

С. Р. Месчян

О влиянии плотности и структурной прочности грунта на зависимость между напряжениями и деформациями

В целях уточнения теории фильтрационной консолидации с учетом влияния сопротивления скелета грунта на процесс уплотнения В. А. Флориным было введено понятие ползучести скелета. Для учета деформации ползучести скелета грунта В. А. Флорин пользовался теорией упруго-ползучего тела Г. Н. Маслова—Н. Х. Арутюняна. Нами [1, 2] была экспериментально обоснована применимость теории упруго-ползучего тела для описания деформации ползучести грунта. В целях дальнейшего уточнения и определения границы применимости указанной теории ползучести нами выполнена настоящая работа.*

Для создания теории ползучести грунтов или же приспособления существующих теорий ползучести к грунтам необходимо знать: 1) зависимость между напряжениями и мгновенными деформациями; 2) зависимость между напряжениями и деформациями ползучести.

Нами было показано [1, 2], что зависимость между напряжениями и мгновенными деформациями с достаточной точностью выражается линейным законом, зависимость же между напряжениями и деформациями ползучести при напряжениях $P \leq 0,5 \div 1,0 \text{ кг/см}^2$ линейна, а при $P \geq 0,5 \div 1,0 \text{ кг/см}^2$ — нелинейна.

Указанные выводы соответствовали случаю испытания грунтов нарушенной структуры при влажности, близкой к их влажности при пределе текучести, случаю, когда грунты обладали высокой пористостью—влажностью и небольшой структурной прочностью к началу испытания.

Учитывая, что деформативные свойства глинистых грунтов зависят от множества факторов, в частности от их плотности, было необходимо не ограничиваться исследованием одного состояния („возраста“) грунта, а расширить эти исследования и рассмотреть вопрос влияния плотности и структурной прочности на указанные выше зависимости.

* Основные результаты доложены на Первом Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике в Москве в январе—феврале 1960 г.

Была исследована на сжатие глина нарушенной структуры при четырех значениях плотности к началу испытания. Ясно, что каждой плотности грунта соответствовала своя структурная прочность.

Основные данные о физических свойствах грунта сведены в таблицу № 1.

Таблица 1

Диб. № грунта	Наимено- вание	Удельный вес $\gamma/\text{см}^3$	Пределы пластичности		
			граница текучести	граница пластичности	число пластичности
4-57	Глина	2,70	41,2	23,2	18,0

Испытания проводились в условиях отсутствия бокового расширения в компрессионных приборах нашей конструкции [2]. Диаметр образцов—70 мм, высота—20 мм. Влажность грунта в момент заполнения колец соответствовала влажности грунта при пределе текучести.

Подготовки трех серий образцов с различными физико-механическими свойствами (плотность, влажность, объемный вес, структурная прочность) осуществлялась путем предварительного уплотнения нагрузками различной величины. В данном случае одна серия образцов уплотнялась нагрузками 0,25 кг/см², вторая—0,5 кг/см², третья—0,75 кг/см² в течение 3, 9 и 16 дней соответственно. Нагрузки прикладывались ступенями по 0,25 кг/см². В каждой серии испытывались 6—8 образцов.

Так как все образцы перед предварительным уплотнением имели одинаковую пористость, то пористость каждой серии образцов грунта к концу предварительного уплотнения определялась на компрессионной кривой величиной предварительно уплотняющей нагрузки.

Таким образом, состояние („возраст“) τ_i каждой серии образцов-близнецов определялось точкой на компрессионной кривой с уплотняющей нагрузкой P_i и коэффициентом пористости e_i .

Для определения зависимости между напряжениями и деформациями образцы грунта данной серии („возраста“) параллельно испытывались различными нагрузками. В приведенном здесь случае образцы грунта испытывались нагрузками 0,25; 0,5; 0,75 и 1,0 кг/см². Нагрузки к образцам прикладывались за предельно короткое время, без удара, на полную величину. Отсчеты брались сейчас же после приложения ($t \approx 0$) нагрузок, далее через 5, 10, 20 и 30 сек, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 30 и 60 мин и через каждые сутки. Испытание продолжалось с 8/III—1959 года по 14/VI—1960 года.

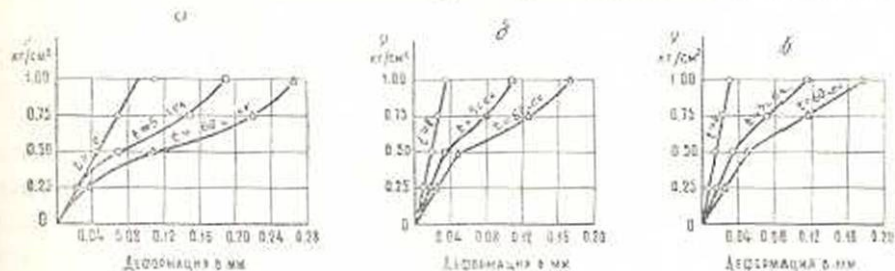
Как и прежде [1, 2], полная деформация грунта разбивалась на мгновенную деформацию и деформацию ползучести

$$I = I_{\text{мгн}} + I_{\text{полз}}(t). \quad (1)$$

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований для мгновенной деформации и деформации ползучести в отдельности.

На графиках фиг. 1 приведены кривые зависимости между мгновенными деформациями и напряжениями для всех трех состояний („возрастов“) τ_1 , τ_2 и τ_3 , а также кривые зависимости между напряжениями и полными деформациями для моментов времени 5 и 60 сек после начала загрузки.

Зависимость между напряжениями и мгновенными деформациями с достаточной точностью выражается линейным законом, что же касается кривых зависимости между напряжениями и полными дефор-



Фиг. 1.

мациями, то они по сравнению с моментом времени $t \approx 0$ претерпевают большие изменения. При τ_1 кривые зависимости $\epsilon = f(P)$ принимают форму буквы S с вогнутостью вниз до $P < 0,5 \text{ кг/см}^2$ и вогнутостью вверх при $P > 0,5 \text{ кг/см}^2$. В остальных двух случаях указанная зависимость при $P < 0,5 \text{ кг/см}^2$ имеет линейный характер, однако при $P > 0,5 \text{ кг/см}^2$ в случае τ_2 прямая переходит в кривую с вогнутостью вверх, а при τ_3 она подчиняется линейному закону, т. е. при τ_3 зависимость между напряжениями и деформациями можно аппроксимировать двумя прямыми с различными углами наклона к оси абсцисс с точкой перелома при $P = 0,5 \text{ кг/см}^2$.

Изменение формы кривой зависимости между напряжениями и деформациями в результате проявления явления ползучести зависит как от плотности, влажности и структурной прочности грунта, так и от величины степени нагрузки и длительности испытания.

Сравнивая приведенные на графиках фиг. 1а кривые зависимости $\epsilon = f(P)$ (состояние τ_1) с результатами наших прежних экспериментов [1, 2], можно заметить, что они несколько отличаются друг от друга при $P < 0,5 \text{ кг/см}^2$. Расхождения, которые имеют место при нагрузках $P < 0,5 \text{ кг/см}^2$, можно объяснить влиянием структурной прочности грунта на процесс деформирования. В рассматриваемом случае, ввиду несколько более прочных связей скелета грунта, чем в наших прежних экспериментах (длительность предварительного уплотнения нагрузками $0,25 \text{ кг/см}^2$ равна 3 суткам вместо 1 часа), перемещение структурных элементов и частиц грунта друг относительно друга происходит значительно труднее. Это приводит к уменьшению скорости деформирования при $P < 0,5 \text{ кг/см}^2$. При нагрузках $P > 0,5 \text{ кг/см}^2$ сравнительно слабые структурные связи не

оказывают влияния на ход деформирования и кривая зависимости между напряжениями и деформациями имеет обычную форму [3].

В состояниях τ_2 и τ_3 , когда серии образцов-близнецов обладают более высокими значениями плотности и структурной прочности, форма кривых зависимости между напряжениями и деформациями существенно отличается от той, которая была рассмотрена выше. В этом случае при нагрузках $P \leq 0,5 \text{ кг/см}^2$ указанная зависимость с достаточной точностью выражается линейным законом, т. е. в течение рассматриваемого интервала времени, скорость деформирования была прямо пропорциональна нагрузке, следовательно деформация ползучести происходила за счет вязкого перемещения структурных элементов друг относительно друга. При напряжениях $P > 0,5 \text{ кг/см}^2$ в состоянии τ_2 , ввиду лавинного разрушения структурного каркаса грунта, форма кривой $I = f(P)$ соответствует случаю испытания грунтов со слабыми структурными связями (относительно действующих напряжений), т. е. имеет обычную форму [1, 2], а в состоянии τ_3 , хотя в рассматриваемых интервалах нагрузок имеет место разрушение существующей структуры грунта, он переходит в такое новое состояние, где указанная зависимость опять остается линейной, но с другим, меньшим, углом наклона к оси абсцисс.

Уменьшение угла наклона к оси абсцисс говорит о разупрочнении грунта в процессе деформирования.

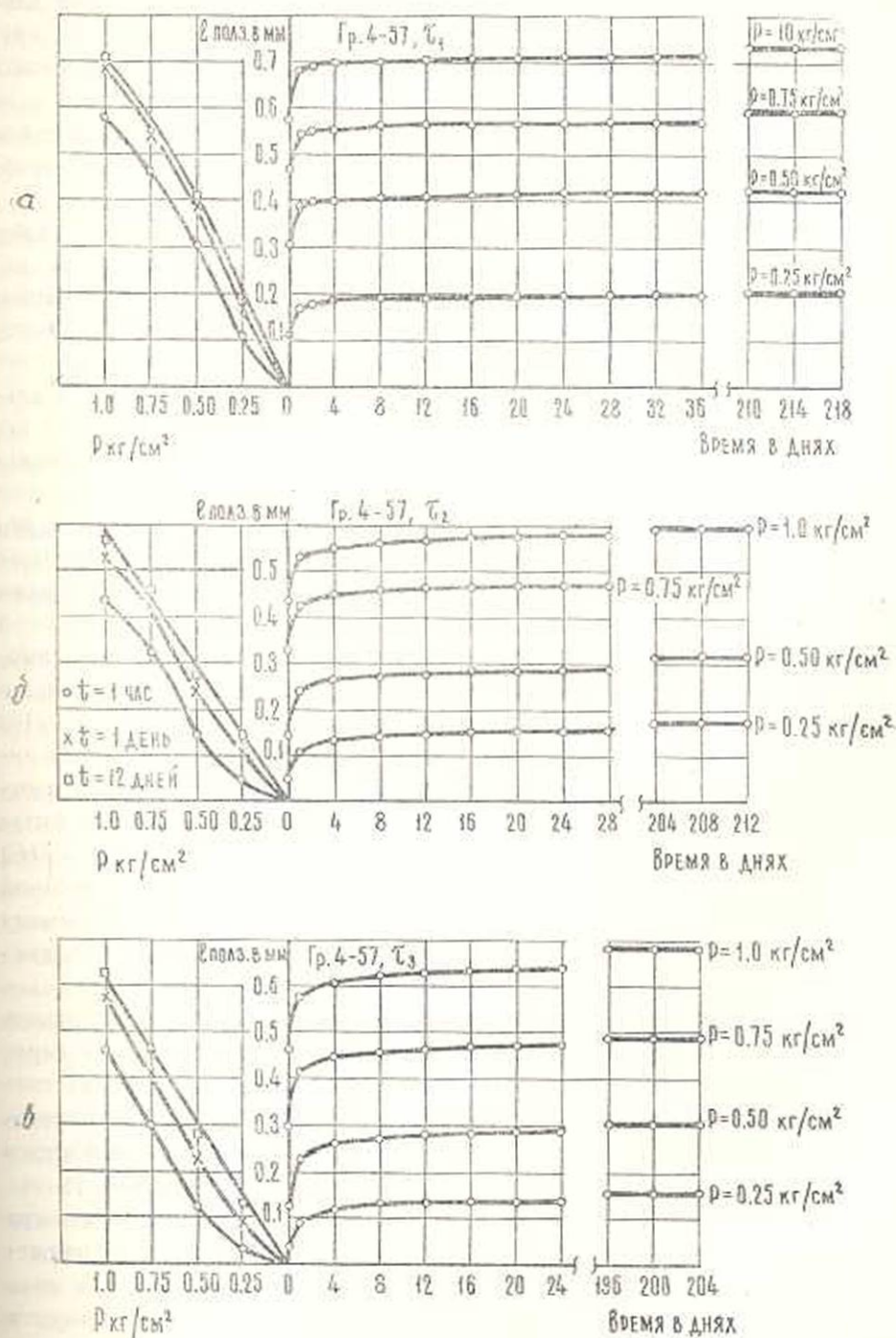
Рассмотрим результаты экспериментального исследования ползучести серии образцов, испытанных при трех значениях плотности, влажности и структурной прочности, а также зависимости между напряжениями и деформациями ползучести (фиг. 2).

На правых половинах фигур 2а, 2б и 2в приведены семейства кривых ползучести трех серий образцов испытанных в состояниях („возрастах“) τ_1 , τ_2 и τ_3 нагрузками 0,25; 0,5; 0,75 и 1,0 кг/см^2 , а на левых половинах этих же фигур — зависимости между напряжениями и деформациями ползучести при трех значениях длительности испытания: 1 час, 1 день и 12 дней. Как и прежде [4], деформации ползучести определялись путем исключения „мгновенных“ деформаций из общих.

Сравнение кривых зависимости между напряжениями и деформациями ползучести (фиг. 2) с кривыми зависимости $I = f(P)$ (фиг. 1) показывает, что:

1) в случае испытания серии образцов-близнецов с наименьшим значением плотности и структурной прочности к моменту загрузки (состояние τ_1) кривая $I_{\text{полз}} = f(P)$ сперва ($t = 1$ час) сохраняет прежнюю форму (фиг. 2а) и принимает вид вытянутой буквы S, а затем ($t = 12$ дн.) она принимает форму, характерную для грунтов со слабыми структурными связями. При этом начальный участок кривой с достаточной точностью аппроксимируется прямой линией;

2) в случае испытания серии образцов в состояниях τ_2 и τ_3 сперва (при $t = 1$ час и 1 день) нарушается прямолинейность участка кри-



Фиг. 2.

вой $l = f(P)$ при $P \leq 0,5 \text{ кг/см}^2$, а затем, по мере увеличения длительности испытания, она постепенно выпрямляется. При $t = 12$ суткам зависимость $l_{\text{полз}} = f(P)$ с достаточной точностью можно выразить линейным законом (фиг. 2).

Природу формоизменения кривых зависимости между напряжениями и деформациями можно объяснить теми же причинами, о которых было сказано выше, а именно:

а) При слабой структурной прочности испытываемых образцов, под действием сравнительно больших нагрузок, большая часть деформации происходит за короткое время с полным разрушением структурного каркаса, после чего грунт переходит в такое состояние, когда деформации протекают очень медленно, только за счет адсорбционных деформаций. Иначе говоря, большая часть потенциальной возможности деформирования грунта под данной нагрузкой исчерпывается за довольно короткое время. При сравнительно небольших значениях нагрузок ($0,25 - 0,5 \text{ кг/см}^2$), разрушение структурного каркаса происходит постепенно, медленно, поэтому деформация достигает максимума спустя определенное время. Ясно, что чем меньше величина нагрузки, тем большее время необходимо для достижения максимума деформации. Можно было полагать, что не исключена возможность влияния фактора фильтрации на изменение зависимости между напряжениями и деформациями в зависимости от длительности испытания. Однако, как показывают эксперименты [5, 6, 7] в самом начале процесса деформирования, в рассматриваемых нами интервалах времени ($t = 5$ и 60 сек), скорость деформации грунта в основном обусловлена ползучестью скелета и влиянием фактора фильтрации можно пренебречь. Что же касается зависимости $l_{\text{полз}} = f(P)$ при $t = 1$ часу, 1 и 12 дням, то и в этом случае, ввиду небольшой толщины образца, избыточные напоры в поровой воде к этому времени достигают такой величины, что их влиянием также можно пренебречь [7].

б) При сравнительно прочных связях, по приведенной выше причине увеличение длительности испытания сперва приведет к нарушению линейной зависимости $l = f(P)$ при $P \leq 0,5 \text{ кг/см}^2$ вследствие проявления структурных [8] деформаций вместо только одной адсорбционной [8] (скорость деформирования при $P = 0,5 \text{ кг/см}^2$ увеличивается не пропорционально по сравнению с $P = 0,25 \text{ кг/см}^2$), а затем уменьшение скорости деформирования при $P > 0,5 \text{ кг/см}^2$ и увеличение при $P = 0,25 \text{ кг/см}^2$ приводят к линейной зависимости между напряжениями и деформациями ползучести ($t = 12$ суткам).

Таким образом, с момента установления линейной зависимости между напряжениями и деформациями ползучести ($t = 12$ суткам) дальнейшее деформирование грунтов происходит при сохранении этой зависимости. Следовательно, наступает такое новое состояние, после которого можно считать, что опять вступает в силу линейная зависимость между напряжениями и скоростями деформации.

Наконец, рассмотрим закономерности деформирования при четвертом состоянии грунта τ_4 .

Для получения нового, четвертого, состояния грунта сперва образцы всех серий были разгружены до 0,25; 0,5 и 0,75 кг/см² соответственно. Затем нагрузка всех образцов трех серий была доведена до 2 кг/см², а после—до 3 кг/см² (процесс разгрузки и нагрузки продолжался с 24/X—1959 г. по 9/II—1960 г.). После полной стабилизации деформации все образцы были полностью разгружены до $P=0$, а после—нагружены до 2 кг/см². Таким образом, перед исследованием интересующего нас вопроса все образцы находились под нагрузкой 2 кг/см².

Изложенная выше методика приготовления образцов преследовала цель: во-первых, изучить закономерности деформирования грунтов при разгрузке; во-вторых, добиться того, чтобы образцы были бы однородными и имели бы одинаковые физико-механические свойства.

Об однородности образцов мы судили путем сравнения деформаций образцов. Например, при $P=3$ кг/см² величина деформации образцов колебалась от 1,982 мм до 2,112 мм. Только деформация одного образца достигла 2,212 мм.

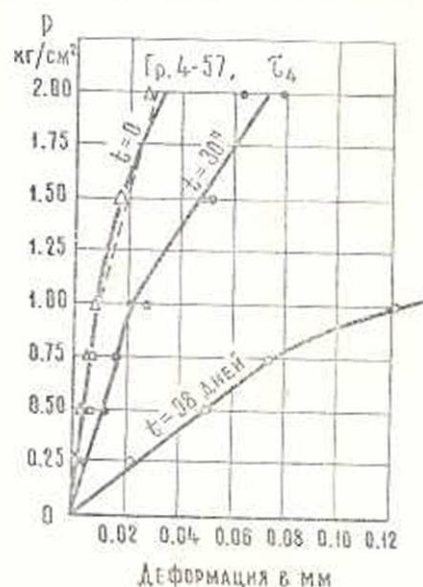
Методика исследования рассмотренных выше зависимостей прежняя, однако, помимо нагрузок 0,25; 0,5; 0,75 и 1,0 кг/см², образцы были испытаны и под нагрузками 1,5 и 2,0 кг/см². Опыт продолжался 98 дней с 7/III 1960 г. по 14/VI 1960 г.

На графиках фигуры 3 приведены исследования зависимостей между напряжениями и деформациями при $t \approx 0,30$ сек и 98 дней, а на фиг. 4—зависимости между напряжениями и мгновенными деформациями для всех четырех состояний („возрастов“) грунтов τ_1 , τ_2 , τ_3 и τ_4 . Как и прежде, зависимость между напряжениями и деформациями при нагрузках до 1 кг/см² ($t=0$ и 30 сек) линейная. При напряжениях до 2 кг/см² зависимость $l=f(t)$ аппроксимируется двумя прямыми с различными углами наклона к оси абсцисс (модулями деформации) с точкой перелома при $P=1$ кг/см², вместо $P=0,5$ кг/см² при τ_2 и τ_3 .

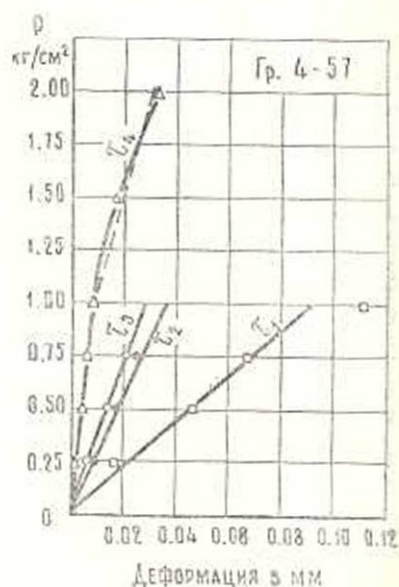
Таким образом, здесь повторяется то, что имело место при состоянии τ_3 с той лишь разницей, что точка перелома кривой зависимости $l=f(P)$ переместилась выше.

Полученные результаты полностью укладываются в рамки изложенной выше природы деформирования. А именно, при нагрузках до 1 кг/см², ввиду большой структурной прочности, деформации во времени протекают за счет вязкого перемещения структурных элементов и частиц (адсорбционная деформация). Более значительное увеличение нагрузок ($P=1,5$ и 2,0 кг/см²) приводит к разрушению структуры, которая была образована в период подготовки образцов к испытанию, грунт переходит в новое состояние, при котором зависимость опять остается линейной.

Уменьшение угла наклона прямой второго участка кривой зависимости $l = f(P)$ к оси абсцисс говорит о разупрочнении грунта, а сравнение с кривыми других состояний приводит к выводу, что в результате разупрочнения, грунт из состояния τ_1 перешел в состояние τ_3 .



Фиг. 3.



Фиг. 4.

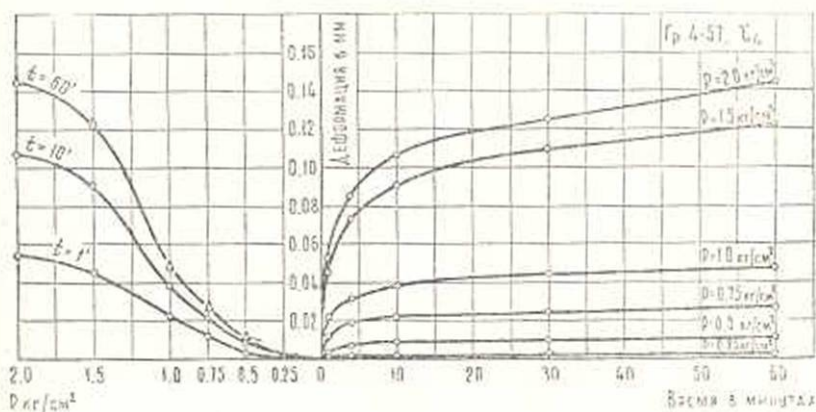
Здесь, как и при τ_1 , τ_2 и τ_3 , отчетливо выделяются две области деформирования с разными модулями деформации и факторами деформирования. В первой области деформирования зависимость $l = f(P)$ в основном обусловлена адсорбционными деформациями [8], а во второй — структурными деформациями.

Рассмотрим результаты исследования зависимости между напряжениями и деформациями ползучести образцов-близнецов в состоянии τ_4 . На графиках фиг. 5 и 6 приведены семейства кривых ползучести и указанная выше зависимость при $t = 1$ мин, 10 мин, 1 часу, 1 дню и 98 дням.

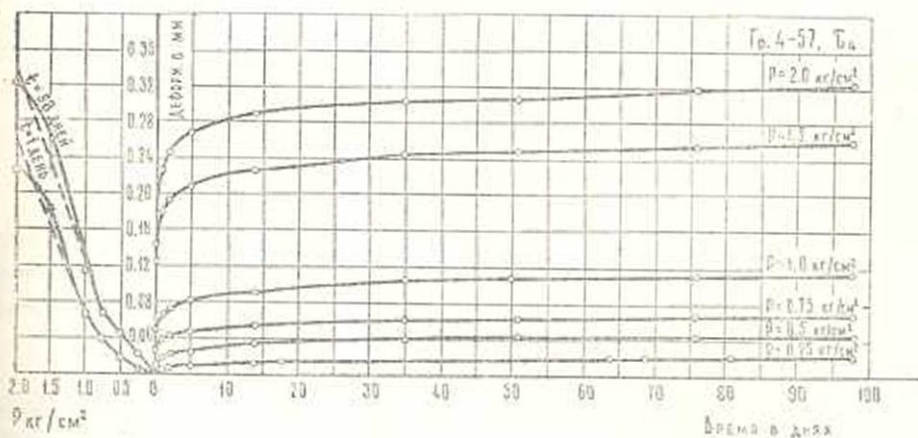
Анализ данных экспериментальных исследований приводит нас к выводу, что в данном случае повторяется все то, что было при состояниях τ_1 , τ_2 и τ_3 , с изменениями, обусловленными значениями плотности и структурной прочности состояния τ_4 . Существенное отличие между кривыми зависимости $l_{полз} = f(P)$ при τ_4 от τ_1 , τ_2 и τ_3 заключается в том, что с увеличением длительности испытания эта зависимость никогда не принимает линейного характера.

В начале процесса деформирования $l_{полз} = f(P)$, как и прежде (фиг. 2), принимает форму буквы S, а затем при больших t аппроксимируется прямой до $P = 0,75 \text{ кг/см}^2$ и кривой при $P > 0,75 \text{ кг/см}^2$. Форма кривой $l_{полз} = f(P)$ при $P > 0,75 \text{ кг/см}^2$ соответствует испытанию грунтов со слабыми структурными связями.

Интересно отметить, что прямая пропорциональность первой области ($P \leq 1,0 \text{ кг/см}^2$, фиг. 4) зависимости $l = f(P)$ остается в силе и при больших значениях t , с той разницей, что изменяется граница между двумя областями деформирования. При $t = 98$ дней переход



Фиг. 5.



Фиг. 6.

из одной области деформирования в другую осуществляется при $P = 0,75 \text{ кг/см}^2$. Ясно, что это является результатом развития структурных деформаций в образцах грунта, испытанных нагрузками $P = 1 \text{ кг/см}^2$ и их перехода во вторую область деформирования.

Резюмируя вышесказанное, можно сделать следующее заключение:

1. Связь между напряжениями и деформациями образцов глинистых грунтов небольшой толщины зависит от плотности, структурной прочности, а также от длительности испытания и величины приложенной нагрузки.
2. В зависимости от указанных в пункте 1 факторов, $l = f(P)$ может быть обусловлена: а) только структурными деформациями;

б) только адсорбционными деформациями; в) адсорбционными и структурными деформациями.

3. В общем случае, когда $I = f(P)$ зависит как от адсорбционных, так и от структурных деформаций, указанная зависимость разбивается на область адсорбционных и область структурных деформаций. Разумеется, что адсорбционные деформации обычно сопровождаются микроструктурными деформациями, а структурные деформации — адсорбционными.

4. При сравнительно слабых структурных связях и плотности грунта ($t > 1$ дня и $P = 1 \text{ кг/см}^2$), с достаточной для практики точностью зависимость $I = f(P)$ можно аппроксимировать прямыми. В случае высокой прочности и плотности грунта указанная зависимость аппроксимируется двумя прямыми с разными углами наклона к оси абсцисс. Граница перехода из одной области в другую зависит от состояния данного грунта к началу испытания.

Институт математики и механики
АН Армянской ССР

Поступила 8 IV 1961

Ս. Ռ. ՄԵՍՉԱՆ

ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԵՎ ԴԵՖՈՐՄԱՑԻԱՆԵՐԻ ՄԻՋԵՎ ԵՂԱԾ ԱՌՆՁՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ ԳՐՈՒՆՏԻ ԽՏՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԱՏՐՈՒԿՏՈՒՐԱՅԻՆ ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅԱՆ ՄԱՍԻՆ

Ա. մ. փ. ո. փ. ո. մ.

Հոգիվածում ուսումնասիրված է կախված գրունտի լարումների և դեֆորմացիաների միջև եղած առնչությունը սեղման ժամանակ կոպիտ ընդարձակման բացակայության պայմաններում, կախված նրա խտությունից, ստրուկտուրային ամրությունից և փորձարկման տեղողությունից:

Ցույց է տրված, որ՝

1) Լարումների ու դեֆորմացիաների միջև եղած առնչությունը, նմուշների ոչ մեծ թափաբություն դեպքում, կախված է գրունտի ստրուկտուրային ամրությունից, փորձարկման տեղողությունից և բննավորման աստիճանի մեծությունից:

2) Գրունտի լարումների ու դեֆորմացիաների միջև եղած առնչությունը կարող է պայմանավորված լինել՝ ա) միմիայն աղտորրցիոն դեֆորմացիաներով, բ) միմիայն ստրուկտուրային դեֆորմացիաներով, և գ) աղտորրցիոն ու ստրուկտուրային դեֆորմացիաներով:

3) Լնդհանուր առմամբ, երբ հիշյալ առնչությունը կախված է լինում թե՛ աղտորրցիոն և թե՛ ստրուկտուրային դեֆորմացիաներից, ապա հիշյալ առնչությունը բաժանվում է երկու՝ աղտորրցիոն դեֆորմացիաների ու ստրուկտուրային դեֆորմացիաների շրջանների: Չի բացառվում այդ երկու տեսակի դեֆորմացիաների համատեղ գործողությունը թե՛ մեկ և թե՛ մյուս շրջանում:

4) Գրունտի համեմատաբար թույլ ստրուկտուրա ունենալու դեպքում, երբ փորձարկման տեղողությունը ավելի է մեկ օրից, իսկ լարվածության մեծությունը մեծ է, քան 1 կգ/սմ², ապա լարումների և սողի դեֆորմացիա-

ների միջև եղած կապը ենթարկվում է դժարին օրենքին: Հսկողական դեպքում, հիշյալ առնչությունը ապրոքորմացիայի է ենթարկվում (նույնը աղբյուրի բեղմունքի մեծությունը) երկու ուղիղով, որոնք արդյունքի տալիս են նկատմամբ տեղեկ թվերի տարբեր անկյուններ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Месчян С. Р. Экспериментальное исследование зависимости между напряжениями и деформациями ползучести связных грунтов. ДАН АрмССР 24, № 2, 1957.
2. Месчян С. Р. О ползучести связного грунта при сжатии в условиях невозможности бокового расширения. Известия АН АрмССР, серия физ.-мат. наук, 11, № 4, 1958.
3. Денисов Н. Я. Строительные свойства глинистых пород и их использование в гидротехническом строительстве. Госэнергоиздат, М.—Л., 1956.
4. Месчян С. Р. К вопросу о ползучести связных грунтов. Изв. АН АрмССР, серия ФМФТ наук, 7, № 6, 1954.
5. Павловский В. М. Экспериментальные исследования порового давления в глинистых грунтах. Инф. мат. НИИ ВОД ГЕО, № 4, М., 1960.
6. Сападин В. П. О проявлении свойств ползучести при компрессионных испытаниях грунтов. ДАН АрмССР, 31, № 5, 1960.
7. Месчян С. Р. К вопросу о перераспределении напряжений между скелетом и поровой водой глинистого грунта. Изв. АН АрмССР, серия физ.-мат. наук, № 1, 1961.
8. Денисов Н. Я. О природе деформации глинистых пород. Изд. Минречфлота, М., 1951.