



[2-4], С. С. Вяловым [1] и др.

Исследованиями Я.Л.Когана и А. И.Чухровой [5] было установлено снижение "мгновенной" прочности в начале опыта, а после - возрастание по мере увеличения длительности испытания образцов. Результаты, полученные автором этой статьи в 1960 г. [6,9], полностью совпали с результатами этих авторов. Было установлено также [9], что истинно-стандартное сопротивление глинистых грунтов сдвигу  $\tau_{f,ст}$ , определяемое в режиме контроля ступеней затухающих деформаций сдвига [11] (по ГОСТ 12248-78), является наименьшим значением их прочности - предельно длительным сопротивлением сдвигу  $\tau_{f,м}$ .

В 1964 г. М.Н.Гольдштейном и С.С.Бабицкой [3] и А.У.Скемптоном [13], испытанием образцов в режиме контроля касательных напряжений, было исследовано пиковое  $\tau_{f,0}$  и остаточное сопротивление глинистых грунтов сдвигу  $\tau_r$  [14]. Было установлено, что: 1)  $\tau_{f,0}$  зависит, а  $\tau_r$  не зависит от скорости испытания образцов; 2) остаточное сопротивление сдвигу  $\tau_r$  либо равно, либо не превышает его предельно длительного значения [3].

Таким образом, существуют два способа определения предельно длительного сопротивления глинистых грунтов сдвигу. Причем, если **первый способ** - способ определения истинно-стандартного сопротивления сдвигу  $\tau_{f,ст}$  при испытании образцов в режиме контроля ступеней затухающих деформаций сдвига (по ГОСТ 12248-78) проверен весьма длительными опытами образцов грунта на ползучесть, то этого нельзя сказать о **втором методе** - о способе определения остаточного сопротивления сдвигу  $\tau_r$ . К сожалению, не выполнено сопоставление результатов, получаемых по двум указанным способам.

Чтобы убедиться в возможности применения отмеченных выше двух методов для определения предельно длительного сопротивления глинистых грунтов сдвигу  $\tau_{f,м}$  и проверки справедливости равенства  $\tau_r \equiv \tau_{f,ст} \equiv \tau_{f,м}$ , нами выполнено специальное экспериментальное исследование\*, результаты которого излагаются ниже. Испытания образцов грунтов выполнены на приборах М-5 [10].

1. Осуществлено испытание суглинка нарушенного сложения за лабораторным номером 64-88 ( $\rho_s = 2650 \text{ кг/м}^3$ ;  $w_L = 0,388$ ;  $w_p = 0,247$ ;  $J_p = 0,141$ ) для определения сопротивления сдвигу по методам затухающих деформаций сдвига (ГОСТ 12248-78) и при различных постоянных скоростях кручения (сдвига): 0,2; 0,5 и 2,0 мм/мин.

Испытаны четыре серии образцов-близнецов, диаметром 101 мм, высотой 24 мм, в количестве 22 штук ( $\rho_0 = 1789 \text{ кг/м}^3$ ;  $w_0 = 0,264$ ) твердой консистенции ( $J_L = -0,12$ ) после месячного уплотнения под давлением  $\sigma_z = 0,2 \text{ МПа}$  ( $\rho_f = 1980 \text{ кг/м}^3$ ,  $w_f = 0,237$ ). Повторность опытов трехкратная.

Для испытания образцов-близнецов в режиме контроля касательных напряжений - при различных постоянных скоростях кручения (сдвига) был использован гибридный прибор М-5 и разрывной машины Р-5 Ивановского завода испытательных приборов.

Результаты испытания четырех серий образцов - близнецов приведены в табл. 1.

\* Испытания образцов выполнены С.Г.Айрояном и Т.Л.Петросяном под руководством и при участии автора.

Таблица 1

Данные об остаточном  $\tau_r$  и стандартном  $\tau_{f,ст}$  сопротивлениях сдвигу грунта 64-88

$\tau_r$ в МПа, при скоростях сдвига (в мм/мин)				$\tau_{f,ст}$ МПа	$\frac{\tau_r}{\tau_{f,ст}}$
0,2	0,5	2,0	среднее		
0,131	0,122	0,134	0,129	0,136	0,95

В опытах, выполненных в режиме контроля касательных напряжений, деформация сдвига не сопровождалась снижением прочности грунта, т. е., при отсутствии  $\tau_{f,0}$ . Зависимость  $\tau - \gamma$  соответствовала кривой для пластичного грунта, установленной Д. Тролопом и К. Ченом [14]. Это вполне закономерно, поскольку испытывался грунт нарушенного сложения, который за месяц уплотнения под действием 0,2 МПа не мог приобрести значительную структурную прочность.

Результаты опытов полностью подтвердили правильность сделанного выше предположения о практическом равенстве стандартного  $\tau_{f,ст}$  и остаточного  $\tau_r$  сопротивлений грунта сдвигу. Опыты подтвердили также независимость  $\tau_r$  от скорости сдвига, установленного ранее другими исследователями [3].

2. Как и в пункте 1, осуществлено испытание суглинка 64-88 нарушенного сложения ( $\rho_0 = 1640 \text{ кг/м}^3$ ,  $w_0 = 0,125$ ,  $J_L = -0,22$ ) в режимах контроля деформации сдвига и контроля касательных напряжений при трех различных постоянных скоростях сдвига: 0,4; 2,0 и 4,0 мм/мин. Повторность опытов трехкратная.

В отличие от рассмотренного выше случая, испытывался грунт относительно небольшой плотности и твердой консистенции. Были рассмотрены: изменения сопротивления грунта сдвигу при более больших скоростях (4 мм/мин) и деформациях (до 30 мм и более) сдвига.

Результаты испытания образцов-близнецов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Данные о сопротивлениях грунта сдвигу, определенные в двух режимах испытания

$\tau_{f,ст}$ МПа	Сопротивления сдвигу $\tau_r$ в МПа при скоростях сдвига (мм/мин)					$\frac{\tau_r}{\tau_{f,ст}}$
	дефор. сдвига в мм	0,4	2,0	4,0	среднее	
0,139	3	0,152	0,158	-	0,155	0,90
	10	-	-	0,154	0,154	0,90
	12	0,146	-	-	0,146	0,95
	16	-	0,152	0,151	0,151	0,92
	30	0,146	0,152	0,151	0,151	0,92

Из данных табл. 2 следует, во-первых, что при деформациях 10 мм и выше имеет место пренебрежимо малое (до 3%) снижение сопротивления грунта сдвигу. Иначе говоря и в этом случае деформации сдвига практически протекали без снижения прочности грунта ( $\tau_{f,0} \cong \tau_r$ ) по причинам как изложенным выше, так и относительно небольших скоростей кручения (сдвига) при продолжительностях опытов; значительно отличных от мгновенного деформирования.

Примечательным является то, как и в рассмотренном в пункте 1 случае остаточное сопротивление грунта сдвигу  $\tau_r$ , практически не зависит от скорости сдвига при широком диапазоне ее изменемости, хотя как продолжительность испытания, так и пути развития деформации сдвига различны. Это говорит о стабильности  $\tau_r$  и необходимости и целесообразности его использования при расчете оснований и сооружений из грунтовых материалов по первому предельному состоянию.

Полученные нами данные полностью согласуются с данными, полученными ранее М.Н.Гольдштейном и С.С.Бабицкой, А.У.Скемптоном и другими, а сопоставление  $\tau_r$  и  $\tau_{f,st}$  показывает их практическое равенство. Следовательно, является справедливым равенство  $\tau_{f,st} \cong \tau_r \cong \tau_{f,\infty}$ .

3. Осуществлено испытание на кручение рассмотренного выше грунта 64-88 нарушенного сложения в двух режимах. Образцы-близнецы ( $\rho_0 = 1785 \text{ кг/м}^3$ ;  $w_0 = 0,204$ ;  $J_L = -0,3$ ) твердой консистенции в количестве 18 штук уплотнены тремя сериями (по шесть образцов в каждой) под давлением 0,1; 0,3 и 0,5 МПа в течение 77 дней и испытаны на кручение (сдвиг) под действием этих же давлений. Повторность опытов трехкратная.

В каждой серии по три образца-близнеца испытаны по ГОСТ 12248-78 для определения  $\tau_{f,st}$ , а три - с постоянной скоростью среза (сдвига) 2 мм/мин для определения пикового  $\tau_{f,0}$  и остаточного  $\tau_r$  сопротивления грунта сдвигу.

Средние показатели данных испытания образцов приведены в табл. 3. Данные, приведенные в табл. 3, показывают, что пиковое сопротивление сдвигу  $\tau_{f,0}$  обнаружено только при испытании четырех образцов. Уменьшение  $\tau_{f,0}$  до его остаточного значения  $\tau_r$  составляет примерно 10%. В этом случае проявление  $\tau_{f,0}$  может быть объяснено как большой плотностью и продолжительностью предварительного уплотнения, так и разбросом опытных данных. Как будет показано ниже (см. п. 4) оно все же связано с разбросом опытных данных.

Таблица 3

Данные о сопротивлении сдвигу грунта 64-88, определенные в трех различных состояниях

№ серии	$\sigma_z$ МПа	$\tau_{f,st}$ МПа	$\tau_{f,0}$ МПа	$\tau_r$ МПа	$\frac{\tau_{f,st}}{\tau_r}$	Разбор данных определения $\tau_r$ , %	Разбор данных определения $\tau_{f,st}$ , %
1	0,1	0,0905	0,087) <sup>x</sup>	0,0724	1,25	12	26
2	0,3	0,113	0,145) <sup>xx</sup>	0,142	0,80	8	13
3	0,5	0,146	0,207	0,187	0,78	20	12

Примечание: )<sup>x</sup> - одно определение, )<sup>xx</sup> - два определения.

В рассмотренном случае расхождение между  $\tau_{f,ст}$  и  $\tau_r$  колеблется в ту или другую сторону до 25%, что обусловлено сложностью изготовления образцов-близнецов грунта твердой консистенции. Поскольку примерно в таких же пределах находятся разбросы данных определения  $\tau_{f,ст}$  и  $\tau_r$ , то можно принять, что они практически равны.

4. Осуществлено испытание двадцати образцов суглинка за номером 67-93 ( $\rho_s = 2640 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_0 = 1910 \text{ кг/м}^3$ ;  $w_0 = 0,215$ ;  $w_L = 0,350$ ;  $w_p = 0,225$ ;  $J_p = 0,125$ ) твердой консистенции ( $J_L = -0,08$ ). Образцы предварительно уплотнены в течение 100 дней под давлением 0,8 МПа, а затем разгружены до 0,2 МПа (8 образцов), 0,4 МПа (6 образцов) и 0,6 МПа (6 образцов) и испытаны под этими давлениями по двум режимам, рассмотренным выше. При режиме контроля касательных напряжений испытания образцов выполнены двумя скоростями сдвига (кручения): 2,0 и 0,2 мм/мин). Повторность опытов двухкратная, а при  $\sigma_z = 0,2$  МПа и  $V=2,0$  мм/мин - четырехкратная. Начальный коэффициент пористости образцов  $e_0 = 0,69$ , а после разгрузки до 0,2; 0,4 и 0,6 МПа соответственно:  $e_0(0,2 \text{ МПа})=0,621$ ,  $e_0(0,4 \text{ МПа})=0,625$  и  $e_0(0,6 \text{ МПа})=0,597$ .

Рассматриваемое экспериментальное исследование выполнено с целью установления влияния большой плотности грунта на изменяемость касательных напряжений до их предельного значения при двух данных значениях скоростей кручения (сдвига).

Результаты испытания переуплотненных образцов грунта 67-93 приведены в табл. 4. В этой таблице приведены также данные о деформациях сдвига, длительности и времени наступления остаточного сопротивления сдвигу испытанных образцов.

Таблица 4

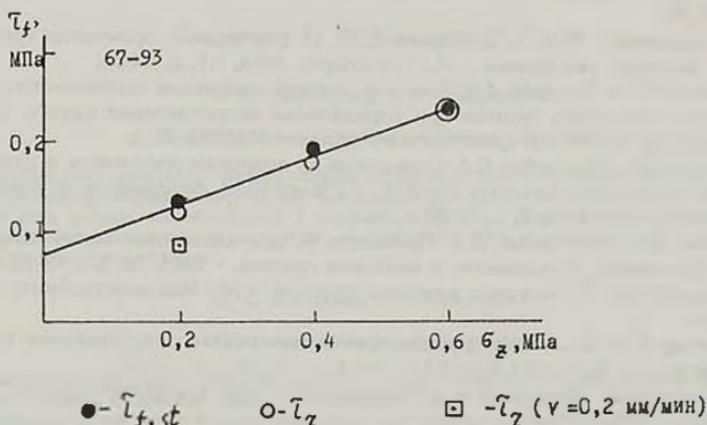
Данные испытания грунта 67-93 в двух режимах на кручение (сдвиг) образцов

NN серии	$\sigma_z$ МПа	$\tau_{f,ст}$ МПа	$\tau_r$ (МПа) при скоростях сдвига (мм/мин).		$\tau_{r,ост}$ МПа	Общая деформация сдвига (мм) при скоростях (мм/мин)		Время (мин) наступления $\tau_r$ при скоростях сдвига (мм/мин):		$\frac{\tau_{f,ст}}{\tau_{r,ост}}$
			2,0	0,2		2,0	0,2	2,0	0,2	
								$\tau_{r,ост}$		
1	0,2	0,137	0,125	(0,088)	0,125	12	7	6	30	1,1
2	0,4	0,194	0,177	0,181	0,179	16	7	10	32	1,08
3	0,6	0,236	0,293	0,237	0,265	17	16	12	38	0,89

Опыты показали, что данные  $\tau_{f,ст}$  и  $\tau_r$ , определенные в двух режимах испытания, практически совпадают. Исключение составляет только при  $\tau_r=0,088$  МПа и скорости сдвига:  $V=0,2$  мм/мин, которое выпадает из общей закономерности зависимости ( $\tau_r \equiv \tau_{f,ст}$ ) -  $\sigma_z$  и поэтому исключено из рассмотрения. Полученные результаты опытов еще раз подтвердили справедливость равенства  $\tau_r = \tau_{f,ст}$  и возможность определения  $\tau_{f,ост}$  двумя, рас-

смаатриваемыми режимами (методами) испытания образцов грунта.

Еще раз приходится отметить, что для наших условий наиболее приемлемым является испытание образцов методом затухающих деформаций сдвига (по ГОСТ 12248-78) - в режиме контроля деформации сдвига. Несмотря на то, что определение  $\tau_{f,ст} = \tau_{f,м}$  по этому методу требует значительно большего времени и более трудоемко, мы пока должны воспользоваться им, поскольку устройства для определения  $\tau_c$  в режиме контроля касательных напряжений, в странах СНГ промышленностью не выпускаются.



Фиг. 1

Опыты показали, что несмотря на большую плотность и продолжительность предварительного уплотнения образцов грунта нарушенного сложения, не был зафиксирован ни один случай проявления "пикового" сопротивления сдвигу. Это можно объяснить как недостаточной структурной прочностью грунта - отсутствием структурного сцепления  $c_c$  [8], так и относительно небольшими скоростями испытания образцов в режиме контроля касательных напряжений, не позволяющими определить "мгновенного" сопротивления сдвигу. Измерительная аппаратура использованного устройства не позволяла фиксацию касательных напряжений при более больших скоростях кручения. После устранения указанного недостатка нашего устройства мы сумеем проверить сказанное выше.

Отметим также, что при испытании образцов в режиме контроля касательных напряжений зафиксирована, кроме одного случая (при  $\sigma_z = 0,2$  МПа,  $V = 2$  мм/мин), контратация (уплотнение) от 0,1 до 0,3 мм. Эти данные в 2-3 раза выше данных, полученных при испытании образцов в режиме контроля деформации сдвига, совпадающие с полученными ранее автором результатов [10]. Они согласуются также с отсутствием "пиковой" прочности испытанных образцов.

Резюмируя изложенное выше, можно отметить, что для определения  $\tau_{f,м}$  глинистых грунтов можно пользоваться как результатами  $\tau_{f,ст}$ , определяемого методом затухающих деформаций сдвига, так и  $\tau_c$ , определяемом в режиме контроля касательных напряжений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Вялов С. С., Пекарская Н. К., Максимьяк Р. В.* Изменение прочностных свойств грунта в процессе ползучести. //Acta Academiæ Scientiarum Hungaricæ - 1968.- Tomus 63(1-4), p. 377-438.
2. *Гольдштейн М. Н.* Ползучесть и длительная прочность глинистых грунтов. //Труды совещания по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения.-М.-1957. Том 11. -с.5-13.
3. *Гольдштейн М. Н. и Бабицкая С. С.* Расчет устойчивости откосов с учетом ползучести сдвига. // Вопросы геотехники.- М.: Транспорт.-1964, № 7., с.83-95.
4. *Гольдштейн М.Н. и Бабицкая С.С.* О длительной прочности грунтов. // Вопросы геотехники .- М.: Транспорт.- 1964, т.7, с. 44-56.
5. *Коган Я.Л. и Чухрова А.И.* Влияние условий изменения напряженного состояния глинистых грунтов при определении сопротивления сдвигу. Сообщение № 153 ВНИИ транспортного стр-ва. - М.:1959, 46 с.
6. *Коган Я.Л., Иоселевич В.А.* Совещание по вопросам ползучести и длительной прочности глинистых грунтов. //Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1961, № 2, с. 27-29.
7. *Коган Я.Л., Иоселевич В.А.* Прочность и "длительная прочность" грунтов. //Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1961, № 5, с.19-20.
8. *Маслов Н.Н.* Прикладная механика грунтов. - М.: Машиностроение, 1949. 329с.
9. *Месчян С.Р.* О влиянии длительности испытания на сопротивление сдвигу грунтов. //Докл. АН Арм. ССР, 1961, т. 32, № 1, с. 31-36.
10. *Месчян С.Р.* Начальная и длительная прочность глинистых грунтов .- М.: Недра, 1978. 207 с.
11. Руководство по лабораторному определению физико-механических характеристик грунтов при устройстве оснований сооружений.- М.: Госстройиздат, 1956. 76 с.
12. *Casagrande A., Wilson S.D.* Effekt of Loading on the Stregs of Clays and Shales at Constant Water Content. - Geotechnique.- 1951,2, p. 251-263.
13. *Skempton A.W.* Long-term Stability of Clay Siopes. - Geotechnique. - 1964, v.14, № 2, p. 77-101.
14. *Trollop D., Chan C.* Soil Structure and Step-strain Phenomenon. - Proc. Amer. Sos. Civil Eng-rs.1960, v.86, sm.2, pt.1, paper 2431, p. 1-99.
15. *Peterson R.* Discussion. Proceed. 3 Internat. Conf. Soil Mech. and Found Eng., Zurich. 1953, v.3, p. 211.

Институт механики НАН Армении

Поступила в редакцию  
14.07.1994