

УДК 624.131.4

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

© 2017 г. В.И. Осипов, Ф.С. Карпенко, Р.Г. Кальбергенов, В.Н. Кутергин, Н.А. Румянцева

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., д.13, стр. 2., Москва, 101000 Россия. E-mail: osipov@geoenv.ru

Поступила в редакцию 14.12.2016 г.

После исправления 22.04.2017 г.

Рассматриваются реологические свойства глинистых грунтов. На основе экспериментальных исследований выявлены закономерности проявления реологических свойств в зависимости от консистенции глинистых грунтов. Механизм проявления реологических свойств при реализации ползучести грунтов и релаксации напряжений рассмотрен с позиций теории контактных взаимодействий. Показана зависимость реологических свойств от свойств гидратных пленок минеральных частиц, микроструктурного строения грунта и его изменения при переориентации частиц грунта при длительном воздействии нагрузок.

Ключевые слова: реологические свойства, ползучесть, релаксация напряжений, микроструктура, переходные, ближние и дальние коагуляционные контакты; адсорбционный, диффузный слой; гидратные пленки, показатель текучести.

ВВЕДЕНИЕ

Среди всего многообразия грунтов особое место занимают глины. Они имеют строение, существенно отличающееся от строения других грунтов, что обуславливает проявление у них реологических свойств – способность изменять во времени напряжённо-деформированное состояние под действием внешних механических сил. Реологические свойства могут проявляться в грунтах в виде развития процессов ползучести и релаксации напряжений, приводящих к снижению их прочности в результате длительного приложения нагрузок.

Представление о реологических свойствах было сформировано в 1920-х гг. Ю. Бингамом (Eugene Cook Bingham) и М. Райнером (Markus Reiner), ими же были заложены основы их изучения. Существенный вклад в развитие представлений о реологических свойствах грунтов внесли С.С. Вялов [2, 3], М.Н. Гольдштейн [4, 5], П.А. Ребиндер [19, 20], С.Р. Месчан [15], Н.А. Цытович [23], В.Д. Казарновский [10], Н.Н. Круглицкий [12, 16], И.М. Горькова [6–9], И.Г. Коробанова [9, 11], С.Б. Ухов [22], А.W. Bishop [25], А.W. Skempton [26], L. Suklje (Л. Шукле [24]) и другие ученые. Однако и в настоящее время многие аспекты природы и закономерностей проявления реологических свойств глин остаются не до конца изученными.

Задача определения реологических свойств грунтов приобретает в настоящее время все большую значимость. Важность таких исследований определяется в том числе тем, что современное строительство предполагает возведение объектов с длительным сроком эксплуатации, отчего возникает необходимость прогнозирования изменений свойств грунтов оснований сооружений в течение всего их жизненного цикла.

Основное внимание при изучении реологических свойств традиционно уделялось мерзлым грунтам, в которых они проявляются наиболее ярко, что связано с наличием в них льда и незамерзающих пленок на поверхности его твердых частиц. В современной отечественной нормативной литературе предусмотрено определение реологических свойств только для мерзлых грунтов. Согласно ГОСТ 12248¹ определение реологических свойств мерзлых грунтов должно проводиться по методике ступенчатого нагружения в режиме ползучести для определения предела длительной прочности. Определение реологических свойств немерзлых грунтов нормативными документами не предусматривается, хотя грунты других классов и видов, главным образом, глинистые дисперсные грунты, ими также обладают.

¹ ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: Стандартинформ, 2011. 96 с.

Согласно С.С. Вялову [2, 3], под пределом длительной прочности подразумевается напряжение, при превышении которого в грунте развивается прогрессирующая ползучесть, приводящая к разрушению. Многочисленные попытки применить методику ступенчатого одноосного нагружения для немерзлых глинистых грунтов приводили к недостоверным результатам. Это объяснялось тем, что на определенных этапах деформирования в глинах, наряду с ползучестью, дополнительно шло их упрочнение, что и приводило к значительному искажению результатов испытаний.

В 1960-х гг. на основе экспериментальных исследований М.Н. Гольдштейном [4, 5] для определения длительной прочности грунтов был разработан альтернативный метод релаксации напряжений. Метод основан на том, что при длительном воздействии постоянной нагрузки в условиях неизменной деформации в грунте происходит снижение напряжения. Однако данный метод до сих пор не получил широкого практического применения.

В целом надо констатировать, что, несмотря на научную и практическую важность изучения реологических свойств глинистых грунтов, наличие соответствующей научно-теоретической базы, такие исследования в практике инженерно-геологических изысканий практически не проводятся, что связано и с отсутствием национальных нормативов на их проведение. Все это свидетельствует о важности дальнейшего детального изучения реологических свойств глинистых грунтов, результаты которого могли бы стать основой для проведения таких испытаний в повседневной практике изысканий. Должен быть исследован как механизм развития ползучести, так и релаксации, так как каждый из них моделирует поведение грунта в разных условиях нагружения.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изменение прочности грунтов во времени (ползучесть грунтов) может реализовываться при приложении касательных разрушающих нагрузок в плоскости, перпендикулярной осевой сжимающей нагрузке, т.е. в условиях одноплоскостного сдвига. Обычно длительная прочность грунтов при сдвиговых испытаниях определяется как остаточная прочность, характеризующая сопротивление сдвигу грунта после разрушения его структуры. Во время сдвига после достижения касательным напряжением максимального значения ($\tau_{\text{макс}}$), продолжающиеся сдвиговые

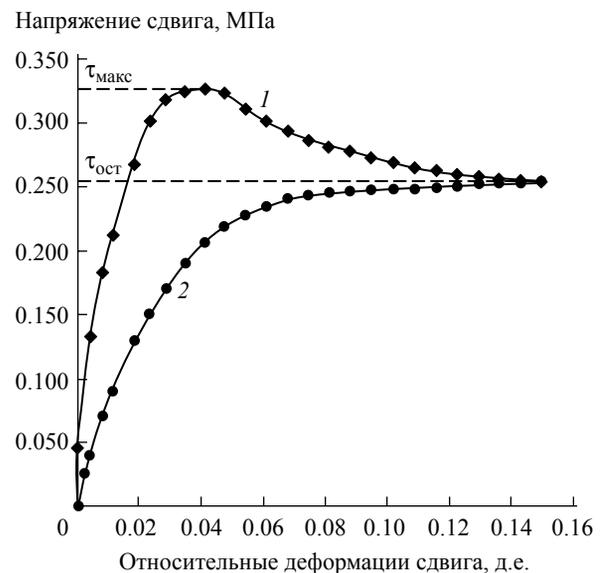


Рис. 1. Определение максимального ($\tau_{\text{макс}}$) и остаточного ($\tau_{\text{ост}}$) касательного напряжения при испытаниях глинистых грунтов в условиях одноплоскостного сдвига (обозначения см. в тексте).

деформации сопровождаются снижением касательных напряжений. В глинистых грунтах касательные напряжения при этом асимптотически стремятся к некоторому значению — остаточному касательному напряжению ($\tau_{\text{ост}}$), величина которого позволяет оценить параметры остаточной или длительной прочности грунта. Пример определения величины максимального и остаточного касательного напряжения при испытаниях глинистых грунтов в условиях одноплоскостного сдвига показан на рис. 1 (линия 1).

Основной недостаток такой методики заключается в том, что характер поведения глинистого грунта при сдвиговых испытаниях зависит от их строения, состава и свойств, поэтому выраженная линия, к которой стремятся значения касательных напряжений после разрушения образца, во многих случаях отсутствует.

В общем случае наиболее достоверным способом определения длительной прочности грунтов являются их испытания при длительном воздействии нагрузок. Испытания проводятся методом одноплоскостного сдвига по консолидировано-дренированной схеме (КД) с постоянной скоростью деформирования. Подробно методика таких испытаний была описана авторами ранее [13]. Основная специфика испытаний заключается в длительном приложении к образцу грунта постоянного нормального и возрастающего касательного напряжения. Скорость деформирования при этом выбирается таким образом, чтобы

в испытываемом грунте не возникало избыточное поровое давление и развивался процесс ползучести и, в большинстве случаев, не должна превышать 0.001 мм/мин. Предел длительной прочности при этом определяется как максимальное напряжение сдвига (линия 2 на рис. 1), а показатели длительной прочности грунта (угол внутреннего трения φ_{∞} и сцепление C_{∞}) рассчитываются по результатам серии испытаний аналогично тому, как это проводится при определении мгновенной прочности.

Такие испытания соответствуют условиям, возникающим при развитии склоновых процессов, в краевых частях нагруженных площадок и т.п., но не позволяют моделировать условия нагружения в осевых частях сооружений, где основная разрушающая сила воздействует на грунт в вертикальном направлении. Последнее наилучшим образом может быть смоделировано в условиях трехосного сжатия. Однако испытания грунтов в стабилометрах по определению ползучести приводят к противоположному результату – упрочнению грунта в процессе испытания, вследствие чего в условиях трехосного сжатия возможно только изучение релаксации напряжения.

Для проведения испытаний глинистых грунтов на длительную прочность в условиях трехосного сжатия авторами разработана и описана методика испытаний – “метод релаксации напряжения” [14]. Суть методики заключается в приложении к образцу грунта ступенчато возрастающей осевой нагрузки с ее последующей релаксацией без возможности развития осевых деформаций грунта. При проведении таких исследований образец испытываемого грунта нагружается объемной нагрузкой, т.е. проводится его консолидация. По окончании этапа консолидации грунта к нему мгновенно прикладывается

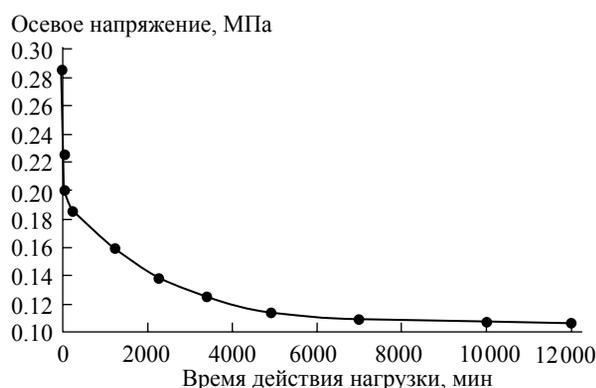


Рис. 2. Релаксация напряжений в грунте во времени воздействия нагрузки.

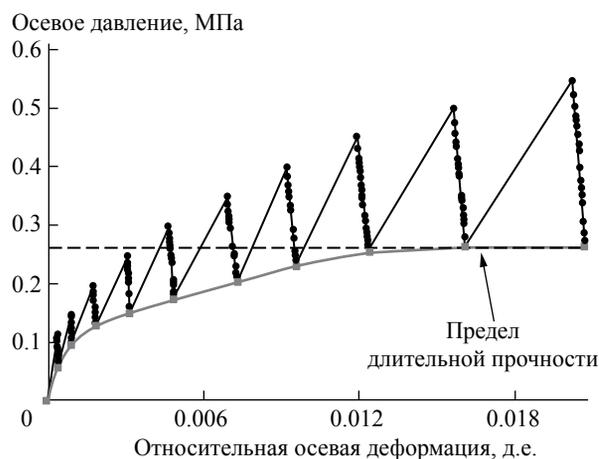


Рис. 3. График изменения напряженно-деформированного состояния грунта при ступенчатом осевом нагружении и релаксации напряжения.

осевая нагрузка, вызывающая деформацию, величина которой не превышает величину упругой деформации. После этого в образце грунта создаются условия, при которых осевые деформации не могут развиваться, при этом происходит постепенное снижение осевого напряжения (релаксация напряжения), носящее затухающий характер. Характерный график релаксации напряжения во времени действия нагрузки приведен на рис. 2. После окончания процесса релаксации напряжения, его условной стабилизации, принимаемой как изменение его величины, не превышающее 1 Н за час, на грунт передается следующая ступень осевой нагрузки. Нагружение образцов грунта проводится до тех пор, пока конечная величина напряжения в грунте после окончания процесса релаксации не станет неизменной на, как минимум, двух последовательных ступенях, что свидетельствует о том, что осевая нагрузка (σ_1) в грунте достигла предела длительной прочности ($\sigma_{1\infty}$), и ее дальнейшее увеличение не происходит. Характерный график изменения напряженно-деформированного состояния грунта при ступенчатом осевом нагружении и релаксации напряжения показан на рис. 3. При этом во время опыта на каждой ступени фиксируются осевая и объемная деформация, объемное и осевое напряжение в грунте. По результатам серии испытаний рассчитываются показатели длительной прочности грунта (угол внутреннего трения φ_{∞} и сцепление C_{∞}) аналогично тому, как это проводится при определении мгновенной прочности.

В настоящее время методики определения длительной прочности грунтов “методом релаксации напряжения” в условиях трехосного сжатия и “методом ползучести” в условиях

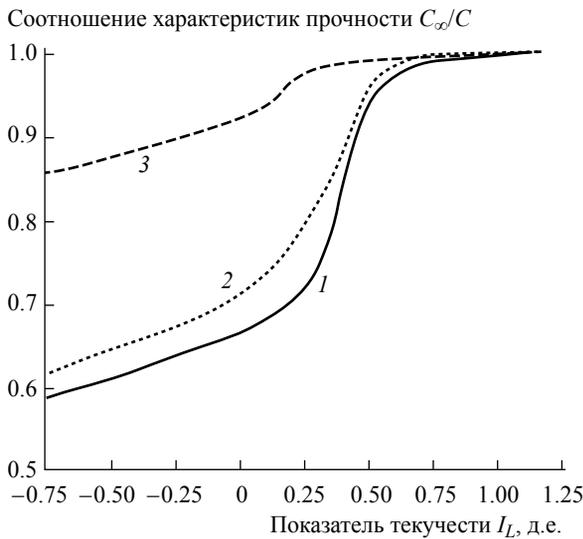


Рис. 4. Изменение соотношения характеристик длительной (C_∞) и мгновенной (C) прочности грунтов при испытаниях в условиях одноплоскостного среза (по методике ползучести и КД) в зависимости от содержания влаги в них. 1 — глины; 2 — суглинки; 3 — супеси.

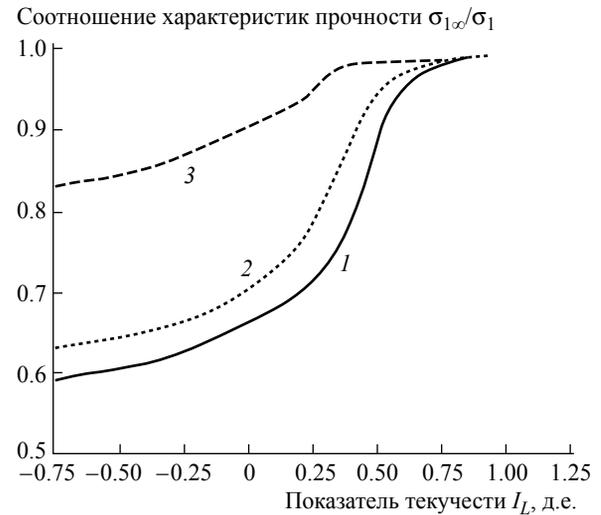


Рис. 5. Изменение соотношения характеристик длительной ($\sigma_{1\infty}$) и мгновенной (σ_1) прочности грунтов при испытаниях в условиях трехосного сжатия (по методике релаксации напряжения и КД) в зависимости от содержания влаги в них. 1 — глины; 2 — суглинки; 3 — супеси.

одноплоскостного среза приняты в ИГЭ РАН в качестве стандартов предприятия^{2,3} и успешно применяются в практических исследованиях.

Результаты выполненных исследований реологических свойств глинистых грунтов позволяют охарактеризовать их поведение при длительном нагружении и определить закономерности изменения свойств в зависимости от состава и структуры грунтов.

Испытания проводились на каолиновой глине и глинистых грунтах московской морены Московского региона. Каолиновая глина имеет мономинеральный состав, сложена преимущественно каолинитом. Глинистые грунты московской морены (gПms) содержат терригенную составляющую, представленную кварцем и полевыми шпатами, и глинистую, представленную преимущественно иллитом и, в меньших количествах, каолинитом. В незначительном количестве в составе глинистой фракции присутствуют смектиты. Наибольшее количество терригенной

составляющей характерно для супесей, для легкой глины ее содержание минимально.

Испытания проводились на искусственно приготовленных полностью водонасыщенных образцах с различными значениями показателя текучести (I_L). Для каждой разновидности грунта определены значения предельных касательных напряжений и мгновенной прочности в условиях одноплоскостного среза, а также предельные осевые напряжения в условиях трехосного сжатия по консолидировано-дренированным (КД) схемам. Результаты испытаний приведены в табл. 1 и 2.

Аналогичные характеристики длительной прочности для тех же разновидностей грунтов определены и по методам ползучести и релаксации напряжения (см. табл. 1, 2). Определение параметров мгновенной и длительной прочности проводилось при одних и тех же нормальных (в условиях среза) и объемных (в условиях трехосного сжатия) нагрузках. Закономерности изменения прочностных характеристик изученных разновидностей глинистых грунтов отображены на рис. 4 (испытания на срез по схеме КД) и рис. 5 (трехосные испытания по схеме КД).

Полученные данные свидетельствуют, что реологические свойства проявляются у всех разновидностей глинистых грунтов и численно выражаются в снижении значений сцепления грунта, при этом величина угла внутреннего трения остается практически неизменной (см. табл. 1). Это

² Стандарт организации СТО 93.020–2013/6. Лабораторные определения длительной прочности глинистых грунтов методом релаксации напряжений при трехосном сжатии [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://geoenv.ru/materials/standards/sto-2013-6_long-term-strength.doc

³ Стандарт организации СТО 93.020–2013/7. Лабораторные испытания дисперсных грунтов методом недренажного одноплоскостного среза с замером порового давления [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://geoenv.ru/materials/standards/sto-2013-7_section.doc

Таблица 1. Результаты консолидировано-дренированных испытаний грунтов в условиях одноплоскостного среза

Разновидность грунта	Число пластичности IP, %	Показатель текучести IL, д.е	Результаты испытаний			Показатели прочности			
			$\sigma_1, \sigma_{1\infty}$, МПа	τ , МПа	τ_{∞} , МПа	мгновенной		длительной	
						φ , град.	C, кПа	φ_{∞} , град.	C_{∞} , кПа
глина	33.9	-0.77	0.100	0.223	0.144	17	192	17	113
			0.200	0.257	0.173				
			0.300	0.285	0.204				
		-0.47	0.100	0.178	0.121	12	157	12	99
			0.200	0.202	0.142				
			0.300	0.221	0.165				
		0.26	0.100	0.027	0.022	6	18	6	13
			0.200	0.044	0.037				
			0.300	0.050	0.042				
		0.56	0.100	0.011	0.011	4	6	4	6
			0.200	0.024	0.021				
			0.300	0.025	0.024				
		1.15	0.100	0.011	0.008	4	3	4	3
			0.200	0.018	0.021				
			0.300	0.027	0.022				
суглинок	13.3	-0.74	0.100	0.085	0.066	19	50	18	31
			0.200	0.113	0.091				
			0.300	0.152	0.131				
		0.02	0.100	0.054	0.042	17	21	16	15
			0.200	0.077	0.072				
			0.300	0.115	0.099				
		0.35	0.100	0.018	0.018	3	13	3	11
			0.200	0.024	0.019				
			0.300	0.030	0.029				
		1.14	0.100	0.008	0.007	2	4	2	4
			0.200	0.010	0.010				
			0.300	0.016	0.013				
супесь	5.5	-0.80	0.100	0.090	0.083	34	21	34	21
			0.200	0.151	0.157				
			0.300	0.225	0.217				
		-0.51	0.100	0.058	0.045	22	16	22	16
			0.200	0.097	0.095				
			0.300	0.139	0.116				
		0.06	0.100	0.051	0.040	21	14	21	14
			0.200	0.091	0.087				
			0.300	0.126	0.103				
		0.34	0.100	0.018	0.012	5	6	5	6
			0.200	0.020	0.021				
			0.300	0.037	0.026				
		1.20	0.100	0.007	0.007	3	3	3	3
			0.200	0.012	0.012				
			0.300	0.016	0.016				

Таблица 2. Результаты консолидировано-дренированных испытаний грунтов в условиях трехосного сжатия

Разновидность грунта	Число пластичности IP, %	Показатель текучести IL, д.е.	Результаты испытаний		
			$\sigma_{Vs}, \sigma_{V\infty}$, МПа	σ_1 , МПа	$\sigma_{1\infty}$, МПа
глина	33.9	-0.74	0.100	0.445	0.264
		-0.23	0.100	0.398	0.251
		0.31	0.100	0.256	0.188
		0.58	0.100	0.200	0.187
		0.84	0.100	0.160	0.158
суглинок	13.3	-0.80	0.100	0.920	0.580
		-0.49	0.100	0.899	0.579
		-0.08	0.100	0.775	0.532
		0.23	0.100	0.498	0.384
		0.54	0.100	0.320	0.305
		0.95	0.100	0.264	0.262
супесь	5.5	-0.74	0.100	0.893	0.742
		-0.36	0.100	0.727	0.621
		0.17	0.100	0.221	0.205
		0.39	0.100	0.210	0.205
		0.77	0.100	0.208	0.205

позволяет оценить закономерности проявления реологических свойств как по соотношению показателей мгновенной (ϕ и C) и длительной (ϕ_∞ и C_∞) прочности, так и по аналогичным показателям предельных напряжений: касательных (τ_∞/τ) для сдвиговых (табл. 3) или осевых ($\sigma_{1\infty}/\sigma_1$) для трехосных испытаний (табл. 4).

Проявление реологических свойств усиливается с увеличением пластичности грунта: наиболее явно они выражены в глинах, в наименьшей степени – в супесях. Более отчетливо реологические свойства выражены в грунтах твердой и полутвердой консистенции, в тугопластичных грунтах степень их проявления значительно снижается, а в грунтах с показателем текучести $I_L > 0.5$ реологические свойства практически не проявляются (см. табл. 1, 2). Такие закономерности проявления реологических свойств выявляются как при испытаниях грунтов по “методу ползучести”, так и по “методу релаксации напряжения”.

Выявленные закономерности проявления реологических свойств глинистых грунтов не могут быть объяснены с позиций традиционных представлений о переходе упругих деформаций в пластические [22] или на основе вязкоупругой модели – комбинации “пружин” и “амортизаторов” [1] и др. Для их объяснения должны быть рассмотрены особенности строения глинистых грунтов и возможность их изменения при длительном действии нагрузок.

Природу изменения прочности грунтов при длительном действии нагрузок можно объяснить с позиций теории контактных взаимодействий. Основные физико-химические особенности реологических свойств глинистых грунтов с учетом характера структурных связей в них были рассмотрены В.И. Осиповым [17]. Полученные авторами экспериментальные данные позволили более детально рассмотреть и уточнить причины и механизм проявления реологических свойств глинистых грунтов.

Реологическими свойствами обладают, главным образом, глинистые грунты, в которых преобладают переходные, и в менее значимом количестве присутствуют ближние коагуляционные контакты. Строение и свойства таких контактов в значительной степени определяются влиянием адсорбционной части двойного электрического слоя (ДЭС), наиболее прочно связанной с минеральными частицами грунта. Увеличение содержания влаги в грунтах приводит к росту толщины ДЭС и преобладанию в грунтах ближних и дальних коагуляционных контактов, в силу чего способность грунтов к проявлению реологических свойств снижается. Для текучих глин, в строении которых участвуют преимущественно дальние коагуляционные контакты, характерно вязкое течение при длительном приложении нагрузки и тиксотропное восстановление прочности при ее снятии. Цементированные

Таблица 3. Изменение характеристик прочности грунтов при испытаниях в условиях одноплоскостного среза и по методу ползучести

Разновидность грунта	Число пластичности IP, %	Показатель текучести IL, д.е.	Изменение показателей прочности	
			φ_{∞}/φ	C_{∞}/C
глина	33.9	-0.77	1.0	0.59
		-0.47	1.0	0.63
		0.26	1.0	0.72
		0.56	1.0	0.96
		1.15	1.0	1.00
суглинок	13.3	-0.74	0.9	0.62
		0.02	0.9	0.71
		0.35	1.0	0.85
		1.14	1.0	1.00
супесь	5.5	-0.80	1.0	0.86
		-0.51	0.9	0.88
		0.06	0.9	0.93
		0.34	0.9	0.98
		1.20	1.0	1.00

Таблица 4. Изменение характеристик прочности грунтов при испытаниях в условиях трехосного сжатия и по методу релаксации напряжения

Разновидность грунта	Число пластичности IP, %	Показатель текучести IL, д.е.	Изменение характеристик прочности $\sigma_{1\infty}/\sigma_1$
глина	33.9	-0.74	0.59
		-0.23	0.63
		0.31	0.73
		0.58	0.94
		0.84	0.99
суглинок	13.3	-0.80	0.63
		-0.49	0.65
		-0.08	0.69
		0.23	0.77
		0.54	0.95
		0.95	0.99
супесь	5.5	-0.74	0.83
		-0.36	0.86
		0.17	0.93
		0.39	0.98
		0.77	0.98

и литифицированные глины с преимущественно смешанными и фазовыми контактами, практически не обладающие пластическими свойствами, при длительном действии нагрузки также не проявляют реологических свойств, а упруго деформируются.

В стабильном состоянии дисперсная система, которой являются глинистые грунты, находится в энергетическом равновесии, достигаемом в результате баланса действия сил притяжения и отталкивания между частицами дисперсной фазы. Приложение дополнительной нагрузки вызывает

сближение частиц дисперсной фазы между собой за счет сжатия ДЭС, при этом общее энергетическое равновесие системы нарушается. Это, в свою очередь, приводит к ответной активизации действия сил отталкивания, в первую очередь, расклинивающего действия гидратных пленок частиц, стремящихся вернуть систему в устойчивое состояние. При быстром снятии дополнительной нагрузки силы отталкивания возвращают систему в исходное равновесное состояние, чем и определяется упругий характер деформаций, происходящих в грунте в этом случае.

Длительное действие нагрузки приводит к структурной перестройке грунта. В этом случае действие сил отталкивания, направленное на восстановление энергетического равновесия, вызывает перемещение частиц дисперсной фазы относительно друг друга. Баланс действия сил притяжения — отталкивания в дисперсной системе может восстанавливаться за счет деформации грунта и соответствующего снижения его напряженного состояния.

Важную роль для понятия природы и характера проявления реологических свойств играют представления о том, каким именно образом происходит структурная перестройка и переориентация частиц при длительном действии осевой нагрузки. Ответ на этот вопрос дан в работах Е.М. Сергеева [21] и В.И. Осипова с соавторами [17, 18] на основании изучения микротекстур глин и их изменения под действием сжимающих нагрузок. Проведенный ими анализ показал, что в этом случае происходит ориентация частиц в плоскости, нормальной к направлению действия нагрузки. Если приложение нагрузки носит кратковременный (упругий) характер, то процесс переориентации развивается в значительно меньшей степени.

В том случае, если осевая сжимающая нагрузка в процессе структурной перестройки остается неизменной, основную роль в достижении энергетического баланса играет деформация грунта, что происходит при длительных испытаниях грунтов на одноплоскостной срез. В этом случае переориентация частиц грунта под действием осевой нагрузки приводит к проявлению эффекта ползучести, и срез грунта происходит по плоскости, в которой структурное сцепление между частицами уже ослаблено в результате их переориентации. Это требует приложения более низких разрушающих нагрузок, чем при испытаниях грунта с неориентированной микроструктурой, когда для его разрушения требуются дополнительные напряжения, направленные на его структурную

перестройку в ходе опыта. В результате параметры прочности, в первую очередь, величина сцепления, оказываются ниже, чем в случае среза при быстром нагружении грунта (см. табл. 1).

Эффект переориентации частиц при длительном действии нагрузки позволяет объяснить причины искажений результатов исследований длительной прочности глинистых грунтов по “методу ползучести” в условиях трехосного сжатия, отмеченных выше. При длительных испытаниях в условиях постоянно действующей нагрузки и свободной деформации грунта происходит переориентация его частиц в плоскости, перпендикулярной направлению действия осевого напряжения. Разрушение грунта в условиях трехосного сжатия в отличие от одноплоскостного среза происходит под действием осевой нагрузки в направлении упрочнения грунта, нормальном к плоскости ориентации частиц, что и приводит к повышению определяемых значений показателей прочности.

При испытаниях в условиях трехосного сжатия по “методу релаксации напряжения” могут развиваться лишь незначительные деформации грунта, поэтому существенной переориентации его частиц не происходит. В этом случае восстановление энергетического равновесия системы происходит за счет действия сил отталкивания, главным образом, расклинивающего действия гидратных пленок минеральных частиц, противодействующим сближению частиц под воздействием осевой нагрузки. Это противодействие приводит к снижению осевой нагрузки (релаксации напряжения), конечная, стабилизированная величина которой определяется величиной расклинивающего давления гидратных пленок. Конечная величина осевой нагрузки после релаксации используется для расчета параметров длительной прочности грунта, что приводит к закономерному снижению значений сцепления по сравнению со стандартными консолидировано-дренированными испытаниями в условиях трехосного сжатия.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования и анализ их результатов позволяют сделать следующие выводы.

Реологические процессы, приводящие к снижению прочности (за счет уменьшения величины сцепления), характерны для всех разновидностей глинистых грунтов. Интенсивность проявления реологических процессов зависит от количества

глинистых частиц в грунтах, следовательно и контактов между частицами, и закономерно снижается в ряду глина – суглинков – супесь.

С другой стороны, реологические процессы наиболее ярко проявляются в грунтах, в структуре которых участвуют преимущественно переходные и ближние коагуляционные контакты (в грунтах твердой и полутвердой консистенции), свойства которых в значительной степени определяются влиянием адсорбционного слоя гидратных пленок минеральных частиц. С увеличением содержания влаги и толщины диффузного слоя гидратных пленок (в тугопластичных грунтах) интенсивность проявления реологических процессов снижается. Преобладание в строении грунтов дальних коагуляционных контактов (грунты с показателем текучести $I_L > 0.5$), свойства которых определяются, в основном, влиянием диффузного слоя ДЭС приводит к тому, что реологические свойства в таких грунтах не проявляются, а длительное воздействие нагрузок приводит к развитию процессов текучести.

Определение реологических свойств (длительной прочности) глинистых грунтов может проводиться по методикам ползучести в условиях одноплоскостного среза и релаксации напряжений в условиях трехосного сжатия, принципиально различающихся между собой по условиям нагружения и деформирования грунта. Различия напряженно-деформированного состояния грунта, возникающие при проведении испытаний по каждой из этих методик, вызывают отличные друг от друга условия изменения микроструктуры грунта в процессе испытаний. Несмотря на это, испытания, проведенные по этим методикам, приводят к сходным результатам, описанным выше, что позволяет говорить, что каждая из них характеризует длительную прочность исследуемого грунта.

В целом, можно утверждать, что достоверное определение длительной прочности глинистых грунтов может проводиться для грунтов с показателем текучести $I_L < 0.5$ как по “методу ползучести” в условиях одноплоскостного среза, так и “методу релаксации напряжения” в условиях трехосного сжатия. Выбор конкретной методики испытаний должен определяться, в первую очередь, конкретными условиями нагружения, в которых находится грунт в реальных природных или техногенных условиях строительства и эксплуатации сооружений. Методики таких исследований разработаны, опробованы и приняты в качестве стандартов ИГЭ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бленд Д.Р. Теория линейной вязкоупругости. М.: Мир, 1965. 199 с.
2. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
3. Вялов С.С., Зарецкий Ю.К., Максимак Р.В., Пекарская Н.К. Проблемы структурной реологии глин // Тр. Междунар. симп. Инженерно-геологические свойства глинистых пород и процессы в них. Вып. 2. М.: МГУ, 1972. С. 16–25.
4. Гольдштейн М.Н., Бабицкая С.С., Мизюмский В.А. Методика испытаний грунтов на ползучесть и длительную прочность // Вопросы геотехники: оползни и противооползневые сооружения. Механические свойства грунтов / Под ред. М.Н. Гольдштейна. Днепропетровск: [б.и.], (Труды / ДИИЖТ; вып. 5). 1962. С. 93–121.
5. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов. М.: Стройиздат, 1973. Т. I. 375 с., Т. II. 366 с.
6. Горькова И.М. Исследование глинистых пород при помощи конического пластометра // Коллоидный журнал. 1956. Т. 18. № 1. С. 26.
7. Горькова И.М. Глинистые породы и их прочность в свете современных представлений коллоидной химии // Тр. лаборатории гидрогеологических проблем. 1957. Т. 14. С. 54.
8. Горькова И.М. Физико-химические исследования дисперсных осадочных пород в строительных целях. М.: Стройиздат, 1975. 151 с.
9. Горькова И.М., Коробанова И.Г., Окнина Н.А. Природа прочности и деформационные особенности глинистых пород в зависимости от условий формирования и увлажнения // Тр. лаборатории гидрогеологических проблем. 1961. Т. 29. 154 с.
10. Казарновский В.Д. Учет сопротивляемости грунтов сдвигу при проектировании дорожной конструкции. М.: Автотрансиздат, 1962. 36 с.
11. Коробанова И.Г. Формирование инженерно-геологических свойств терригенной формации. М.: Наука, 1970. 115с.
12. Круглицкий Н.Н. Физико-химические основы регулирования свойств дисперсий глинистых минералов. Киев: Наукова думка, 1968. 120 с.
13. Кутергин В.Н., Кальбергенов Р.Г., Карпенко Ф.С., Седов В.В. Новые технологические испытания грунтов на сдвиг // В сб. Сергеевские чтения. Научное обоснование актуализации нормативных документов инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий. Вып. 12. М.: РУДН, 2010. С. 366–372.
14. Кутергин В.Н., Кальбергенов Р.Г., Карпенко Ф.С., Леонов А.Р., Мерзляков В.П. Определение реологических свойств глинистых грунтов методом

- релаксации // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2013. № 1. С. 2–5.
15. Месчан С.Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов. М.: Недра, 1985. 342 с.
 16. Овчинников П.Ф., Круглицкий Н.Н., Михайлов Н.В. Реология тиксотропных систем. Киев: Наукова думка, 1972. 122 с.
 17. Осипов В.И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. М.: МГУ, 1979. 232 с.
 18. Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород / Под ред. Е.М. Сергеева. М.: Недра, 1989. 211 с.
 19. Ребиндер П.А. Конспект общего курса коллоидной химии. М.: Изд-во Моск. университета, 1970. 111 с.
 20. Ребиндер П.А. Структурно-механические свойства глинистых пород и современные представления физико-химии коллоидов // Тр. совещ. по инж.-геол. свойствам горн. пород. М.: АН СССР. 1957. Т. 1. С. 31–44.
 21. Сергеев Е.М. Инженерная геология. М.: МГУ, 1978. 384 с.
 22. Ухов С.Б., Королев М.В., Брызгалин Ю.В. Определение параметров длительной прочности грунтов при испытании их в режиме ползучести-релаксации // Проблемы механики грунтов и инженерного мерзлотоведения. М.: Стройиздат, 1990. С. 237–248.
 23. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высшая школа. 1979. 272 с.
 24. Шукле Л. Реологические проблемы механики грунтов. М.: Стройиздат, 1976. 485 с.
 25. Bishop A.W. The principle of effective stress. Norwegian Geotechnical Institute. 1960. Publication № 32. P. 1–5.
 26. Skempton A.W. Significance of Terzaghi's concept of effective stress // L. Bjerrum, A. Casagrande, R. Peck and A.W. Skempton (Eds.). From Theory to Practice in Soil Mechanics. New York: Wiley, 1960. P. 43–53.
 4. Goldshtein, M.N., Babitskaya, S.S., and Mizyumskii, V.A. *Metodika ispytaniy gruntov na polzuchest i dlitelnyuyu prochnost* [Methods of creep and long-strength tests of soils]. *Voprosy geotekhniki*, vol. 5. *Opolznyi i protivopolznevyye sooruzheniya. Mekhanicheskie svoystva gruntov*. Dnepropetrovsk, 1962, pp. 93–121. (in Russian).
 5. Goldshtein, M.N. *Mekhanicheskie svoystva gruntov* [Mechanical properties of soils]. Moscow, Stroizdat Publ., 1973, vol. I, 375 p., vol. II, 366 p. (in Russian).
 6. Gor'kova, I.M. *Issledovanie glinistykh porod pri pomoshchi konicheskogo plastometra* [The study of clay rocks with conical plastometer]. *Kolloidnyi zhurnal*, 1956, vol. 18, no. 1, p. 26. (in Russian).
 7. Gor'kova, I.M. *Glinistye породы i ikh prochnost v svete sovremennykh predstavlenii kolloidnoi khimii* [Clay rocks and their strength in the view of modern concepts of colloid chemistry]. *Trudy laboratorii gidrogeologicheskikh problem*. 1957, vol. 14, p. 54. (in Russian).
 8. Gor'kova, I.M. *Fiziko-khimicheskie issledovaniya dispersnykh osadochnykh porod v stroitel'nykh tselyakh* [Physicochemical studies of dispersed sedimentary rocks for construction purpose]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975, 151 p. (in Russian).
 9. Gor'kova, I.M., Korobanova, I.G., and Oknina, N.A. *Priroda prochnosti i deformatsionnye osobennosti glinistykh porod v zavisimosti ot uslovii formirovaniya i uvlazhneniya* [Nature of strength and deformation features of clay rocks depending on formation and moistening conditions]. *Trudy laboratorii gidrogeologicheskikh problem*. 1961, vol. 29, 154 p. (in Russian).
 10. Kazarnovskii, V.D. *Uchet soprotivlyaemosti gruntov sdvigu pri proektirovanii dorozhnoi konstruktssii* [Consideration of soil resistance to shear when designing a road construction]. Moscow, Avtotransizdat Publ., 1962, 36 p. (in Russian).
 11. Korobanova, I.G. *Formirovanie inzhenerno-geologicheskikh svoystv terrigennoi formatsii* [Formation of engineering geological properties of terrigenous formations]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 115 p. (in Russian).

REFERENCES

1. Bland, D.R. *Teoriya lineinoi vyazkouprugosti* [Linear viscoelasticity theory]. Moscow, Mir Publ., 1965. 199 p. (in Russian).
2. Vyalov, S.S. *Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov* [Rheological principles of soil mechanics]. Moscow, Higher school Publ., 1978. 447 p. (in Russian).
3. Vyalov, S.S., Zaretskii, Yu.K., Maksimyak, R.V., and Pekarskaya, N.K. *Problemy strukturnoy reologii glin* [Structural rheology of clays]. *Trudy Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Inzhenerno-geologicheskie svoystva glinistykh porod i protsessy v nikh"* [Proc. Int. Symp. "Engineering-geological properties of clayey rocks and the processes in them"]. Moscow Univ. Publ., 1972, pp. 16–25. (in Russian).
12. Kruglitskii, N.N. *Fiziko-khimicheskie osnovy regulirovaniya svoystv dispersii glinistykh mineralov* [Physico-chemical principles for regulation of dispersion of clay minerals]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1968. 120 p. (in Russian).
13. Kutergin, V.N., Kal'bergenov, R.G., Karpenko, F.S., and Sedov, V.V. *Novye tekhnologii ispytaniy gruntov na sdvig* [New soil shear testing technologies]. *Sergeevskie chteniya*, vol. 12, 2010, pp. 366–372. (in Russian).
14. Kutergin, V.N., Kal'bergenov, R.G., Karpenko, F.S., Leonov, A.R., and Merzlyakov, V.P. *Opredelenie reologicheskikh svoystv glinistykh gruntov metodom relaksatsii* [Determination of rheological properties of clay soils by relaxation method]. *Osnovaniya*,

- fundamenty i mekhanika gruntov*, 2013, no. 1, pp. 2–5. (in Russian).
15. Meschan, S.R. *Experimental'nyya reologia glinistykh gruntov* [Experimental rheology of clay soils]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 342 p. (in Russian).
 16. Ovchinnikov, P.F., Kruglitskii, N.N., and Mikhailov, N.V. *Reologiya tiksotropnykh sistem* [Rheology of thixotropic systems]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1972. 122 p. (in Russian).
 17. Osipov, V.I. *Priroda prochnostnykh i deformatsionnykh svoistv glinistykh porod* [Nature of strength and deformation properties of clay soils nature]. Moscow Univ. Publ., 1979, 232 p. (in Russian).
 18. Osipov, V.I., Sokolov, V.N., and Rumyantseva, N.A. *Mikrostruktura glinistykh porod* [Microstructure of clay soils]. E.M. Sergeev (Ed.), Moscow, Nedra Publ., 1989, 211 p. (in Russian).
 19. Rebinder, P.A. *Konspekt obshchego kursa kolloidnoy khimii* [Abstract of the general course of colloidal chemistry]. Moscow Univ. Publ., 1970, 111 p. (in Russian).
 20. Rebinder, P.A. *Strukturno-mekhanicheskiye svoistva glinistykh porod i sovremennyye predstavleniya fiziko-khimii kolloidov* [Structural and mechanical properties of clay rocks and modern representations of physico-chemistry of colloids]. *Trudy soveshch. po inzh.-geol. svoystvam gorn. porod* [Proc. meeting on engineering geological properties of rocks]. Moscow, USSR Academy of Sciences. 1957, vol. 1, pp. 31–44. (in Russian).
 21. Sergeev, E.M. *Inzhenernyya geologia* [Engineering geology]. Moscow Univ. Publ., 1978, 384 p. (in Russian).
 22. Ukhov, S.B., Korolev, M.V., and Bryzgalin, Yu.V. *Opreделение parametrov dlitelnoi prochnosti pri ispytaniikh v rezhime polzuchestii- relaksatsii* [Determination of long-term soil strength parameters tested in the creep-relaxation regime]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1990, pp. 237–248. (in Russian).
 23. Tsytoich, N.A. *Mekhanika gruntov* [Soil mechanics]. Moscow, Higher school Publ., 1979, 272 p. (in Russian).
 24. Suklje, L. *Reologicheskiye problemy mekhaniki gruntov* [Rheological aspects of soil mechanics]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1976, 485 p. (in Russian).
 25. Bishop, A.W. The principle of effective stress. Norwegian Geotechnical Institute. 1960, Publication № 32, p. 1–5.
 26. Skempton, A.W. Significance of Terzaghi's concept of effective stress. L. Bjerrum, A. Casagrande, R. Peck and A.W. Skempton (Eds.). *From Theory to Practice in Soil Mechanics*. New York: Wiley, 1960, p. 43–53.

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF THE CLAY SOILS

V.I. Osipov, F.S. Karpenko, R.G. Kalbergenov, V.N. Kutergin, N.A. Rumyantseva

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Science,
Ulanskii per. 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia. E-mail: osipov@geoenv.ru*

The rheological properties of clays are considered in the article. Peculiarities of the rheological properties, namely, the creep and stress relaxation mechanisms, were experimentally studied. The results obtained are discussed from the viewpoint of structural-contact theory. Loss in strength, cohesion, above all, upon the rheological processes is typical to all clay varieties. The intensity of rheological processes depends on the quantity of clay particles in the soil, and consequently the quantity of contacts between the mineral particles, which is reducing in the row: clay – silty clay – silt. It also depends on the liquidity of clay characterized by the liquidity index (IL). The intensity of rheological properties manifestation in clays falls with the increasing water content; and they are not evident at $IL > 0.5$.

The intensity of rheological processes depends on soil microstructure. They are most clearly manifested in the soils, with the structure involving mainly transitional and near coagulation contacts (very stiff and stiff clay). The properties of such soils are mostly determined by the influence of an adsorption layer of hydrated films of mineral particles. The intensity of rheological processes is reduced with the increase of moisture content and thickness of the diffusive layer of hydrated films (in firm–stiff clay soil). Rheological properties are not pronounced in soft and very soft clay soils with liquidity index $(IL) > 0.5$ and prolonged stress action results in the flowing process development. Far coagulation contacts prevail in the microstructure of these soils and their properties are mainly controlled by the diffusive layer of hydrated films.

Rheological processes may be manifested in clay soils through the creep and stress relaxation mechanisms. Realization of each of these mechanisms leads to similar results as described above. Study of rheological properties of clays may be based on the method of creep in shear tests and the method of stress relaxation in triaxial compression tests depending on the stress that soils undergo either in natural or technogenic conditions. The methodology of such studies was developed and adopted in the IEG RAS.

Key words: rheological properties, creep, stress relaxation, microstructure, transition contacts, near and far coagulation contacts, adsorption layer and diffuse layer of hydrated films, liquidity index.