

МПС СССР

**ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

С. С. БАБИЦКАЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

2386/10

Днепропетровск
1965

Публичная защита диссертации состоится на заседании Ученого совета
Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта
25 мая 1965 г.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого совета или прислать свои отзывы о работе по адресу: г. Днепропетровск-10, Университетская, 2, Институт инженеров железнодорожного транспорта.

Автореферат разослан **24 апреля** 1965 г.

НТБ
ДНУЖТ

МПС СССР

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

С. С. БАБИЦКАЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель —
доктор технических наук, профессор
М. Н. ГОЛЬДШТЕИН.

Днепропетровск
1965

Работа выполнена в научно-исследовательской лаборатории механики грунтов Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта под руководством профессора М. Н. Гольдштейна.

НТБ
ДНУЖТ

Введение

Огромный объем строительства в СССР делает особенно актуальной задачу правильной оценки прочности грунтов, определяющей несущую способность оснований, давление грунта на ограждения и подземные сооружения, устойчивость склонов и откосов.

В опубликованных исследованиях Н. М. Герсевича, Н. Я. Денисова, Н. Н. Маслова, А. А. Ничипоровича, Н. А. Цытовича и многих других детально рассмотрена природа прочности грунтов и показано, что между их механическими свойствами, составом и состоянием существует закономерная связь, а на сопротивление сдвигу оказывает влияние ряд различных факторов.

С целью уточнения теории прочности Мора, которая наиболее широко из всех теорий используется для грунтов, многие ученые (А. И. Боткин, М. В. Малышев, Кьельман, Хабиб и др.) проводили теоретические и экспериментальные исследования влияния промежуточного главного напряжения на прочность.

Разработан ряд методов дифференцированного определения параметров прочности. Наибольшее практическое значение получили методы, основанные на испытаниях переуплотненных (А. А. Ничипорович, Ф. П. Саваренский, Бьеррум, Терцаги, Хворслев и др.) или недоуплотненных (Я. П. Коган, Н. Н. Маслов) образцов.

Однако, часто для практических целей оказывается недостаточным знание характеристик прочности, определенных только при кратковременных испытаниях. Многие случаи нарушения устойчивости откосов, причины которых ранее были неизвестны, в последнее время связывают с реологическими процессами, определяющими длительную медленную деформацию (ползучесть) и с падением прочности грунта вследствие деформаций (явление длительной прочности).

В связи с этим возник интерес к исследованию свойств ползучести и длительной прочности, а также влиянию режима испытаний на прочностные характеристики грунтов. Такие ис-

следования наиболее широко проводились в Советском Союзе С. С. Вяловым, М. Н. Гольдштейном, Г. М. Ломизе, Н. Н. Масловым, С. Р. Месчаном, Б. Ф. Рельтовым, С. А. Роза, А. М. Скибицким и многими другими, а за рубежом Бьеррумом, Вильсоном, Гефели, Гезом, Таном, Терцаги и др. Некоторые исследователи (Э. В. Костерин, С. Р. Месчан, В. А. Мизюмский, Б. Ф. Рельтов, А. М. Скибицкий, Г. В. Сорокина, С. Н. Ситников, Гефели, Гез и др.) основное внимание уделяли изучению деформативных свойств грунтов. В других работах (С. С. Вялов, М. Н. Гольдштейн, В. В. Жихович, Н. Н. Маслов, Н. А. Цытович, Вильсон, Казагранде и др.) главным образом изучалось явление длительной прочности. На основании экспериментальных и теоретических исследований предложены различные способы оценки длительной прочности и предела длительной прочности.

В связи с тем, что грунты обладают свойством ползучести и длительной прочности, прочностные характеристики, определяемые в лаборатории, оказываются в значительной степени зависящими от режима испытаний. В зависимости от природы грунта и условий испытаний получаемые результаты оказывались различными.

Несмотря на ряд значительных успехов в исследовании проблемы прочности, она все еще изучена недостаточно и некоторые важнейшие вопросы продолжают оставаться предметом дискуссий. К этим вопросам относятся физическая природа прочности, влияние на прочность напряженного состояния, влияние режима испытаний и связанная с этим проблема ползучести и длительной прочности. Не ясна и спорна также роль порового давления. Весьма большое значение имеет усовершенствование аппаратуры и методики испытаний.

Диссертация посвящена изучению некоторых из этих вопросов в связи с проблемой прочности водонасыщенных связных грунтов.

Исследование прочности без учета влияния фактора времени

В главе I описаны основные механические теории прочности, которые в качестве одного из решающих факторов рассматривают касательные напряжения, так как значительные пластические деформации и разрушение грунтов в естественных условиях происходят, в основном, под действием касательных напряжений. Это теория максимальных касательных напряжений, теория Мора и энергетическая теория. Рассмотрены также объединенная теория Давиденкова-Фридмана

и дальнейшее развитие отечественными и зарубежными исследователями классических теорий прочности в применении к грунтам.

Особое внимание в обзоре литературы уделялось вопросу влияния промежуточного главного напряжения σ_2 на прочность. Результаты, описанные разными авторами, оказались противоречивыми. Одной из возможных причин этого является различный подход в определении момента разрушения.

По нашим исследованиям, описанным в главе II, различие в значениях прочности за счет способа обработки опытных данных перекрывало эффект влияния промежуточного главного напряжения на прочность. Экспериментальное исследование прочности трех разновидностей связных грунтов проводилось при различных типах напряженного состояния: при $\sigma_2 = \sigma_3$

(в стабилометре), при $\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ (в торсиометре) и при

$\sigma_2 = \sigma_1$ (в приборе бокового давления). Проведенные исследования позволяют считать, что при современном уровне лабораторной техники влияние σ_2 оказывается в пределах разброса опытных данных. Поэтому для практических целей можно не учитывать это влияние и пользоваться теорией прочности Мора с прямолинейной огибающей по Кулону.

В главе III на основании анализа ряда работ показано, что попытка изменить и усовершенствовать условие прочности Кулона-Мора с дифференцированным определением сцепления и трения не получила удовлетворительного для практики решения. Исследования, проведенные при трехосном сжатии, показали, что прочность водонасыщенных глинистых и песчаных грунтов в условиях закрытой системы не зависит от шарового тензора напряжений, а следовательно, не соответствует основному положению теории Мора.

Хотя физическая природа прочности грунтов окончательно еще не выяснена и отсутствуют количественные зависимости между прочностью и внутренними силами, обусловливающими сопротивление разрушению, исследования многих авторов свидетельствуют о физической сложности явления разрушения и о необходимости рассматривать процесс нарушения прочности, исходя из особенностей грунта как дисперсного материала, свойства которого определяются взаимодействием его компонентов.

В идеально закрытой водонасыщенной двухфазной системе изменение давления в воде за счет изменения общего давления не влияет на прочность. Между механическим поведе-

нием водонасыщенного песчаного и глинистого грунта нет принципиального различия. Однако, чем более водопроницаемым является грунт, тем труднее сохранить постоянство физического состояния в процессе сдвига и при изменении всестороннего или нормального давления. Поэтому получающиеся при испытании параметры графика сдвига φ и c являются переменными и зависят от начального состояния грунта и условий испытания. Тогда под параметром c , называемом обычно сцеплением, следует понимать «начальную» прочность грунта, строго соответствующую данному физическому состоянию грунта (плотности, влажности и структуре). Тангенс угла наклона графика сдвига следует рассматривать как показатель увеличения «начальной» прочности под воздействием внешнего давления, так как он интегрально характеризует упрочнение вследствие уплотнения, изменения величины и характера связей, а также изменения сложения. Исходя из физического смысла этой характеристики, более правильно называть φ не углом внутреннего трения, а «углом упрочнения», как это предлагал Н. Я. Денисов. Поэтому, если условия лабораторного опыта строго не отвечают условиям работы грунта в натуре, то полученные характеристики не могут быть использованы для расчета.

Основываясь на том, что внутреннее трение в грунтах обусловлено не только чисто механическим взаимодействием между частицами, но также молекулярными силами и в этом отношении ничем принципиально не отличается от сцепления, можно более правильно и удобно оценивать прочность грунта значением сопротивления сдвигу, не разделяя его на отдельные компоненты, как это предлагалось уже многими исследователями (Н. Я. Денисовым, Н. Н. Масловым, С. А. Роза, В. А. Флориным, Шмидом и др.).

Исследования показали, что когда график сдвига водонасыщенного грунта не параллелен оси абсцисс ($\varphi \neq 0$), каждая опытная точка характеризуется иным эффективным напряженным состоянием образца, а следовательно, в соответствии с принципом гидроемкости, и иным физическим состоянием.

В работе сделана попытка, исходя из концепции эффективных напряжений и принципа гидроемкости Н. М. Герсеванова, рассмотреть прочность феноменологически как свойство, обусловленное взаимодействием между частицами грунта, зависящим от его физического состояния. Принимая далее, что силы этого взаимодействия определяются величиной эффективных напряжений, т. е. напряжений, возникающих в скелете грунта, можно полагать, что прочность будет однозначной

функцией эффективных напряжений, независимо от того, каким методом она определена.

Ввиду отсутствия методов непосредственного определения эффективных напряжений, их рассчитывают как разность между общим давлением и поровым давлением. Последнее определяется обычно экспериментально. Однако на основании проведенных исследований можно считать, что поровое давление может быть правильно измерено лишь в водонасыщенном грунте при начальной влажности не меньшей предела раскатывания, когда грунт содержит так называемую свободную воду.

Водонасыщенный влажный грунт можно представить как двухфазную систему, у которой одной фазой является свободная вода, а второй — скелет грунта вместе со связанной водой. Определяемое поровое давление — это давление, воспринимаемое свободной водой. Для рассмотрения механического поведения такого грунта принцип эффективных напряжений оказывается весьма удобным. Но по мере уменьшения влажности (увеличения плотности) грунта растет вероятность непосредственного контакта между грунтовыми частицами с оболочками связанной воды, а грунт по своим свойствам приближается к однофазному материалу, для которого принцип эффективных напряжений лишен смысла, так как его использование предполагает наличие двух фаз, которым соответствуют две системы давления.

В главе IV описаны результаты исследований грунтов с измерением порового давления. Для измерения порового давления был сконструирован и изготовлен лабораторный пьезометр ДИИТ'а. Он прост по устройству и удобен при подготовке к работе, надежен в обращении и достаточно чувствителен. Прибор позволяет измерять не только положительное, но и отрицательное (т. е. меньшее, чем атмосферное) давление в поровой воде.

Кроме использования порового давления для расчета эффективных напряжений, его можно рассматривать как удобный и чувствительный индикатор изменения физического состояния грунта и как критерий разрушения при испытании на трехосное сжатие, так как перед разрушением поровое давление уменьшается. Величину и знак порового давления можно также использовать как показатель истории напряженного состояния.

Для обоснования возможности использования изменения порового давления как показателя изменения физического состояния грунта, были проведены испытания на консолида-

цию с измерением порового давления в специально изготовленном приборе, позволяющем начинать процесс консолидации после того, как измерено максимально возможное и стабильное поровое давление. Проведенные исследования подтвердили ограниченность фильтрационной теории консолидации Терцаги и показали необходимость учета переменного значения коэффициента вязкости скелета грунта. Вместе с тем эти опыты показали, что график изменения порового давления во времени и график консолидации имеют аналогичный характер, что свидетельствует о соответствии между пористостью и поровым давлением.

В результате исследований установлено, что начальное распределение напряжений между фазами грунта зависит от его физического состояния. В пластичном ($B > 0$) водонасыщенном грунте ($G = 1$) поровое давление, как правило, было практически равно всестороннему давлению. По мере уплотнения грунта и увеличения возможности непосредственного контакта между частицами грунта даже в водонасыщенном нормально-уплотненном грунте доля дополнительного давления, воспринимаемого водой становится все меньшей, так как в грунте одновременно с приложением этого дополнительного давления возникают эффективные напряжения. В переуплотненном грунте возникает отрицательное поровое давление тем большее по абсолютной величине, чем больше степень переуплотнения. Отрицательное поровое давление свидетельствует об объемном расширении образца и об увеличении потенциала всасывания.

Чтобы экспериментально проверить, будет ли сопротивление сдвигу однозначно определяться эффективным напряженным состоянием, независимо от методики испытания (условий дренирования, соотношения между давлением предварительной консолидации и всесторонним давлением, состояния образца при сдвиге, характера изменения главных напряжений при сдвиге), были проведены опыты при трехосном сжатии с водонасыщенными образцами каолининовой глины и пылеватого суглинка. В процессе опытов измерялось поровое давление. Опыты показали, что с учетом порового давления сопротивление сдвигу $s = \sigma_1 - \sigma_3$ водонасыщенного глинистого грунта однозначно зависит от среднего эффективного

напряжения $\sigma_o = \frac{\Sigma \sigma}{3} - u$. Следовательно, условия испытания и состояние образца (недоуплотненное, нормально-уплотненное и переуплотненное) не оказывают влияния на результаты.

Отсюда следует, что для определения прочности пригодны любые методы, в том числе и методы, основанные на испытании недоуплотненных или переуплотненных образцов при условии, что опытные данные выражаются в терминах эффективных напряжений.

Поскольку зависимость между сопротивлением сдвигу и средним эффективным напряжением оказалась наиболее общей, ее удобно использовать для определения расчетного значения прочности; при этом необходимо оценить эффективное напряженное состояние грунта в естественных условиях.

Исследование длительной прочности

Главы V и VI диссертации посвящены исследованию следующих вопросов, связанных с проблемой длительной прочности грунтов: 1) влияние режима испытаний на прочность при ступенчатом и непрерывном деформировании; 2) методика определения стандартной и длительной прочности; 3) исследование усталостной прочности; 4) анализ результатов «режимных» испытаний.

При выяснении общих закономерностей использовались различные по минералогическому составу грунты нарушенной структуры. Изучались также свойства ползучести и длительной прочности ряда грунтов ненарушенной структуры из оснований сооружений Куйбышевской и Нижне-Камской ГЭС, глин Киевского и Московского метрополитена, а также грунтов строительной площадки Дворца Советов в г. Москве.

С целью уточнения режима испытаний для определения стандартной (кратковременной) прочности были проведены испытания на одноосное сжатие с шестью разновидностями глинистых грунтов. Оказалось, что при ступенчатом характере приложения нагрузки продолжительность испытания существенно влияет на прочность: с увеличением интервала между ступенями прочность уменьшается. При одинаковых условиях у суглинков прочность уменьшалась на 12—19%, тогда как у глин — примерно на 35%. Данные этих испытаний характеризуют, в известной степени, склонность грунта к ползучести.

Зависимость прочности от скорости непрерывного деформирования представляет интерес для расчета устойчивости сткосов и склонов и проектирования противооползневых сооружений. В связи с этим изучалось соотношение между деформацией и напряжением при различных скоростях дефор-

мирования и исследовалось влияние скорости непрерывного деформирования на прочность.

Опыты проводились в условиях одноосного сжатия на специально сконструированном приборе, позволяющем изменять скорость деформирования от 2,5 мм/мин до 0,0006 мм/мин. Сопоставление графиков $\sigma = f(\epsilon)$ при быстром и медленном деформировании образцов иллитового грунта показало, что соотношение между напряжением и деформацией не зависит от скорости деформирования на участке, где напряжения возрастают, достигая максимального значения. Дальнейшее деформирование при медленных испытаниях сопровождается резким уменьшением напряжений, тогда как при быстрых — участок максимальных напряжений растянут, а падение напряжения на единицу приращения деформации весьма незначительно. При медленных испытаниях максимальное значение прочности уменьшалось, примерно, на 10% по сравнению с быстрыми испытаниями.

Для проведения испытаний в условиях непрерывной и постоянной по величине поверхности сдвига использовался кольцевой прибор с усовершенствованным маятниковым рычагом системы Ксгана—Тулупова. Скорость деформирования можно было изменять в 1000 раз. На кольцевом приборе при различных скоростях деформирования были проведены испытания с образцами иллитовой и каолиновой глины и красnobурого суглинка. Цель опытов состояла в следующем: 1) в исследовании изменения сопротивления сдвигу в процессе непрерывного деформирования; 2) в установлении влияния скорости деформирования на соотношение между пиковым (максимальным) $s_{\max}$ и установившимся (минимальным) $s_{\min}$ сопротивлением сдвигу; 3) в исследовании влияния величины нормальной нагрузки на $s_{\max}$ и $s_{\min}$.

При испытании глинистых грунтов, имеющих консистенцию около предела раскатывания, наблюдалось увеличение сопротивления сдвигу до некоторого максимального значения. Затем при дальнейшем деформировании происходило падение сопротивления сдвигу до минимального значения. Соотношение между $s_{\max}$ и $s_{\min}$ зависело от скорости деформирования, консистенции и нормального давления. Чем меньше скорость деформирования и чем больше показатель консистенции грунта, тем меньше различие между $s_{\max}$ и $s_{\min}$. Можно предположить, что при бесконечно медленном деформировании кривая зависимости сопротивления сдвигу от величины деформации не будет иметь максимума. На величину $s_{\max}$ скорость деформирования оказывала существенное

влияние: при уменьшении скорости деформирования в 1000 раз $s_{\max}$ краснобурского суглинка уменьшилось на 26%, а глины примерно на 40% при одном и том же нормальном давлении. В то же время значение $s_{\min}$ практически оказалось одинаковым при разных скоростях деформирования. Сопоставляя значение $s_{\min}$ со значением длительной прочности, определенной при сжатии, и с величиной среднего сопротивления сдвигу в зоне оползневой смещения оползневой течения по расчету А. Я. Туровской, можно предположить, что установившаяся прочность близка к значению предела длительной прочности.

Испытания на кольцевой сдвиг, проведенные при разных нормальных давлениях показали, что максимальная прочность изменялась незначительно, а минимальная заметно возрастала с увеличением нормального давления. Анализ полученных результатов позволяет считать, что при относительно небольшом значении деформации сдвига, когда еще не нарушена первоначальная структура грунта и не успевают измениться его физические свойства, максимальное сопротивление сдвигу обусловлено, в основном, силами внутреннего взаимодействия между частицами, не зависящими от внешнего давления, т. е. характеризуется «начальной» прочностью или сцеплением (по Кулону). Когда же сопротивление равно $s_{\min}$ то фактически имеет место сдвиг по уже образованной разрезом поверхности (как в случае сдвига «плитка по плитке»). Тогда чем больше нормальное давление, тем больше число контактов между частицами и, соответственно, большим оказывается сопротивление сдвигу. Когда нарушено сцепление, прочность $s_{\min}$ обусловлена, в основном, силами трения (по Кулону).

Испытания на приборе кольцевого сдвига можно рассматривать как простой, удобный и относительно быстрый способ определения минимально возможного значения прочности, соответствующего данному физическому состоянию. Этот способ нуждается в дальнейшем подтверждении.

В механике грунтов используют целый ряд различных методов экспериментального определения длительной прочности и предела длительной прочности, который иногда называют «порогом ползучести», «пределом пластического течения», «пределом долговременной прочности» и т. п. Наиболее достоверным является метод, в основе которого лежит испытание на ползучесть вплоть до разрушения с построением кривой длительной прочности. Этот прямой метод назван нами «нормальным». Однако, и этот метод является в некоторой

степени условным, поскольку кривая длительной прочности экстраполируется в область весьма больших значений времени. Любой же косвенный метод каким бы удобным он ни казался, нуждается в обосновании того, что определяемая с его помощью величина может рассматриваться как предел длительной прочности. Результаты, полученные таким методом, должны сопоставляться с результатами «нормальных» испытаний.

При помощи «нормального» метода нами были проведены испытания в условиях одноосного сжатия семи различных связных грунтов нарушенной структуры, близкой к пределу раскатывания консистенции при $G=1$. Стандартная прочность грунтов ($\sigma_{ст}$) находилась в пределах от 1,13 до 10,05 кг/см².

Испытания показали, что разрушение при нагрузках, составляющих 95—90% от $\sigma_{ст}$, происходило за время от нескольких минут до нескольких часов; при нагрузках 80% от $\sigma_{ст}$ время разрушения колебалось от нескольких часов до нескольких суток. При нагрузках 70% от $\sigma_{ст}$ разрушение наступало обычно через несколько десятков суток, тогда как нагрузки 60% и меньше приводили к разрушению лишь через 100—200 суток, а иногда разрушение не происходило даже в течение нескольких сот суток, и наблюдалась стабилизация деформацией (измерения производились мессурой с ценой деления 0,01 мм).

Построенные по результатам испытаний кривые длительной прочности могут быть выражены степенной функцией вида:

$$\sigma = A t^{-m} \quad (1)$$

где A и m — параметры, зависящие от грунта и определяемые по опытным данным.

Графики длительной прочности испытанных грунтов, построенные в логарифмической сетке координат $\lg \sigma - \lg t$ имели одинаковый наклон. Следовательно, близкие по консистенции грунты нарушенной структуры обладают одинаковым характером изменения прочности во времени.

Однако, не всегда возможно и удобно проводить испытания на ползучесть вплоть до разрушения с целью построения графика длительной прочности. Поэтому одна из задач исследования состояла в разработке более удобного для практического использования метода определения длительной прочности.

Обработка данных многочисленных испытаний на ползучесть позволила установить, что скорость деформации в зависимости от времени и величины нагрузки хорошо аппроксимируется степенной кривой вида:

$$\dot{\epsilon} = B \sigma^{\kappa} t^{-a}, \quad (2)$$

где B , κ и a — параметры, зависящие от особенностей грунта.

Эта эмпирическая зависимость справедлива, начиная со скорости деформирования спустя 1 сутки от начала опыта и до того участка кривой ползучести, когда деформации начинают идти с возрастающей скоростью.

Наши опыты показали также, что разрушение связных пластичных грунтов происходило при некотором значении деформации, которое не зависело от величины и времени действия нагрузки, но зависело от рода грунта, его плотности и влажности. К такому же выводу пришли и другие исследователи (С. С. Вялов, Ю. М. Иванов, Казагранде и Вильсон, Рейнер, Витман и др.) причем, не только в случае грунтов, но и для других материалов.

Основываясь на этих экспериментальных зависимостях, можно предложить косвенный метод определения длительной прочности, находя параметры уравнения (2) по графикам скорости деформирования, построенным в логарифмической сетке координат по данным непродолжительных опытов (10—20 суток) на ползучесть.

Определив параметры, производим интегрирование уравнения (2) в пределах от 1 суток до заданного времени разрушения t дл.:

$$\epsilon_p - \epsilon_1 = B \sigma_{дл}^{\kappa} \int_1^{t_{дл}} \frac{dt}{t^a} \quad (3)$$

где: ϵ_1 — деформация за первые сутки,

ϵ_p — предельное значение деформации для данного грунта,

$\sigma_{дл}$ — длительная прочность, соответствующая $t_{дл}$.

Решая полученное уравнение относительно $\sigma_{дл}$ получаем следующие формулы для определения длительной прочности: при $a < 1$:

$$\sigma_{дл} = \sqrt[\kappa]{\frac{(\epsilon_p - \epsilon_1)(1 - a)}{B(t_{дл}^{1-a} - 1)}} \quad (4)$$

при $a=1$

$$\sigma_{\text{дл}} = \sqrt[k]{\frac{\varepsilon_p - \varepsilon_1}{B \ln t_{\text{дл}}}} \quad (5)$$

при $a > 1$;

$$\sigma_{\text{дл}} = \sqrt[k]{\frac{(\varepsilon_p - \varepsilon_1)(a-1)t_{\text{дл}}^{a-1}}{B(t_{\text{дл}}^{a-1} - 1)}} \quad (6)$$

Деформация за первые сутки определяется экспериментально. Далее методом последовательных приближений определяется $\sigma_{\text{дл}}$ соответствующее заданному $t_{\text{дл}}$. Сравнение результатов, полученных предлагаемым методом с результатами прямых испытаний для трех разновидностей грунтов показало, что расхождение не превышает 11,5%.

Предлагаемый метод определения длительной прочности может быть использован не только при испытании на ползучесть серии образцов, но и при испытании одного образца путем многоступенчатого нагружения, полагая при этом, что справедлив принцип наложения.

Анализ экспериментальной кривой скорости деформации при ступенчатом нагружении показал, что она хорошо аппроксимируется эмпирическим уравнением:

$$\dot{\varepsilon} = B \left[\sigma_0^k t^{-a} + \sum_{i=1}^n \left(\sigma_i^k - \sigma_{i-1}^k \right) \tau_i^{-a} \right] \quad (7)$$

где: σ_0 — начальная ступень нагрузки;

n — количество ступеней нагрузки, не считая начальной;

σ_i — суммарное напряжение, действующее на образец после приложения i -й ступени нагрузки;

τ_i — продолжительность действия i -й ступени нагрузки в сутках.

Методом ступенчатого нагружения были испытаны образцы ненарушенной структуры старичного суглинка и кинельской глины.

Кроме исследования влияния на прочность продолжительности действия статической нагрузки, производились также опыты в условиях одноосного сжатия при циклическом приложении нагрузки, составляющей некоторую долю от стандартной прочности. Испытания продолжались либо до разрушения

образца, либо до прекращения роста полной деформации. Чем больше была величина нагрузки, тем меньше требовалось циклов для разрушения, которое происходило при достижении деформацией практически одинакового значения. Анализ результатов показал, что предел усталостной прочности близок к пределу длительной прочности.

Хотя многочисленные наблюдения и исследования свидетельствуют о том, что у грунтов, подобно другим материалам, длительная прочность оказывается тем меньше, чем дольше действует сдвигающая нагрузка, в последнее время появились работы (В. В. Жихович, Н. В. Жуков, Я. Л. Коган и В. А. Иосилевич, Д. Троллоп и Чен), в которых утверждается прямо противоположное, а именно, что длительная прочность выше, чем прочность при быстром испытании. Опыты, на основании которых был сделан такой вывод, проводились по следующей основной схеме с теми или иными несущественными отклонениями: сначала образец нагружался ступенями с кратковременным выдерживанием каждой, затем под действием некоторой постоянной нагрузки происходила деформация ползучести, после чего образец догружался до разрушения. Испытания по такой схеме названы нами условно «режимными». Эти исследователи рассматривали «режимную» прочность как «длительную», хотя совершенно очевидно, что «режимная» прочность ничего общего не имеет с обычно принятым понятием о длительной прочности.

В связи с этим нами параллельно с длительной исследовалась и «режимная» прочность ряда грунтов нарушенной и ненарушенной структуры. Опыты показали, что для одного и того же грунта наряду с явным снижением прочности при «нормальных» испытаниях (по сравнению со стандартной), «режимная» прочность оказалась практически равной стандартной при неизменной плотности и влажности образцов. Возможно, что это кажущееся противоречие объясняется влиянием вязкого сопротивления. Поскольку вязкое сопротивление уменьшается с уменьшением скорости деформирования, то при испытании на ползучесть (на длительную прочность), когда скорость деформирования пренебрежимо мала по сравнению с быстрыми испытаниями, доля вязкого сопротивления в общем сопротивлении грунта становится ничтожной. При «режимных» же испытаниях, когда скорость деформирования становится снова равной скорости при стандартных испытаниях, возрастает роль вязкого сопротивления. Хотя это объяснение не исчерпывает всей сложности процессов, происходящих при деформировании, однако, такой простой, по сути

дела, феноменологический подход позволяет снять несоответствие между снижением прочности при длительных испытаниях на ползучесть и сохранением ее неизменной при «режимных» испытаниях (при неизменном физическом состоянии).

Заключение

Проблема прочности грунтов является очень сложной и настоящая работа, естественно, не претендует на окончательное и бесспорное решение поставленных вопросов. При решении этих вопросов грунт рассматривался как дисперсный материал, отличающийся от материалов, исследуемых в механике сплошной среды, двумя существенными особенностями:

1. Грунт состоит из совокупности отдельных частиц.
2. Поры между частицами заполнены водой.

С целью дальнейшего развития методов лабораторного испытания на прочность и длительную прочность, которые бы обеспечили получение данных, пригодных для практического использования, исследования проводились в условиях одноосного и трехосного сжатия, изучалась роль твердой и жидкой фаз грунта в механическом поведении его под нагрузкой и учитывалось влияние фактора времени. Проведенные исследования позволили сделать следующие основные выводы.

1. Получаемое в лаборатории значение сопротивления сдвигу связного грунта зависит от принятого критерия разрушения и способа обработки опытных данных. Для возможности сопоставления результатов исследований, полученных в разных лабораториях, необходимо стандартизировать методику проведения опытов и обработку данных.

2. При современном уровне лабораторной техники для практических целей можно пренебречь влиянием промежуточного главного напряжения на прочность.

Прочность грунта рассматривается как свойство, обусловленное внутренними связями между частицами, сила взаимодействия между которыми зависит только от эффективных напряжений. Экспериментально показано, что сопротивление сдвигу является однозначной функцией среднего эффективного напряжения независимо от метода испытания (условий испытания и состояния образца).

3. Измерение порового давления не только позволяет рассчитать эффективные напряжения, но может рассматриваться как удобный и чувствительный индикатор изменения физического состояния грунта и как критерий разрушения при испытании на трехосное сжатие. Знак и величина порового дав-

ления позволяют также судить об истории напряженного состояния грунта.

Испытания на консолидацию с измерением порового давления подтвердили ограниченность фильтрационной теории Терцаги и показали необходимость учета переменного значения коэффициента вязкости скелета грунта. Вместе с тем опыты показали, что графики изменения порового давления во времени и консолидации аналогичны.

~~При непрерывном деформировании во время непрерывного сдвига грунтов усиливается с увеличением общей прочности сопротивление сдвигу.~~

4. При непрерывном деформировании во время кольцевого сдвига сопротивление грунта возрастает до некоторого максимального значения $s_{\max}$, а затем уменьшается, достигая установившегося значения $s_{\min}$. Соотношение между $s_{\max}$ и $s_{\min}$ зависит от скорости деформирования, консистенции и величины нормального давления. На основании проведенных опытов можно считать, что $s_{\max}$ обусловлено, в основном, сцеплением (по Кулону), а $s_{\min}$ — трением. Сопоставление значения $s_{\min}$ со средним сопротивлением сдвигу в зоне оползневого смещения и с значением длительной прочности позволяет предположить, что установившаяся прочность близка к пределу длительной прочности.

5. Предложен практически удобный способ оценки длительной прочности, основанный на использовании опытной зависимости между скоростью ползучести, временем действия и величиной напряжения, а также на экспериментально проверенном критерии постоянства деформации при разрушении.

6. На основании совпадения в наших опытах предела длительной прочности и предела усталостной прочности можно предположить, что не требуется особый учет влияния циклического характера подвижной нагрузки на устойчивость земляных масс, если расчет ведется по длительной прочности. Однако, это предположение нуждается в дальнейшем экспериментальном подтверждении.

7. Наряду с явным снижением прочности при «нормальных» испытаниях, прочность при «режимных» испытаниях оказалась равной стандартной при неизменном физическом состоянии, что можно, вероятно, объяснить влиянием вязкого сопротивления при больших скоростях деформирования.

Основное содержание диссертации опубликовано в статьях:

1. Методика определения длительной прочности грунтов, ж-л «Основания, фундаменты и механика грунтов», № 4, 1959 (совместно с М. Н. Гольдштейном).
2. Методика испытания грунтов на ползучесть и длительную прочность, Сб. «Вопросы геотехники», № 5, 1962, (совместно с М. Н. Гольдштейном и В. А. Мизюмским).
3. Изменение порового давления в процессе консолидации сыпучего грунта, Сб. «Вопросы геотехники», № 6, 1963.
4. Методика испытания связных грунтов на прочность, Сб. «Вопросы геотехники», № 6, 1963 (совместно с М. Н. Гольдштейном).
5. Лабораторный поропьезометр ДИИТа, Сб. «Вопросы геотехники», № 6, 1963 (совместно с А. Т. Кутеповым и М. А. Раскиным).
6. О критерии разрушения и влиянии промежуточного главного напряжения на прочность, Сб. «Вопросы геотехники», № 7, 1964.
7. Расчет устойчивости откосов с учетом ползучего сдвига, Сб. «Вопросы геотехники», № 7, 1964 (совместно с М. Н. Гольдштейном).
8. О длительной прочности связных грунтов, Сб. «Вопросы геотехники», № 7, 1964 (совместно с М. Н. Гольдштейном).

БТ 07250. Областная книжная типография
Днепропетровского областного управления по печати,
г. Днепропетровск, ул. Серова, 7.

Заказ 863-м. Тираж 200. Объем 1,25 п. л. Подписано к печати 13.IV-65 г.