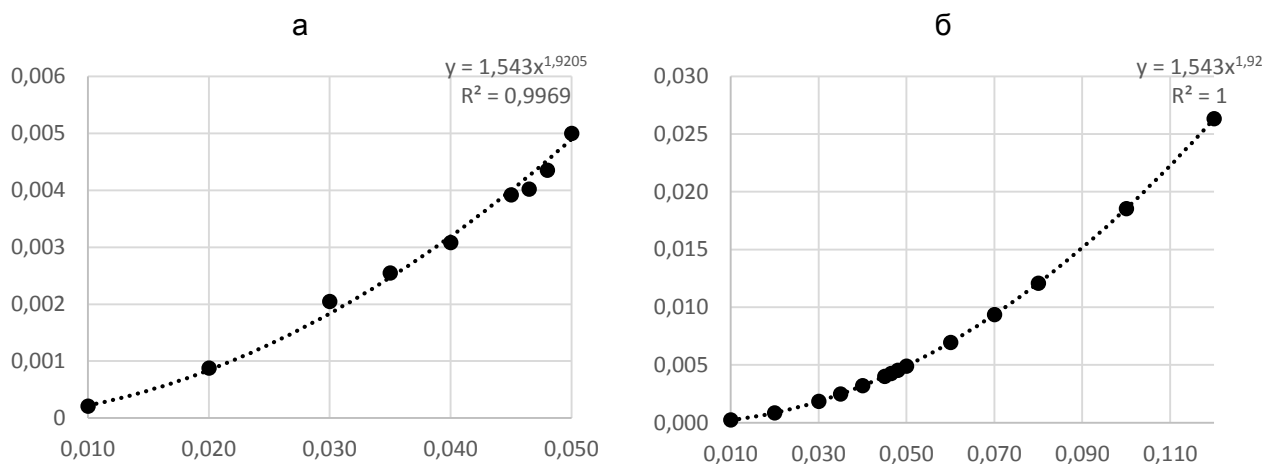


Рисунок 1. Зависимость смещения сдвижной обоймы ПЛЛ-9 от приложенного тангенциального напряжения: а) измеренный диапазон смещения до 5 мм; б) экстраполированный диапазон смещения до 28 мм.

Figure 1. Dependence of the displacement of the sliding cage PLL-9 on the applied tangential voltage: а) measured displacement range up to 5 mm; б) extrapolated displacement range up to 28 mm.

Второй. При проведении лабораторного испытания на быстрый срез прибором Литвинова в нашем конкретном случае мы имеем дело с монолитом грунта объемом 50 см^3 . При этом срезается часть монолита определенного объема по плоскости соприкосновения с основной частью, площадь среза – 15% от 25 см^2 и сминается дополнительный объем, прилегающий к сдвигающей и удерживающей частям стенок обоймы. Но в природных условиях для среза (и смятия) того же объема грунта необходимо приложить несколько большее усилие, поскольку сдвигаемый объем «зафиксирован» со всех сторон таким же грунтом с наличием тех же структурных связей.

Следовательно, значение сопротивления срезу, получаемое нами при проведении быстрого среза, меньше, чем истинное.

Согласно п. 5.6 ГОСТ 12248.1–2020, образцы должны иметь форму цилиндра

диаметром не менее 70 мм и высотой от 1/3 до 1/2 диаметра. Максимальный размер фракции грунта (включений, агрегатов) в образце должен быть не более 1/5 высоты образца. При проведении опыта, структура связного грунта в образце разрушается на 50–100%, т.е. *внутреннее* сцепление монолита разрушается в некоторой части сдвигаемого объема, *внутреннее* трение преодолевается в этом же объеме.

Сразу можно сделать вывод, что лабораторные исследования на неконсолидированный срез занижают значение сопротивления срезу на 10–50% в зависимости от размера образца.

Кроме того, поскольку площадь открытой «несвязной» поверхности имеет полиномиальную зависимость второго порядка от радиуса пробы при одной и той же высоте сдвижного кольца, то и выявленная ошибка будет нелинейно зависеть от размера монолита (таблица 7).

Таблица 7. Зависимость несвязной открытой площади образцов грунта от радиуса при постоянной высоте кольца 2 см.

Table 7. The dependence of the incoherent open area of soil samples on the radius at a constant ring height of 2 cm.

Показатель, единица измерения	Радиус образца, см				
	2,8	10	20	50	100
Площадь основания, см ²	25	314	1256	7850	31400
Площадь боковой поверхности, см ²	35	126	251	628	1256
Суммарная площадь поверхности образца, см ²	60	440	1507	8478	32656
Объем образца, см ³	50	628	2514	15710	62840
Относительное увеличение площади разрушаемой поверхности, см ²	2,41	1,40	1,20	1,08	1,04
Отношение площади поверхности образца к его объему, см ⁻¹	1,20	0,70	0,60	0,54	0,52

При увеличении размеров монолита, относительное увеличение площади воздействия при сдвиге за счет боковой поверхности при постоянной высоте пробы, будет уменьшаться. Кроме того, ошибка в определении прочностных характеристик будет падать сообразно уменьшению отношения площади поверхности образца к его объему.

Полевые методы

Испытания грунтов на срез в полевых условиях чаще всего проводят способом среза целика по фиксированной горизонтальной или вертикальной поверхности в выработке (расчистке, котловане, шурфе, штреке и т. п.) касательной нагрузкой при одновременном нагружении целика грунта нагрузкой, нормальной к плоскости среза (п.7.4 ГОСТ 20276.4–2020)

Из всех полевых испытаний грунта на срез только метод среза целиков позволяет непосредственно определить прочностные характеристики грунта: сопротивления грунта срезу τ , угол внутреннего трения ϕ и удельное сцепление c (п. 4.1 ГОСТ 20276.4-2020).

При проведении испытания по схеме консолидированно-дренированного (медленного) среза, согласно п. 7.2 ГОСТ 20276.4–2020, каждую ступень давления при предварительном уплотнении необходимо выдерживать не менее 5 мин для крупнообломочных грунтов и песков и не менее 30 мин — для глинистых грунтов. За критерий условной стабилизации деформации

сжатия принимают приращение осадки целика, не превышающее 0,05% за время, указанное в таблице 2 ГОСТ 20276.4–2020. Для пылеватых песков и глинистых грунтов – не менее 120 мин дополнительно. Сам срез – 3–5 мин. За критерий условной стабилизации среза принимают приращение перемещения кольца в плоскости среза, не превышающее 0,1 мм за время, указанное в таблице 2 ГОСТ 20276.4–2020. При непрерывно возрастающей касательной нагрузке скорость среза должна быть постоянной и соответствовать указанной в таблице 8.3 ГОСТ 20276.4–2020. Деформации среза фиксируют не реже чем через 2 мин. Испытание следует считать законченным, если при приложении очередной ступени касательной нагрузки происходит мгновенный срез (срыв) одной части грунта по отношению к другой или общая деформация среза превысит 10%. После окончания испытания целики грунта следует разгрузить и отобрать из зоны среза две пробы грунта для определения влажности.

При проведении испытания по схеме неконсолидированно-недренированного (быстро-го) среза, согласно п. 8.1 ГОСТ 20276.4–2020, на целик грунта передают сразу в одну ступень нормальное давление p , при котором будут проводить срез целика грунта. Сразу после передачи нормальной нагрузки проводят срез целика грунта не более чем за 5 мин с момента приложения нормальной нагрузки. При передаче касательной нагрузки ступенями их значения не должны превышать 10% значения нормальной

нагрузки, при которой проводят срез (п. 8.2 ГОСТ 20276.4–2020), и приложение ступеней должно следовать через каждые 15—30 с. При передаче непрерывно возрастающей касательной нагрузки скорость среза принимают в интервале 5–20 мм/мин так, чтобы срез произошел в течение указанного времени.

Минусы полевых испытаний.

1. Монолит вырезан со всех сторон, кроме основания.

2. Монолит забран в кольцо-обойму, которое препятствует его разрушению, следовательно, непонятен объем разрушений.

3. Монолит предварительно сдавливается нормальной нагрузкой, что приводит к изменению его структуры и влажности. Надо иметь в виду, что первичная структура грунта, особенно песчаников, при таком воздействии может быть разрушена.

4. Время подготовки опыта занимает несколько часов, что сводит на нет требование п. 8.1.5 ГОСТ 20276.4–2020: Испытания можно проводить в том числе для природного сложения и природной влажности. Отбор проб на влажность из зоны среза – нонсенс, грунт разрушен, следовательно, объемную влажность мы не определяем, за несколько часов подготовки и проведения опыта с учетом отжима влаги при нормальном нагружении влажность изменится кардинально.

Выводы

1. Исследования сдвиговых характеристик грунтов общепринятыми методами, такими как одноплоскостной срез и трехосное сжатие, показывают значительные погрешности до 100 и более процентов, не позволяющие с требуемой точностью измерять прочностные параметры,

Литература

Петраков А.А. Учебное пособие по курсу «Механика грунтов» / Петраков А.А., Яркин В.В., Таран Р.А., Казачек Т.В.; Под ред. Петракова А.А. Макеевка: ДонНАСА, 2004. 164 с.

необходимые для проектирования и строительства сооружений лесной инфраструктуры.

2. Авторами отмечена существенная разница в оценке сцепления и угла внутреннего трения грунтов в естественном залегании и лабораторных «подготовленных» образцов. При отборе проб для испытаний происходит разрушение структуры монолитов грунта, принципиально изменяющее их плотность и влажность. Этот факт не учитывается при лабораторных испытаниях по стандартным методикам, что приводит к искажению результатов.

3. Кроме того, авторами было проведено испытание одной и той же пробы грунта различными методами с получением отличий в результатах в 2 и более раза. Это ставит под сомнение обоснованность применения данных методик. Полевые испытания грунтов, также не обеспечивающие ненарушенной структуры грунта, имеют целый ряд недостатков, приводящих к снижению точности определения прочностных характеристик.

4. Данные несоответствия, по нашему мнению, могут быть вызваны принципиально неверным подходом к определению параметров среза в указанных методиках. Сопротивление срезу рассматривается по отношению к плоскости среза, т.е. к параметру площади, в то время как необходимо учитывать значительный объем грунта, в котором также преодолевается внутреннее сопротивление. При этом возникает вопрос к соотношению высоты и диаметра образца в применяемых приборах, а также к приведению этих размеров к полевым условиям, где размеры монолитов, подверженных воздействию внешних нагрузок, принципиально иные.

References

Petrakov A.A., Yarkin V.V., Taran R.A., Kazachek T.V. *Mekhanika gruntov Uchebnoe posobie [Mechanics of soils. Textbook]*. Editor Petrakova A.A. Makeyevka, DonNASA, 2004. 164 p. (In Russian).

- Крамаренко В.В.* Грунтоведение. Учебное пособие. Томский политехнический университет. Томск, 2011. 431 с.
- Крамаренко V.V.* *Gruntovedenie. Uchebnoe posobie [Soil science. Textbook]*. Tomsk, Publ. Tomsk Polytechnic University, 2011. 431 p. (In Russian).
- Цытович Н.А.* Механика грунтов. М.: Государственное издательство по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. 636 с.
- Tsytovich N.A.* *Mekhanika gruntov [Mechanics of soils]*. Moscow, Publ. State Publishing House for Construction, Architecture and Building Materials, 1963. 636 p. (In Russian).
- Виноградов Ю.Б.* Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 144 с.
- Vinogradov Yu.B.* *Etyudy o selevykh potokakh [Sketches about mudflows]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1980. 143 p. (In Russian).
- Дмитриев В.В., Ярг Л.А.* Методы и качество лабораторного изучения грунтов. М.: КДУ, 2008. 542 с.
- Dmitriev V.V., Yarg L.A.* *Metody i kachestvo laboratornogo izucheniya gruntov [Methods and quality of laboratory study of soils]*. M., KDU, 2008. 542 p. (In Russian).
- Пыхтеева Н.Ф., Букуша В.В., Миронова В.И.* Учебно-методическое пособие «Механика грунтов». Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2018. 116 с.
- Pykhteeva N.F., Buksha V.V., Mironova V.I.* *Mekhanika gruntov. Uchebno-metodicheskoe posobie [Soil mechanics. Educational and methodical manual]*. Yekaterinburg, Ural University Publishing House, 2018. 116 p. (In Russian).
- Литвинов И.М.* Исследование грунтов в полевых условиях. Харьков: Углетехиздат, 1951. 196 с.
- Litvinov I.M.* *Issledovanie gruntov v polevykh usloviyakh [Investigation of soils in the field]*. Kharkiv, Ugletekhizdat, 1951. 196 p. (In Russian).
- Алексеев В.М.* Полевые методы исследования механических свойств грунтов: учеб. пособие / В.М. Алексеев, П.И. Калугин. Воронеж: Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т., 2011. 112 с.
- Alekseev B.M., Kalugin P.I.* *Polevye metody issledovaniya mekhanicheskikh svoystv gruntov: ucheb. posobie [Field methods of investigation of mechanical properties of soils: textbook.]*. Voronezh. Publ. State Arch.-builds. University, 2011. 112 p. (In Russian).
- Горбунов-Посадов М.И., Ильичев В.А., Крутов В.И.* Основания, фундаменты и подземные сооружения. Справочник проектировщика. М.: Стройиздат, 1985. 480 с.
- Gorbunov-Posadov M.I., Ilyichev V.A., Krutov V.I.* *Osnovaniya, fundamenty i podzemnyye sooruzheniya. Spravochnik proyektirovshchika. [Foundations, foundations and underground structures. Designer's Handbook]*. M., Stroyizdat, 1985. 480 p. (In Russian).
- Лужнов Ю.М., Александров В.Д.* Основы триботехники: учеб. пособие / Ю.М. Лужнов, В.Д. Александров; под ред. Ю.М. Лужнова. М.: МАДИ, 2013. 136 с.
- Luzhnov Yu.M., Alexandrov V.D.* *Osnovy tribotekhniki: ucheb. posobie [Fundamentals of tribotechnics: textbook]*. Edited by Yu.M. Luzhnov. M, MADI, 2013. 136 p. (In Russian).