

С. Р. Месчян

О ползучести связного грунта при сжатии в условиях невозможности бокового расширения

Вопросы уплотнения связных водонасыщенных грунтов во времени имеют весьма важное значение для решения задач осадок сооружений во времени, устойчивости откосов сооружений, возводимых в условиях высокой влажности укладываемого грунта, устойчивости оснований сооружений при нестабилизированном состоянии возводимых на сравнительно слабопроницаемых грунтах высокой влажности и т. д. [1].

Для решения указанных выше задач пользуются теорией уплотнения земляных масс, развитой в работах [1, 2, 3 и т. д.].

Следует однако отметить, что до последнего времени (1953 г.) теория уплотнения базировалась на таких предпосылках, которые неполностью соответствовали действительной природе деформирования водонасыщенного связного грунта [4]. В частности, в теории уплотнения приближенно принималось, что длительность процесса деформирования связного грунта обусловлена временем, необходимым для перемещения свободной воды, вытекающей из пор, пренебрегая ролью внутренних связей грунта, которые обуславливают его прочность. При этом во всех работах принималось то допущение, что деформация скелета грунта изменяется мгновенно при изменении напряжений [5].

В дальнейшем, по мере развития физико-химии коллоидов, грунтоведения, инженерной геологии и механики грунтов, точка зрения на природу деформирования связных грунтов во времени постепенно изменилась. В развитии этих новых представлений имели большое значение работы [4, 6, 7, 8, 9, 10 и т. д.].

На основании достижений указанных выше наук и анализа факторов, влияющих на процесс деформирования водонасыщенного глинистого грунта, установлено [4], что наряду с сопротивлением пор при вытекании свободной воды из них имеет не менее важное значение сопротивление от взаимного перемещения частиц и агрегатов грунта.

Выражаясь словами Н. Н. Маслова [11], при деформировании водонасыщенного грунта всегда имеет место конкурентная борьба за счет: 1) сопротивляемости проходимого через толщу воды (фактор коэф. фильтрации) и 2) сопротивляемости деформации уплотнения

грунта за счет его внутренних водно-коллоидальных связей (фактор вязкости). Под фактором вязкости понимается то сопротивление, которое препятствует взаимному перемещению частиц в породе (грунте).

Дальнейшим развитием теории уплотнения земляных масс явились работы [8, 9]. В этих работах для учета фактора, обусловленного сопротивлением взаимному перемещению частиц и агрегатов грунта в теорию уплотнения земляных масс, впервые В. А. Флоринным было введено понятие о ползучести скелета грунта и были решены задачи уплотнения с учетом ползучести скелета, используя для этого теорию упруго-ползучего тела Г. Н. Маслова—Н. Х. Арутюняна [12, 13].

Под ползучестью скелета грунта подразумевается деформация [8, 9], обусловленная относительным смещением твердых частиц и агрегатов грунта, а также разрушением цементационных связей, вследствие чего, при действии внешней нагрузки, деформации возникают не сразу, а постепенно.

В зависимости от истории образования данного грунта указанные выше факторы в процессе деформирования будут иметь ту или иную роль. В частности для сравнительно неплотных новых образований у которых связи между частицами очень слабы, когда перемещение частиц в грунте происходит почти беспрепятственно, процесс деформирования будет в основном обусловлен фильтрационными свойствами грунта, однако, по мере уплотнения, упрочнения и образования более прочных связей между его частицами и агрегатами, роль структурных и структурно-адсорбционных деформаций [4], т. е. ползучести скелета грунта, значительно повышается.

Таким образом, соотношение между указанными выше основными факторами деформирования водонасыщенного связного грунта не остается постоянным, оно может изменяться в процессе уплотнения, как по мере приложения внешних нагрузок, так и при длительном выдерживании образцов грунта под нагрузкой.

Если процесс деформирования связного водонасыщенного грунта в основном зависит от фактора фильтрации, то для решения задачи уплотнения необходимо пользоваться теорией фильтрационного уплотнения, пренебрегая ролью ползучести скелета грунта и, наоборот, если явление выжимания воды из пор не имеет существенного значения, то можно пренебрегать ролью фильтрации, используя для решения задач уплотнения теорию ползучести. А когда оба фактора выступают совместно, то ясно, что в этом случае необходимо пользоваться совместным решением теории фильтрационного уплотнения и теории ползучести [8, 9].

Критерием, определяющим значение того или иного фактора, должна служить продолжительность деформирования образцов разной толщины при их испытании одинаковыми нагрузками. Если окажется, что продолжительность деформирования не зависит от высоты образцов, то это будет означать, что основная роль в процессе деформи-

рования принадлежит ползучести скелета грунта. Если же продолжительность деформирования будет зависеть от второй степени высоты образца, т. е. будет соответствовать решению фильтрационного уплотнения то можно будет пренебрегать ползучестью скелета грунта. Во всех остальных случаях необходимо считаться как с ползучестью скелета, так и фильтрационными явлениями. Следовательно для решения задач уплотнения в каждом отдельном случае необходимо, путем экспериментирования, определить значение того или иного фактора в процессе деформирования грунта.

Оставляя пока в стороне вопрос о влиянии высоты образца на продолжительность деформирования, в этой статье приводим только результаты экспериментального исследования характеристик **ползучести скелета связных грунтов**, проведенных на образцах одинаковых размеров с целью установления возможности применения к связным грунтам теории упруго-ползучего тела Г. Н. Маслова—Н. Х. Арутюняна [12, 13], при их сжатии в условиях отсутствия бокового расширения.

В целях выполнения поставленной задачи были экспериментально исследованы все те основные предпосылки, которые положены в основу указанной выше теории, как-то: 1) зависимость между мгновенными деформациями и напряжениями; 2) изменяемость модуля мгновенной деформации; 3) зависимость между деформациями ползучести и напряжениями; 4) справедливость закона наложения для деформации ползучести грунта.

При выполнении указанной работы мы пользовались образцами водонасыщенных грунтов, т. е. не исключались деформации, вызванные фильтрационными явлениями, однако, учитывая то обстоятельство, что испытанию подвергались образцы небольшой толщины (10—20 мм), у которых явления фильтрации проявляются в самом начале испытания, то ролью фильтрационных явлений пренебрегли.

Ввиду необходимости выполнения множества параллельных опытов из образцах с одинаковыми физическими и механическими свойствами и практической невозможности подобрать таковые из грунтов естественной структуры, для решения поставленной задачи мы пользовались образцами грунта нарушенной структуры.

Материалы и приборы

При ведении экспериментальных исследований в качестве материала были использованы восемь различных грунтов, отобранных из участков работ Армянского отделения Института „Гидроэнергопроект“ и из оснований фундаментов ряда строящихся зданий в г. Ереване.

Данные об основных физических свойствах исследованных грунтов сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Лаб. № грунта	Гранулометрический состав в %			Удельн. вес в г/см ³	Объемн. вес в г/см ³	Естеств. влажн. в %	Пористость в %	Коэф. пористости	Пределы пластичности		
	Наименование частиц								нижн. граница текучести	нижн. граница пластичн.	число пластичности
	песчаных	пылеватых	глинистых								
3248	49,60	30,81	19,59	2,75	1,83	23,8	46,20	0,86	27,5	17,4	10,1
3363	11,79	72,19	16,02	2,69	1,76	32,6	50,01	1,04	46,8	26,4	20,4
3371	20,71	56,20	23,09	2,69	1,89	27,9	45,10	0,82	40,4	24,1	16,3
3389	27,25	62,49	10,26	2,72	1,81	28,9	48,50	0,94	47,0	34,7	12,3
3454	17,28	59,74	22,58	2,76	1,68	38,7	56,20	1,28	—	—	—
3455	11,75	55,51	32,74	2,79	1,58	32,6	57,30	1,35	44,6	23,5	21,1
1—57	—	—	—	2,64	—	—	—	—	44,3	17,3	27,0
2—57	21,8	67,4	10,8	2,66	—	—	—	—	31,3	18,6	12,7

Из вышеприведенной таблицы следует, что нами рассмотрена почти вся гамма глинистых грунтов, начиная от легких пылеватых суглинков (гр. за лаб. № 3389), кончая глиной (гр. за лаб. № 1—57).

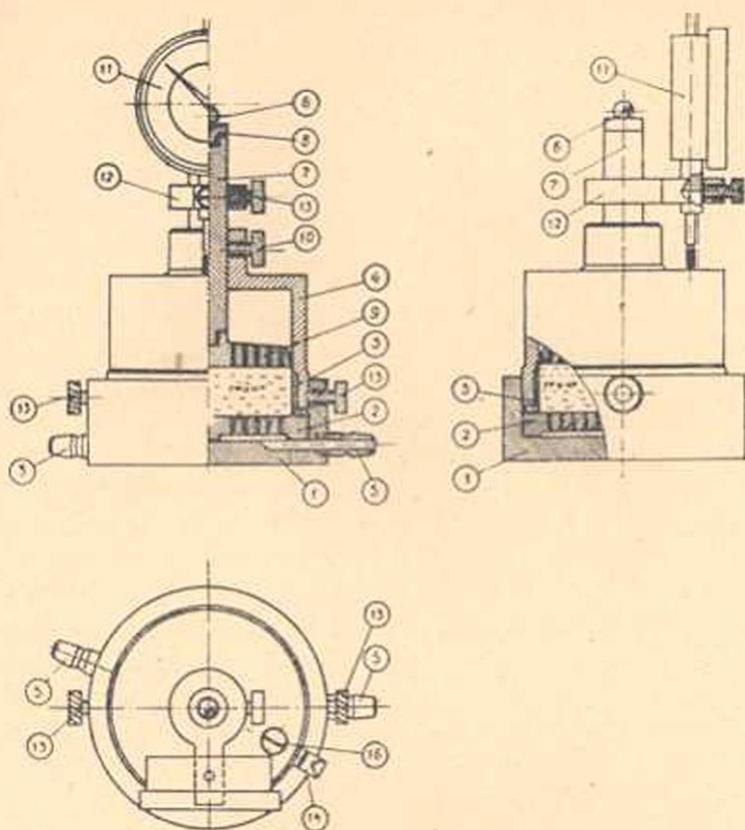
Для выполнения экспериментального исследования указанных выше основных предпосылок теории ползучести и определения основных характеристик деформативности грунтов были использованы компрессионно-фильтрационные приборы—комфилтметры—Г. И. Тер-Степаняна [14] и приборы нашей конструкции [15] (фиг. 1 и 2).

Прибор, предназначенный для исследования ползучести связных грунтов при сжатии в условиях отсутствия бокового расширения, состоит из днища 1, помещенного в нем нижнего дырчатого диска (фильтра) 2, грунтового кольца 3, цилиндра 4 с направляющей головкой. Днище 1 снабжено штуцерами 5, предназначенными для выпуска и подачи воды в прибор снизу. Внешняя нагрузка воспринимается стальным шариком 6, через стальную подушку 8, шток 7 и дырчатый поршень 9 передается на образец грунта, помещенный в кольцо 3. Образец грунта арретируется винтом 10. Деформация образца грунта измеряется индикатором часового типа 11 с точностью от 0,01 мм до 0,001 мм, который при помощи держателя 12 и винта 13 закрепляется к штоку 7.

Прибор снабжен патрубком 14, являющимся указателем уровня воды в приборе, а также прижимными винтами 15, закрепляющими цилиндр 4 к днищу 1. Для налива воды в прибор сверху служит отверстие, снабженное пробкой 16.

При испытании грунтов с естественной влажностью, т. е. без предварительного водонасыщения, для предотвращения высыхания образца патрубков 14 заменяется пробкой, а штуцера 5 закрываются с помощью резиновых трубок и зажимов Гофмана.

Прибор позволяет вести как исследования ползучести грунтов в условиях невозможности бокового расширения при любой влажности, так и компрессионные и фильтрационные испытания по всем схемам [14].



Фиг. 1.

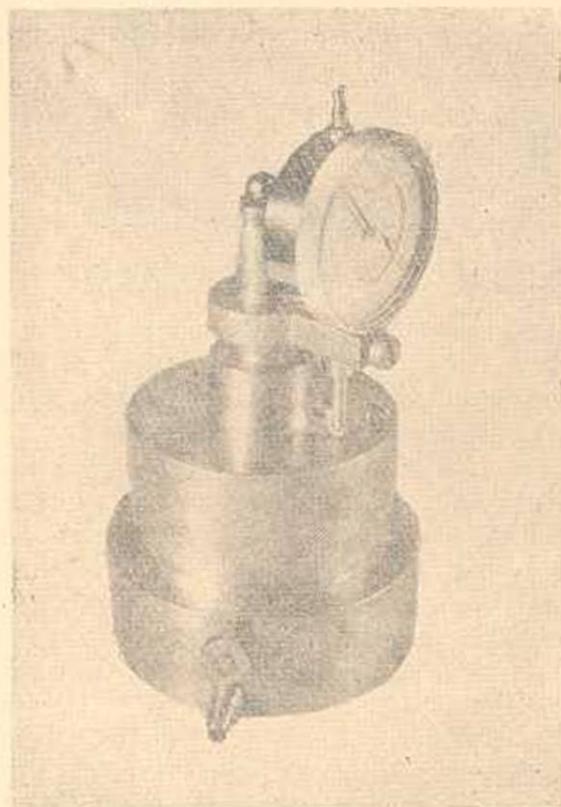
Технические данные прибора: диаметр грунтового кольца 70 мм, высота 10 и 20 мм.

Передача внешней нагрузки на прибор осуществляется с помощью рычажных прессов любых конструкций.

Результаты исследования зависимости между напряжениями и мгновенными деформациями грунта

Известно [4], что при приложении нагрузки на грунт в момент нагружения проявляется мгновенная деформация, вслед за которой с течением времени развиваются структурные и структурно-адсорбционные деформации, то при исследовании их деформативных свойств необходимо исходить из указанного расчленения деформаций. Конечно, при этом необходимо также учесть такое специфическое свойство связного грунта, как изменяемость его механических свойств, как за счет уплотнения, так и под влиянием продолжительности нагружения (фактор времени).

В связи с вышесказанным, при исследовании деформативных свойств связных грунтов, нами принято деформации грунта разбивать на две части: на мгновенные деформации, которые проявляются в момент приложения нагрузки, и на деформации ползучести, которые протекают в течение времени, вслед за мгновенными деформациями.



Фиг. 2.

Под деформацией ползучести понимается суммарное значение структурных и структурно-адсорбционных деформаций.

Сделанное нами разделение деформаций на мгновенные деформации и деформации ползучести полностью соответствует как современным представлениям о деформативности связных грунтов, так и рассматриваемой нами теории ползучести [12, 13].

При исследовании зависимости между мгновенными деформациями и напряжениями, по указанным выше причинам, взамен общепринятого понятия модуля упругости

грунта мы перешли к понятию модуля мгновенной деформации [16].

В отличие от модуля упругости, модуль мгновенной деформации не является постоянным, а характер его изменчивости зависит как от физико-механических свойств самого грунта, так и от способа и длительности загрузки. Модуль мгновенной деформации является характеристикой, выражающих механические и деформативные свойства материала, соответствующей его некоторому определенному состоянию в определенный момент времени.

При определении мгновенных деформаций, соответствующих разным значениям нагрузок, во избежание влияния уплотнения на механические и деформативные свойства грунта, мы воспользовались методикой параллельного испытания нескольких образцов-близнецов, обладающих одинаковыми физико-механическими свойствами, путем

их мгновенного, безударного нагружения постоянными нагрузками различной величины с фиксацией мгновенных деформаций.

Говоря о мгновенных нагрузках и мгновенных деформациях, нельзя не привести то замечание В. А. Флорина [17], что под условным термином „мгновенной“ нагрузки обычно следует понимать однократно приложенную нагрузку, возрастание которой от нуля до своего конечного значения происходит с предельной скоростью, при которой она может еще рассматриваться как постепенно возрастающая нагрузка. При этом под термином „начальное“ напряженное состояние земляной среды понимается состояние, соответствующее моменту окончания предельного быстрого возрастания нагрузки, которое определяется, естественно, без учета сил инерции.

При выполнении экспериментальных работ мы, обычно, попарно испытывали восемь образцов-близнецов четырьмя значениями нагрузок: 0,25, 0,5, 1,0, 2,0 кг/см².

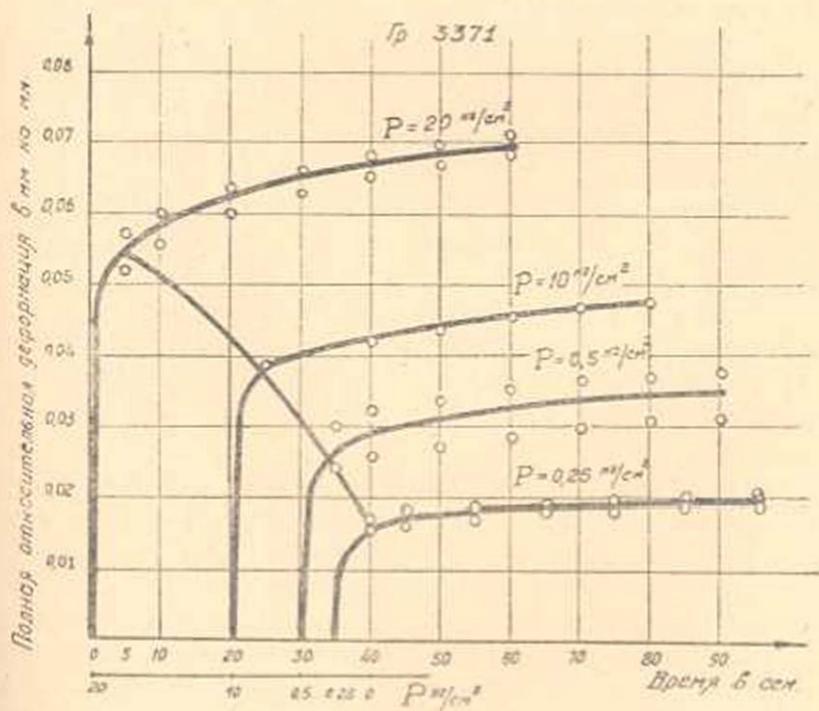
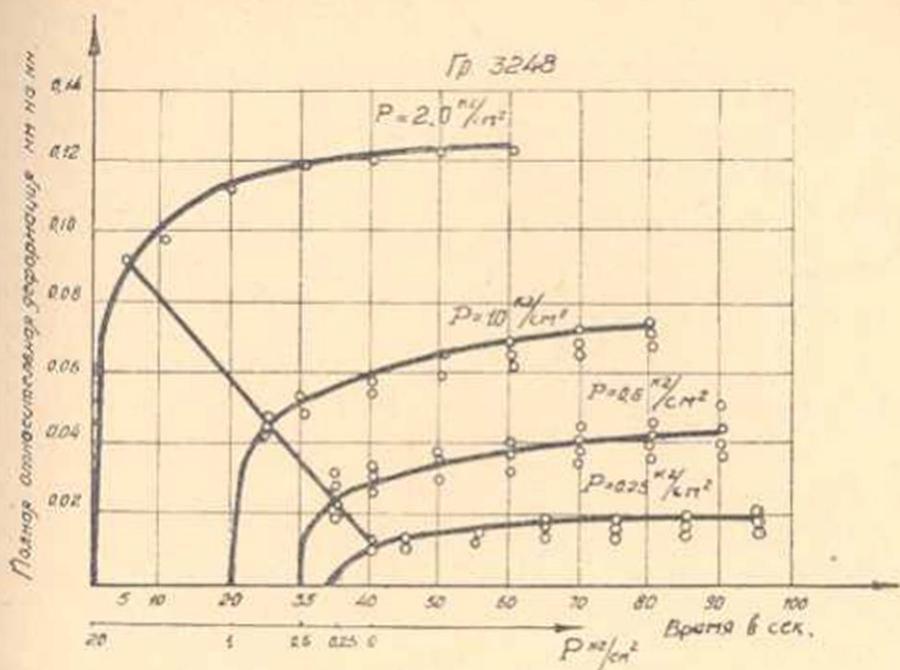
Учитывая то обстоятельство, что точность полученных результатов в значительной степени зависит от физико-механических свойств образцов-близнецов, при их приготовлении прилагали все усилия для получения образцов с одинаковыми физическими и механическими свойствами.

Для примера в табл. 2 приведены основные физические характеристики испытанных образцов-близнецов грунтов за лаб. №№ 3248

Таблица 2

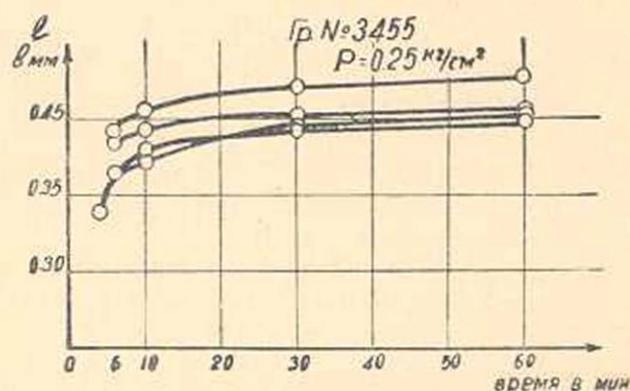
№№ пп	№№ опытов	Удельный вес в г/см ³	Объемный вес в г/см ³	Влажность в %	Коэффициент пористости	Внешняя нагрузка в кг/см ²
Грунт № 3248						
1	4-54	2,75	2,03	25,0	0,698	0,25
2	5-54	2,75	2,00	25,0	0,718	0,50
3	6-54	2,75	2,00	23,5	0,697	0,50
4	7-54	2,75	2,06	23,8	0,697	0,50
5	8-54	2,75	2,00	25,4	0,730	1,00
6	9-54	2,75	2,06	14,3	0,658	1,00
7	11-54	2,75	2,00	25,4	0,730	1,00
8	12-54	2,75	2,06	25,5	0,698	2,00
Грунт № 3371						
1	14-54	2,69	1,78	43,5	1,17	0,25
2	50-54	2,69	1,80	44,7	1,17	0,25
3	152-55	2,69	1,76	41,3	1,17	0,25
4	15-54	2,69	1,84	45,0	1,12	0,50
5	153-55	2,69	1,76	41,3	1,17	0,50
6	16-54	2,69	1,79	48,5	1,22	1,00
7	17-54	2,69	1,72	41,5	1,20	2,00
8	43-54	2,69	1,76	43,5	1,18	2,00

и 3371, а на фиг. 3—сводный график кривых ползучести грунта № 3455 полученных при испытании образцов-близнецов равными нагрузками 0,25 кг/см².



Фиг. 4.

Рассматривая результаты определений физических свойств образцов, приведенных в таблице 2, а также результаты механического испытания их во времени (фиг. 2), приходим к выводу, что образцы действительно обладают достаточно близкими физическими и механическими свойствами и мы в праве сравнивать те результаты, которые получены в результате их испытания.



Фиг. 3.

Эксперименты выполнялись двумя способами: а) способом испытания предварительно неуплотненных и б) способом испытания предварительно уплот-

ненных образцов грунта нагрузкой $0,25 \text{ кг/см}^2$ в течение одного часа.

При проведении испытания предварительно неуплотненных образцов в силу больших значений как величин, так и скоростей деформирования в начальные моменты времени, во избежание ошибок, фиксировались условно-мгновенные деформации, которые соответствовали пятой секунде после момента нагружения. Что же касается второго способа, то в силу сравнительно небольших деформаций фиксировались мгновенные деформации, соответствующие моменту нагружения.

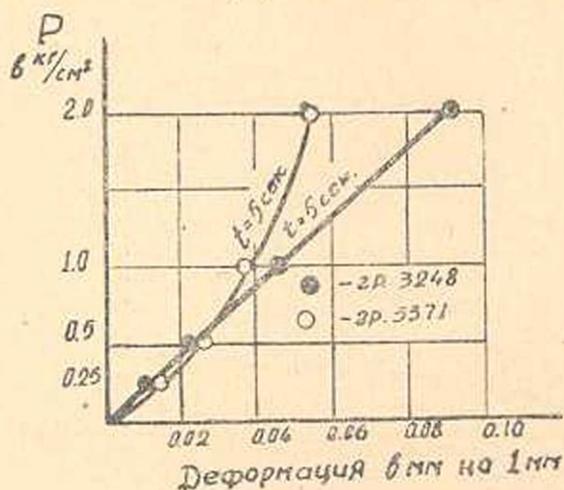
Приведем результаты исследования зависимости между напряжениями и условно-мгновенными деформациями двух грунтов за №№ 3248 и 3371 (фиг. 4 и 5) и зависимости между мгновенными деформациями и напряжениями шести грунтов (фиг. 6), выполненные по второму способу.

На графиках фиг. 4 приведены кривые полных относительных деформаций, определенных при испытании образцов-близнецов нагрузками $0,25$, $0,5$, $1,0$ и $2,0 \text{ кг/см}^2$ в интервале времени до 60 сек , а на графике фиг. 5 — кривые зависимости между напряжениями и условно-мгновенными деформациями. Как следует из графика фиг. 5, связь между условно-мгновенными деформациями и напряжениями, в зависимости от физических свойств испытанных образцов грунта (табл. 2), выражается как линейным (гр. № 3248), так и нелинейным законом (гр. № 3371).

Отклонение указанной выше зависимости от линейного закона обусловлено как проявлением деформаций ползучести в течение пяти секунд после приложения нагрузок, так и наличием неровностей на поверхности образцов [18]. Следует однако отметить, что указанная

зависимость с достаточной для практики точностью для нагрузок до $1,0 \text{ кг/см}^2$ почти всегда можно выразить линейным законом.

Если теперь рассмотреть кривые зависимости между напряжениями и мгновенными деформациями (фиг. 6), то нетрудно заметить, что ввиду



Фиг. 5.

отсутствия влияния как деформаций ползучести ($t = 0$), так и неровностей на поверхности образцов, которые были сглажены при предварительном уплотнении образцов, для всех грунтов без исключения она с достаточной точностью выражается линейным законом [16].

Рассмотрим вопрос изменяемости модуля мгновенной деформации который тесно связан с переходом от понятия

модуля упругости к понятию модуля мгновенной деформации.

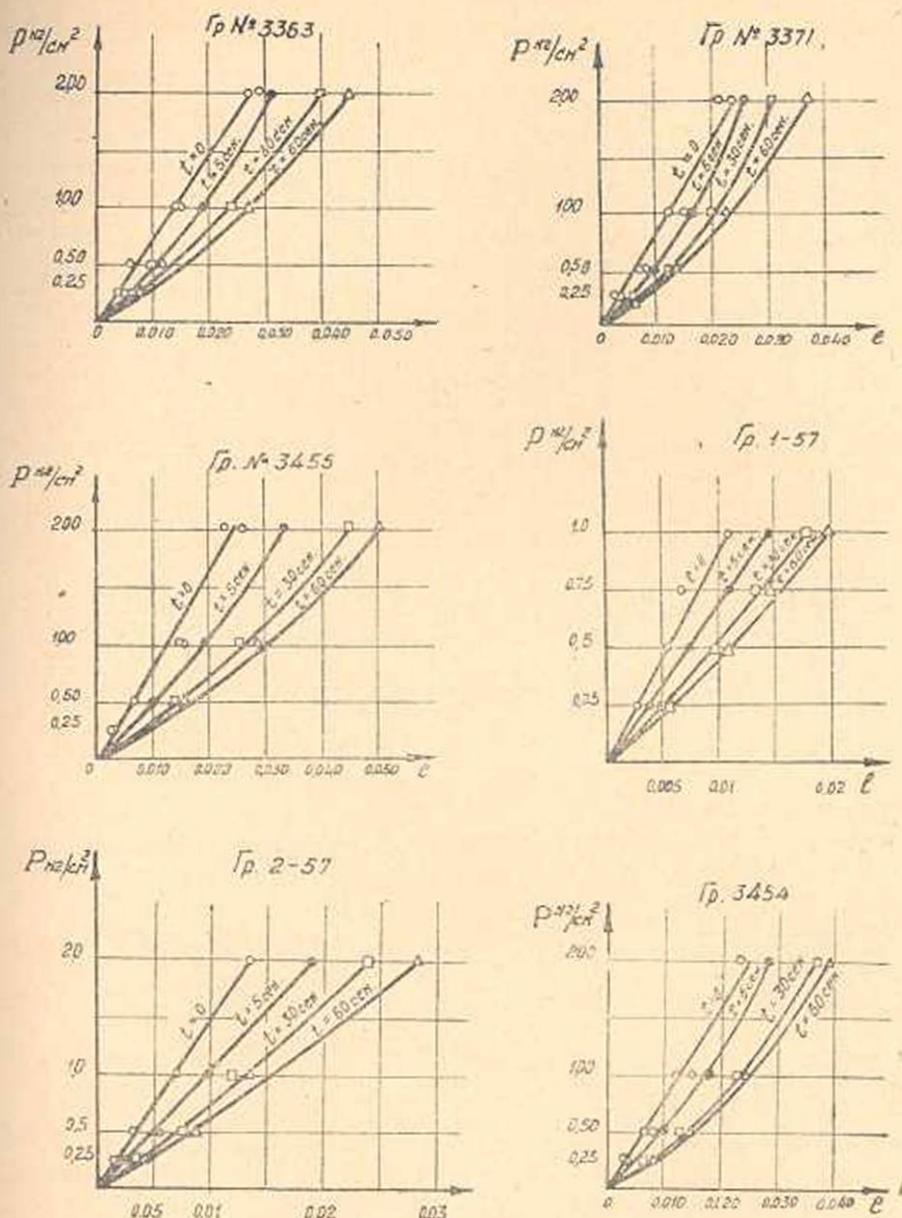
Известно, что процесс твердения бетона в течение времени сопровождается изменением его физико-механических свойств, его старением, что в конечном итоге выражается изменением его упругих характеристик и ползучести. Поэтому основной задачей равновесия упруго-ползучего тела Н. Х. Арутюнян считает определение напряжения и деформации в этом теле под воздействием внешних нагрузок с учетом ползучести и изменения во времени модуля мгновенной деформации.

Сказанное в полной мере относится и к связным грунтам с той лишь разницей, что в одном случае старение является результатом твердения цементного камня, а в другом случае результатом как увеличения плотности грунта под действием внешних нагрузок, так и проявлением сцепления [19].

Вопрос же исследования влияния старения на деформируемость грунта в конечном итоге сводится к исследованию деформативных свойств грунта (мгновенной деформации и деформации ползучести) при разных состояниях его физико-механических свойств.

Не останавливаясь на вопросе изменяемости мгновенных деформаций во времени под действием постоянных нагрузок [16], покажем изменяемость модуля мгновенной деформации в случае, когда внешняя нагрузка не постоянна, а нарастает во времени.

Для выяснения закона изменяемости модуля мгновенной деформации во времени при переменных нагрузках, нарастание их представим в виде последовательно приложенных равных ступеней через определенные интервалы времени [16].



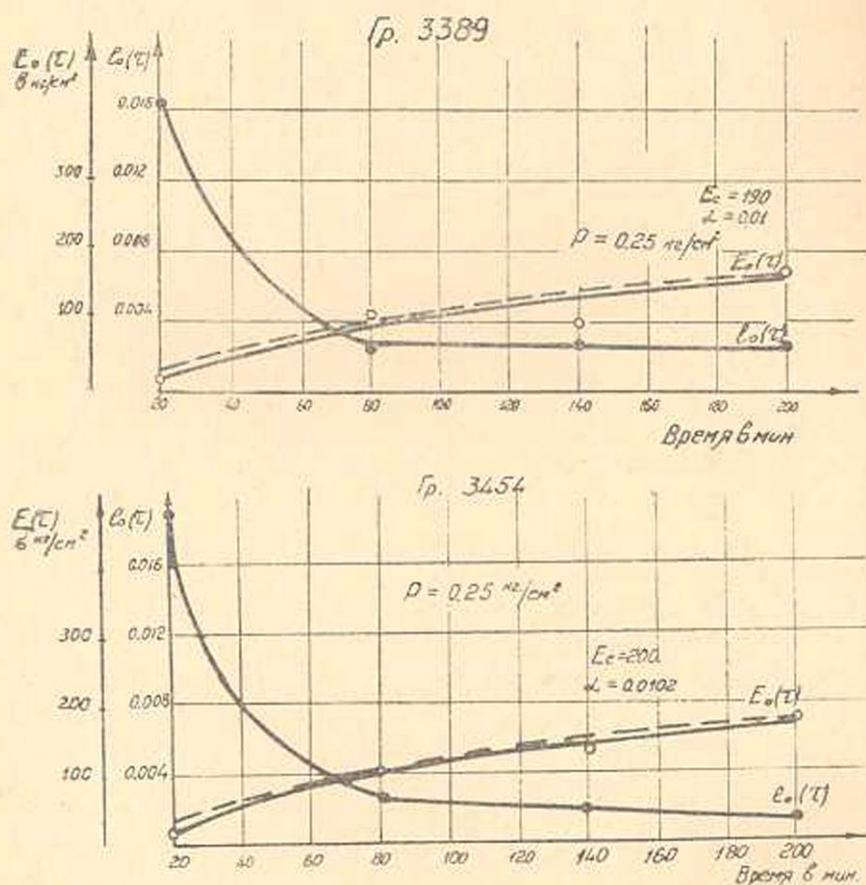
Фиг. 6.

Нами исследованы два случая изменяемости модуля мгновенной E и условно-мгновенной E_0 деформаций: а) при кратковременном и б) при длительном выдерживании образцов под каждой ступенью нагрузки. Время выдерживания в первом случае равнялось одному часу, а во втором случае—от 10 до 30 дней.

Модули мгновенных или условно-мгновенных деформаций определялись, как отношение величины напряжения к величине относи-

тельной мгновенной (условно-мгновенной) деформации от приложения данной ступени нагрузки.

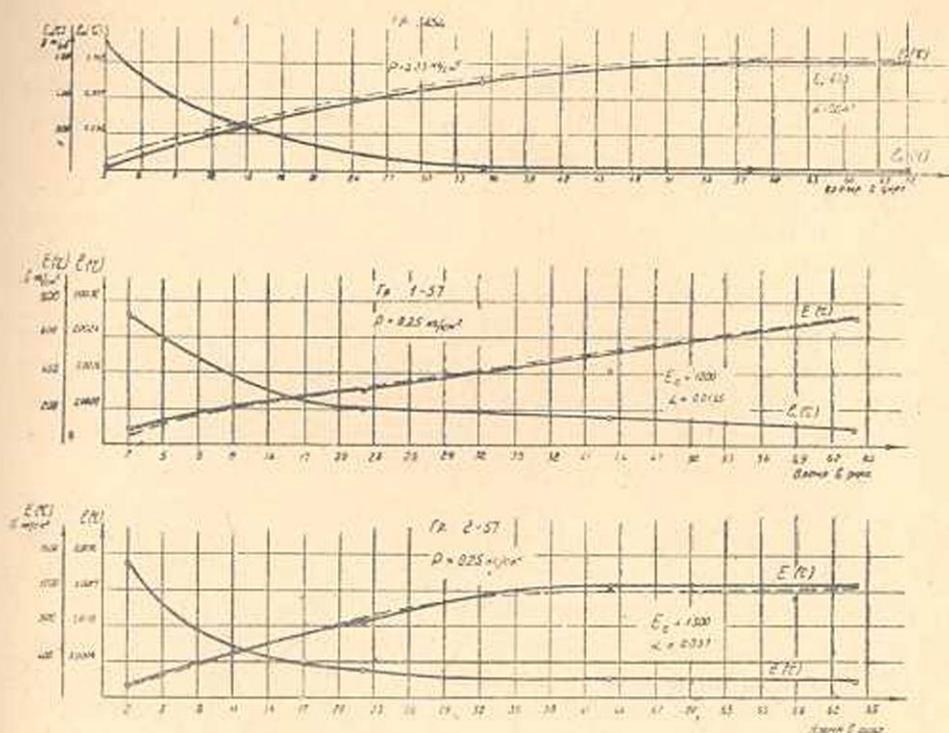
На графиках фиг. 7 приведены кривые изменчивости модуля мгновенной (E_t) и условно-мгновенной (E_{0t}) деформаций совместно с кривыми изменчивости относительных мгновенных (l_t) и условно-мгновенных деформаций (l_{0t}) во времени при выдерживании образцов под нагрузками в течение одного часа, а на фиг. 8 при длительном их выдерживании под ступенями нагрузок.



Фиг. 7.

Рассматривая вышеприведенные графики (фиг. 7 и 8), приходим к выводу, что по мере уплотнения и упрочнения грунта повышаются его механические свойства, что выражается уменьшением мгновенных деформаций при последовательном приложении равных ступеней нагрузок с соответствующим увеличением модуля мгновенной или условно-мгновенной деформаций.

Значительным является то, что по мере уплотнения и упрочнения грунта, модуль мгновенной (условно-мгновенной) деформации асимптотически стремится к некоторой постоянной величине, т. е., по



Фиг. 8.

мере приближения грунта к упруго-уплотненному состоянию, деформативные свойства его стабилизируются.

Во всех вышеприведенных графиках величина каждой ступени нагрузки равнялась $0,25 \text{ кг/см}^2$.

Для описания закона изменяемости модуля мгновенной E_c и условно-мгновенной E_0 , деформации во времени использовано известное выражение (1) теории ползучести [13]

$$E_{(t)} = E_c (1 - \beta e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

при $\beta = 1$ и соответствующем подборе параметров E_c и α по экспериментальной кривой.

Теоретические кривые, построенные по выражению (1), показаны на графиках фиг. 7 и 8 пунктирными линиями. Значения параметров E_c и α показаны на графиках.

Из приведенных графиков следует, что при соответствующем подборе параметров можно добиться достаточно хорошего совпадения теоретических и опытных кривых.

Зависимость между напряжениями и деформациями ползучести

Известно [13], что в зависимости от того, какая связь существует между напряжениями и деформациями ползучести, к упруго-ползучему телу применяется та или иная теория ползучести.

В частности, в теории ползучести бетона связь между напряжениями и деформациями материала линейная, если $\sigma \leq 0,5R$, и нелинейная, если $\sigma > 0,5R$, где R —величина временного сопротивления бетона. Следовательно, для напряжений $\sigma \leq 0,5R$ применяется линейная, а при $\sigma > 0,5R$ —нелинейная теория ползучести [12, 13].

Для применения указанной теории к другим материалам, в частности к связным грунтам, которые обладают свойством ползучести, и определения границ ее применимости необходимо экспериментально определить указанную выше зависимость.

В целях установления зависимости между напряжениями и деформациями ползучести связных грунтов нарушенной структуры при их сжатии в условиях отсутствия бокового расширения были исследованы семь различных грунтов в компрессионных приборах под водой после их полного водонасыщения [20].

Сущность метода определения указанной зависимости заключалась в параллельном определении деформаций ползучести на нескольких образцах-близнецах при разных значениях уплотняющих нагрузок с последующим их сравнением между собой. При этом деформации ползучести определялись как разность полных и мгновенных (условно-мгновенных) деформаций. Следовательно, исследование зависимости между напряжениями и деформациями ползучести по сути дела представляет собой непосредственное продолжение исследования зависимости между напряжениями и мгновенными (условно-мгновенными) деформациями.

Для определения деформации ползучести, как и при определении мгновенных и условно-мгновенных деформаций, обычно, попарно испытывались восемь образцов-близнецов нагрузками 0,25, 0,5, 1,0 и 2,0 кг/см² в течение времени (от одного часа до 100 дней).

Как и в предыдущем случае, при определении деформации ползучести пользовались методами испытания предварительно уплотненных и предварительно уплотненных образцов грунта нагрузками 0,25 кг/см² в течение одного часа. В первом случае из полных деформаций исключались условно-мгновенные деформации, а во втором случае—мгновенные деформации.

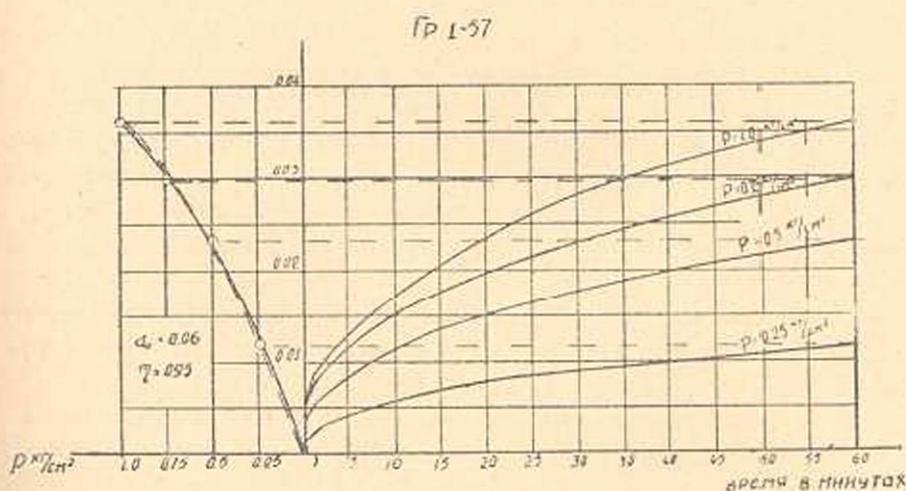
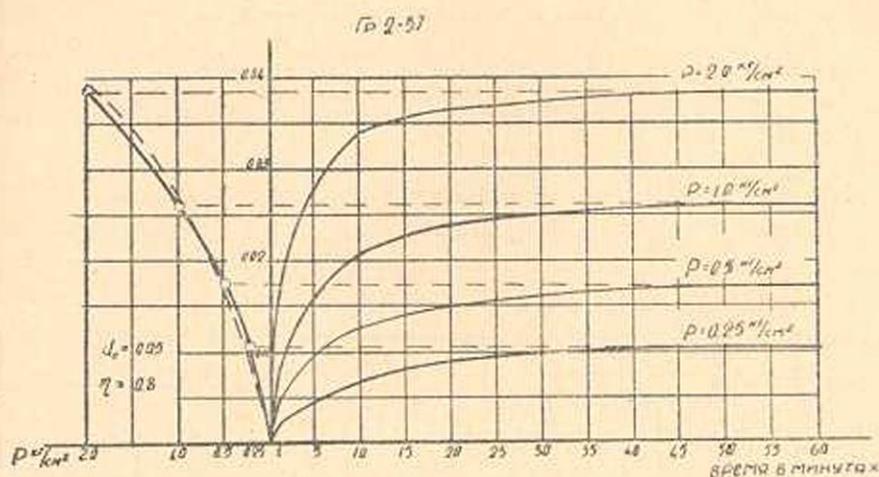
Учитывая то обстоятельство, что при определении деформации ползучести путем испытания предварительно уплотненных образцов деформации от предварительно уплотняющих нагрузок не успевали затухать в течение часа и суммировались с деформациями ползучести от основной нагрузки, во избежание искажения результатов опытов, эти деформации исключались из общих деформаций ползучести, путем специального определения их значений.

Рассмотрим результаты экспериментального исследования интересующей нас зависимости для двух грунтов за №№ 1—57 и 2—57* приведенных на графиках фиг. 9 и 10.

В таблице 3 приведены осредненные значения основных физических свойств исследованных серий образцов-близнецов.

Таблица 3

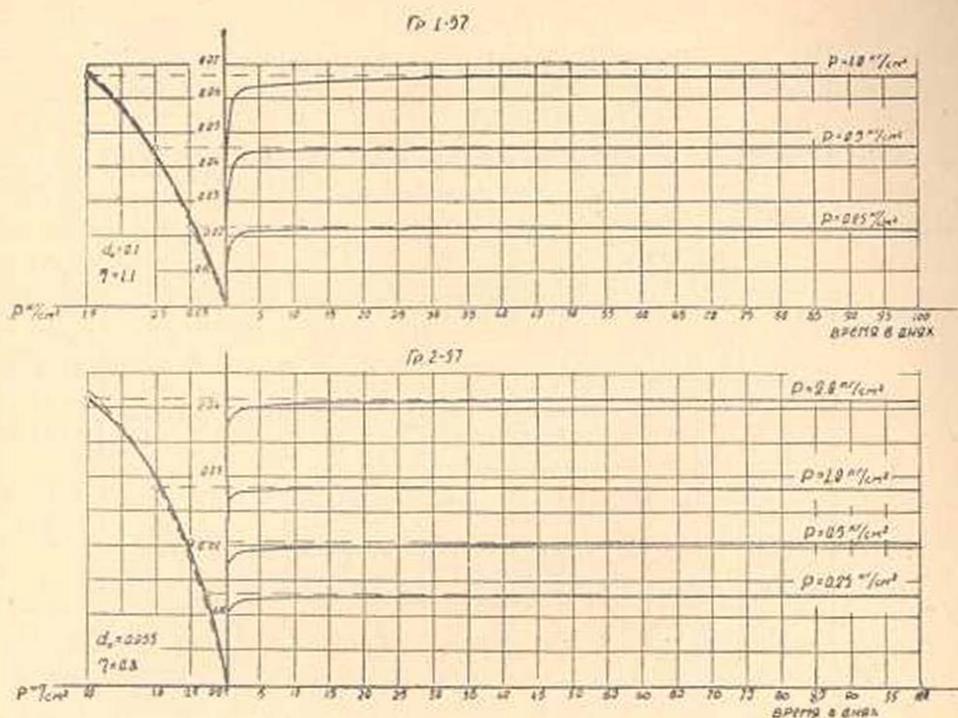
№№ п/п	Лаб. № грунта	Удельный вес в г/см ³	Объемный вес в г/см ³	Влажность в %/о/о	Коэффициент пористости
1	1-57	2,64	1,75	38,7	1,10
2	2-57	2,66	1,80	34,86	1,00



Фиг. 9.

На правых половинах графиков фиг. 9 и 10 приведены кривые ползучести, определенные путем испытания предварительно уплотненных образцов-близнецов нагрузками 0,25, 0,5, 0,75, 1,0 и 2,0 kg/cm^2 . На этих графиках по оси абсцисс отложено время, а по оси ординат—деформация ползучести, выраженная в мм на 1 мм [20].

На основании семейства кривых ползучести построены кривые зависимости между напряжениями и деформациями ползучести, которые показаны на левых половинах указанных графиков, где по оси



Фиг. 10.

абсциссе отложены напряжения в кг/см^2 , а по оси ординат—деформации ползучести в мм на 1 мм .

Из рассмотрения указанных кривых следует, что между деформациями ползучести грунтов и напряжениями нет линейной зависимости. Следовательно, при сжатии грунтов нарушенной структуры, в условиях отсутствия бокового расширения следует пользоваться нелинейной теорией ползучести.

Сделанный вывод справедлив как для предварительно-уплотненных, так и предварительно-неуплотненных грунтов нарушенной структуры [20].

Ввиду отсутствия линейной зависимости между напряжениями и деформациями ползучести, для получения кривой ползучести при любом напряжении необходимо ординаты кривой при единичном напряжении умножить на некоторый множитель, являющийся функцией напряжений $F(P)$ [21].

Обработка многочисленных экспериментов показала, что для исследуемого нами случая функция напряжений $F(P)$ может быть аналитически приближенно выражена экспоненциальной зависимостью вида

$$F(P) = d_0 (1 - e^{-\eta P})$$

где d_0 и η —параметры, подбираемые по результатам экспериментов, P —напряжение, e —основание натуральных логарифмов.

На левых половинах графиков фиг. 9 и 10 пунктирными линиями показаны теоретические кривые, которые построены по выражению (2) с соответствующим подбором параметров d_0 и τ . Значения параметров d_0 и τ приведены на графиках. Кривые построенные по выражению (2), дают хорошее совпадение с данными опыта.

Следует отметить, что при малых нагрузках порядка 0,5—1,0 кг/см² интересующую нас зависимость с достаточной точностью можно выразить линейным законом.

Исследование закона наложения для деформации ползучести грунта

Рассмотрим последнюю из основных предпосылок теории упруго-ползучего тела [12, 13], закон наложения для деформации ползучести грунта.

В отличие от теории „старения“ Я. В. Столярова, С. Е. Фрейфельда и др., в теории упруго-ползучего тела [12, 13] деформации ползучести при переменном во времени напряжении определяются не на основании гипотезы „старения“, а в соответствии с принципом наложения [22].

Принцип наложения П. И. Васильев [22] сформулировал следующим образом: „суммарная деформация ползучести при переменном напряжении может быть найдена как сумма деформаций ползучести, вызванных соответствующими приращениями напряжений“.

Т. е. закон наложения в теории упруго-ползучего тела применяется для перехода от деформаций ползучести, определенных при постоянных напряжениях, к деформациям ползучести при переменных напряжениях.

Закон наложения для деформаций ползучести непосредственно вытекает из основного интегрального уравнения теории упруго-ползучего тела [13], которое соответствует непрерывному росту напряжений и при линейной ползучести выражается зависимостью:

$$l(t) = \frac{P(t)}{E(t)} - \int_0^t P(\tau) \frac{\partial \delta(t, \tau)}{\partial \tau} dt$$

или

$$l(t) = \frac{P(t)}{F(t)} - \int_0^t P(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} + C(t, \tau) \right] d\tau \quad (3)$$

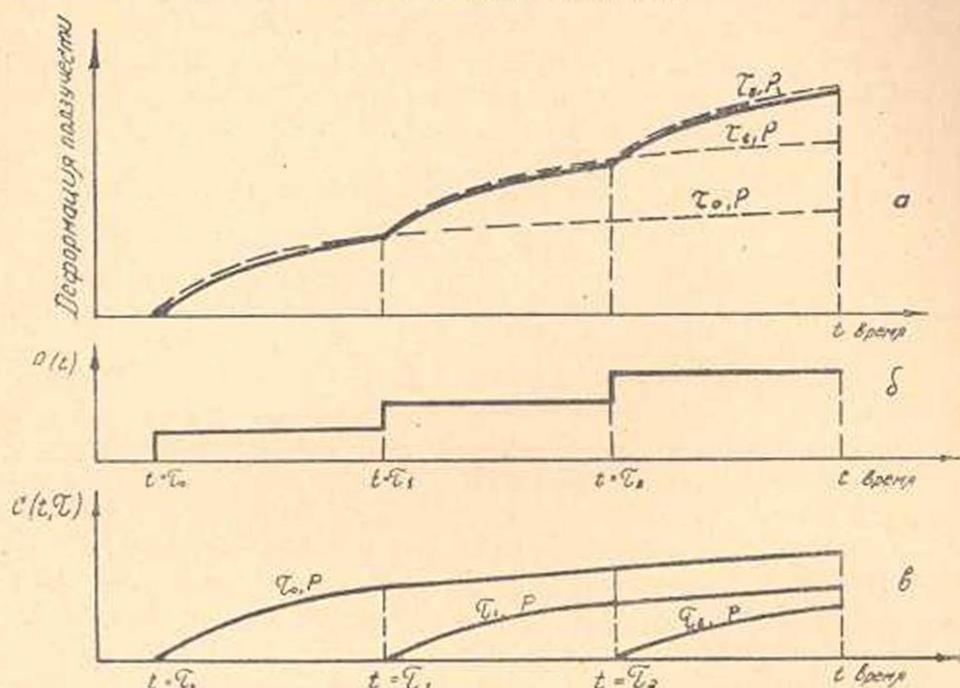
где E —модуль мгновенной деформации,

P —напряжение,

$C(t, \tau)$ —мера ползучести.

Если, для простоты, непрерывный рост напряжений, для материала обладающего свойством старения, заменить ступенчатым нагружением, т. е. в момент времени τ_0 приложено напряжение P_0 , в

момент времени τ_1 приложено напряжение P_1 , в момент времени τ_2 приложено напряжение P_2 и т. д., то при линейной и нелинейной ползучести закон наложения для деформации ползучести будет выражаться соответственно выражениями (4) и (5):



Фиг. 11.

$$l_n(t) = P_0(\tau_0) C(t, \tau_0) + P_1(\tau_1) C(t, \tau_1) + P_2(\tau_2) C(t, \tau_2) + \dots + P_n(\tau_n) C(t, \tau_n); \quad (4)$$

$$l_n(t) = F[P_0(\tau_0)] C(t, \tau_0) + F[P_1(\tau_1)] C(t, \tau_1) + F[P_2(\tau_2)] C(t, \tau_2) + \dots + F[P_n(\tau_n)] C(t, \tau_n); \quad (5)$$

где:

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) [1 - e^{\gamma(t-\tau)}]; \quad (6)$$

$$\varphi(\tau) = C_0 + \frac{A_1}{\tau}. \quad (7)$$

$F[P]$ —функция напряжений, определяемая из экспериментов, имеющая вид (2);

$\varphi(\tau)$ —предельная мера ползучести;

P_n —приращение напряжений;

τ —момент приложения нагрузки;

t —момент времени, для которого определяется деформация;

C_0 , A_1 и γ —параметры.

Из выражений (4) и (5) следует, что деформация ползучести от ступенчатого нагружения $l_n(t)$ к моменту времени t (на фиг. 11а показана сплошной линией) может быть определена суммированием

деформаций ползучести от приращений напряжений с учетом старения материала к моменту приложения их (фиг. 11в), т. е. для проверки закона наложения необходимо сопоставить кривую деформации ползучести от ступенчатого нагружения с суммой кривых деформаций ползучести от приращения напряжений, определенных на образцах, обладающих такими физико-механическими свойствами, какими обладает ступенчато-загруженный образец в моменты приложения ступеней нагрузок.

Для выполнения указанной проверки, в случае нарастания нагрузок равными ступенями P , необходимо на графике деформации ползучести от ступенчатого нагружения (фиг. 11а, сплошная линия) построить кривую ползучести от нагрузки P , приложенной к грунту в возрасте $t = \tau_0$ до конца исследуемого отрезка времени t (на фиг. 11а и 11в кривая τ_0, P). На эту кривую, начиная с момента приложения второй ступени нагрузки, когда ступенчато-загруженный образец обладает возрастом $t = \tau_1$, необходимо наложить кривую деформации ползучести, определенной в возрасте $t = \tau_1$ (на фиг. 11а и 11в, кривая τ_1, P), до момента времени t , и т. д.

Из вышесказанного следует, что для выполнения проверки закона наложения для деформаций ползучести грунта, обладающего свойством старения, необходимо экспериментально определить кривые деформации ползучести, соответствующие его разным возрастам к началу нагружения (фиг. 11в), знать закон его „старения“.

Выше мы уже говорили, что, как бетон, так и грунт способны менять свои физико-механические свойства. Способность грунта изменять свои физико-механические свойства под суммарным воздействием ряда факторов, по аналогии со старением бетона, названа нами „старением“ грунта. При этом необходимо иметь в виду то обстоятельство, что в старении бетона основную роль играют его внутренние физико-химические процессы, протекающие в течение времени, тогда как „старение“ грунта, помимо указанного выше фактора, обусловлено еще и уплотнением.

Следовательно, при экспериментальном исследовании деформаций ползучести грунтов, соответствующих их разным „возрастам“, необходимо одновременно считаться как с фактором внутренних физико-химических процессов, так и фактором уплотнения. Поэтому для экспериментального определения кривых деформаций ползучести мы пользовались [15] методикой, несколько отличной от методики определения кривых деформаций бетона в его разных возрастах к моменту нагружения.

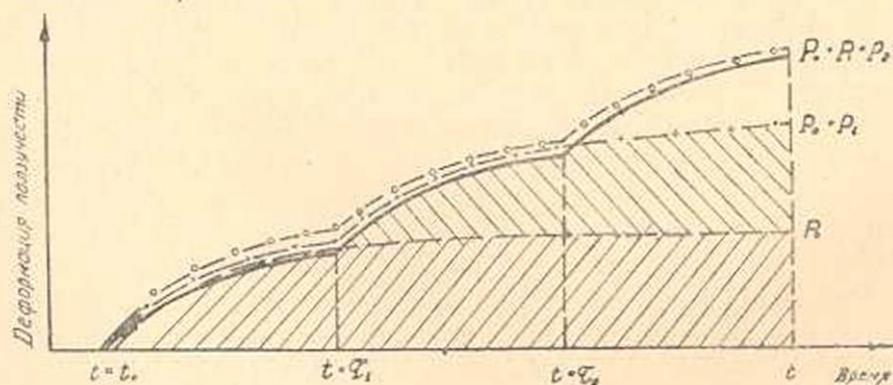
Как уже говорили, для выполнения проверки закона наложения необходимо, чтобы между физико-механическими свойствами образцов грунта, подвергавшихся испытанию в его разных возрастах, и физико-механическими свойствами ступенчато-нагруженного образца в моменты приложения нагрузок было полное соответствие.

Для достижения указанного выше соответствия физико-механических свойств недостаточно приготовить образец грунта с физическими свойствами (пористость, влажность), соответствующими этим свойствам ступенчато-нагруженного образца в момент приложения какой-либо ступени нагрузки, необходимо также, чтобы структуры их соответствовали друг другу, так как в течение времени имеет место упрочнение грунта [19], в результате проявления сцепления, упрочнения [4] за счет протекания внутренних физико-химических процессов, которое в свою очередь зависит как от продолжительности загрузки, так и от величины нагрузки.

Следовательно, мы полностью достигаем своей цели только тогда, когда параллельно с испытанием образца на ступенчатое нагружение другие образцы-близнецы, обладающие одинаковыми с ним физико-механическими свойствами к началу нагружения, будут доведены до интересующего нас „возраста“ путем уплотнения в течение времени точно так, как был уплотнен ступенчато-нагруженный образец при достижении им какого-либо „возраста“.

Указанная методика подготовки образцов грунта отличается от методики подготовки образцов бетона тем, что, если для достижения какого-либо возраста образцы бетона выдерживаются в течение определенного времени, то образцы грунта, помимо выдерживания в течение времени, подвергаются и уплотнению.

Порядок уплотнения образцов-близнецов грунта и определение деформации ползучести в разных возрастах к моменту нагружения приведены на фиг. 12.



Фиг. 12.

В соответствии с вышесказанным, для испытания образца-близнеца в „возрасте“ $t = \tau_0$ (фиг. 12) достаточно его загрузить нагрузкой P_0 в указанном возрасте и выдержать под нагрузкой до момента времени t , для которого определяется деформация (показана пунктиром). Для испытания образца в „возрасте“ $t = \tau_1$ второй образец-близнец в „возрасте“ $t = \tau_0$ загружается нагрузкой P_0 и, после достижения им возраста $t = \tau_1$, с выдерживанием под этой нагрузкой

в интервале времени $\tau_1 - \tau_0$ загружается нагрузкой P_1 и выдерживается до момента времени t (показана пунктирной линией с крестиками). Наконец для испытания третьего образца-близнеца в „возрасте“ $t = \tau_2$ он сперва уплотняется нагрузкой P_0 в течение времени от $t = \tau_0$ до $t = \tau_1$, в момент времени $t = \tau_1$ загружается нагрузкой P_1 и, после достижения им „возраста“ $t = \tau_2$, загружается P_2 и выдерживается до момента времени t (показана пунктирной линией с кружечками). На этом же графике сплошной линией показана кривая деформации ползучести, определенная ступенчатым нагружением образца нагрузками P_0 , P_1 и P_2 в моменты времени $t = \tau_0$, $t = \tau_1$ и $t = \tau_2$.

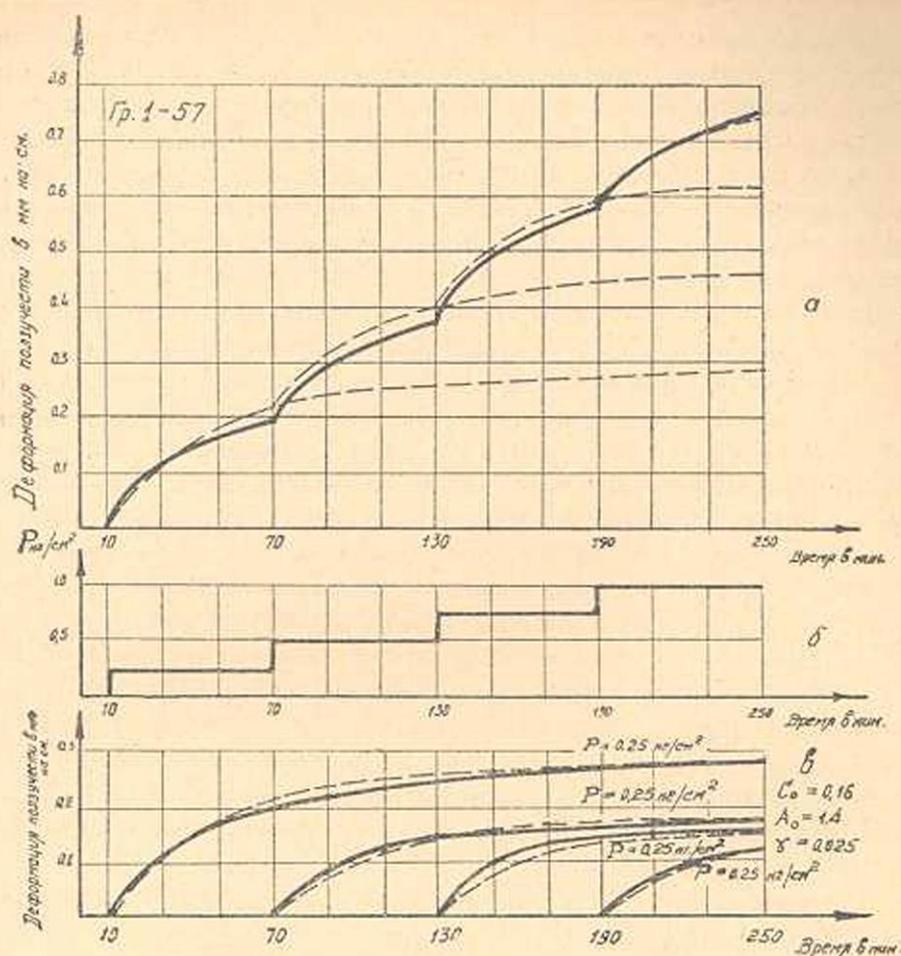
Кривая деформации ползучести, соответствующая „возрасту“ $t = \tau_0$ к началу нагружения заштрихована восходящими линиями, а деформации ползучести, соответствующие „возрасту“ $t = \tau_1$, заштрихованы нисходящими линиями. Последние определялись как разность ординат между кривыми ползучести от нагрузок $(P_0 + P_1)$ и P_0 .

Из сказанного непосредственно следует, что, если кривые деформации ползучести, соответствующие разным „возрастам“ грунта, определяются указанным выше методом, то ясно, что расхождение между кривой, построенной путем суммирования элементарных приращений деформации от приращений напряжений, и кривой, определенной ступенчатым нагружением образца, будет в пределах точности параллельных испытаний образцов-близнецов. А это значит, что при сжатии глинистого грунта нарушенной структуры в условиях невозможности бокового расширения закон наложения для деформации ползучести справедлив.

Таким образом, для осуществления перехода от деформации ползучести постоянных нагрузок к деформациям ползучести при переменных нагрузках по зависимостям теории упруго-ползучего тела (3), (4) и (5), необходимо закон изменения кривых деформации ползучести грунта при его „старении“ выразить аналитически по зависимостям (6) и (7) теории упруго-ползучего тела и экспериментальную кривую деформации ползучести от ступенчатого нагружения сопоставить с суммой элементарных приращений деформаций от приращений напряжений, определенных аналитически, на основании семейства экспериментальных кривых ползучести.

В отношении методики экспериментального определения закона изменения кривых деформации ползучести грунта в зависимости от его „возраста“ следует добавить, что наряду с точной приведенной выше методикой, когда для определения указанного закона необходимо испытать несколько образцов-близнецов, можно воспользоваться упрощенной методикой [24], при помощи которой этот закон, с достаточной точностью, можно определить испытанием одного образца.

Остается показать, что семейство кривых ползучести старения грунтов нарушенной структуры (фиг. 11в) можно описать аналитическим выражением изменения во времени меры ползучести (6) теории упруго-ползучего тела [12, 13].

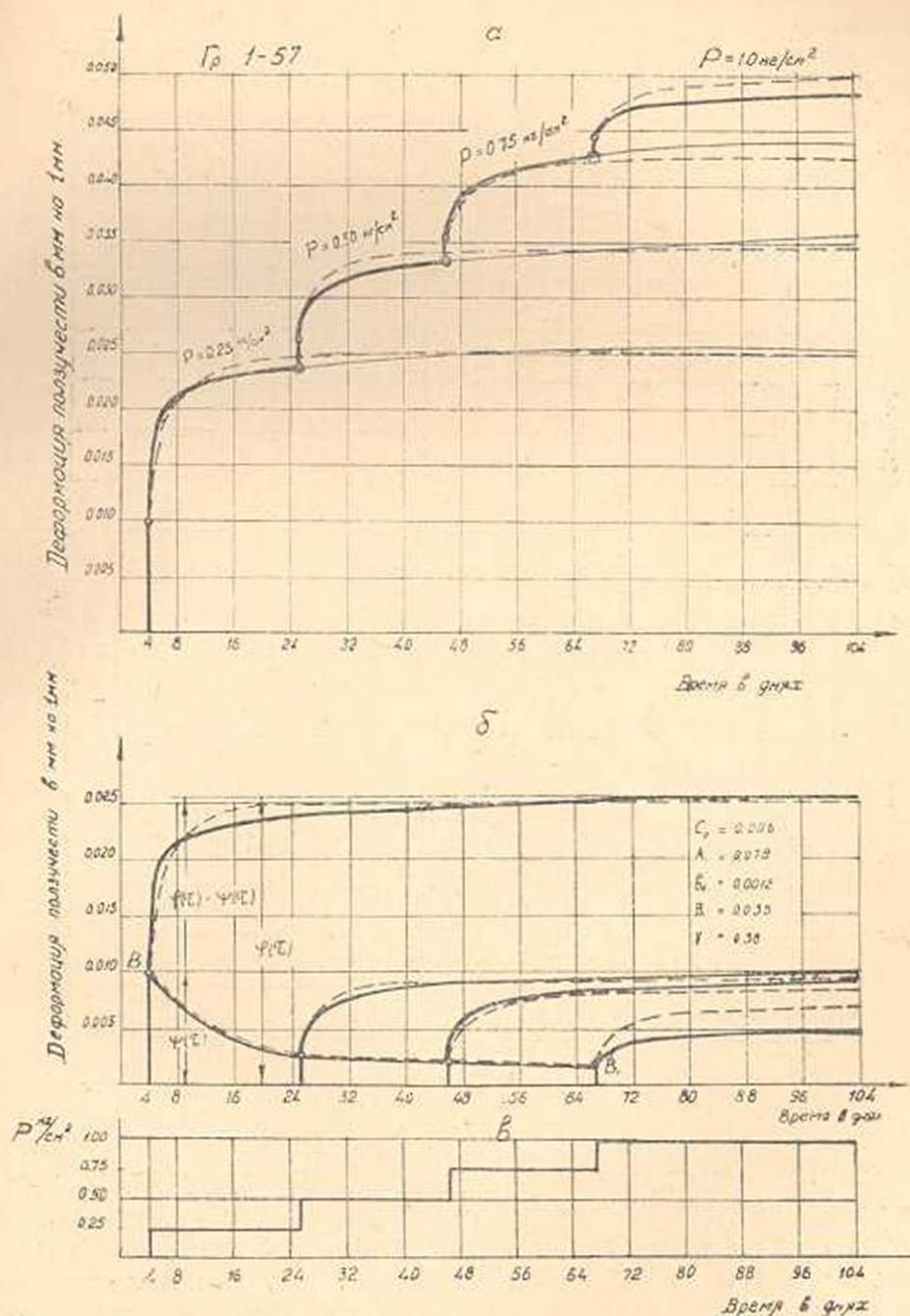


Фиг. 13.

На графике фиг. 13в приведен пример описания семейства кривых ползучести и старения, определенных вышеизложенным способом, при сжатии шенгавитской глины (№ 1—57) нарушенной структуры в условиях невозможности бокового расширения при продолжительности нагружения образцов от 60 до 240 минут, а на фиг. 14б и 15б описание семейств кривых старения грунтов 1—57 и 2—57 при продолжительности нагружения образцов от 37 до 116 дней.

На фиг. 13в показаны теоретические кривые, построенные на основании зависимостей (6) и (7), при соответствующем подборе параметров C_0 , A_0 и γ , значение которых приведено на графике. Из графика фиг. 12в следует, что расхождение между кривыми ползучести и кривыми, построенными на основании указанных выше зависимостей, небольшое.

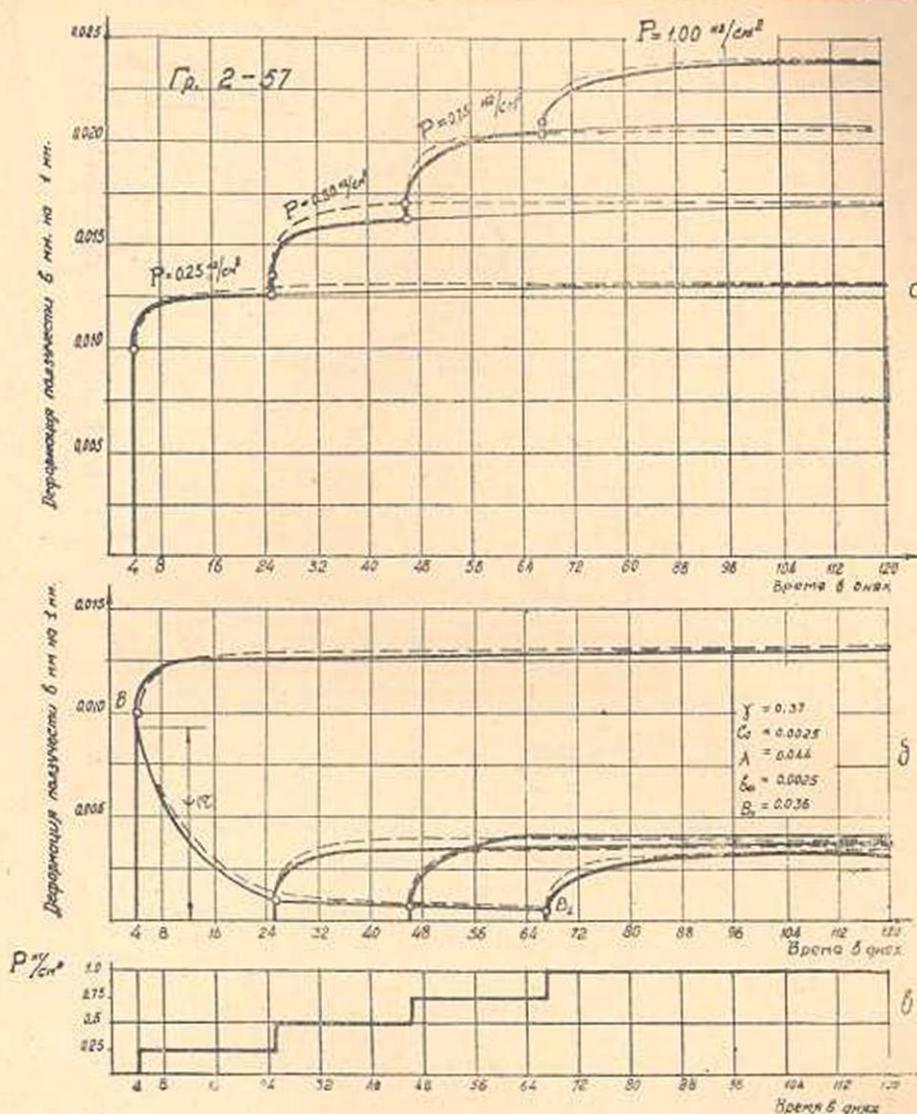
На основании приведенного здесь примера и других выполненных нами многочисленных опытов мы пришли к заключению, что выражения закона изменения во времени меры ползучести (6) и (7) в таком виде достаточно точно описывают семейства кривых ползу-



Фиг. 14.

части связных грунтов нарушенной структуры при сравнительно непродолжительных испытаниях их.

Несколько иначе обстоит дело с описанием указанного семейства кривых при длительных выдерживаниях образцов грунта под каждой ступенью нагрузки (фиг. 14б и 156).



Фиг. 15.

Как показывают эксперименты при длительных испытаниях, кривые ползучести грунта, определенные в разных его „возрастах“, по виду отличаются друг от друга, т. е. они не являются подобными. Такое же явление наблюдается и в бетонах, где, как и в грунтах, кривые ползучести, определенные в разных их возрастах, не являются аффинно-подобными [23].

Следовательно, основная зависимость упруго-ползучего тела (6), которая учитывает как влияние длительности нагружения, так и возраст материала и выведена из условия подобия кривых ползучести, не вполне соответствует действительному процессу старения бетона [23] и грунтов.

Изменение характера кривых ползучести грунта при переходе от одного возраста к другому, можно объяснить как его уплотнением, так и проявлением сцепления упрочнения в течение времени при участии внешних уплотняющих нагрузок.

Следует обратить внимание на то обстоятельство, что в грунтах, как и в бетоне [23], у образцов нагруженных в раннем возрасте в начале наблюдается быстрый рост деформации ползучести, тогда как для образцов, нагруженных в более „старом“ возрасте, рост деформации ползучести во времени в начале нагружения протекает более спокойно (фиг. 14 и 15).

В целях описания семейства кривых ползучести грунтов при длительных испытаниях их, выражение (6) мы несколько видоизменили и придали ему следующий вид [24]:

$$C(t, \tau) = \psi(\tau) + [\varphi(\tau) - \psi(\tau)] [1 - e^{-\lambda(t-\tau)}] \quad (8)$$

где

$$\varphi(\tau) = b_0 + \frac{B_1}{\tau} \quad (9)$$

$\psi(\tau)$ — деформация ползучести, которая соответствует первому часу после момента нагружения; b_0 и B_1 — параметры, которые подбираются на основании экспериментов.

На графиках фиг. 136 и 146 пунктирными линиями показаны кривые деформации ползучести, построенные на основании выражений (7), (8) и (9) при соответствующем подборе параметров C_0 , A_1 , b_0 , B_1 и λ , значения которых приведены на тех же графиках. На этих же графиках кривыми BB_1 показан закон изменения функции $\psi(\tau)$. Сплошной линией показана экспериментальная кривая, а пунктирной — кривая, построенная по выражению (9).

Из приведенных графиков следует, что выражения (7), (8) и (9) достаточно точно описывают семейства кривых ползучести грунтов нарушенной структуры при их сжатии в условиях отсутствия бокового расширения.

Если теперь в соответствии с выражением (4) сопоставить кривые деформации ползучести грунта (фиг. 13а, 14а и 15а), определенные путем их ступенчатого нагружения нагрузками $0,25 \text{ кг/см}^2$ (сплошная линия), с суммой деформаций ползучести от приращений напряжений, определенных аналитически (показаны пунктирной линией) по выражениям (6), (7), (8) и (9) на основании семейства экспериментальных кривых ползучести (фиг. 13а, 14а и 15а), нетрудно заметить, что расхождение между ними небольшое.

Следовательно, зная аналитическое выражение закона изменения кривых деформации ползучести грунта в зависимости от „возраста“ его, можно, при помощи зависимостей (3), (4) и (5), осуществить переход от деформаций ползучести, определенных при постоянных нагрузках, к деформациям ползучести при переменных нагрузках.

В заключение коснемся вопроса влияния продолжительности загрузки на процесс ползучести связных грунтов.

Известно [24], что, при последовательном нагружении образцов грунта равными ступенями нагрузок, через интервалы времени 60 минут, при переходе от одной ступени нагрузки к другой, по мере его старения, имеет место закономерное уменьшение деформации ползучести. Известно также, что при более длительном выдерживании образца по ступеням нагрузок (от 10 до 20 дней) имеет место нарушение изложенной выше закономерности, т. е. не всегда предельное значение деформации ползучести от данной ступени нагрузки меньше, чем деформация ползучести от предыдущей ступени нагрузки.

Нарушение указанной выше закономерности объяснялось нами [19] тем, что за время выдерживания образца грунта под какой-либо ступенью нагрузки имеет место его некоторое упрочнение за счет протекания внутренних физико-химических процессов (за счет проявления сцепления упрочнения) и что, если при последующем нагружении образца силы сцепления упрочнения будут превышать значения внешней нагрузки, будет иметь место уменьшение деформации ползучести по сравнению с предыдущей ступенью нагрузки, в противном случае будет иметь место разрушение ранее образованной структуры и увеличение деформации ползучести.

Если теперь рассмотрим семейство кривых ползучести грунтов, приведенных на графиках фиг. 13в, 14б, 15б, нетрудно заметить, что вышеизложенное полностью относится и к ним. А именно: в случае непродолжительных испытаний, когда грунт не успевает достаточно упрочниться за счет внутренних физико-химических процессов, т. е. структурные связи между частицами и агрегатами грунта еще слабы, а старение его в основном обусловлено его уплотнением, наблюдается уменьшение деформации ползучести по мере испытания образцов в более старом возрасте (фиг. 13в). В случае продолжительных испытаний, когда старение грунта обусловлено как фактором уплотнения, так и фактором внутренних физико-химических процессов, наблюдается нарушение указанной выше закономерности (фиг. 15б), тем, что предельное значение деформации ползучести, определенное в возрасте $\tau = 25$ дней, меньше, чем предельное значение деформации ползучести, определенное в возрасте $\tau = 46$ дней к моменту загрузки. Увеличение деформации ползучести при испытании образца грунта в возрасте 46 дней по сравнению с испытанием образца в возрасте 25 дней объясняется разрушением ранее образованной структуры.

Что же касается семейства кривых ползучести, приведенного на фиг. 14б, замечаем, что здесь, как и в случае непродолжительных испытаний образцов, при переходе от молодого „возраста“ к более старому „возрасту“ имеет место уменьшение деформации ползучести. Указанное поведение данного грунта можно объяснить небольшим значением силы сцепления, которая не оказывает существенного влияния на ход процесса деформирования [19].

Резюмируя вышесказанное, приходим к выводу, что связный грунт нарушенной структуры, при сжатии в условиях отсутствия бокового расширения, ведет себя в соответствии с основными предпосылками теории упруго-ползучего тела Г. Н. Маслова—Н. Х. Арутюняна [12, 13] и что можно к нему применить указанную теорию при их сжатии в отмеченных выше условиях.

Автор выражает глубокую благодарность члену-корреспонденту АН СССР В. А. Флорину и академику АН АрмССР Н. Х. Арутюняну, ценные указания которых были учтены при выполнении настоящей работы.

Институт математики и механики
АН Армянской ССР

Поступило 18 XII 1957

Ս. Ռ. ՄԷԼՅԱՆԸ

ԿԱՊԱԿՑՎԱԾ ԳՐՈՒՆՏԻ ՍՈՂՔԻ ՄԱՍԻՆ՝ ԿՈՂԱՅԻՆ ԸՆԴԱՐՁԱԿՄԱՆ ԲԱՑԱԿԱՅՈՒԹՅԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ ՍԵՂՄՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոդվածում բերված են խախտված սարուկտուրա ունեցող կապակցված գրունտների ղեֆորմատիվ հատկությունների ուսումնասիրությունները սեղմման ժամանակ, երբ բացակայում է կողային ընդարձակման հնարավորությունը, նպատակ ունենալով ստուգել Մալով-Հարությունյանի սողքի տեսության կիրառման հնարավորությունը նրանց նկատմամբ՝ փորձարկման նշված պայմանների համար:

Հիշյալ նպատակի համար ուսումնասիրված են՝ 1) ակնթարթային ղեֆորմացիաների և լարումների միջև եղած առնչությունը, 2) ակնթարթային մոդուլի ժամանակի ընթացքում փոփոխման օրինաչափությունը, երբ արտաքին բևեռ հաստատուն չէ, այլ աճում է ժամանակի ընթացքում հալատար աստիճաններով, 3) լարումների և սողքի ղեֆորմացիաների միջև եղած առնչությունը և 4) սողքի ղեֆորմացիաների համար վերադրման օրենքի կիրառման հնարավորությունը:

Նշված ուսումնասիրությունները կատարելու համար օգտագործված են կապակցված գրունտների ութ արատեսակները, որոնք փորձարկման են ենթարկվել Գ. Ի. Տեր-Ստեփանյանի և հոդվածի հեղինակի մշակած կոմպրեսիոն սարքերում:

Կատարված փորձերի հիման վրա պարզված է, որ ակնթարթային ղեֆորմացիաների և լարումների միջև եղած առնչությունը բավականին ճշտությամբ արտահայտվում է գծային օրենքով, իսկ ակնթարթային մոդուլի ժամանակի ընթացքում փոփոխման կապը արտաքին բևեռի աստիճանաձև փոփոխման ղեղքում կարելի է ներկայացնել սողքի տեսության (1) արտահայտությամբ [13]:

Ուսումնասիրություններից պարզված է, որ սողքի ղեֆորմացիաների և լարումների միջև եղած առնչությունը արտահայտվում է ոչ գծային օրենք-

քով: Սակայն, փոքր լարումների դեպքում ($0,25, 0,5$ կգ/սմ²), թուլաստիկ ճշտությամբ այն կարելի է արտահայտել դժային օրենքով:

Պարզված է նաև, որ պրակտիկայի համար թուլաստիկ ճշտության սահմաններում, խախտված սարսկաուրա ունեցող գրունտների սուղքի դեֆորմացիաների նկատմամբ կիրառելի է վերադրման օրենքը:

Ամփոփելով վերոհիշյալը, հեղինակը հանգել է այն եզրակացության, որ վերևում նշված պարամետրների համար, խախտված սարսկաուրա ունեցող կապակցված գրունտների սեղման դեպքում, նրանց նկատմամբ կիրառելի է Մասլով-Հարությունյանի սուղքի տեսությունը:

ЛИТЕРАТУРА

1. Флорин В. А. Теория уплотнения земляных масс. Стройиздат, М.—Л., 1948.
2. Герсеванов Н. М. Основы динамики грунтовой массы. Стройиздат, 1937.
3. Герсеванов Н. М. и Польшин Д. Е. Теоретические основы механики грунтов и их практические применения. Стройиздат, М., 1918.
4. Денисов Н. Я. О природе деформации глинистых пород. Изд. Минеречфлота, М., 1951.
5. Флорин В. А. Некоторые вопросы экспериментальных и теоретических исследований уплотнения земляной среды. В кн. Новое в области оснований гидротехнических сооружений. Л., 1953.
6. Денисов Н. Я. и Ребиндер П. А. О коллоидно-химической природе связности глинистых пород. ДАН СССР, том 54, № 6, 1946.
7. Дерягин Б. В. Расклинивающее действие жидких пленок и его практическое значение. «Природа», № 2, 1943.
8. Флорин В. А. Одномерная задача уплотнения сжимаемой пористой ползучей среды. Изв. АН СССР, ОТН, № 6, 1953.
9. Флорин В. А. Одномерная задача уплотнения земляной среды с учетом старения, нелинейной ползучести и разрушения структуры. Изв. АН СССР, ОТН, № 9, 1953.
10. Покровский, О физических принципах расчета деформации грунтов. В кн. Материалы Всесоюзного совещания по основаниям и фундаментам 1935. Госстройиздат, М.—Л., 1939.
11. Маслов Н. Н. Условия устойчивости склонов и откогов в гидроэнергетическом строительстве. Госэнергоиздат, М.—Л., 1955.
12. Маслов Г. Н. Термическое напряженное состояние бетонных массивов при учете ползучести бетона. Изв. ВНИИГ, т. 28, 1940.
13. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. Изд. технико-теоретической ант., М.—Л., 1952.
14. Тер-Степанян Г. И. Комфилтметр—прибор для компрессионных и фильтрационных испытаний грунтов. Изв. АН АрмССР, серия ФМЕТ наук. т. IX, № 4, 1956.
15. Месчян С. Р. К вопросу о законе наложения для деформации ползучести связных грунтов при сжатии. ДАН АрмССР, т. XXV, № 4, 1957.
16. Месчян С. Р. К вопросу экспериментального определения упругих характеристик связных грунтов при сжатии. ДАН АрмССР, т. XXIII, № 3, 1956.
17. Флорин В. А. Вопросы развития механики грунтов. В кн. Совещание о путях развития механики грунтов. Изд. ВНИГОС, Лен. отд., Л., 1950.
18. Черкасов И. И. Влияние метода установки штампа на результаты испытания грунта пробной нагрузкой. ДАН СССР, т. XXXII, № 3, 1952.
19. Месчян С. Р. К вопросу о влиянии продолжительности нагружения на ползучесть связных грунтов нарушенной структуры. ДАН АрмССР, т. XXIII, № 2, 1956.
20. Месчян С. Р. Экспериментальное исследование зависимости между напряжениями и деформациями ползучести связных грунтов. ДАН АрмССР, т. XXIV, № 2, 1957.

21. *Васильев П. И.* Связь между напряжениями и деформациями в бетоне при сжатии с учетом времени. Изв. ВНИИГ, т. 45, 1951.
22. *Васильев П. И.* Некоторые вопросы пластических деформаций бетона. Изв. ВНИИГ, т. 49, 1953.
23. *Васильев П. И.* Влияние старения бетона на вид кривых ползучести. Изв. ВНИИГ, т. 57, 1957.
24. *Месчин С. Р.* К вопросу об описании ползучести связанных грунтов нарушенной структуры. ДАН АрмССР, т. XXI, № 2, 1955.