ПНИИИС Госстроя СССР

Рекомендации

по определению параметров ползучести и консолидации грунтов лабораторными методами



gost.e-ecolog.ru

Производственный
и научно-исследовательский институт
по инженерным изысканиям в строительстве
(ПНИИИС) Госстроя СССР

Рекомендации

по определению параметров ползучести и консолидации грунтов лабораторными методами

Москва Стройиздат 1989

УДК 624.131.37 : 624.131.22

Рекомендовано к изданию решением инженерно-геологической секции научно-технического совета ПНИИИС Госстроя СССР.

Рекомендации по определению параметров ползучести и консолидации грунтов лабораторными методами / ПНИИИС — М.: Стройиздат, 1989, 64 с.

Даны указания по определению параметров ползучести и консолидации грунтов в лабораторных условиях, предлагаются различные методы испытаний, по результатам которых устанавливают порог ползучести, коэффициент вязкости, критическую деформацию ползучести, время протекания ползучести при заданной скорости деформирования и другие параметры.

Рассмотрены теории расчета прогноза напряженно-деформируемого состояния во времени грунтов различного физического состояния. Даны описание рекомендуемых приборов, методики проведения испытаний и обработки полученных результатов. Предлагается новый расчетный способ нахождения параметров консолидации и ползучести с применением ЭВМ.

Рекомендации не распространяются на глинистые грунты с крупнообломочными включениями, а также грунты в мерзлом состоянии.

Для инженерно-технических работников изыскательских и проектных организаций.

Табл. 4, ил. 15

3202000000 – 292
Р ---------- Инструкт.-нормат., I вып. – 116 – 88
047(01) – 89

©Стройиздат, 1989

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одной из главных задач инженерных изысканий, особенно для крупных объектов, являются оценка и прогноз изменений свойств грунтов при взаимодействии с сооружениями и окружающей геологической средой (СНиП 2.02.01–83).

В практике строительства наблюдаются довольно частые случаи медленных деформаций грунтов в основании сооружений, откосах и склонах, в результате чего возникают аварийные ситуации. Причиной длительных деформаций является ползучесть грунтов. В зависимости от вида напряженного состояния массива грунтов может проявляться объемная или сдвиговая ползучесть.

Из-за отсутствия необходимой методики оценки параметров ползучести в настоящее время проектирование сооружений ведется без должного учета и прогноза длительных деформаций.

Учитывая актуальность и необходимость разработки такой методики ПНИИИС совместно с МИСИ, МАДИ и Калининградданпроектом проводил в течение ряда лет методические исследования, послужившие основой для составления данных Рекомендаций.

Рекомендации разработаны ПНИИИС Госстроя СССР (доктор геол.-минер. наук Р.С. Зиангиров, канд. геол.-минер. наук Л.А. Аносова, Т.И. Робустова, инженеры И.С. Бочарова, Ф.Ф. Хамматова); МИСИ им. В.В. Куйбышева (канд. техн. наук Л.Н. Рябченков); МАДИ (канд. техн. наук З.М. Караулова); Калининградданпроект (канд. техн. наук Б.В. Сухарев).

I. СДВИГОВАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ

1. ИСПЫТАНИЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ В ПРИБОРЕ МНОГОПЛОСКОСТНОГО СРЕЗА

Общие положения

1.1. Во многих природных склонах, сложенных достаточно прочными грунтами, наблюдаются непрерывные медленные деформации слоев грунта, обусловленные ползучестью. При проектировании инженерных сооружений на склонах необходимо решать две задачи:

оценка вероятности катастрофического смещения грунтового массива и определение момента времени, когда оно может произойти;

прогноз возможного перемещения поверхности склона и влияние накапливаемых смещений на эксплуатационные характеристики проектируемых или построенных на склоне сооружений.

1.2. Для описания зависимости скорости деформаций сдвига от напряженного состояния рекомендуются уравнения:

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta_\nu(\sigma_э)} \quad \text{при } \tau < \tau_{lim}; \tag{1}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau - \tau_{lim}}{\eta_{\nu\beta}(\sigma_э)} \quad \text{при } \tau \geqslant \tau_{lim}, \tag{2}$$

где $\dot{\gamma}$ – скорость угловой деформации, 1/с; τ – действующее касательное напряжение, МПа; $\tau_{lim} = f_2(\sigma_э)$ – порог ползучести, МПа; $\eta_\nu = f_1(\sigma_э)$ – коэффициент вязкости Па·с; $\eta_{\nu\beta} = f_3(\sigma_э)$ – коэффициент вязкопластического течения, Па·с.

В уравнение (2) следует подставлять значения τ_{lim} для эффективных нормальных напряжений $\sigma_э$, определяемых как разность тотального $\sigma_т$ и нейтрального $\sigma_н$ напряжений. Тотальное напряжение – это вертикальное напряжение, приложенное к поверхностям образца. Нейтральное напряжение равно давлению жидкости в порах образца.

1.3. Рассмотренная методика может применяться для исследований глинистых грунтов с показателем текучести $I_L \geqslant 0{,}25$, а также для похожих с ними по физическим свойствам материалов.

1.4. При определении параметров уравнений (1) и (2) рекомендуется использовать следующие схемы испытаний:

открытую схему, при которой обеспечивается свободный отток жидкости из образца через верхний и нижний штампы;

закрытую, при которой выдавливание жидкости из образца исключается. Для этого предпринимаются меры, оговоренные в техническом описании применяемого грунтоиспытательного устройства.

Выбор схемы обусловливается инженерно-геологическими условиями конкретной строительной площадки. При затруднениях в выборе схемы рекомендуется применять закрытую схему как основную, с измерением значений $\sigma_н$.

1.5. При определении параметров уравнения (2) рекомендуется использовать следующие режимы испытаний:

режим заданных постоянных во времени касательных напряжений τ при заданных постоянных во времени нормальных напряжений $\sigma_т$. При этом деформации образца не должны влиять на величины τ и $\sigma_т$;

режим заданных постоянных во времени скоростей сдвига $\dot{\gamma}$, не зависящих от величины сдвига γ. Напряжение $\sigma_т$ при этом сохраняется постоянным, не зависящим от деформаций образца;

режим релаксации напряжений при заданных постоянных во времени относительных горизонтальных перемещениях. При этом режиме испытаний замеряются изменяющиеся во времени значения τ. Значение $\sigma_т$ при этом сохраняется постоянным, не зависящим от деформаций образца грунта.

Выбор режима обусловливается прежде всего наличием необходимого оборудования. Как основной рекомендуется режим заданных постоянно действующих касательных напряжений.

Приборы и оборудование

1.6. Для испытаний образцов грунта рекомендуется прибор многоплоскостного среза, схема которого представлена на рис. 1.

1.7. Для проведения испытаний образцов в приборе должны соблюдаться следующие условия: начальная высота образца $h_0 = 3{,}5$ см; диаметр $d' = 7{,}136$ см; площадь поперечного сечения $F = 40$ см^2. Допустимая

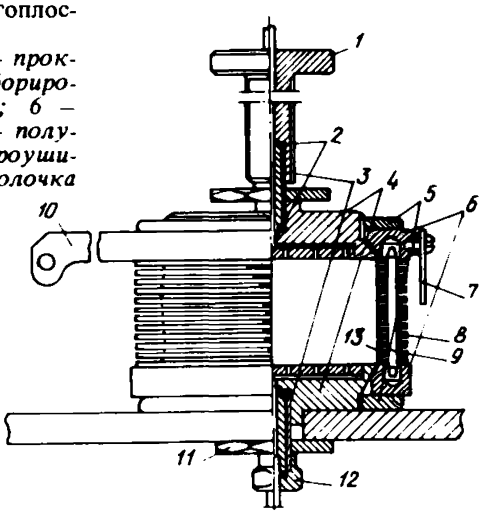


Рис. 1. Схема прибора многоплоскостного среза (в разрезе)
1 – регулировочный винт; 2 – прокладки; 3 – трубки; 4 – перфорированные штампы; 5 – гайки; 6 – обоймы; 7 – площадка; 8 – полукольца; 9 – стержни; 10 – проушина; 11 – 12 – гайки; 13 – оболочка

вертикальная осадка образца S = 1 см, а горизонтальное смещение торцов M = 1,5 см. Допустимые вертикальное напряжение в образце и внутреннее давление на стенки прибора до 2 МПа.

Прибор обеспечивает:

одномерное уплотнение образца по вертикали;

сдвиг образца;

испытания по открытой схеме;

испытания по закрытой схеме;

герметичность образца и его предохранение от высыхания в течение не менее 12 мес;

измерение нейтральных напряжений $\sigma_н$;

искусственное создание нейтральных напряжений;

испытание в режимах заданных сдвигающих касательных напряжений, релаксации и в режиме заданных скоростей сдвига.

1.8. Прибор приспособлен для установки в стандартное рычажное устройство сдвигового прибора НИС Гидропроекта. При незначительных изменениях он может быть установлен в корпус стандартного сдвигового прибора ВСВ-25.

1.9. В целях повышения производительности труда и качества испытаний прибор следует снабжать стандартным электронным оборудованием, обеспечивающим запись результатов в автоматическом режиме.

1.10. Прибор снабжается следующими комплектующими изделиями и приспособлениями:

устройством для извлечения образца из металлического кольца стандартного прибора одноплоскостного среза;

стандартными индикаторами перемещений часового типа с ценой деления 0,01 мм или аналогичными им измерителями перемещений;

комплектом ключей согласно спецификации на прибор.

Проведение испытаний

1.11. Подготовка образца к испытаниям должна выполняться в полном соответствии с нормами проведения опытов в стандартном приборе одноплоскостного среза.

1.12. Подготовка прибора к опыту (см. рис. 1):

завинтить и затянуть трубки *3* с прокладками в штампы *4*;

надеть на нижний штамп оболочку *13*, насадить на него кольцо *6* и навинтить, не затягивая гайку *5*;

узел установить на стол рычажного устройства, навинтить и затянуть гайку *11*, затянуть гайку *5*;

растянуть верхнюю кромку оболочки и надеть ее на кольцо *6* так, чтобы она не мешала установке образца на штамп; вынуть образец из металлического кольца и с прокладками фильтровальной бумаги на торцах установить на нижний штамп, придерживая образец, снять с кольца оболочку и расправить ее на боковой поверхности образца;

вставить стержни *9* в гнезда кольца *6*;

соблюдая маркировку, установить полукольца *8*;

установить верхний штамп *4* на верхний торец образца; при этом

верхняя кромка резиновой оболочки должна быть равномерно размещена на боковой конусной поверхности штампа;

установить кольцо *6*, навинтить и затянуть гайку *5*;

надеть винт *1*, заранее завинченный в верхнюю перекладину рычажного устройства; вращением винта *1* отрегулировать рычаг до нормального исходного положения;

для проведения опыта по открытой схеме в трубки *3* вставить дополнительные металлические трубки с плотно надетыми на них эластичными шлангами; присоединение нижней дополнительной трубки герметизировать прокладкой *2*, затянув гайку *12*; присоединение верхней дополнительной трубки герметизируется прокладкой *2* автоматически при приложении к винту *1* вертикальной силы; свободные концы шлангов опустить в сосуд с водой; во избежание попадания воды из сосуда в образец уровень воды в сосуде должен быть ниже нижнего торца образца;

для проведения опыта по закрытой схеме вместо дополнительных трубок в трубки *3* вставить металлические стержни и герметизировать соединения, затянув гайку *12* и приложив вертикальную силу к винту *1*, предварительно заполнив полости штампов *4* водой согласно техническому описанию приборов;

для измерения нейтрального напряжения вместо стержня в одну из трубок *3* вставить трубку жесткого манометра;

для регулирования нейтрального напряжения к другой трубке *3* подключить регулятор нейтрального давления.

1.13. Приложение нагрузок (режим заданных напряжений): вертикальная сила P, необходимая для создания нормального напряжения σ_T, передается на винт *1* с помощью рычажного устройства. Вес гирь на длинном плече рычага вычисляется по формуле

$$R = \sigma_T F k - Q k , \tag{3}$$

где k – отношение короткого плеча рычага к длинному; Q – вес рамы рычажного устройства.

Горизонтальная сила I, необходимая для создания напряжения τ, прикладывается через серьгу к проушине *10*. Величина силы вычисляется по формуле

$$T = \tau F k. \tag{4}$$

Осадка образца S и горизонтальное перемещение верхнего торца образца M измеряется с точностью 0,01 мм. Начальные показания приборов устанавливаются до приложения R и T.

Сила T прикладывается ступенями. Первая ступень прикладывается после условной стабилизации осадки S. Критерием наступления условной стабилизации осадки является величина $\Delta S \leqslant 0{,}01\, S$, накопленная за 8 ч наблюдений.

Величина ступени τ выбирается ориентировочно с учетом прочностных показателей грунта (φ_w и c_w) и напряжения $\sigma_э$. От начала нагружения силой T до конца опыта (разрушения образца или исчерпания допус-

тимого горизонтального смещения M = 1,5 см) должно быть не менее шести равномерных степеней нагружения. В первом приближении можно принимать значение ступени, равной 1/8 $T_{\text{пред}}$, где $T_{\text{пред}}$ – предельное значение T в опытах на одноплоскостной срез при одинаковых значениях $\sigma_{\text{э}}$.

При отсутствии устройств автоматической записи значений M и t допускается их запись в журнале: первая запись делается сразу после приложения нагрузки, вторая и последующие записи производятся с интервалами через 5, 20, 180 с; 5, 30 мин; 2, 4 ч и далее – два раза в сутки в начале и конце рабочего дня.

Каждая ступень T выдерживается до состояния условной стабилизации скорости сдвига. За стабилизацию принимается равенство (с точностью до 10%) приращений значений ΔM, полученных в течение трех рабочих дней.

Для конкретизации параметров уравнения (2), необходимо проведение самостоятельных опытов при различных значениях $\sigma_{\text{э}} = \sigma'_{\text{э}}, \sigma''_{\text{э}}, \sigma'''_{\text{э}}$. Значения $\sigma_{\text{э}}$ назначаются из условия максимально возможного приближения напряженного состояния образца к природному в совокупности с изменениями напряженного состояния при строительстве и эксплуатации сооружения.

Обработка результатов опытов

1.14. Основой для конкретизации уравнения (2) являются построенные по результатам опытов графики: зависимости γ от t (времени); γ от τ; $\dot{\gamma}$ от τ; τ_{lim} от $\sigma_{\text{э}}$; τ от t (иллюстрационная).

Характерный вид графиков представлен на рис. 2.

1.15. При автоматизированной записи $\gamma - t$ необходимо настроить оборудование таким образом, чтобы запись производилась в масштабах: по оси времени 1 ч – 1 см; по оси γ – 0,01 – 0,5 см на формате 297х х420 мм в правой части формата. Разметка формата под график показана на рис. 3. Масштабы τ, $\dot{\gamma}$ и $\sigma_{\text{э}}$ не нормируются.

1.16. При отсутствии устройств автоматизированной записи допускается запись результатов вручную в журнал испытаний по форме прил. 1.

1.17. Значения γ вычисляются по формуле

$$\gamma = M/h\,, \tag{5}$$

где $h = h_0 - S$ – высота образца после осадки.

1.18. Значения $\dot{\gamma}$ вычисляются по формуле

$$\dot{\gamma} = \Delta\gamma/\Delta t\,, \tag{6}$$

где $\Delta\gamma = \gamma_i - \gamma_{i-1}$ – разность значений γ, вычисленных по формуле (5), отвечающих началу и концу отрезка времени Δt, $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ – последние 6 – 8 ч деформации образца на данной ступени.

1.19. Вычисления по формулам (5) и (6) сводятся в таблицу.

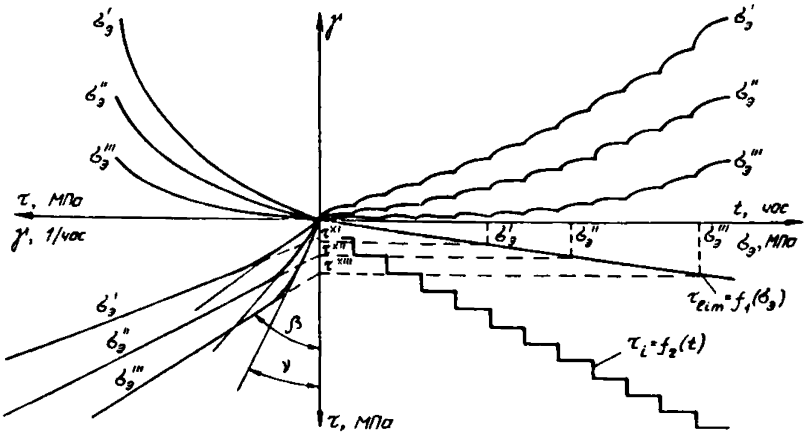
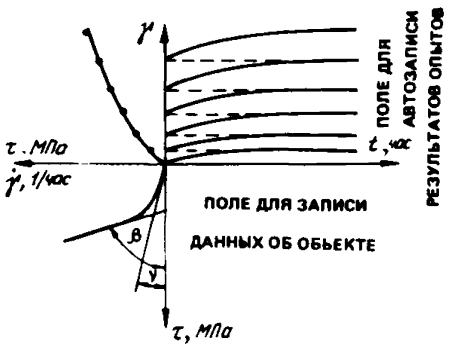


Рис. 2. Характерный вид графиков при испытаниях грунта в приборе многоплоскостного среза

Рис. 3. Образцы графиков при испытаниях в приборе многоплоскостного среза с автоматической регистрацией деформаций



1.20. Каждому опыту должен отвечать один формат рис. 3 с графиками, построенными по данным пп. 1.15 – 1.19.

1.21. По группе опытов для разных значений $\sigma_э$ строятся графики по форме, согласно рис. 2. При этом экспериментальные данные аппроксимируются графиками с соблюдением подобия для разных значений зависимостей $\tau - \gamma$ и $\tau - \dot{\gamma}$, а также линейной зависимости τ_{lim} от $\sigma_э$.

1.22. Значения η_ν вычисляются по формуле:

$$\eta_\nu = \Delta\tau / \Delta\dot{\gamma}, \tag{7}$$

где $\Delta\tau$ и $\Delta\dot{\gamma}$ определяются по графику зависимости $\dot{\gamma}$ от τ на ее начальном участке.

1.23. Значения $\eta_{\nu\beta}$ вычисляются по формуле

$$\eta_{\nu\beta} = \Delta\tau / \Delta\dot{\gamma}', \tag{8}$$

где $\Delta\tau$ и $\Delta\dot{\gamma}$ определяются по графику зависимости $\dot{\gamma}$ от τ на ее конечном участке (см. рис. 2).

2. ИСПЫТАНИЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ В ПРИБОРАХ ОДНОПЛОСКОСТНОГО СРЕЗА

Общие положения

2.1. Испытания на ползучесть выполняют для грунтов в пределах контуров расположения наиболее ответственных зданий и сооружений, а также при проектировании противооползневых сооружений и мероприятий на склонах и откосах.

2.2. По результатам испытаний грунтов в приборах одноплоскостного среза определяют: порог ползучести $\tau_{lim} = f(\sigma)$, коэффициент динамической вязкости $\eta_t = f(t)$, критическую деформацию сдвига $\lambda_{кр}$, период времени от начала опыта до момента разрушения образца $t_{кр} = f(u)$.

2.3. В соответствии с физико-технической теорией ползучести Н.Н. Маслова скорость деформации ползучести на поверхности грунтовой толщи выражается следующими уравнениями:

для пластичных глинистых грунтов без необратимых цементационных связей

$$du = -\frac{\tau}{\eta_t}dz, \tag{9}$$

для скрытопластичных глинистых грунтов с коагуляционными и цементационными структурными связями

$$du = -\frac{\tau - (P_z \operatorname{tg}\varphi_w + C_c)}{\eta_t}dz \tag{10}$$

или в общем виде:

$$du = -\frac{\tau - \tau_{lim}}{\eta_t}dz, \tag{11}$$

где u – скорость сдвиговой деформации, см/с; τ – действующее касательное напряжение, МПа; P_z – вертикальное давление на глубине z, МПа; $\operatorname{tg}\varphi_w$ – тангенс угла внутреннего трения, град.; C_c – структурное сцепление, МПа; η_t – коэффициент динамической вязкости, Па·с, $\eta_t = f(t)$.

Знак (–) в выражениях (9) – (11) отвечает обратному соотношению значений скорости деформации u и глубины z рассматриваемого слоя грунта.

2.4. Н.Н. Масловым предложено расчленять присущее глинистым грунтам сцепление c_w на обратимую часть Σ_w, – сцепление связности и необратимую его часть c_c – структурное сцепление.

2.5. Порог ползучести τ_{lim} ориентировочно может быть определен из выражения

$$\tau_{lim} = \sigma \operatorname{tg}\varphi_w + c_c, \tag{12}$$

но для более точного определения следует проводить эксперимент.

2.6. Переход грунта в состояние ползучести может иметь место при одновременном выполнении следующих условий:

$$\tau < \sigma \operatorname{tg} \varphi_w + c_c + \Sigma_w , \tag{13}$$

$$\tau > \sigma \operatorname{tg} \varphi_w + c_c . \tag{14}$$

2.7. Разработанный в МАДИ метод испытания грунтов на ползучесть в приборах одноплоскостного среза может применяться для исследований глинистых грунтов с показателем текучести $0 < I_L < 0{,}5$.

Следует применять открытую схему испытаний, обеспечивающую свободный отток воды из образца через верхний и нижний штампы прибора.

Рекомендуемый режим испытаний – деформирование образца с постоянной заданной скоростью сдвига, не зависящей от величины сдвига.

Вертикальная нагрузка на образец должна оставаться постоянной в течение всего опыта. Для предотвращения возможности искажения результатов опытов вертикальная нагрузка не должна вызывать дополнительное уплотнение образца в процессе испытаний.

2.8. Испытания на ползучесть могут проводиться на монолитных образцах с естественной структурой и влажностью, а также на искусственно приготовленных из глинистой пасты образцах с заданными влажностью и плотностью. Кроме того, для определения параметров ползучести трещиноватых глин или грунтов в зоне оползневых смещений (по старым поверхностям скольжения) рекомендуется испытывать образцы методом "плашка по плашке", т.е. предварительно разрезая образец в зоне зазора на три площадки.

Приборы и оборудование

2.9. Для проведения опытов по схеме одноплоскостного среза с постоянной скоростью деформирования образца используют стандартные срезные приборы конструкции НИС Гидропроекта с некоторыми конструктивными изменениями и др. Приборы должны позволять задавать определенные скорости деформирования и поддерживать эти скорости постоянными в течение опыта. Кроме того, приборы должны позволять создавать большой зазор между нижней и верхней каретками (1 – 1,5 см).

Предпочтительнее использовать автоматизированные приборы, а регистрацию деформаций осуществлять с помощью самописцев.

Конструктивные изменения срезного прибора заключаются в подъеме на 1 – 1,5 см рычажного устройства для передачи горизонтального срезающего усилия. Это необходимо для сохранения горизонтальности тросика, передающего срезающее усилие, при создании большого зазора (1 – 1,5 см) между каретками прибора.

2.10. Для предотвращения высыхания образца в процессе опыта его следует заключать в тонкую (не более 0,25 мм) резиновую оболочку, плотно прилегающую к образцу, но не создающую бокового давления на него.

2.11. Для предотвращения сжатия или расширения образца и выдавливания грунта из зазора необходимо на образец в зоне зазора одеть несколько тонких пластмассовых или металлических колец.

2.12. Образец вырезается стандартными кольцами, входящими в комплект срезных приборов. Первоначальная высота образца должна быть не менее 5 см, диаметр образца 7,1 см, а площадь поперечного сечения 40 см^2.

2.13. Комплектующими деталями должны быть индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм, самописцы тонкие (1,5 мм), металлические или пластмассовые кольца с внутренним диаметром, равным диаметру образца, плюс двойная толщина резиновой оболочки, секундомер (при использовании неавтоматизированных приборов).

Проведение испытаний

2.14. Подготовка образца к испытаниям должна выполняться в соответствии с ГОСТ 12248–78.

2.15. Вырезанный и взвешенный образец извлекается из кольца, заключается в резиновую оболочку, причем, на торцах образца приклеиваются резиновым клеем кружки, вырезанные из такой же резины, после чего образец помещают обратно в рабочие кольца прибора, а в зазоре между нижним и верхним кольцом на образец надевается несколько (3 – 4 шт.) тонких колец. Зазор должен составлять 1 – 1,5 см. При испытании методом "плашка по плашке" образец предварительно разрезается в зоне сдвига на плашки стальной проволокой.

2.16. После установки образца в прибор с помощью уровня проверяется горизонтальность тросика, передающего срезающее усилие.

2.17. С помощью штангенциркуля проверяется величина зазора.

2.18. На подготовленный образец передается вертикальная нагрузка, под которой образец выдерживается до условной стабилизации вертикальных деформаций.

Вертикальную нагрузку следует передавать на образец в одну степень и выдерживать ее не менее 30 мин. При испытании методом "плашка по плашке" время стабилизации вертикальной деформации должно быть принято не менее 1 ч.

Масса гирь на рычаге определяется обычным путем с учетом конструкции прибора.

Вертикальная нагрузка должна оставаться постоянной в течение всего опыта.

Рекомендуется из каждого монолита вырезать не менее трех одинаковых образцов-близнецов и испытывать их при трех различных вертикальных нагрузках.

2.19. После стабилизации вертикальной деформации еще раз проверяется величина зазора и в случае необходимости проводится регулировка зазора с помощью винтов, а затем устанавливается индикатор деформации среза и записывается его начальное показание.

2.20. Срезающее усилие, необходимое для поддержания заданной скорости деформации постоянной, прикладывается к образцу ступеня-

ми. Величина ступеней подбирается эмпирически в зависимости от свойств грунта и выбранной скорости деформирования.

2.21. По мере нарастания срезающего усилия регистрируется рост абсолютной деформации сдвига. При отсутствии устройств автоматической записи роста деформаций во времени допускается их запись в журнале.

Первая запись производится сразу после приложения первой ступени срезающей нагрузки, а последующие – в зависимости от заданной скорости деформирования через 10, 20, 30 мин, 1 ч, 1 сут и далее 1 раз в сутки.

2.22. При выборе скорости деформирования образца следует исходить из положения, что прогноз интенсивности деформаций ползучести проводится применительно к стадии неустановившейся (затухающей) ползучести, при которой структура грунта остается практически ненарушенной. На этой стадии отсутствует опасность перехода ползучести в установившуюся и далее в прогрессирующую, что в конечном итоге могло бы привести к разрушению структуры грунта. Как показал опыт наблюдения за сооружениями, для затухающей ползучести характерны малые скорости деформирования, измеряемые долями мм в сутки. Исходя из этого, в опытах следует задавать скорости деформирования грунтов $a \cdot 10^{-8}$ или $a \cdot 10^{-9}$ см/с.

Для определения порога незатухающей ползучести и коэффициента вязкости на стадии незатухающей ползучести можно рекомендовать скорости деформации $a \cdot 10^{-7}$; $a \cdot 10^{-6}$ см/с.

2.23. Окончанием опыта следует считать накопление суммарной абсолютной деформации сдвига 6 – 7 мм или разрушение образца (срез).

2.24. В течение всего опыта должны быть обеспечены стабильные условия проведения опыта (постоянные температура и влажность воздуха в помещении), а также должны быть исключены даже самые незначительные динамические воздействия на прибор.

2.25. После окончания опыта образец извлекается из колец и резиновой оболочки. Производятся контрольные определения плотности и влажности в зоне среза и в нижней и верхней частях образца.

2.26. Испытания образцов методом "плашка по плашке" проводятся в той же последовательности, что и монолитных образцов.

Обработка результатов опытов

2.27. По результатам опытов строятся графики зависимости абсолютной деформации грунта от времени $\lambda = f(t)$ и роста срезающего усилия τ во времени t.

Схематические графики представлены на рис. 4.

Образцы записи результатов опытов и последующей обработки результатов представлены в прил. 2 и 3.

По графику зависимости $\tau = f(t)$ можно определить порог ползучести τ_{lim} как пересечение касательных к двум участкам кривой (см. рис. 4).

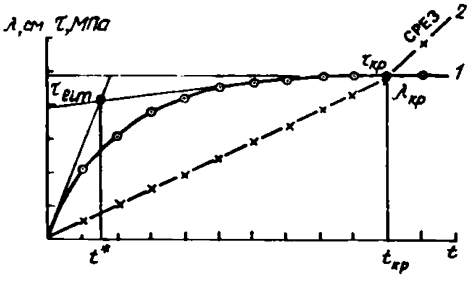


Рис. 4. Образец графического оформления результатов испытаний грунта в условиях одноплоскостного среза
Графики: 1 – $\tau = f(t)$; 2 – $\lambda = f(t)$. Масштаб: 10 мм – τ = 0,02 МПа; λ = 0,1 см; t = 10 (50) мин

При испытаниях грунта методом "плашка по плашке" порог ползучести, как привило, оказывается равным нулю.

2.28. Интенсивность процесса ползучести характеризуется коэффициентом динамической вязкости. В стадии неустановившейся ползучести (затухающей) коэффициент динамической вязкости является величиной переменной. Его можно вычислить на любой момент времени t по формулам:

$$\eta_t = \frac{\tau - \tau_{lim}}{u} d, \qquad (15)$$

$$\eta_t = \frac{\tau}{u} d \text{ при } \tau_{lim} = 0. \qquad (16)$$

2.29. В опытах, где наблюдается стадия установившейся ползучести, можно вычислить коэффициент вязкости установившейся ползучести для конечного прямолинейного участка кривой $\tau = f(t)$ по формуле

$$\eta_t = \frac{\tau_{кр} - \tau_{lim}}{u} d, \qquad (17)$$

где $\tau_{кр}$ – предельное срезающее усилие, при котором произошло разрушение образца (срез).

2.30. По результатам серии опытов, выполненных из одного монолитного однородного образца, но при различных вертикальных нагрузках, можно построить графики зависимости $\tau_{lim} = f(\sigma)$ и $\tau_{кр} = f(\sigma)$.

II. ОБЪЕМНАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ И КОНСОЛИДАЦИЯ

3. ИСПЫТАНИЯ ГРУНТОВ НА ОБЪЕМНУЮ ПОЛЗУЧЕСТЬ И КОНСОЛИДАЦИЮ В КОМПРЕССИОННЫХ ПРИБОРАХ

Общие положения

3.1. Изложенные в настоящем разделе рекомендации распространяются на типы глинистых, пылеватых и биогенных (органических и органоминеральных) водонасыщенных грунтов ($S_r > 0{,}8$) и содержат методы определения консолидационных параметров, основанные на обработке результатов испытаний грунтов на консолидацию, выполненных в условиях компрессионного сжатия.

3.2. Консолидацией называется нестационарное деформирование под действием внешних силовых факторов нескальных грунтов, состоящих из твердой фазы, поровой воды и газообразных включений.

3.3. Твердая часть грунтов представлена минеральными и органическими частицами, различными по химическому составу, размерам и форме, объемной сжимаемостью которых при математическом описании процесса консолидации пренебрегают. Взаимодействие между отдельными частицами происходит в местах их наибольшего сближения (по контактам) и осуществляется либо за счет коагуляционных связей, характерной особенностью которых является наличие прослойки жидкости между контактирующими поверхностями частиц, либо в результате образования кристаллизационно-конденсационных связей за счет сил химической природы. Совокупность твердых частиц с адсорбированными пленками прочносвязанной воды, взаимосвязанных в пространстве посредством сил разнообразной физико-химической природы, образует первую фазу грунта – его скелет.

3.4. Второй фазой является заполняющая поры между частицами и агрегатами свободная гидравлически непрерывная (капиллярная и гравитационная) вода, а также рыхлосвязанная с поверхностью твердых частиц влага, которая способна перемещаться под действием возникающих в ней градиентов давлений при передачи на грунт нагрузки.

3.5. В водонасыщенных грунтах некоторый объем пор занимает газ, находящийся в виде замкнутых (защемленных) пузырьков воздуха и растворенных в поровой жидкости газов. Для грунтов со степенью влажности более 0,8 полагают, что газовая составляющая как отдельная фаза не существует. Принимая, что газ в основной своей части равствoрен в поровой воде, наделяя ее повышенной сжимаемостью, водонасыщенные дисперсные грунты в математических моделях консолидации рассматриваются как квазидвухфазные.

3.6. Приложенное к грунту внешнее давление воспринимается его скелетом, поровой водой и газовой составляющей. Деформация скелета происходит в зависимости от вещественного состава твердых частиц плотности их упаковки, их размеров, формы, толщины гидратных оболо-

чек, физико-химической природы и прочности структурных связей, а также от характера действия уплотняющей нагрузки. При объемной деформации скелета происходит уменьшение порового пространства за счет взаимного смещения, переориентации и увеличения плотности упаковки частиц твердой фазы.

Возникающее гидростатическое давление в поровой жидкости является причиной ее сжимаемости и фильтрационного отжатия из грунтовой толщи. Таким образом, в процессе уплотнения грунтов возникает взаимное перемещение элементов их скелета и газированной поровой жидкости, т.е. происходит изменение соотношения фаз в единице объема.

3.7. По данным многочисленных экспериментов, у илов и слабоуплотненных водонасыщенных грунтов текучей и текучепластичной консистенции приложенная нагрузка полностью или в значительной части передается на воду и вызывает ее фильтрацию из пор, при этом максимальная величина порового давления наблюдается в момент приложения нагрузки. У грунтов мягкопластичной консистенции с более выраженными структурными связями уплотняющая нагрузка воспринимается как поровой жидкостью, так и скелетом грунтов, а поровое давление развивается постепенно – сначала возрастает до некоторого максимального значения, затем падает до 0. После полного рассеивания порового давления грунты продолжают деформироваться в результате ползучести скелета.

3.8. С учетом характера процессов, вызывающих уплотнение водонасыщенных грунтов в различные периоды времени, процесс консолидации условно разграничивают на две фазы: первичную или фильтрационную и вторичную, обусловленную ползучестью скелета грунта. Время завершения этапа фильтрационной консолидации устанавливается по консолидационным кривым, построенным в координатах $S - \lg t$, или экспериментально по моменту полного рассеивания порового давления. В зависимости от плотности, влажности, особенностей структуры грунтов и величины действующей на них нагрузки соотношение фильтрационных и реологических явлений в процессе консолидации грунтов различно. У торфов, сапропелей, илов и слабоуплотненных глинистых и пылеватых грунтов, содержащих большое количество свободной и слабосвязанных форм влаги, доля деформаций, обусловленных фильтрационными явлениями, составляет от 55 до 96 %.

С повышением плотности грунтов и увеличением их структурной связанности в развитии процесса уплотнения грунтов преобладающими становятся осадки, вызванные реологическими свойствами скелета, а в грунтах, содержащих только прочносвязанную воду, вся осадка обусловлена проявлением ползучести скелета грунтов.

3.9. При одномерном сжатии без возможности бокового перемещения частиц процесс консолидации грунта под действием постоянной нагрузки имеет затухающий характер, и для большинства глинистых и органоминеральных грунтов могут быть установлены время стабилизации и величина конечной осадки грунта под заданной нагрузкой.

3.10. В зависимости от физического состояния и степени водонасыщенности грунтов принимаются различные решения теории консолидации – математические модели, основанные на совместном учете ведущих

факторов, влияющих на развитие осадок во времени у грунтов различной консолидации.

В настоящих Рекомендациях рассматриваются только линейные модели одномерной консолидации. Такие модели описывают процессы развития осадок или изменения порового давления в слое двухкомпонентного (квазидвухфазного) и однокомпонентного (квазиоднофазного) грунтов конечной мощности, загруженных вертикальной нагрузкой. При этом минимальная площадь загружения должна более чем в пять раз превышать высоту слоя, так как только для таких условий деформации в центральной части загружения можно считать одномерными.

Математические модели и прямые задачи одномерной консолидации двухкомпонентных (квазидвухфазных) грунтов

3.11. В основе линейных моделей одномерной консолидации квазидвухфазных грунтов лежит зависимость изменения соотношения фаз грунта в единице его объема при уплотнении

$$\frac{\partial e}{\partial t} + n_{ср} m_w \frac{\partial p_w}{\partial t} = \frac{k_{ср}^{(ф)}}{\rho_w} \frac{\partial^2 p_w}{\partial x^2}, \qquad (18)$$

где e – коэффициент пористости; $n_{ср}$ – средняя пористость грунта; m_w – коэффициент сжимаемости газированной поровой жидкости; $k_{ср}^{(ф)}$ – средний коэффициент фильтрации; ρ_w – плотность поровой жидкости; p_w – избыточное гидростатическое давление в поровой жидкости; t – время; x – пространственная координата.

3.12. Для полного решения задачи консолидации зависимость (18) дополняется линейным уравнением связи между эффективным вертикальным напряжением $\sigma_э$ и относительной вертикальной деформацией ϵ:

$$\epsilon(t) = F\{\sigma_э\}_0^t. \qquad (19)$$

Если фактор времени не учитывать в выражении (19), то его можно представить в виде

$$\epsilon = m_к \sigma_э, \qquad (20)$$

где $m_к$ – коэффициент относительной полной сжимаемости скелета грунта при компрессии.

Учет фактора времени производится чаще всего в рамках теории наследственной ползучести

$$\epsilon(t) = m_c [\sigma_э(t) + \int_0^t k_c(t, \nu)\, \sigma_э(\nu)\, d\nu], \qquad (21)$$

где m_c – коэффициент относительной мгновенной сжимаемости скелета грунта при компрессии; $k_c(t, \upsilon)$ – ядро ползучести скелета, характеризующее скорость протекания вязких деформаций.

В большинстве ММК ядро ползучести принято экспоненциальным

$$k_c(t,\nu) = \delta_{exp}[-\delta_1(t-\nu)]\,. \qquad (22)$$

3.13. Для решения на основе выражений (18) и (19) прямых задач консолидации по прогнозу напряженно-деформированного состояния грунта во времени необходимо задать начальные и граничные условия.

Начальные условия определяют динамическую функцию уравнения консолидации в момент приложения нагрузки. Краевые условия описывают характер взаимодействия уплотняемого слоя с контактирующими с ним областями. Так, на границе с дренирующим слоем $p_w = 0$, с непроницаемыми областями $\partial p_w/\partial x = 0$.

3.14. Простейшей моделью одномерной консолидации является модель фильтрационной консолидации К. Терцаги – Н.М. Герсеванова. В ней используются следующие допущения:

поровая жидкость полностью дегазирована, т.е. несжимаемая;

относительные вертикальные деформации описываются зависимостью (20), которая не учитывает ползучесть скелета грунта.

По этой модели в начальный момент времени прикладываемое к грунту давление полностью передается на поровую жидкость, а затем вследствие ее фильтрации перераспределяется на скелет грунта.

3.15. Уравнение для названной модели фильтрационной консолидации при мгновенном приложении нагрузки σ к грунту имеет вид

$$\frac{\partial p_w(x,t)}{\partial t} = c_к \frac{\partial^2 p_w(x,t)}{\partial x^2}\,, \qquad (23)$$

где $c_к = k_{ср}^{(ф)}/(\rho_w m_к)$ – коэффициент фильтрационной консолидации.

Совокупность краевых условий для случая двухсторонней фильтрации поровой жидкости описывается следующими зависимостями:

$$p_w(0,t) = p_w(h,t) = 0\,;\ p_w(x,0) = \sigma.$$

3.16. На основании уравнения (23) получены формулы для прогноза во времени осадки и давления в поровой жидкости:

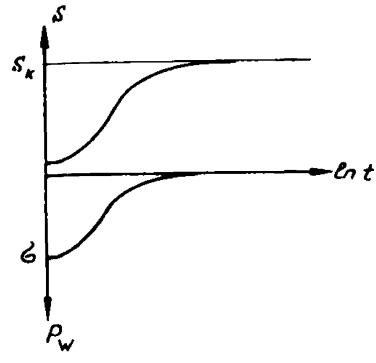
$$S(t) = h m_к \sigma \left\{1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1,3,5,\ldots}^{\infty} \frac{1}{i^2} \exp(-a_i^2 c t)\right\}, \qquad (24)$$

$$p_w(x,t) = \frac{4\sigma}{\pi} \sum_{i=1,3,5\ldots}^{\infty} \frac{1}{i} \sin(a_i x) \exp(-a_i^2 c t), \qquad (25)$$

где $a_i = i\pi/h$ (рис. 5).

3.17. Областью применения модели К. Терцаги – Н.М. Герсеванова являются илы, сапропели водонасыщенные, слабоуплотненные глинистые

Рис. 5. Характерное распределение осадки и порового давления во времени по теории фильтрационной консолидации



и пылеватые грунты текучей и текучепластичной консистенции с коагуляционными структурами и торфы при первой ступени нагружения.

3.18. Учет сжимаемости газированной поровой жидкости и ползучести скелета выполнен в моделях консолидации квазидвухфазных грунтов Ю.К. Зарецкого, В.А. Флорина, З.Г. Тер-Мартиросяна и др.

3.19. Уравнение консолидации, соответствующее этим моделям, при экспоненциальном ядре ползучести имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}\Big(\epsilon(x,t) + \int_0^t \delta - \exp[-\delta_1(t-\nu)] - \epsilon(x,\nu)\,d\nu - \\ - \frac{1-B}{B}\left\{m_c\sigma\left[1 + \frac{\delta}{\delta_1}(1-\exp(-\delta_1 t))\right] - \right. \\ \left. - \epsilon(x,t)\right\}\Big) = c\,\frac{\partial^2 \epsilon(x,t)}{\partial x^2}, \qquad (26)$$

где $c = k_{ср}^{(ф)}/(\rho_w m_c)$ – коэффициент консолидации; $B = 1/(1 + m_w n_{ср}/m_c)$ – начальный коэффициент порового давления.

Краевые условия для случая двухсторонней фильтрации записываются следующим образом:

$$\epsilon(0,t) = \epsilon(h,t) = m_c\sigma\left\{1 + \frac{\delta}{\delta_1}[1 - \exp(-\delta_1 t)]\right\}; \qquad (27)$$

$$\epsilon(x,0) = (1-B)m_c\sigma.$$

3.20. Прогноз развития осадки во времени для модели консолидации (26) при краевых условиях (27) производится по формулам:

$$S(t) = m_c\sigma h\left\{1 + \frac{\delta}{\delta_1}[1 - \exp(-\delta_1 t)] - \frac{8B}{\pi^2}\sum_{i=1,3,5\ldots}^{\infty}\varphi_i(t)\right\}, \qquad (28)$$

где $\varphi_i(t) = \frac{1}{i^2}\left(A_i\left\{\exp(\omega_1 t) + \frac{\delta}{\delta_1+\omega_1}[\exp(\omega_1 t) - \exp(-\delta_1 t)]\right\} -\right.$

$$-D_i\left\{\exp(\omega_2 t)+\frac{\delta}{\delta_1+\omega_2}[\exp(\omega_2 t)-\exp(-\delta_1 t)]\right\});$$

$$A_i=\frac{\delta+\delta_1+\omega_1}{\omega_1-\omega_2};\quad D_i=\frac{\delta+\delta_1+\omega_2}{\omega_1-\omega_2};\quad \omega_{1,2}=-Q_i\pm(Q_i^2-R_i)^{0,5};$$

$$Q_i=0{,}5\,(\delta_1+B\delta+cBa_i^2)\;;R_i=\delta Bca_i^2;\quad a_i=i\pi/h\,.$$

Для расчета гидростатического давления в поровой жидкости используется зависимость

$$p_w(x,t)=\frac{4}{\pi}B\sigma\sum_{i=1,3,5\ldots}^{\infty}\psi_i(t)\sin(a_i x), \tag{29}$$

где $\psi_i(t)=\frac{1}{i}[A_i\exp(\omega_1 t)-D_i\exp(\omega_2 t)]$.

Характерное распределение осадки и порового давления по теории фильтрационной консолидации представлено на рис. 6.

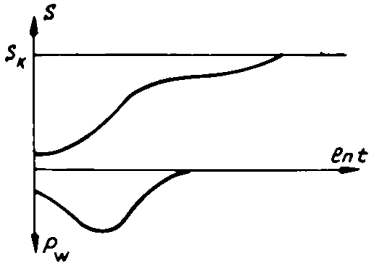


Рис. 6. Характерное распределение осадки и порового давления во времени по формулам, учитывающим сжимаемость поровой жидкости и реологические свойства скелета грунта

3.21. Областью применения выражений (28) и (29) являются грунты, описанные в п. 3.17, для последующих ступеней нагружения и всего периода консолидации.

3.22. Использование в ММК более сложных видов ядер ползучести (например, разработанных Н.Х. Арутюняном для нестабильных материалов) связано с разрешением принципиальных трудностей в нахождении их параметров.

3.23. Грунты неводонасыщенные, водонасыщенные, но имеющие консистенцию, близкую к полутвердой, а также водонасыщенные почти полностью и практически не содержащие газы (< 1 %), при условии полного завершения этапа фильтрационной консолидации следует рассматривать как однокомпонентные (квазиоднофазные).

Прогноз развития осадки во времени квазиоднофазных грунтов может быть получен по формуле

$$S(t)=h\sigma m_c[1+\frac{\delta}{\delta_1}(1-\exp(-\delta_1 t))]. \tag{30}$$

Структура консолидационных параметров и методы их определения

3.24. Консолидационные параметры (КП) – это совокупность постоянных, зависящих от физико-механических свойств грунтов, которые входят как расчетные показатели в уравнения консолидации и их краевые условия. Найденные значения КП позволяют решать прямые задачи консолидации (ПКЗ) по прогнозу осадки и давления в поровой жидкости при уплотнении грунтов во времени.

Состав КП зависит от вида математической модели консолидации и может быть определен методами теории подобия, исходя из физических свойств грунтов и предполагаемой расчетной модели консолидации, определенной по результатам анализа предварительной обработки данных консолидационных испытаний.

3.25. Для модели фильтрационной консолидации (23) – (25) расчетными параметрами являются:

$c_к$ – коэффициент фильтрационной консолидации;

$m_к$ – коэффициент относительной полной сжимаемости грунта при компрессии.

3.26. В модели консолидации двухкомпонентных (квазидвухфазных) грунтов, соответствующей уравнению (26), в число КП входят:

c – коэффициент консолидации;

m_c – коэффициент относительной мгновенной сжимаемости скелета грунта при компрессии;

B – начальный коэффициент порового давления;

δ, δ_1 – параметры экспоненциального ядра ползучести скелета грунта.

3.27. При использовании модели консолидации применительно к однокомпонентным (квазиоднофазным) грунтам [формула (30)] комплекс необходимых для решения прогнозных задач КП включает:

m_c – коэффициент относительной мгновенной сжимаемости грунта при компрессии.

3.28. Все способы нахождения КП подразделяются на прямые и косвенные методы.

Метод называется прямым для устанавливаемого параметра, если все показатели, которые используются при его вычислении, могут быть найдены из соответствующих экспериментов. Например, для прямого выявления коэффициента фильтрационной консолидации используется зависимость $c_к = k_{ср}^{(ф)}/(\rho_w m_к)$, все составляющие которой должны быть определены из соответствующих экспериментов.

3.29. В косвенных методах из опыта выявляются показатели, представляющие собой окончательные результаты процесса консолидации, исследованного экспериментально, – осадка или давление в поровой жидкости в заданные моменты времени, по значениям которых производится вычисление КП.

3.30. При проведении инженерных изысканий методы определения консолидации параметров, соответствующих рассмотренным моделям консолидации, должны удовлетворять следующим требованиям:

простота и доступность технического обеспечения опытов;

минимальная трудоемкость проведения экспериментов и надежность получаемых результатов;

целенаправленная линеаризация зависимостей, которые описывают протекающие при консолидации процессы в заданном диапазоне уплотняющих нагрузок;

возможность определения реологических параметров в условиях, когда деформации ползучести скелета протекают на фоне уплотнения, вызванного сжимаемостью и фильтрацией газированной поровой жидкости. Изложенным выше требованиям в наибольшей степени удовлетворяют косвенные методы нахождения КП, изложенные в следующих разделах.

Методика проведения консолидационных испытаний

3.31. Настоящая методика предусматривает определение параметров консолидации и ползучести в условиях одномерного сжатия при отводе поровой жидкости только в вертикальном направлении. Полученные параметры можно использовать для расчета величины конечной осадки грунта под заданной нагрузкой и прогноза его консолидации во времени при применении моделей одномерного сжатия и одномерной фильтрации.

3.32. Основой для вычисления КП являются результаты испытаний грунтов на консолидацию, проведенных в условиях компрессионного сжатия, включающие:

значения осадок образца S_i, замеренных в фиксированные моменты времени t_i, при его уплотнении под проектной нагрузкой σ;

величину стабилизировавшейся в опыте (конечной) осадки образца $S_к$;

консолидационные кривые, построенные в координатах $S_i - \lg t$, $S_i - \sqrt{t}$, $S_i - \ln t$.

3.33. Испытания проводятся на образцах со степенью влажности $> 0{,}8$ ненарушенного сложения или искусственно приготовленных водонасыщенных образцах при заданных значениях плотности и влажности.

АППАРАТУРА

3.34. Испытание грунтов на консолидацию выполняются в стандартных и специально изготовленных компрессионных приборах, конструкция которых соответствует требованиям ГОСТ 23908–79. При выборе аппаратуры следует руководствоваться рекомендациями, изложенными ниже.

3.35. Торфы, сапропели, илы, а также глинистые и пылеватые грунты с различным содержанием органического вещества мягкопластичной, текучепластичной и текучей консистенции рекомендуется испытывать в специально сконструированных приборах или модернизированных стандартных приборах, отличающихся от обычных следующими показателями:

приборы, предназначенные для слабых грунтов, должны быть снабжены облегченными штампами и противовесом, полностью уравновешивающим загрузочные устройства;

конструкция приборов должна обеспечивать передачу на образец малых ступеней нагрузок, порядка 0,005 МПа, и возможность развития значительных деформаций сжатия (50% и выше первоначальной высоты образца) без перестановки рычагов в ходе выполнения опыта:

для замера деформаций приборы должны быть оборудованы прогибомерами или индикаторами с удлиненными стержнями;

перфорация штампов должна обеспечивать свободный отток раствора, отжимаемого из пор образца при его уплотнении (рекомендуется использовать штампы, изготовленные из пористого камня).

Предпочтительно, чтобы одометры были оборудованы устройствами для замера порового давления в образце (поропьезометрами, керамическими датчиками и т.п.), а также самописцами для автоматической регистрации и записи объемной деформации образца при его уплотнении.

Примечание. Применение самописцев существенно повышает точность замера осадок грунта в начальные моменты времени после приложения нагрузки, так как взятие по индикаторам секундных отсчетов вызывает определенные трудности. На вторые сутки после начала опыта регистрирующее устройство может быть отключено.

3.36. Отмеченными конструктивными особенностями обладают компрессионно-фильтрационный прибор, установка для определения сжимаемости с учетом порового давления конструкции ЦНИИС Минтрансстроя СССР и компрессионный прибор для слабых грунтов системы НИС Гидропроекта.

Компрессионно-фильтрационный прибор ЦНИИС Минтрансстроя СССР предназначен для испытаний на компрессию и консолидацию всех типов слабых грунтов, включая и торфы. Прибор имеет круговой рычаг, обеспечивающий постоянство давления при больших деформациях, свойственных торфам, сапропелям и др., содержащим органические вещества, слабым грунтам. На одной панели размещены два одометра с разными размерами рабочих колец. Первый одометр имеет кольцо с внутренним диаметром 11,3 см, площадь 100 $см^2$, высоту 10 см и объем 1000 $см^3$. Рабочее кольцо второго одометра имеет внутренний диаметр 7,14 см, площадь – 40 $см^2$ и высоту 10 см.

Для замера порового давления используется пьезодинамометр системы НИС Гидропроекта. Деформации образца под нагрузкой замеряются с помощью прогибомера. Прибор оснащен устройством для автоматической регистрации и записи деформаций осадок на самопишущем приборе.

Установка для определения сжиамемости слабых грунтов с учетом порового давления конструкции ЦНИИС Минтрасстроя СССР позволяет проводить испытания грунтов на консолидацию на образцах с различными высотами, равными 1, 2 и 4 см.

Прибор отличается следующими конструктивными особенностями: рабочее кольцо прибора имеет внутренний диаметр 8,75 см и площадь, равную 60 $см^2$. Замер порового давления в процессе опыта осуществляется пьезодинамометром конструкции НИС Гидропроекта.

3.37. Грунты полутвердой и твердой консистенции могут быть испытаны в стандартных компрессионных приборах, конструктивные особенности которых и применяющаяся в них измерительная аппаратура соответствуют требованиям ГОСТ 23908–79.

3.38. Для облегчения и повышения производительности труда сотрудников лабораторий при проведении консолидационных испытаний грунтов, указанных в п. 3.37, рекомендуется использовать компрессионный прибор с автоматической записью деформаций в процессе опыта и регистрацией их условной стабилизации (АКПР-1). Прибор разработан Красноярским трестом инженерно-строительных изысканий на основе автоматизации компрессионного прибора КПР-1, выпускаемого Угличским экспериментальным ремонтно-механическим заводом института Гидропроект.

Прибор АКПР-1 состоит из:

компрессионного прибора КПР-1;

тензометрического устройства, входящего в систему регистрации деформации образца грунта, представляющего собой стальную гибкую пластинку с наклеенными тензометрическими сопротивлениями, неподвижно закрепленную в кронштейне и опирающуюся свободным концом на винт установки нуля шкалы прибора КСП-4;

прибора КСП-4, предназначенного для измерения и записи деформации образца;

программно-задающего устройства;

нагружающего устройства.

Техническая характеристика:

диаметр образца	87,4 мм
высота образца	25 мм
нагрузка	до 0,3 МПа
приложение нагрузки	автоматическими ступенями
замер осадки	тензодатчиками
точность измерения	0,01 мм
запись величины деформаций	автоматическая, на диаграмной ленте, КСУ4
скорость движения ленты	регулируется

При проведении опытов к образцу грунта, помещенному в одометр, прикладывается периодически увеличивающаяся статическая нагрузка с помощью нагружающего устройства. Одновременно с этим прибор КСП-4 производит измерение–запись величины деформации образца. Управляет работой нагружающего устройства и самопишущего устройства КСП-4 программно-задающее устройство по программе, предварительно выбранной при помощи специальных тумблеров на передней панели устройства.

Подготовка к испытаниям

3.39. Подготовку приборов и измерительных устройств к выполнению консолидационных испытаний производят в соответствии с требованиями ГОСТ 23908–79.

При использовании прибора АКПР-1 дополнительно должна быть проверена работа автоматики путем закладывания в одометр болванки и включения прибора в автоматический режим для установления исправности всех главных узлов аппаратуры.

3.40. Образец грунта ненарушенной структуры, предназначенный для испытания, вырезается из монолита с учетом следующих дополнительных условий:

при работе с илами и грунтами со степенью влажности > 0,5 при загружении кольца грунтом и зачистке торцевых поверхностей удобно пользоваться лобзиком с туго натянутой струной;

при загружении в рабочее кольцо слабо- и среднеразложившихся торфов необходимы остро отточенные ножи, способные перерезать неразложившиеся растительные волокна;

загрузка рабочих колец грунтами тугопластичной и полутвердой консистенции производится с помощью ручного пресса.

3.41. Для глинистых и пылеватых грунтов, испытываемых на консолидацию, должны быть определены влажность, пределы пластичности, плотность, плотность частиц грунта (ГОСТ 5180–84), гранулометрический состав (ГОСТ 12536–79), содержание органических веществ (ГОСТ 23740–79). Для торфов дополнительно определяются степень разложения (ГОСТ 10650–72) и потеря от прокаливания с использованием величины зольности торфа, определенной по ГОСТ 11306–83.

3.42. При необходимости проведения испытаний образцов нарушенной структуры, приготовленных с заданными величинами плотности и влажности, расчеты задаваемых влажности и коэффициента пористости, при консистенции грунта $0,5 < I_L < 1$, следует проводить по формулам, приведенным в ГОСТ 23908–79.

Схемы испытаний

3.43. Достоверность величин консолидационных параметров во многом зависит от правильности выбора условий и методики проведения испытаний грунтов на консолидацию, поэтому при планировании эксперимента необходимо учитывать влияние рассмотренных ниже внутренних и внешних факторов на численные значения лабораторных данных S_i, $S_к$ и соотношение в процессе уплотнения фильтрационных и реологических процессов.

3.44. Характер консолидационных кривых, отражающих в общем ходе уплотнения грунта долю осадок, связанных с фильтрационной консолидацией и ползучестью, а также величина конечной осадки образца зависят как от особенностей структуры и физического состояния грунтов, так и от величины уплотняющей нагрузки (рис. 7). В связи с этим давление, прилагаемое к образцу в опыте, должно соответствовать расчет-

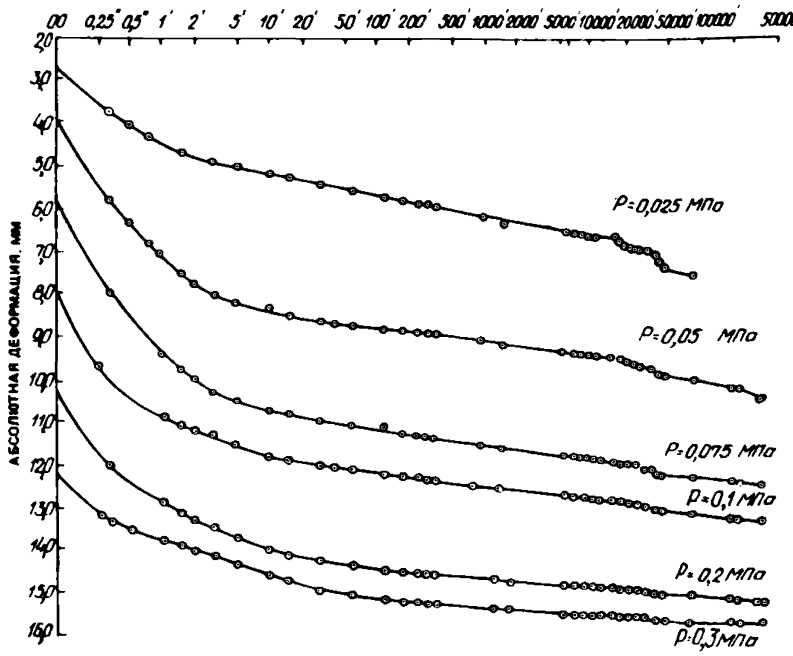


Рис. 7. Консолидационная кривая торфа при различных ступенях давления

ному давлению в середине рассматриваемого слоя грунта в массиве и быть согласовано с проектировщиками.

3.45. Величина замеренной в компрессионном опыте стабилизировавшейся осадки входит в расчет конечной осадки основания сооружения, а также параметров консолидации и ползучести исследуемого грунта, обусловливая тем самым достоверность прогноза его напряженно-деформируемого состояния во времени. Как показали опыты, проведенные в ПНИИИС, выдерживание грунта под нагрузкой до условной стабилизации деформации, равной в соответствии с критерием, данным в ГОСТ 23908–79, 0,01 мм за 16 ч для глинистых и за 4 ч для пылеватых грунтов, дает значительные погрешности в оценке величины и времени стабилизации осадки многих разновидностей грунтов независимо от испытываемого ими давления. Этот вывод наглядно иллюстрируется данными табл. 1, в которой приведены значения деформаций различных по составу и состоянию грунтов, замеренные в опытах на компрессию и консолидацию при достижении условной стабилизации в соответствии с критерием ГОСТ 23908–79 (0,01 мм за 16 ч) и после их полного затухания. В последнем случае опыт заканчивался тогда, когда показания индикаторов на приборах не менялись в течение 5 – 8 сут.

Анализ данных по разным типам грунтов показал, что наибольшая погрешность в оценке их способности к уплотнению (до 74 % от полностью стабилизированной осадки образца) при использовании критерия, регламентированного ГОСТом, возникает в тех случаях, когда в процессе сжатия грунтов преобладают деформации ползучести.

Таблица 1

Грунты	Глубина отбора пробы, м	Содержание частиц < 0,005, мм	Число пластичности I_p	Природная влажность w	Плотность		Коэффициент пористости e
					грунта ρ	сухого грунта ρ_d	
Пермская глина	10,3	70,5	0,34	0,42	1,73	1,23	1,23
То же	10,8	66,6	0,37	0,41	1,73	1,23	1,23
»	11,2	48,1	0,24	0,42	1,98	1,39	0,97
»	12	58	0,3	0,38	1,78	1,29	1,12
Четвертичная озерно-ледниковая глина	5,5	33,9	0,24	0,42	2,01	1,63	0,66
	5,6	49,4	0,12	0,14	2,11	1,85	0,45
Озерно-ледниковый суглинок	9	22,7	14	0,12	2	1,75	0,53
Озерно-ледниковая глина	12	41,3	0,16	0,2	2,11	1,76	0,55

Продолжение табл. 1

Грунты	Степень влажности S_r	Консистенция I_L	Данные консолид. испытаний			Погрешность в определении стабилизированной осадки $S_к$ в опыте, % от величины конечной осадки образца	Место отбора проб
			Уплотняющая нагрузка σ, МПа	Деформация образца, мм			
				при условной стабилизации осадки, равной 0,01 мм за 16 ч	при отсутствии приращения осадки за 5–7 сут		
Пермская глина	0,91	0,14	0,6	1,42	3,79	63	г. Горький
То же	0,92	0,11	0,6	1,39	5,28	74	То же
"	1,1	0,54	0,6	0,67	1,15	42	"
"	0,92	0,05	0,6	1,93	3	36	"
Четвертичная озерно-ледниковая глина	0,94	0,54	0,6	1,86	2,92	37	"
	0,83	0	0,6	1,04	1,49	31	"
Озерно-ледниковый суглинок	0,71	0	0,6	0,73	1,12	35	"
Озерно-ледниковая глина	0,99	0,06	0,6	0,96	2,22	57	"

С учетом рассмотренных материалов рекомендуется в опытах на консолидацию за критерий условной стабилизации деформации грунта при данном давлении принимать деформацию не более 0,001 мм за 24 ч, а при изысканиях под особо ответственные сооружения доводить до условного затухания осадки, за которое следует принимать отсутствие приращения деформаций не менее чем за 5 сут.

3.46. Испытания грунтов на консолидацию и объемную ползучесть рекомендуется выполнять, прилагая к грунту одну ступень давления, равного расчетному давлению в середине исследуемого слоя.

Торфы и другие типы слаболитифицированных грунтов, строительство которых ведется после инженерной подготовки территории путем предварительного уплотнения слабой толщи нагрузкой песчаного слоя, следует испытывать при последовательном приложении двух нагрузок, первая из которых соответствует давлению пригрузочного слоя, вторая – расчетному давлению от проектируемого сооружения в i-м слое.

Примечание. Исследования, выполненные в ПНИИИС по изучению режима статического нагружения на конечную осадку грунта, показали, что она не зависит от количества и величины прилагаемых ступеней давления, а определяется только их суммарной величиной.

На рисунке 8, *а, б* приведены компрессионные кривые образцов – дублеров пасты каолинитовой глины и пылеватого суглинка ненарушенной структуры, испытанных при последовательном приложении ступеней давлений, равных: в первом опыте по 0,025 МПа, во втором – по 0,05 МПа, в третьем – по 0,1 МПа. Практически полное слияние компрессионных кривых подтверждает высказанное положение.

3.47. Слаболитифицированные сильносжимаемые грунты – торфы, сапропели, илы, а также глинистые и пылеватые грунты с различным содержанием органического вещества при $I_L > 0{,}75$ следует испытывать под водой во избежание подсыхания образцов в процессе опытов.

Следует иметь в виду, что консолидационные испытания подобных грунтов могут продолжаться более одного-двух месяцев.

Ненабухающие разновидности мягкопластичных грунтов испытываются по двум схемам:

при испытании образцов с естественной влажностью и предохранением проб от высыхания в течение опыта;

после предварительного водонасыщения образцов с арретиром и выполнением опыта под водой.

3.48. Консолидационные опыты для набухающих грунтов рекомендуется проводить по следующим схемам:

Схема – грунты природного сложения и естественной влажности (или искусственно приготовленные с заданными значениями плотности–влажности) уплотняются под давлением, соответствующим расчетному, с предохранением образцов от высыхания до условной стабилизации деформаций ползучести в соответствии с требованием п. 3.45. Затем они замачиваются в приборах, и исследуется их набухание под заданной нагрузкой. По результатам испытаний рассчитывают значения КП при влажности, соответствующей природной, у искусственно приготовленных образцов – заданной, а также относительное набухание грунта $\epsilon_{s\omega}$ под этой нагрузкой;

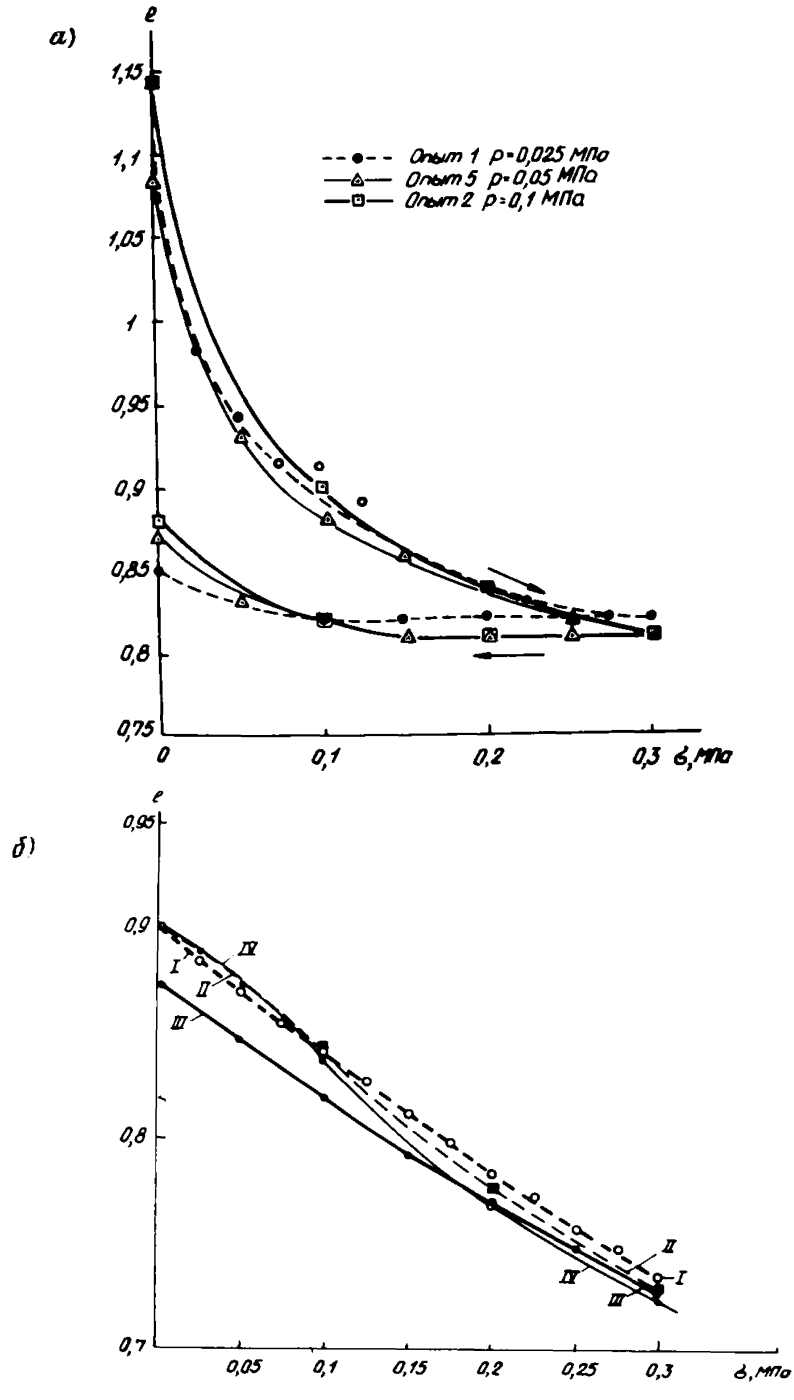


Рис. 8. Компрессионные кривые
а – паста каолинитовой глины ($w = w_{s\omega}$); б – суглинок пылеватый с ненарушенной структурой

II с х е м а – исследуемые образцы грунтов водонасыщаются в условиях свободного набухания (или под нагрузкой) до условной стабилизации деформации набухания по ГОСТ 24143–80, после чего к ним прикладывается давление, равное расчетному. Опыт проводится до условной стабилизации осадки (п. 3.45). По результатам испытания рассчитывают величину свободного набухания $\epsilon_{s\omega}$ или набухания под нагрузкой, а также значения КП для грунтов, набухших в заданных условиях напряженного состояния.

Первая схема позволяет изучить процессы консолидации и объемной ползучести в грунтах природного сложения с естественной влажностью, а также моделирует деформационное поведение грунтовых оснований в состоянии завершенной консолидации, при воздействии на них природных и техногенных вод.

Вторая схема позволяет прогнозировать значения параметров консолидации и ползучести грунтов на потенциально подтопляемых территориях после их замачивания.

В зависимости от реальной обстановки на площадке изысканий или застроенном участке возможны и другие схемы испытаний.

3.49. Водонасыщение образцов следует проводить грунтовой водой с места отбора монолитов. По заданию замачивание может быть осуществлено дистиллированной водой, технологическими утечками промышленных предприятий или искусственно приготовленными растворами заданного химического состава.

Проведение испытаний

3.50. Подготовленное с учетом правил, изложенных в п. 3.40, рабочее кольцо с грунтом, прикрытое с двух сторон фильтрами, устанавливают в одометр.

При испытании образцов природной влажности осуществляют меры для предохранения грунта от высыхания в течение опыта (обкладывают верхний штамп одометра ватой, смоченной жидким вазелином или водой, влажной марлей и т.п.).

При испытании слаболитифицированных водонасыщенных грунтов, не проявляющих способность набухать, рабочее кольцо закрепляют арретирным кольцом, точно доводя его до соприкосновения с поршнем. Затем образец водонасыщают предварительно дегазированной водой. Если насыщению подвергаются грунты со степенью влажности < 1, после его окончания кольцо с грунтом вынимают из прибора, взвешивают, после чего помещают его обратно в прибор.

Набухающие грунты испытывают после стабилизации деформации набухания в заданных условиях.

3.51. Испытание на консолидацию и объемную ползучесть рекомендуется проводить при однократном приложении давления, равного расчетному давлению, в середине исследуемого слоя грунта. Слабые грунты, строительство на которых возможно только после их предварительной огрузки песчаным слоем, следует испытывать при ступенчатом приложении двух нагрузок, первая из которых должна соответствовать давлению,

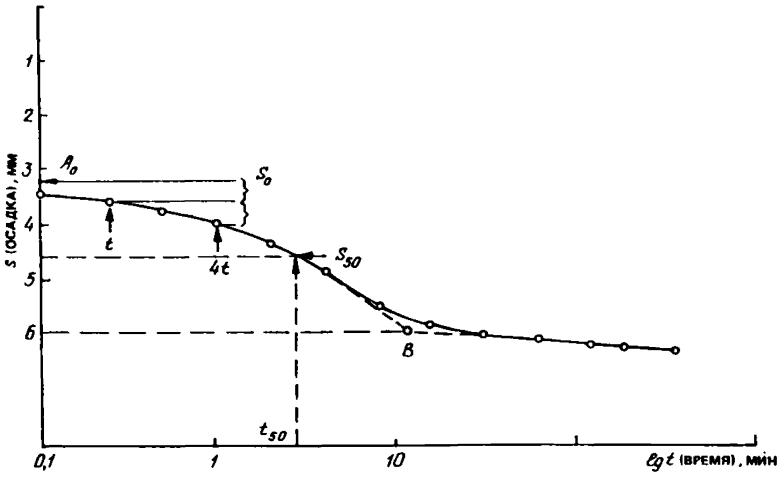


Рис. 9. Консолидационная кривая в координатах $S - \lg t$

создаваемому песчаным слоем, вторая – расчетному давлению от проектируемого сооружения.

3.52. После приложения нагрузки замер деформаций проводится одновременно по двум индикаторам одометра и по прибору, измеряющему поровое давление (если имеется соответствующая аппаратура).

Показания индикаторов регистрируют через 15″; 30″; 45″; 1′; 1,5′; 2′; 2,5′; 3′; 3,5′; 4′; 5′; 6′; 7′; 8′; 9′; 10′; 12′; 14′; 16′; 18′; 20′; 25′; 30′; 40′; 50′; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4 ч и далее через каждый час до конца рабочего дня. В последующие сутки показания индикаторов записываются в начале и конце рабочего времени.

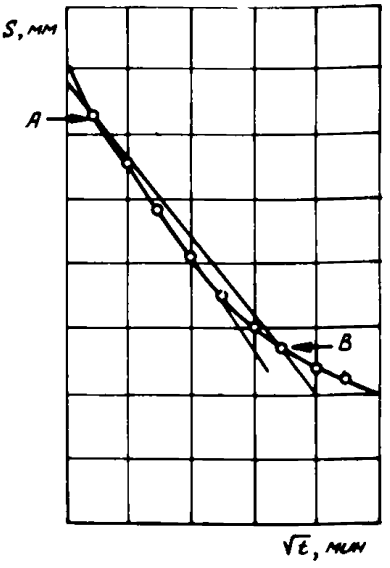
Примечание. Для облегчения дальнейших расчетов замеры приращения деформаций образца в течение опыта рекомендуется проводить всегда в одно и то же время.

3.53. Испытание считается законченным при достижении условной стабилизации деформации, не более 0,001 мм за 24 ч, или при практическом полном ее затухании. Выбор критерия условной стабилизации осадки следует производить в соответствии с п. 3.45 настоящего раздела.

3.54. Разгрузку образца следует производить сразу, снимая гири, создающие давление. Регистрация деформаций при разгрузке проводится через интервалы времени, соответствующие 15″; 30″; 1′; 2′; 5′; 10′; 20′; 30′; 60′ и далее через 1 ч до конца рабочего дня, затем в начале и в конце дня до достижения условной стабилизации деформации, равной 0,01 мм за 16 ч.

3.55. После окончания разгрузки образца удаляют воду из одометра. Кольцо с влажными фильтрами взвешивают и производят контрольное измерение его высоты. Все данные заносят в журнал испытаний грунта (прил. 4, 5).

Рис. 10. Консолидационная кривая в координатах $S - \sqrt{t}$



3.56. По замеренным в ходе испытания деформациям одновременно с его выполнением строят два графика:

кривую зависимости осадки от десятичного логарифма времени (рис. 9);

кривую зависимости осадки от квадратного корня из времени (рис. 10).

Построение кривой $S(\sqrt{t})$ следует проводить для грунтов со степенью влажности > 0,75.

3.57. После окончания испытания, учитывая консистенцию и особенности структуры грунта, а также характер консолидационной кривой $S(\lg t)$, устанавливают расчетную модель консолидации, состав соответствующих ей параметров и, исходя из этого, намечают методику дальнейшей обработки результатов испытания с целью выявления численных значений параметров консолидации и ползучести скелета грунта, необходимых для решения прогнозных задач консолидации (табл. 2).

Кривую $S(\lg t)$ используют также для определения этапов первичной (фильтрационной) консолидации и вторичной консолидации (ползучести).

Анализ консолидационных кривых различных по составу и состоянию дисперсных грунтов позволил выявить четыре характерные вида кривых, отражающих различное соотношение в процессе уплотнения грунтов, фильтрационных и реологических процессов.

1-й вид кривых связан с преобладающим вкладом фильтрационных явлений в общий ход осадок. Эти кривые консолидации имеют выпуклый участок и характерный перелом на графиках $S - \lg t$ и $S - \ln t$ (рис. 11).

Для 2-го и 3-го вида кривых свойственны деформации, связанные с фильтрационной консолидацией и ползучестью.

Таблица 2

Группа	Подгруппа	Вид консолидационной кривой	Модель консолидации, положенная в основу решения задач по прогнозу осадок во времени. Уравнения консолидации и ползучести	Расчетные параметры	Методы определения параметров одномерной консолидации и ползучести	Примечания
1	Сапропели, илы, слабоуплотненные водонасыщенные глинистые и пылеватые грунты текучепластичной и текучей консистенции ($I_L > 0{,}75$)	I*	Модель фильтрационной консолидации Терцаги–Герсеванова. Формулы (24), (25)	$c_к$ – коэффициент фильтрационной консолидации; $m_к$ – коэффициент относительной полной сжимаемости при компрессии	1. Метод квадратного корня Д. Тейлора. 2. Метод Казагранде. 3. Метод Тейлора–Строганова (по заданию)	Перечисленные методы могут быть применимы к слаборазложившимся водонасыщенным торфам
2	а) глинистые и пылеватые грунты мягкопластичной консистенции ($I_L = 0{,}5-0{,}75$); б) торфы и заторфованные грунты; в) глинистые и пылеватые грунты тугопластичной и полутвердой консистенции ($I_L < 0{,}5$)	II III IУ	Расчетные модели, учитывающие сжимаемость содержащей газы поровой жидкости и ползучести скелета грунта (В.А. Флорин, Ю.К. Зарецкий, З.Г. Тер-Мартиросян и др.). Формулы (26), (27)	c – коэффициент консолидации; m_c – коэффициент относительной мгновенной сжимаемости скелета грунта при компрессии; B – начальный коэффициент порового давления; δ, δ_1 – параметры экспоненциального	Интегральные методы идентификации КП с проведением расчетов на ЭВМ по программному комплексу GEOPAK-80	Интегральные методы определения КП рекомендуется применять и при изучении консолидации грунта текучей и текучепластичной консистенции с выраженными структурными связями (например, глинистых и пылеватых грунтов, содержащих

				ядра ползучести скелета грунта		органические вещества)
3	Грунты различного состава полутвердой консистенции, а также тугопластичные грунты с цементационными структурами	У	Расчетные модели, основанные на учете реологических свойств скелета грунта с экспоненциальным ядром ползучести. Формула (28)	m_c – коэффициент относительной мгновенной сжимаемости; δ, δ_1 – параметры экспоненциального ядра ползучести скелета грунта	То же	

* Вид консолидационной кривой следует устанавливать по рис. 11.

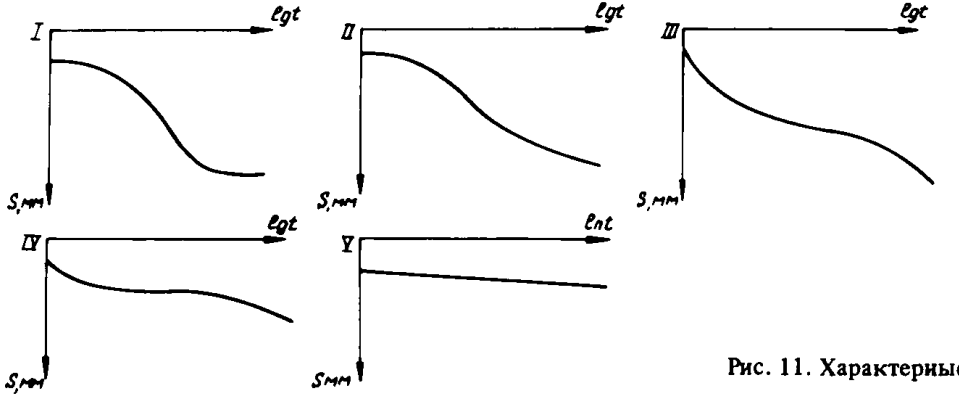


Рис. 11. Характерные виды консолидационных кривых $S(t)$

Кривые 4-го вида вызваны исключительно реологическими явлениями.

Особенности структуры и состояния грунтов с различным видом кривых охарактеризованы в табл. 2.

Методы определения параметров фильтрационной консолидации

3.58. Деформативность скелета грунта в модели фильтрационной консолидации (К. Терцаги – Н.М. Герсеванова) описывается одним параметром – коэффициентом относительной полной сжимаемости скелета грунта $m_к$, который рассчитывается по данным консолидационных испытаний:

$$m_к = S_к/(\sigma h) , \qquad (31)$$

где $S_к$ – стабилизированная осадка образца, мм, замеренная в опытах на консолидацию под расчетной нагрузкой σ, МПа; h – высота образца, мм.

3.59. Для определения коэффициента фильтрационной консолидации широко используются методы Тейлора, Казагранде и Тейлора–Строганова, основанные на графической обработке консолидационных кривых, построенных по значениям осадок во времени, замеренных в опытах на консолидацию.

Примечание. Выполненные ВНИИОСП и ПНИИИС сопоставления величин $c_к$, определенных методами Д. Тейлора и А. Казагранде, показали их достаточно хорошую сопоставимость.

Определение величины осадок, связанных с фильтрационной и вторичной консолидацией

3.60. Начало фильтрационной консолидации устанавливают по начальному участку кривой, построенной в координатах S_t и $\sqrt{t}$. Точку, соответствующую началу фильтрационного этапа, определяют продолжением прямолинейного участка кривой до оси осадок (точка A, рис. 10).

Конец фильтрационного уплотнения (V = 100 %) определяют по кривой, построенной в полулогарифмической системе координат (S_t и lg t) (см. рис. 9). Точка пересечения продолжения первого прямолинейного участка (первичной консолидации) с продолжением прямой, соответствующей этапу ползучести (точка B), принимается за окончание фильтрационного этапа уплотнения.

Величину фильтрационной осадки устанавливают по разности ординат точек, одна из которых соответствует осадке при 100 %-й фильтрационной консолидации (точка B) и нулевой, характеризующей начало фильтрационного этапа (точка A_0).

Определение коэффициента консолидации по логарифмическому методу А. Казагранде

3.61. При определении коэффициента консолидации по методу Казагранде необходимые для его расчета параметры находят при обработке консолидационной кривой, построенной в системе координат S_t (мм) – lgt (мин) (см. рис. 9). По лабораторной кривой устанавливают время начала фильтрационного этапа, деформации уплотнения, соответствующие 100 и 50 % первичной консолидации, а также время, соответствующее 50 % последней.

Начальная часть кривой зависимости деформации сжатия от логарифма времени представляет собой параболу. Поэтому для нахождения точки, соответствующей началу фильтрационной фазы уплотнения, на начальном участке кривой находят две точки, для которых время находится в соотношении 1:4 (например, 12″ и 48″). Тогда разность в показаниях индикатора в этих двух точках (A_1 и A_2) равна разности между показанием первой точки и показанием, соответствующим приведенному 0 (A_0). Исходя из сказанного, начало фильтрационного этапа находят, откладывая вверх от ординаты точки A_1 разность ординат точек A_2 и A_1.

Деформацию при 100%-й фильтрационной консолидации устанавливают по ординате пересечения двух прямых, одна из которых является продолжением прямолинейного участка кривой консолидации, соответствующего фазе ползучести, другая – касательной к отрезку кривой на участке, соответствующему фильтрационному этапу уплотнения. По половине разности показаний индикатора в точках B и A_0 находят осадку образца при 50 %-й фильтрационной консолидации и устанавливают время, соответствующее этой осадке (t_{50}). Коэффициент консолидации $c_к$, см²/с, рассчитывают по формулам:

$$c_к = \frac{0{,}197\,(0{,}5h)^2}{t_{50}\,60} \quad \text{– для опытов с двухсторонней фильтрацией;} \qquad (32)$$

$$c_к = \frac{0{,}197\,(h)^2}{t_{50}60} \quad \text{– для опытов с односторонней фильтрацией,} \qquad (33)$$

где 0,197 – числовой коэффициент для 50 %-й первичной консолидации;
h – высота образца, см.

Метод квадратных корней из времени (Д. Тейлора)

3.62. Коэффициент консолидации $c_к$ по методу Тейлора определяют путем обработки консолидационной кривой, построенной в системе координат S_t и $\sqrt{t}$, где S_t – деформация сжатия грунта в мм (см. рис. 10). На графике проводят прямую, совпадающую с начальным прямолинейным участком кривой консолидации. Пересечение этой кривой с осью ординат (точка A) называется точкой начала первичной консолидации. Начальная

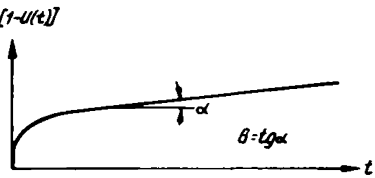


Рис. 12. Консолидационная кривая в координатах $-\ln[1-U(t)]-t$

осадка вызвана сжатием и растворением пузырьков газа в поровой воде, упругими деформациями грунта и т.д. Из точки A проводят вторую прямую, абсциссы которой составляют 1,15 соответствующих абсцисс первой прямой. Точка пересечения второй прямой с экспериментальной кривой (точка B) определяет 90 % консолидации ($u = 90$), а соответствующее ей время дает t_{90}.

Коэффициент консолидации $c_к$,см^2/с,при двухсторонней фильтрации определяется по формулам:

$$c_к = \frac{0{,}848\,(0{,}5h)^2}{t_{90}\,60} \quad \text{– для опытов с двухсторонней фильтрацией;} \tag{34}$$

$$c_к = \frac{0{,}848\,(h)^2}{t_{90}\,60} \quad \text{– для опытов с односторонней фильтрацией,} \tag{35}$$

где 0,848 – числовой коэффициент Тейлора для 90 %-й первичной консолидации; h – высота образца, см; t_{90} – время, соответствующее 90 %-й первичной консолидации, мин.

3.63. В методе Тейлора–Строганова консолидационные кривые строятся в системе координат $-\ln[1-u(t)]-t$. Они аппроксимируются прямой $a + bt = -\ln[1-u(t)]$ (рис. 12).

В пределах прямолинейного участка графика, соответствующего фильтрационной консолидации, результаты опытов обрабатываются методом наименьших квадратов. Тангенс угла наклона прямой вычисляется по формуле

$$b = \frac{N\sum\limits_{i=1}^{N} t_i[1-u(t_i)] + \sum\limits_{i=1}^{N} t_i \sum\limits_{i=1}^{N} \ln[1-u(t_i)]}{N\sum\limits_{i=1}^{N} t_i^2 - \left(\sum\limits_{i=1}^{N} t_i\right)^2}, \tag{36}$$

где $u(t_i) = S(t_i)/S_к$; $S(t_i)$ – значение осадки, замеренной в момент времени t_i; N – число экспериментальных точек.

Тогда коэффициент фильтрационной консолидации будет равен

$$c_к = bh^2\,0{,}393\,. \tag{37}$$

Формула (37) справедлива при условии одностороннего дренирования образцов в компрессионных приборах. Для случая двухсторонней фильтрации поровой жидкости в эту формулу следует подставлять величину h, равную половине высоты образцов.

Интегральные методы нахождения параметров в одномерной консолидации

3.64. Современные методы прогноза протекания осадок во времени, применительные к квазидвухфазным грунтам, требуют определения комплекса параметров, характеризующих ползучесть скелета грунта, фильтрацию сжимаемости поровой жидкости и ряда других факторов, что является весьма трудоемкой задачей, а также наличия в лабораториях специального оборудования.

Анализ существующих методов выявления КП показывает, что они имеют ряд серьезных недостатков: крайне низкая точность КП, определяемых прямым путем; восстановление КП косвенными способами по значениям осадок только для простейших моделей, недостаточно учитывающих особенности уплотнения ряда грунтов; принципиальные трудности поиска реологических характеристик, поскольку ползучесть грунтов протекает на фоне фильтрации поровой жидкости; отсутствие рекомендаций по осреднению КП; высокая трудоемкость опытов и уникальность их технического обеспечения.

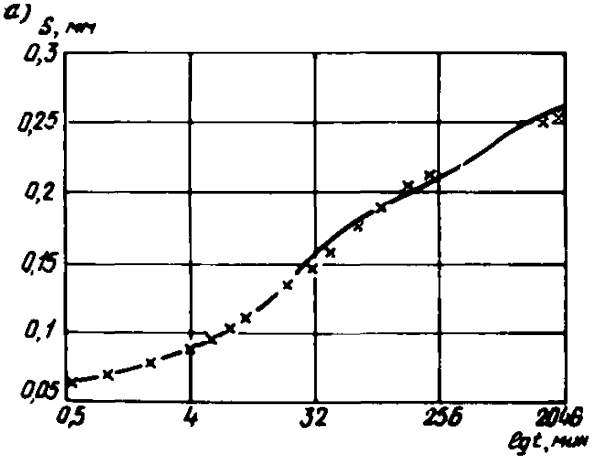
Несоответствие между современными методами решения ПЗК и низкую достоверность закладываемых в расчеты КП можно ликвидировать при использовании для их нахождения интегральных методов, разработанных Б.В. Сухаревым.

3.65. Интегральный метод заключается в определении консолидационных параметров (КП) на основе решения обратной (коэффициентной) задачи консолидации с помощью ЭВМ, содержанием которой является восстановление КП по данным консолидационных испытаний. При решении обратной задачи консолидации идентифицируются численные значения следующих параметров: c – коэффициента консолидации; B – коэффициента, учитывающего сжимаемость газированной поровой жидкости; m_c – коэффициента первичной относительной сжимаемости; δ и δ_1 – параметров экспоненциального ядра ползучести.

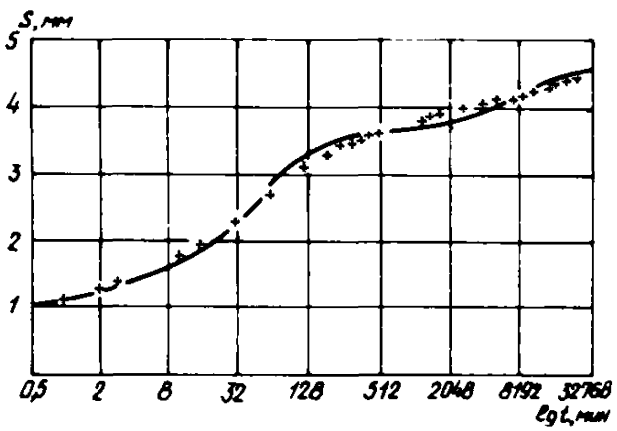
Исходными данными для работы программы служат замеры деформаций во времени, которые определяются при испытаниях грунтов на консолидацию по методике, изложенной в п. 3.60.

3.66. Проверка интегрального метода, осуществленная в ПНИИИСе и ГорьковТИСИЗе на характерных литологических типах грунтов различной консистенции ($I_L > 0$) с коагуляционными, смешанными и конденсационными структурными связями, показала практически полную сходимость между экспериментальными значениями осадок и найденными расчетным способом с применением этого метода. Максимальные отклонения между экспериментальными и теоретическими значениями осадок не превышают 2–5 % (рис. 13, *а – з*). На рисунках совместно с расчетной кривой, полученной с использованием КП, определенных интегральным

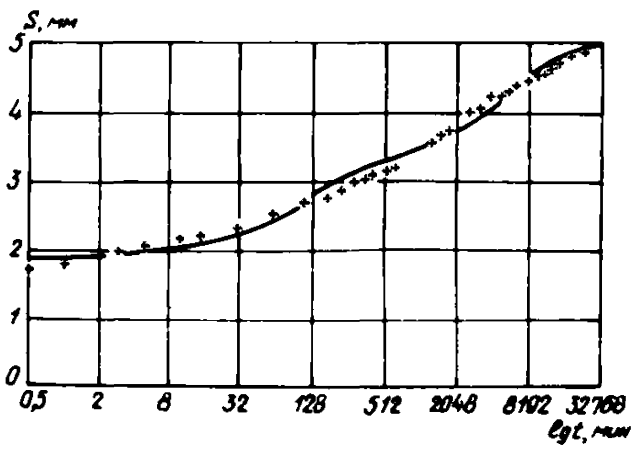
а)


S, мм
0,3
0,25
0,2
0,15
0,1
0,05
0,5
4
32
256
2048
lgt, мин

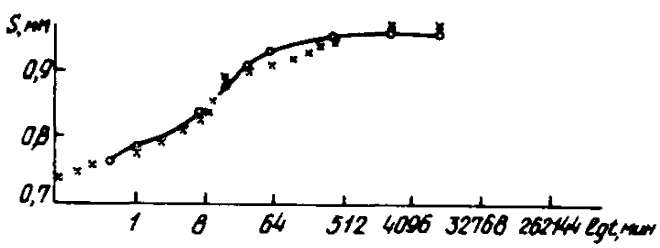
б)


S, мм
5
4
3
2
1
0,5
2
8
32
128
512
2048
8192
32768
lgt, мин

в)


S, мм
5
4
3
2
1
0
0,5
2
8
32
128
512
2048
8192
32768
lgt, мин

г)


S, мм
0,9
0,8
0,7
1
8
64
512
4096
32768
262144
lgt, мин

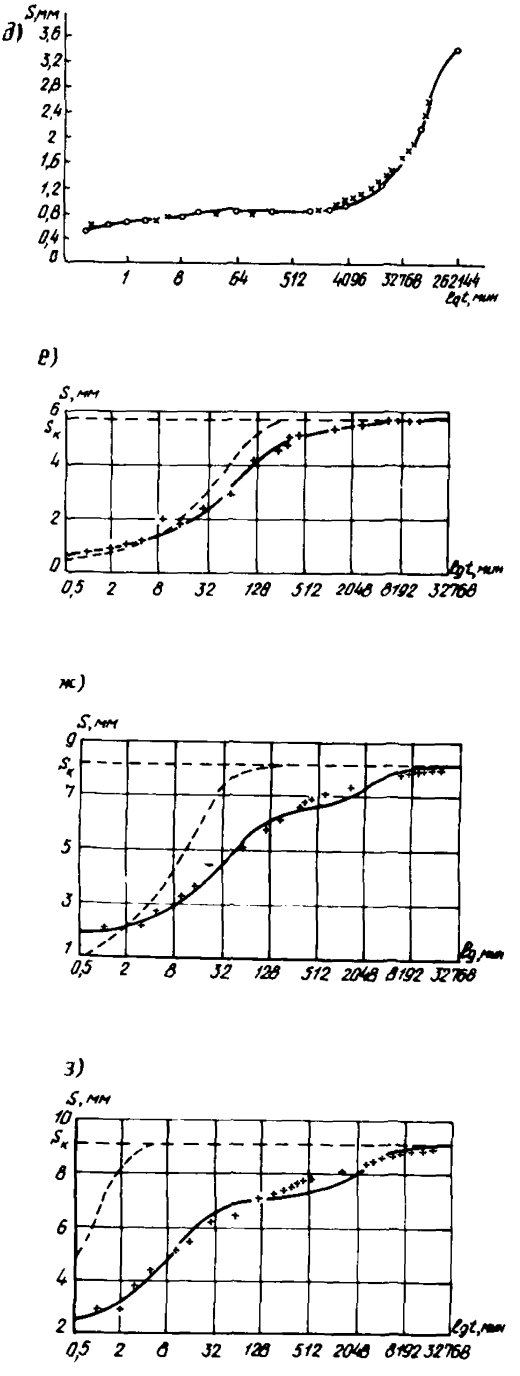


Рис. 13. Консолидационные кривые: *а* – озерно-аллювиального тяжелого суглинка (Среднее Приобье); *б* – торфа (г. Горький, Мещерское озеро); *в* – заторфованного суглинка (г. Горький, Мещерское озеро); *г* – озерно-ледниковой глины, I_L = 0,06 (г. Горький); *д* – пермской глины I_L = 0,21; *е* – заторфованного суглинка q = = 0,17 (г. Горький); *ж* – зторфованного суглинка q = 0,21 (г. Горький); *з* – сильноразложившегося торфа R > 95%; q = 0,55 (г. Горький); ——— – *теоретическая кривая, рассчитанная по параметрам, определенным по интегральному методу (*c, m_c, B, δ и δ_1*);* ++++++ – *экспериментальные данные, полученные при испытаниях грунтов на консолидацию;* – – – – – – *расчетная кривая, полученная с использованием коэффициента* $c_к$, *определенного по методу квадратного корня*

Таблица 3

Литологический тип породы	Содержание органического вещества q, %	Влажность w, %	Плотность ρ, г/см³	Плотность сухого грунта ρ_d, г/см³	Плотность частиц грунта ρ_s, г/см³	Пористость n, %
Слаболитифицированные грунты и пасты мономинеральных грунтов						
Сфагновый фуксум-торф, слаборазложившийся, $R = 5$ %	0,98	14,8	0,99	0,06	1,55	96,1
Торф, сильноразложившийся, $R > 95$ %	0,52	1,49	1,1	0,44	1,82	76
То же $R > 95$ %	0,55	2,77	1,1	0,29	1,84	84
» $R = 88$ %	0,54	2,16	1,07	0,34	1,57	78
» $R = 96$ %	0,55	2,64	1,03	0,3	1,51	79
Суглинок заторфованный	0,23	1,39	1,29	0,54	1,91	71
То же	0,17	1	1,34	0,67	2,42	72
Органический сапропель	0,55	8	1	0,11	1,8	93,88
Суглинок озерно-аллювиальный гумусированный	0,19	0,87	1,37	0,73	2,27	67,84
Суглинок аллювиальный гумусированный	0,06	0,44	1,69	1,22	2,69	54,65
Суглинок покровный пылеватый	0,31	0,34	1,74	1,4	2,67	47,8
Гумбрин (паста)	–	0,94	1,42	0,73	2,66	72,56
То же	–	0,84	1,52	0,82	2,66	69,32
Каолинит (паста)	–	0,4	1,72	1,23	2,63	53,23
Грунты средней и высокой степени литификации						
Глина водно-ледниковая	–	0,21	2,02	1,68	2,7	38
То же	–	0,18	2,06	1,75	2,72	38
»	–	0,2	2,07	1,72	2,72	37
Пермская глина	–	0,42	1,76	1,24	2,74	55
То же	–	0,46	1,77	1,22	2,74	56

Продолжение табл. 3

Литологический тип породы	Коэффициент пористости e	Степень влажности S_r	Пластичность			Нагрузка σ, МПа	Коэффициент консолидации c, мм²/мин
			предел текучести	предел раскатывания	число пластичности		
Слаболитифицированные грунты и пасты мономинеральных грунтов							
Сфагновый фуксум-торф, слаборазложившийся, $R = 5\ \%$	24,83	0,98	–	–	–	0,05	63,32/ –
Торф, сильноразложившийся, $R > 95\%$	3,1	0,88	–	–	–	0,3	7,04/26,17*
То же, $R > 95\ \%$	5,34	0,95	–	–	–	0,3	7,28/67,60*
” $R = 88\ \%$	3,64	0,93	–	–	–	0,15	1,08/ –
” $R = 96\ \%$	3,99	0,91	–	–	–	0,15	7,4/ –
Суглинок заторфованный	2,53	1	–	–	–	0,15	1,54/ –
То же	2,61	0,92	–	–	–	0,3	0,84/1,02*
Органический сапропель	15,36	0,94	–	–	–	0,02	0,43/ –
Суглинок озерно-аллювиальный гумусированный	2,11	0,94	118	94	24	0,15	9,56/ –
Суглинок аллювиальный гумусированный	1,2	1	–	–	–	0,02	98,73/ –
Суглинок покровный пылеватый	0,91	0,99	31	20	11	0,02	38,12/ –
Гумбрин (паста)	2,64	0,95	94,8	59,6	35,2	0,025	2,45/ –
То же	2,26	1	–	–	–	0,1	0,69/ –
Каолинит (паста)	1,13	0,93	40,3	31,3	9	0,05	11,94/ –
Грунты средней и высокой степени литификации							
Глина водно-ледниковая	0,61	0,91	38	22	16	0,6	27,85/ –
То же	0,57	0,88	33	18	15	0,6	29,28/ –
”	0,58	0,94	35	19	16	0,6	–
Пермская глина	1,21	0,95	74	37	37	0,6	4,95/ –
То же	1,25	1	72	39	33	0,6	20,25/ –

Продолжение табл. 3

Литологический тип породы	Коэффициент первичной относит. сжимаемости m_c, МПа$^{-1}$	Коэффициент, учитыв. сжимаемость поровой воды B	Параметры экспоненциального ядра ползучести		Район отбора образца
			δ_1, 1/мин	δ, 1/мин	
Слаболитифицированные грунты и пасты мономинеральных грунтов					
Сфагновый фуксум-торф, слаборазложившийся, $R = 5\,\%$	8,92	0,68	$0{,}230 \cdot 10^{-4}$	$0{,}361 \cdot 10^{-4}$	Архангельская обл.
Торф, сильноразложившийся, $R > 95\,\%$	0,811	0,68	$4{,}373 \cdot 10^{-4}$	$1{,}157 \cdot 10^{-4}$	г. Горький, район Мещерского озера
То же, $R > 95\,\%$	0,923	0,76	$3{,}810 \cdot 10^{-4}$	$1{,}173 \cdot 10^{-4}$	То же
" $R = 88\,\%$	0,834	0,41	$0{,}164 \cdot 10^{-4}$	$0{,}892 \cdot 10^{-4}$	"
" $R = 96\,\%$	1,545	0,49	$0{,}135 \cdot 10^{-3}$	$0{,}396 \cdot 10^{-4}$	"
Суглинок заторфованный	0,929	0,74	$0{,}153 \cdot 10^{-3}$	$0{,}483 \cdot 10^{-4}$	"
То же	0,645	0,91	$6{,}711 \cdot 10^{-4}$	$1{,}188 \cdot 10^{-4}$	"
Органический сапропель	1,235	0,44	$0{,}520 \cdot 10^{-4}$	$0{,}199 \cdot 10^{-4}$	БССР, озеро Червонное
Суглинок озерно-аллювиальный гумусированный	0,061	0,18	$0{,}211 \cdot 10^{-3}$	$0{,}482 \cdot 10^{-4}$	Среднее Приобье
Суглинок аллювиальный гумусированный	0,022	0,58	$0{,}303 \cdot 10^{-2}$	$0{,}135 \cdot 10^{-2}$	То же
Суглинок покровный пылеватый	0,035	0,91	$0{,}759 \cdot 10^{-2}$	$0{,}290 \cdot 10^{-2}$	"
Гумбрин (паста)	0,252	0,96	$0{,}147 \cdot 10^{-3}$	$0{,}136 \cdot 10^{-4}$	"
То же	0,003	0,69	$0{,}101 \cdot 10^{-2}$	$0{,}574 \cdot 10^{-3}$	"
Каолинит (паста)	0,111	0,93	$0{,}702 \cdot 10^{-2}$	$0{,}341 \cdot 10^{-4}$	"
Грунты средней и высокой степени литификации					
Глина водно-ледниковая	0,075	0,14	$0{,}521 \cdot 10^{-5}$	$0{,}836 \cdot 10^{-5}$	г. Горький
То же	0,075	0,49	$0{,}124 \cdot 10^{-4}$	$0{,}406 \cdot 10^{-5}$	То же
"	0,052	–	$0{,}580 \cdot 10^{-1}$	–	"
Пермская глина	0,085	0,6	$0{,}428 \cdot 10^{-5}$	$0{,}121 \cdot 10^{-5}$	"
То же	0,058	0,33	$0{,}917 \cdot 10^{-5}$	$0{,}304 \cdot 10^{-4}$	"

* Коэффициент консолидации c_K, определенный методом квадратного корня Д. Тейлора.

методом, прерывистой линией изображены кривые $S(t)$, рассчитанные без учета реологических свойств скелета грунта и сжимаемости газосодержащей поровой жидкости с использованием $c_к$, определенному по методу Тейлора. Как видно по рисунку время стабилизации осадки образца заторфованного суглинка, найденное по расчетной схеме фильтрационной консолидации, сильно занижено по сравнению с экспериментальными данными (табл. 3).

Обратная задача

3.67. Для нахождения КП по данным лабораторных исследований проводится решение ОЗК по результатам опытов на консолидацию образца высотой h под расчетной нагрузкой σ (фильтрация поровой жидкости в образце вертикальная двухсторонняя). Тогда известны значения осадки грунта во времени $S(t)$. Функция

$$S(t) = \int_0^h \varepsilon(x,t)\,dx \qquad (38)$$

является дополнительным условием для ОЗК.

3.68. Выполним интегрирование уравнения (26) – однократного по времени и многократного по пространственной координате для исключения всех производных в выражении (26). Соответствующий интегральный аналог уравнения консолидации имеет вид:

$$\Phi(T) + \delta\int_0^T \exp[-\delta_1(T-t)]\,\Phi(t)\,dt - $$

$$-\frac{1-B}{B}\left\{\frac{h^3}{12}m_c\sigma\left[1+\frac{\delta}{\delta_1}\left\{1-\exp(-\delta_1 T)\right\}\right]-\right.$$

$$\left.-\Phi(T) = c\int_0^T\left(hm_c\sigma\left\{1-\frac{\delta}{\delta_1}\left[1-\exp(-\delta_1 t)\right]\right\}-S(t)\right)dt, \right. \qquad (39)$$

где $\Phi(T)$ – статический момент площади эпюры перемещений квазидвухфазного грунта относительно центра уплотняемого слоя в момент времени T.

3.69. Если T – время, большее или равное времени стабилизации осадки, то формула запишется следующим образом:

$$\frac{S_к h^2}{12}\left(1+\frac{\delta}{\delta_1}\right) = c\int_0^T\left(hm_c\sigma\left\{1+\frac{\delta}{\delta_1}\left[1-\exp(-\delta_1 t)\right]\right\}-S(t)\right)dt. \qquad (40)$$

3.70. Для нахождения величины $\Phi(t)$ эпюру относительных вертикальных деформаций аппроксимируем квадратичной зависимостью, параметры которой удовлетворяют краевым условиям задачи и интегрально соответствуют в каждый момент времени возникающей осадке.

Если $S(t) < \frac{\cdot}{3}\ hm_c\sigma\left\{3 - 2B + \frac{\delta}{\delta_1}[1 - \exp(-\delta_1 t)]\right\}$, (41)

то $\Phi(t) = \frac{1}{60}\left\{30S(t)x_1(h - x_1) + 2Nx_1(5h^2 - 10hx_1 + 4x_1^2) - \right.$

$-10m_c\sigma(1 + \frac{\delta}{\delta_1} - [1 - \exp(-\delta_1 t)])x_1^2(3h - 4x_1) + 5(1 - B)\times$

$\left. \times\ m_c\sigma(h - 2x_1)^3\right\}$, (42)

где $N = \frac{m_c\sigma\left\{B + \frac{\delta}{\delta_1}[1 - \exp(-\delta_1 t)]\right\}}{h - x_1}$, (43)

а x_1 является меньшим корнем уравнения

$$4x_1^2 - 3x_1(2h - M) + 3h(h - M) = 0, \quad (44)$$

в котором

$$M = \frac{hm_c\sigma\left\{1 + \frac{\delta}{\delta_1}[1 - \exp(-\delta_1 t)]\right\} - S(t)}{m_c\sigma\left\{B + \frac{\delta}{\delta_1}[1 - \exp(-\delta_1 t)]\right\}}. \quad (45)$$

Если условие (41) нарушается, то

$$\Phi(t) = \frac{h^2}{60}(6S(t) - hm_c\sigma\left\{1 + \frac{\delta}{\delta_1}[1 - \exp(-\delta_1 t)]\right\}. \quad (46)$$

3.71. Интегральный аналог (40), в котором $\Phi(t)$ определяется формулами (42) или (46), связывает известную из опытов осадку во времени с искомыми КП m_c, c, B, δ и δ_1. Варьируя в нем высоту образцов грунта или верхний предел интегрирования T по числу неизвестных КП, можно получить замкнутую систему нелинейных алгебраических уравнений для нахождения КП.

Алгоритм поиска КП интегральными методами приведен в пп. 3.76 – 3.78.

Методы определения консолидационных параметров

3.72. Задача осреднения консолидационных параметров на практике возникает в следующих случаях:

при прогнозе осадок во времени оснований зданий и сооружений, представленных напластованиями достаточно однородных слоев слабых водонасыщенных грунтов;

при обработке результатов консолидационных испытаний однородных образцов одной грунтовой разности.

3.73. Расчет на этапе проектирования осадок во времени слоисто-однородных уплотняемых толщ может быть выполнен двумя способами:

путем строгого решения ПЗК, сформулированной в виде системы уравнений консолидации для каждого слоя и совокупности условий сохранения слоев;

путем приведения слоисто-однородной толщи к квазиоднородной за счет осреднения КП отдельных грунтовых слоев и использования формул (24) – (25), (28) и (29).

3.74. Осреднение КП грунтовых толщ, находящихся в условиях компрессионного сжатия, производится по следующим формулам:

для модели фильтрационной консолидации:

$$m_{\kappa} = \sum_{i=1}^{N} h_i m_{\kappa_i}/h\,; \qquad h/c_{\kappa} = m_{\kappa} \sum_{i=1}^{N} h_i/(c_{\kappa_i} m_{\kappa_i})\,, \tag{47}$$

где N – количество слоев в сжимаемой толще мощностью h;

для модели консолидации квазидвухфазных грунтов с учетом ползучести их скелета:

$$m_c = \sum_{i=1}^{N} M_i/h; \quad B = \sum_{i=1}^{N} M_i B_i/M; \quad h/c = m_c \sum_{i=1}^{N} h_i/(c_i m_{c_i})\,; \tag{48}$$

$$\delta_1 = \Big(\sum_{i=1}^{N} M_i \delta_i/\delta_{1i}\Big)/\Big(\sum_{i=1}^{N} M_i \delta_i/\delta_{1i}^2\Big); \quad \delta = \delta_1 \Big(\sum_{i=1}^{N} M_i \delta_i/\delta_{1i}\Big)/M,$$

где $M_i = h_i m_{c_i}$; $\quad M = h m_c$.

3.75. Осреднение КП для совокупности образцов, испытанных в лабораторных условиях, может быть выполнено по формулам (47) и (48). В этом случае h_i – высота i-го образца; h – сумма высот всех N образцов. Например, для образцов-близнецов выражения (48) примут вид:

$$m_c = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} m_{c_i}; \quad B = \frac{1}{N m_c}\sum_{i=1}^{N} m_{c_i} B_i; \quad \frac{N}{c} = m_c \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{m_c c_i}\,;$$

$$\delta_1 = \Big(\sum_{i=1}^{N} m_{c_i} \frac{\delta_i}{\delta_{1_i}}\Big)\Big/\Big(\sum_{i=1}^{N} m_{c_i} \frac{\delta_i}{\delta_{1_i}^2}\Big); \quad \delta = \frac{\delta_1}{N m_c} \sum_{i=1}^{N} m_{c_i} \frac{\delta_i}{\delta_{1_i}}\,. \tag{49}$$

Краткое описание программы

3.76. Программа предназначена для определения консолидационных параметров квазидвухфазных грунтов, ползучесть скелета которых описывается линейными уравнениями наследственного типа с экспоненциальными ядрами $k_c(t) = k_B(t) = \delta \exp(-\delta_1 t)$.

В основе программы лежит использование интегрального аналога линейного дифференциального уравнения одномерной консолидации

$$\frac{m_c}{m_c}\{\Phi(t)\} + \frac{1-B}{B}[\Phi(t) - \frac{h^3}{12}\tilde{m}_c\{\sigma(t)\} =$$

$$= c\int_0^t [h\tilde{m}_c\{\sigma(\tau)\} - S(\tau)]\,d\tau, \qquad (50)$$

где $\tilde{m}_c\{y(t)\}$ – интегральный оператор, который воздействует на произвольную функцию $y(t)$ следующим образом:

$$\tilde{m}_c\{y(t)\} = m_c[y(t) + \int_0^t k_c(t-\tau)\,y(\tau)\,d\tau]. \qquad (51)$$

3.77. Для решения прямой задачи консолидации, позволяющей прогнозировать развитие осадок во времени, программой рассчитываются следующие консолидационные параметры: c – коэффициент консолидации; B – коэффициент, учитывающий сжимаемость газированной поровой жидкости; m_c – коэффициент первичной относительной сжимаемости; δ; δ_1 – параметры ядра ползучести скелета грунта.

Исходными данными для работы программы служат: h – высота образца, испытываемого в компрессионном приборе; σ – прикладываемая к образцу ступень нагрузки; t_i – моменты времени, когда выполняются замеры осадки в процессе консолидационных испытаний; S_i – замеренная осадка образца в момент времени t_i; $i = 1, \ldots, n$; T_j – моменты времени, для которых составляются интегральные аналоги $j = \overline{1,4}$; $T_j < T_{j+1}$. Величины $T_1 - T_3$ соответствуют значениям осадок, разбивающим ветвь первичной консолидации, выявленной по методу Казагранде, приблизительно на три равные части. Величина T_4 принимается равной времени стабилизации осадки или окончания эксперимента.

Кроме того, задается совокупность параметров программы, управляющих ходом вычислительного процесса.

Укрупненная блок-схема программы определения консолидационных параметров квазидвухфазных грунтов при экспоненциальных ядрах ползучести интегральным методом

3.78. А. Блок ввода исходных данных, в том числе

h; σ; T_j; $j = 1, \ldots, 4$ $(T_j < T_{j+1})$; t_i; S_i; $i = 1, \ldots, n$.

Б. Блок аппроксимации экспериментальных данных $t_i - S_i$ ортогональными полиномами Чебышева $S = f(t)$.

В. Блок аппроксимации конечного участка кривой консолидации ($t \geqslant t_m$) функцией $S(t) = S_к - A\exp(-\delta_1^{(0)} t)$ путем минимизации $\varphi(S_к;\ \delta_1^{(0)};\ A) = \sum_{i=1}^{n} [S_i - S(t_i)]^2$ (52) методом переменной метрики Дэвидона–Пауэлла.

Г. Блок решения обратной задачи по определению консолидационных параметров:

1. Начало цикла по k для расчета δ_1.

2. $\delta_1 = \delta_1^{(k-1)}$ ($\delta_1^{(0)}$ принимается из п. В).

3. Начало цикла по i для расчета В.

4. $B = B^{(i-1)}$ $(B(0) = 1)$.

5. Определение m_c при фиксированных значениях δ_1 и В методом половинного деления из условия $c(T_2) = c(T_3)$, где

$$c(T_j) = \frac{\dfrac{\tilde{m}_c}{m_c}\{\Phi(T_j)\} + \dfrac{1-B}{B}\left[\Phi(T_j) - \dfrac{h^3}{12}\tilde{m}_c\{\sigma(T_j)\}\right]}{\int_0^{T_j}\left[h\tilde{m}_c\{\sigma(\tau)\} - S(\tau)\right]d\tau}, \qquad (53)$$

причем $0 < m_c \leqslant S_к/(\sigma h)$.

6. Начало цикла по e для расчета a при фиксированных c, m_c, δ_1.

7. $a = a^{(e-1)}$ $\qquad (a^{(0)} = (1-B)/B)$.

8.
$$a^{(e)} = \frac{c\int_0^{T_1}\left[h\tilde{m}_c\{\sigma(\tau)\} - S(\tau)\right]d\tau - \dfrac{\tilde{m}_c}{m_c}\{\Phi(T_1)\}}{\Phi(T_1) - \dfrac{h^3}{12}\tilde{m}_c\{\sigma(T_1)\}}. \qquad (54)$$

9. Если заданная точность вычисления a достигнута, то идти к п. 11.

10. Конец цикла по e.

11. Если получившееся значение $a^{(e)} < 0$, то принимается $a^{(e)} = 0$ (двухфазный грунт).

12. $B^{(i)} = 1/(1 + a^{(e)})$.

13. Если заданная точность вычисления B достигнута, то идти к п. 15.

14. Конец цикла по i.

15. Определение $\delta_i^{(k)}$ при фиксированных $c, m_c, B = B^{(i)}$

$$\delta_1^{(k)} = \frac{c(S_K - m_C \sigma h)\,[1 - \exp(-\delta_1 T_4)]}{c\int_0^{T_4}[S_K - S(t)]\,dt - \frac{\tilde{m}_C}{m_C}\{\sigma(T_4)\} - \frac{1-B}{B}[\Phi(T_4) - \frac{h^3}{12}\tilde{m}_C\{\sigma(T_1)\}]} \quad (55)$$

16. $\delta = \delta_1^{(k)}[S_K/(m_C \sigma h) - 1]$.

17. Если заданная точность вычисления δ_1 достигнута, то идти к п. 19.

18. Конец цикла по k.

19. Печать результатов: c, m_C; B; δ_1; δ.

Д. Блок решения прямой задачи по определению теоретических значений $S(t_i)$ при найденных консолидационных параметрах. Печать результатов решения прямой задачи.

Е. Конец программы.

Программа написана на алгоритмическом языке ФОРТРАН-4 для ЭВМ ЕС-1022.

Пример нахождения консолидационных параметров и их практического применения

3.79. Пусть необходимо выполнить прогноз осадки во времени площадки, отсыпанной дренирующим материалом, например, песком средней крупности и крупным, с высотой слоя 2 м и объемной массой 1,6 г/см³. Площадка имеет форму прямоугольника с минимальной стороной 10 м. В основании площадки залегает подстилаемый песком среднеразложившийся торф мощностью 1,6 м со следующими физико-механическими характеристиками:

$$\rho_s = 1{,}54 \text{ г/см}^3; \quad \rho = 0{,}917 \text{ г/см}^3; \quad \rho_d = 0{,}12 \text{ г/см}^3;$$

$$w = 663\,\%; \quad c = 11{,}8.$$

При выборе расчетной схемы примем следующие допущения:

максимальная осадка насыпи возникает в ее центральной части, где торф находится в условиях одномерного напряженно-деформированного состояния (компрессионного сжатия);

по условиям дренирования слоя торфа в нем будет происходить двухсторонняя фильтрация поровой жидкости при консолидации;

в связи с незначительной сжимаемостью песчаных грунтов (по сравнению с торфом) дополнительными осадками за счет собственного их деформирования можно пренебречь;

нагрузка на слой торфа, вызванная весом насыпи, составляет $\delta =$

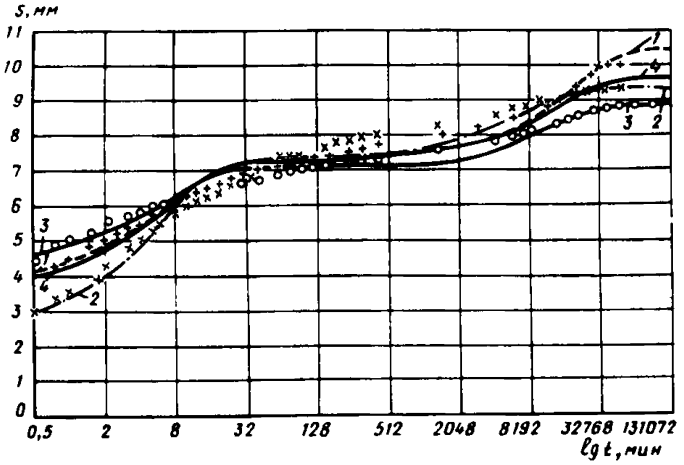


Рис. 14. Экспериментальные данные и решения ПЗК с восстановленными КП для торфа: *1* – образец К1-1; *2* – К1-2; *3* – К1-3; *4* – ПЗК с осредненными КП

$= 1{,}6 \cdot 200 \cdot 10^{-4} = 0{,}032$ МПа. Изменение нагрузки во времени в строительный период не учитываем.

Таким образом, задача сводится к расчету одномерной консолидации слоя торфа высотой 160 см под действием мгновенно приложенной нагрузки $\delta = 0{,}032$ МПа.

Для решения поставленной задачи выполнены следующие операции.

1. В процессе инженерно-геологических изысканий отобраны образцы торфа. Три образца-близнеца (К1-1, К1-2, К1-3) подвергнуты консолидационным испытаниям в одометрах с высотой кольца 30 мм под проектной нагрузкой $\delta = 0{,}032$ МПа. Замеренные при этом осадки во времени показаны дискретными графическими знаками на рис. 14.

2. Экспериментальные данные использованы для решения ОЗК интегральными методами. Полученные при этом консолидационные параметры представлены в табл. 4.

Таблица 4

Номер образца	c, мм²/мин	m_c, МПа$^{-1}$	B, δ/р	$\delta_1 - 10^4$, мин$^{-1}$	$\delta_2 - 10^4$, мин$^{-1}$
К1-1	22,977	7,632	0,531	0,579	0,246
К1-2	18,289	7,652	0,742	1,424	0,386
К1-3	31,453	7,361	0,429	0,878	0,224

Соответствующие кривые консолидации образцов, рассчитанные на основе найденных интегральных характеристик, показаны на рис. 15.

3. Для нахождения осредненных для всего слоя торфа консолидационных параметров приведенные в табл. 4 величины обработаны с помощью зависимостей (48) – (49):

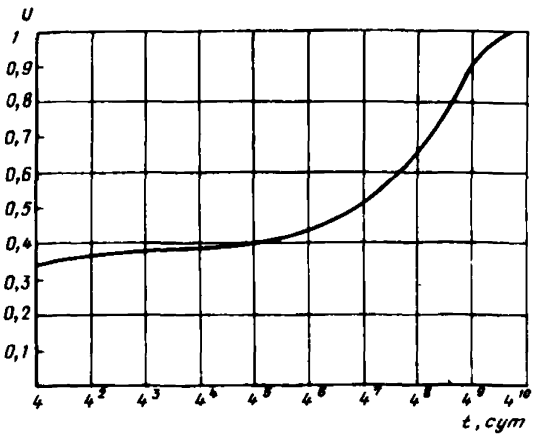


Рис. 15. Прогноз осадки насыпной площадки во времени

$$m_{c_0} = \sum_{i=1}^{N} m_{c_i}/N = (7{,}632 + 7{,}652 + 7{,}361)/3 = 7{,}548 \text{ МПа}^{-1}; \qquad (56)$$

$$B_0 = \sum_{i=1}^{N} m_{c_i} B_i/(N m_{c_0}) = (7{,}632 + 0{,}531 + 7{,}652 \cdot 0{,}742 +$$

$$+ 7{,}363 \cdot 0{,}429)/(3 \cdot 7{,}548) = 0{,}569; \qquad (57)$$

$$c_0 = N/[m_{c_0} \sum_{i=1}^{N} 1/(m_{c_i} c_i)] = 3/\{7{,}548[1/(7{,}632 \cdot 22{,}977 +$$

$$+ 7{,}652 \cdot 18{,}289 + 7{,}361 \cdot 31{,}453)]\} = 23{,}151 \text{ мм}^2/\text{мин} =$$

$$= 0{,}0333 \text{ м}^2/\text{сут}; \qquad (58)$$

$$\delta_{10} = \left(\sum_{i=1}^{N} m_{c_i} \frac{\delta_i}{\delta_{1i}}\right) / \left(\sum_{i=1}^{N} m_{c_i} \frac{\delta_1}{\delta_{1c}}\right) = (7{,}632 \cdot 0{,}246/0{,}579 +$$

$$+ 7{,}652 \cdot 0{,}386/1{,}424 + 7{,}361 \cdot 0{,}224/0{,}879)\ 10^{-4} : (7{,}632 \cdot 0{,}246/$$

$$/0{,}579^2 + 7{,}652 \cdot 0{,}386/1{,}424^2 + 7{,}361 \cdot 0{,}224/0{,}879^2) =$$

$$= 0{,}782 \cdot 10^{-4} \text{ мин}^{-1} = 0{,}113 \text{ сут}^{-1}; \qquad (59)$$

$$\delta_0 = \frac{\delta_{10}}{N m_c} \sum_{i=1}^{N} m_{c_i} \frac{\delta_i}{\delta_{1i}} = [0{,}782 \cdot 10^{-4}/(3 \cdot 7{,}548)]/$$

$$/(7{,}632 \cdot 0{,}246/0{,}579 + 7{,}652 \cdot 0{,}386/1{,}424 + 7{,}361 \cdot 0{,}224/0{,}879) =$$

$$= 0{,}249 \cdot 10^{-4} \text{ мин}^{-1} = 0{,}0359 \text{ сут}^{-1}. \qquad (60)$$

4. Осадка слоя торфа во времени под насыпью рассчитывается по формуле (66) с использованием осредненных КП. Полученные таким образом кривые консолидации представлены на рис. 15. Конечная осадка слоя торфа составит

$$S_к = m_{c_0} \sigma h (1 + \delta_0/\delta_{10}) = 7{,}548 \cdot 0{,}032 \cdot 160 (1 + 0{,}0359/0{,}113) =$$
$$= 50{,}9 \text{ см}. \qquad (61)$$

Приложение 1

ФОРМА ЖУРНАЛА ЗАПИСИ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Объект _____ 3. Глубина _____

2. Скважина (шурф) _____ 4. Монолит _____

5. Образец _____

6. Характеристики физических свойств _____

_____

7. Опыт _____ 8. Вертикальная нагрузка _____

9. Прибор (номер, соотношение плеч рычагов, высота образца, площадь поперечного сечения и др. особенности)

10. Внешние устройства:
    а) для измерения поровых давлений
    б) другие возможные устройства

Дата	Нагрузки		Время снятия отсчетов	Деформация	Поровое давление		Примечание
					датчик	Р	
1	2	3	4	5	6	7	8

Приложение 2

ЖУРНАЛ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТА В УСЛОВИЯХ ОДНОПЛОСКОСТНОГО СРЕЗА (МЕТОД Н.Н. МАСЛОВА)

Объект _____

Лабораторный номер образца _____

Номер выработки _____

Глубина от ___ до _____ м

Номенклатурный вид грунта _____

_____

Сложение грунта _____

Условия проведения испытания _____

_____

Величина зазора _____ см

Диаметр образца _____ см

Высота образца _____ см

Площадь образца _____ $см^2$

Объем образца _____ $см^3$

Масса образца _____ г

Плотность грунта _____ $г/см^3$

Влажность грунта _____ %

Нормальное давление

_____ МПа ($кгс/см^2$)

Скорость деформирования

_____ см/с

Дата проведения испытания и время отсчета	Время отсчета от начала испытания	Масса грунта на подвеске рычага прибора	Срезающее усилие	Деформация образца		Примечания
				показания индикатора	деформации образца	

Приложение 3

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

№ п.п.	Лабораторный номер образца	Номер выработки, глубина от ___ до ___ м	Номенклатурный вид грунта	Сложение грунта	Условия проведения испытания	Влажность, %	Плотность, г/см³	Скорость деформирования, см/с	Нормальное давление, МПа	Предел прочности при сдвиге, МПа	Порог ползучести, МПа	Коэффициент динамической вязкости, Па·с	Предельная деформация разрушения, см	Время до разрушения образца, мин
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Руководитель лаборатории _____
(подпись, инициалы, фамилия)

Исполнители: _____
(должность, подпись, инициалы, фамилия)

Приложение 4

Рекомендуемое

ЖУРНАЛ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТА ПРИ СЖАТИИ В КОМПРЕССИОННОМ ПРИБОРЕ

Организация _____ Объект _____ Сооружение _____
(лаборатория) (пункт)

Лабораторный номер образца _____

Компрессионный прибор (тип, №) _____

Шурф № _____ глубиной от ___ до ____ м Структура _____
(скважина)

Визуальное описание грунта в лаборатории _____

_____

Условия проведения испытаний (схема и т.д.) _____

_____

_____

Наименование определяемых параметров	Ед. изм.	Величина определяемых параметров		Примечания
		до опыта	после	
1	2	3	4	5
Масса грунта с кольцом	г			
Масса кольца	”			
Масса грунта	”			
Высота кольца	см			
Диаметр кольца	”			
Площадь кольца	$см^2$			
Объем кольца	$см^3$			
Объемная плотность грунта	$г/см^3$			
Весовая влажность	%			
Истинная плотность грунта	$г/см^3$			
Удельный вес грунта	$Н/м^3$			
Коэффициент пористости	–			
Коэффициент водонасыщения	–			
Масса сухого грунта	г			
Влажность на границе текучести	%			
Влажность на границе раскатывания	”			
Число пластичности	”			
Показатель консистенции	–			
Содержание органического вещества	%			
Степень разложения (для торфа)	–			

Приложение 5

ФОРМА ЗАПИСИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Даты испытания	Часы, минуты замера деформаций образца	Время от начала опыта, мин	Показания индикаторов			Деформация образца с поправкой на деформацию прибора, мм	Примечания
			1	2	среднее 2		
1	2	3	4	5	6	7	8

Приложение 6

ПАРАМЕТРЫ И ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

τ, МПа – касательное напряжение;

τ_{lim}, МПа – порог ползучести – начальное касательное напряжение, выше которого грунт переходит в состояние ползучести;

$\tau_{кр}$, МПа – предельное срезающее усилие, при котором произошло разрушение образца (срез);

$\Delta\tau$, МПа – разность значений касательного напряжения, определяемая по графику зависимости $\dot{\gamma} = f(\tau)$ на его начальном участке;

$\Delta\tau'$, МПа – разность значений касательного напряжения, определяемая по графику $\dot{\gamma} = f(\tau)$ на его конечном участке;

σ, МПа – нормальное напряжение;

$\sigma_{эф}$, МПа – эффективное нормальное напряжение;

$\sigma_{т}$, МПа – тотальное нормальное напряжение;

$\sigma_{н}$, МПа – нейтральное нормальное напряжение;

p_z, МПа – вертикальное давление в грунтовой толще на глубине z;

p_w, МПа – избыточное гидростатическое давление в поровой жидкости;

P, н – вертикальная сила, необходимая для созания напряжения σ;

T, н – горизонтальная сила, необходимая для создания напряжения τ;

$T_{пред}$, н – предельное значение T в опытах на одноплоскостной срез;

R, кг – вес гирь, нагружаемых на подвеску рычага;

Q, кг – вес рамы рычажного устройства;

k	–	отношение короткого плеча рычага к длинному;
η_t, Па·с	–	коэффициент динамической вязкости (изменяющейся во времени);
η_ν, Па·с	–	коэффициент вязкости, определяемый на начальном участке графика зависимости $\dot{\gamma} = f(\tau)$;
$\eta_{\nu\beta}$, Па·с	–	коэффициент вязкопластического течения, определяемый на конечном участке графика зависимости $\dot{\gamma} = f(\tau)$;
c_w, МПа	–	сцепление глинистого грунта;
c_c, МПа	–	структурное сцепление;
Σ_w, МПа	–	сцепление связности;
φ_w, град	–	угол внутреннего трения грунта при определенной плотности – влажности;
λ, см	–	деформация сдвига;
$\lambda_{кр}$, см	–	критическая деформация сдвига;
γ	–	угловая деформация (скашивания);
$\Delta\gamma$	–	разность значений угловой деформации, отвечающих началу t_{i-1} и концу t_i отрезка времени $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ (последние 6–8 ч деформации образца на данной ступени нагружения);
M, см	–	допустимое горизонтальное смещение торцов образца;
ΔM, см	–	приращение значений горизонтального смещения торцов образца;
ϵ	–	относительная вертикальная деформация;
S, см	–	вертикальная осадка образца;
$S(t)$, мм, см, м	–	текущая осадка;
$S_к$, мм, см, м	–	конечная осадка;
d, см	–	величина зазора (зона деформирования);
T, t, с, мин, ч	–	время;
$t_{кр}$, с, мин, ч	–	период времени от начала опыта до момента разрушения образца;
u, см/с	–	скорость сдвиговой деформации;
$\dot{\gamma}$, 1/с	–	скорость угловой деформации;
$\Delta\dot{\gamma}$, 1/с	–	разность значений скорости угловой деформации, определяемая по графику зависимости $\dot{\gamma} = f(\tau)$ на его начальном участке;
$\Delta\dot{\gamma}'$, 1/с	–	разность значений скорости угловой деформации, определяемая по графику зависимости $\dot{\gamma} = f(\tau)$ на его конечном участке;
c, $c_к$, мм^2/мин	–	коэффициенты одномерной консолидации;
m_c, МПа$^{-1}$	–	коэффициент относительной мгновенной сжимаемости грунта при компрессии;
$m_к$, МПа$^{-1}$	–	коэффициент относительной полной сжимаемости скелета грунта при компрессии;
m_w, МПа$^{-1}$	–	коэффициент сжимаемости газированной поровой жидкости;

u, %	–	степень консолидации;
B	–	консолидационный параметр, учитывающий сжимаемость газированной поровой жидкости (начальный коэффициент порового давления);
$k_c(t, \nu)$	–	ядро ползучести скелета грунта при компрессии;
δ, δ_1, мин$^{-1}$	–	параметры ядра ползучести;
z, м	–	глубина от поверхности грунтовой толщи;
x, м	–	расстояние от дневной поверхности до рассматриваемого уровня в сжимаемой толще;
h_0, см	–	начальная высота образца;
h, см	–	высота образца после осадки от вертикальной нагрузки;
d', см	–	диаметр образца;
F, см^2	–	площадь поперечного сечения образца;
V, см^3	–	объем образца;
m, г	–	масса образца;
l	–	коэффициент пористости грунта;
$n_{ср}$, %	–	средняя пористость грунта;
ρ, г/см^3	–	плотность грунта;
ρ_w, г/см^3	–	плотность поровой жидкости;
w, %	–	влажность грунта;
I_L	–	показатель текучести;
S_r	–	степень водонасыщения;
$\epsilon_{s\omega}$	–	относительное набухание;
$k_ф$, см/с, м/с, м/сут	–	коэффициент фильтрации;
$k_{ср}^{(ф)}$, см/с, м/с, м/сут	–	средний для всего периода уплотнения коэффициент фильтрации;
КП	–	консолидационные параметры;
ММК	–	математическая модель консолидации;
ОЗК	–	обратная задача консолидации;
ПЗК	–	прямая задача консолидации.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3
I. СДВИГОВАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ 4
1. Испытания глинистых грунтов на ползучесть в приборе многоплоскостного среза 4
Общие положения 4
Приборы и оборудование 5
Проведение испытаний 6
Обработка результатов опытов 8
2. Испытания глинистых грунтов на ползучесть в приборах одноплоскостного среза 10
Общие положения 10
Приборы и оборудование 11
Проведение испытаний 12
Обработка результатов опытов 13
II. ОБЪЕМНАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ И КОНСОЛИДАЦИЯ 15
3. Испытания грунтов на объемную ползучесть и консолидацию в компрессионных приборах 15
Общие положения 15
Математические модели и прямые задачи одномерной консолидации двухкомпонентных (квазидвухфазных) грунтов 17
Структура консолидационных параметров и методы их определения 21
Методика проведения консолидационных испытаний 22
Аппаратура 22
Подготовка к испытаниям 25
Схемы испытаний 25
Проведение испытаний 31
Методы определения параметров фильтрационной консолидации 36
Определение величины осадок, связанных с фильтрационной и вторичной консолидацией 36
Определение коэффициента консолидации по логарифмическому методу А. Казагранде 37
Метод квадратных корней из времени (Д. Тейлора) 37
Интегральные методы нахождения параметров в одномерной консолидации 39
Обратная задача 45
Методы определения консолидационных параметров 46
Краткое описание программы 48
Укрупненная блок-схема программы определения консолидационных параметров квазидвухфазных грунтов при экспоненциальных ядрах ползучести интегральным методом 48
Пример нахождения консолидационных параметров и их практического применения 50
Приложение 1. Форма журнала записи результатов 54
Приложение 2. Журнал испытаний грунта в условиях одноплоскостного среза (метод Н.Н. Маслова) 55
Приложение 3. Обработка результатов испытаний 56
Приложение 4. Журнал испытаний грунта при сжатии в компрессионном приборе 57
Приложение 5. Форма записи результатов испытаний 58
Приложение 6. Параметры и их определения 58

Нормативно-производственное издание

ПНИИИС Госстроя СССР

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЗУЧЕСТИ И КОНСОЛИДАЦИИ ГРУНТОВ ЛАБОРАТОРНЫМИ МЕТОДАМИ

Редактор *Г.А. Полякова*
Мл. редактор *И.Я. Драчевская*
Технический редактор *Н.Н. Аксенова*
Корректор *Н.С. Сафронова*
Оператор *В.В. Провоторова*
Н/К

Подписано в печать 16.12. 88 Формат 60x84 1/16 Бумага офсетная №1 Печать офсетная Усл.печ.л. 3,72 Усл.кр.-отт. 3,97 Уч.-изд.л. 3,67 Тираж 6 000 экз. Изд. № XII–3003 Зак № 4497 Цена 20 коп.

Стройиздат. 101442 Москва, Каляевская, 23а

Московская типография №9 НПО "Всесоюзная книжная палата" издата СССР
109033, Москва, Волочаевская, 40

gost.e-ecolog.ru