

С С С Р
М П С
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Е. С. Л О В Е Ц К И И

ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЧНОСТИ СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

М О С К В А — 1 9 6 2

НТБ
ДНУЖТ

СССР
МПС
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Е. С. Л О В Е Ц К И И

ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЧНОСТИ
СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ

1732р

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА—1962

НТБ
ДНУЖТ

В В Е Д Е Н И Е

Широкое развитие крупного гидротехнического, железнодорожного и промышленного строительства привело в условиях нашей страны к необходимости использования мягких грунтов в качестве естественных оснований крупных сооружений.

После Днепрогэса гидротехнические сооружения на Дону, Днепре, Волге и Каме возводились и возводятся на мягких связных грунтах. Вопросы долговечности и надежности, устойчивости и экономичности таких сооружений являлись и остаются в настоящее время основными проблемами исследований и проектирования. Их успешное разрешение связано с необходимостью создания методов исследований, способных обеспечить наиболее достоверные значения показателей прочности связных грунтов основания для всех периодов эксплуатации возводимого сооружения.

Ко времени проектирования первых крупных гидротехнических сооружений на мягких грунтах такие методы исследований отсутствовали. Лишь в результате отдельных оригинальных исследований было установлено, что прочность связного грунта, как дисперсного пластичного материала, характеризуется сопротивлением сдвигу, что сопротивление сдвигу и его условные компоненты — коэффициент трения и сцепление — не являются для данного грунта постоянными величинами. Они зависят от состояния грунта, скорости приложения внешних нагрузок, напряженного состояния и других факторов.

Применяемый в то время во всех случаях строительной практики известный метод испытаний связных грунтов на сдвиг проф. Н. П. Пузыревского не учитывал этих особенностей и не мог поэтому оценить возможного в условиях эксплуатации изменения начальной прочности связных грунтов в основаниях

крупных сооружений, в откосах каналов, в оползневых склонах и т. п. Отсутствие рациональных методов испытаний приводило в отдельных случаях к неправильной оценке связных грунтов, как недостаточно надежных оснований для крупных сооружений, и вместе с тем не позволяло получать прогрессивные и экономичные решения.

В послевоенные годы, как в Советском Союзе, так и в других странах, методы исследований прочности грунтов получили значительное развитие, что позволило дополнить и углубить существующие представления о природе прочности связных грунтов и выдвинуть новые методы исследований. Однако анализ последних показывает несостоятельность претензий на их универсальность, то есть на использование их во всех случаях строительной практики, и указывает на недостаточную связь этих методов с условиями работы возводимых сооружений, состоянием грунта и его изменением во времени.

Существенными недостатками многих из предложенных методов являются ограниченность условий их применения и невозможность правильно оценить прочность грунта в условиях решающего или расчетного периода работы проектируемого сооружения.

Успешная разработка прогрессивных методов исследований оказалась возможной лишь в результате проверки существующих теорий в процессе проектирования и строительства крупных сооружений.

Большую пользу этому делу принесло творческое сотрудничество научно-исследовательских организаций с Гидропроектом, Гидроэнергопроектом, Волгодонстроем, Куйбышевгидростроем, Киевгасстроем и др.

Настоящая работа посвящена вопросам теории и практики исследований прочности связных грунтов в целях крупного гидротехнического, железнодорожного и промышленного строительства и перспективам дальнейшего развития методики исследования этих грунтов. В ней рассмотрены также вопросы практического выбора методов определения показателей прочности, отвечающих, согласно принципу подобия, условиям ра-

НТБ
ДНУЖТ

боты проектируемых сооружений и ожидаемому состоянию грунтов.

Основными задачами работы являются:

1. Построение теоретической базы исследований прочности грунтов: условия прочности при криволинейной огибающей больших кругов диаграммы напряжений O . Мора и принципа подобия в применении к исследованиям прочности грунтов.

2. Создание методики испытаний грунтов на прочность, обеспечивающей:

а) прогноз изменения состояния связных грунтов во времени в результате воздействия природных и инженерных факторов;

б) получение расчетных показателей прочности для каждого отдельного периода работы возводимого сооружения, характеризуемого комплексом условий, влияющих на прочность грунта, включая его прогнозируемое состояние.

Методы испытаний, дающие показатели, соответствующие расчетным схемам и условиям работы сооружений, далее кратко именуется "расчетными методами испытаний".

Отметим, что значительная часть работы по пересмотру и построению основных положений методики исследований прочности грунтов, начатой автором еще на строительстве канала имени Москвы, Углической и Рыбинской гидроэлектростанций, была выполнена при изысканиях и проектировании Волго-Донского водного пути, Волжской гидроэлектростанции имени В.И. Ленина и Волжской гидроэлектростанции имени XXII съезда КПСС.

В соответствии с изложенным настоящая работа построена на:

1. Обобщении результатов имеющихся теоретических исследований прочности связных грунтов.

2. Результаты лабораторных работ, выполненных под общим руководством автора, которые были одобрены экспертами Госстроя СССР и Министерства строительства электростанций и приняты для проектирования и последующего возведения гидротехнических сооружений на Дону и Волге.

3. Теоретических исследованиях автора.

В работе также использованы результаты лабораторных исследований связных грунтов оснований сооружений Волго-Донского водного пути и Волжской гидроэлектростанции имени В. И. Ленина, выполненных непосредственно на строительстве лабораториями Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта (ДИИТ), под руководством профессора М. Н. Гольдштейна, а также результаты исследований по грунтам Волжской ГЭС имени В. И. Ленина, выполненных в Москве лабораторией Московского института инженеров железнодорожного транспорта (МИИТ), под руководством профессора Г.М.Шахунянца.

Лабораторные исследования Гидропроекта выполнялись под общим методическим руководством автора в комплексных лабораториях геологических экспедиций, возглавляемых инженерами С. Н. Егоровым, З. И. Константиной, Е. П. Тихомировой, В. А. Чупровым и др., а также в Московской лаборатории Гидропроекта под руководством инженеров И. Б. Симанчука, И. А. Выхирева. В руководстве лабораторными исследованиями грунтов района Волжской гидроэлектростанции имени В. И.Ленина большое участие принимал кандидат геолого-минералогических наук Я. Л. Коган.

Основные выводы по проведенным комплексным исследованиям связных грунтов с установлением расчетных методов исследований, дающих расчетные показатели прочности, а также основанные на них рекомендации по проектированию каждого крупного гидротехнического сооружения на Дону и Волге, обсуждались на расширенных заседаниях Технического совета института "Гидропроект" им. С. Я. Жука. Экспертные заключения и замечания по комплексу этих вопросов консультантов Технического совета: проф. М. Н. Гольдштейна, проф. Н. И. Денисова, проф. Н. Н. Маслова, проф. А. А. Ничипоровича, проф. Г. М. Шахунянца и заместителя председателя Технического совета проф. М. М. Гришина также учтены автором настоящей работы.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ловецкий Е. С. К вопросу определения зависимости угла сдвига от нормального давления, Москва-Волгострой, 1937, № 3-4.

2. Ловецкий Е. С. Геотехнические исследования в период проектирования (главы первая, вторая и третья). Волго-Дон, том III, Госэнергоиздат, М., 1956.

3. Ловецкий Е. С. "Принцип подобия в испытаниях прочности и ползучести грунтов". Труды совещания по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения, т. I, изд. АН СССР, 1956.

4. Ловецкий Е. С. "Показатели сдвига глинистых грунтов и продолжительность лабораторных испытаний". Московский инженерно-строительный институт. Совещание по исследованиям строительных свойств грунта, тезисы докладов М., 1958.

5. Ловецкий Е. С. Вопросы исследований прочности связанных грунтов. Гидропроект. М., 1960.

6. Ловецкий Е. С. Основы методики исследований грунтов. Геология района сооружений Волго-Дона. Гл. XI. Госэнергоиздат, 1960.

7. Ловецкий Е. С. К методике ускоренного определения прочности грунтов. Труды Гидропроекта, Сборник третий, М., 1960.

8. Ловецкий Е. С. "Принцип подобия в испытаниях прочности и ползучести грунтов" Труды совещания по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения. Т. III, Изд. АН СССР (в печати).

9. Маслов В. Н., Ловецкий Е. С. и др. Канал Москва-Волга. Том "Геотехника". Госстройиздат, 1940.

I. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЧНОСТИ СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ

В этой части работы рассмотрены известные теории прочности, существующие методы лабораторных исследований прочности связных грунтов и их теоретические основы.

Как наиболее применимые к грунтам, рассматриваются теории прочности О. Мора, П. П. Баландина и А. И. Боткина.

Для связных грунтов пластичной консистенции наиболее вероятно разрушение путем сдвига, а не путем отрыва. Это отвечает наблюдениям за характером разрушения естественных оснований гидротехнических сооружений, естественных склонов и земляных сооружений, которые обычно происходит в виде сдвига.

Для описания предельных состояний прочности связных грунтов, учитывая их способность к разрушению за счет сдвигающих или растягивающих напряжений и отсутствие разрушения при всестороннем равномерном сжатии, признается наиболее подходящей теория прочности О. Мора.

Как известно, согласно этой теории, начало пластического течения, то есть нарушения прочности путем пластического сдвига наступает, когда касательное напряжение τ на площадке скольжения достигает определенной величины S , зависящей от действующего на той же площадке нормального напряжения p , то есть когда

$$\tau = S = f(p) \quad (I)$$

Формулируя условия прочности и пластичности, эта теория позволяет учитывать изменения свойств грунтов и связанной с ними прочности под влиянием внешних напряжений.

Отдельные недостатки этой теории, по-видимому, не бу-

дуг имеют существенного значения в условиях применения к связным грунтам, изучаемым методом сдвига или сжатия в стабиллометре. Погрешность в испытаниях прочности за счет недоучета теорией σ_c Мора среднего главного напряжения, по данным ряда исследователей, не превышает в крайних случаях 15-17%.

В этом же разделе работы рассмотрены теоретические основы и существующие методы исследований прочности связных грунтов отдельных наиболее выдающихся отечественных и зарубежных исследователей. В результате обзора сделаны следующие замечания и предложения.

Существующие методы лабораторных исследований прочности связных грунтов предполагают, что огибающие предельных кругов напряжений Мора представляют собой прямые. В действительности же они, как правило, криволинейны и могут быть прямыми лишь в частном случае.

Существующие методы исследований прочности связных грунтов, разработанные различными исследователями, позволяют установить влияние на показатели прочности грунта следующих факторов: структуры, пористости, влажности, степени насыщения водой, степени уплотнения грунта, величины порового давления, скорости приложения внешних напряжений. Каждый из этих методов может получить право использования лишь в том случае, если он учитывает условия фактической работы и состояние грунта в проектируемом сооружении.

Таким образом, условия практического использования каждого отдельного метода, определяющего лишь частные значения показателей прочности, должны быть строго установлены, во избежание недоразумений в оценке строительных свойств изучаемого грунта.

Автор приходит к выводу, что методика испытаний должна определяться исходя из предварительного анализа условий работы грунтов в сооружении.

Разработка соответствующей методики, открывающей возможности наиболее объективной оценки прочности связных грунтов, особенно необходимой при проектировании крупных сооружений на не скальных мягких основаниях, составляет содержание последующих глав диссертации.

II. ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ СДВИГУ ОТ НОРМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Согласно общим положениям теории прочности О. Мора, сопротивление сдвигу S определяется функцией:

$$S = f(\rho + \tilde{\sigma}_0), \quad (2)$$

где свойства грунта как материала характеризуются видом функции (2) и значениями параметров, входящих в ее состав.

Н. М. Герсеванов [1937 г.], считая, что зависимость (2) в виде криволинейной огибающей больших кругов диаграммы Мора отвечает грунтам лучше прямолинейной зависимости Кулона. Неоднородность функции (2) подтвердилась многочисленными исследованиями грунтов для крупного гидротехнического строительства. Ее использование становится практической необходимостью в условиях испытаний грунтов на прочность методом трехосного сжатия и при больших нормальных нагрузках в опытах на сдвиг.

В результате анализа многочисленных экспериментальных данных и теоретических исследований, зависимость сопротивления сдвигу S от нормального к площадке скольжения напряжения ρ была установлена автором [1947 г.] в виде

$$S = \beta(\rho + \tilde{\sigma}_0)^n \quad (3)$$

и неоднократно проверена для различных грунтов.

Здесь β , $\tilde{\sigma}_0$ и n параметры, однозначно характеризующие свойства и состояние грунта и метод испытаний, включая способ подготовки грунта. Так, $\tilde{\sigma}_0$ кг/см² представляет собой внутренние напряжения в грунте, определяемые характером взаимодействия между частицами, имеющего электрическую природу. При значении $\rho = -\tilde{\sigma}_0$ сопротивление сдвигу $S = 0$. Пока-

затель степени n , согласно опытным данным, может быть больше и меньше единицы. Когда $n > 1$ - кривая сдвига обращена выпуклостью к оси нагрузок, когда $n < 1$ - наоборот. В последнем случае имеет место упрочнение грунта в области больших нагрузок. При $n = 1$, в качестве частного случая, получим известную прямолинейную зависимость Кулона:

$$S = \beta (\rho + \sigma_0), \quad (4)$$

для которой понятия и величины так называемых коэффициента трения ($\operatorname{tg} \varphi = \beta$) и сцепления ($c = \beta \sigma_0$), определяются только геометрическим построением, так как в действительности эти показатели не характеризуют собой физического трения и сцепления в грунте, а являются лишь параметрами уравнения сопротивления сдвигу.

Нелинейность этой зависимости, особенно с учетом областей малых и больших нормальных нагрузок (меньше 1 кг/см^2 и больше $10\text{--}15 \text{ кг/см}^2$), не вызывает сомнений и все больше обращает на себя внимание при разработке методов исследований, особенно с соблюдением принципа подобия.

Уравнение сдвига (3) выведено автором, пользуясь результатами испытаний на сдвиг на различных ветвях компрессионной кривой. Из рассмотрения этих результатов следует, что в каждом отдельном цикле внутреннее сопротивление сдвигу S растет не только с ростом нормального напряжения, но и с увеличением начального уплотнения грунта. В тех же циклах испытаний скорость изменения S уменьшается по мере возрастания ρ и σ_0 .

Это отвечает представлению, что суммарная прочность внутренних связей растет вместе с уплотнением грунта. При этом скорость изменения каждого из факторов, определяющих этот процесс, снижается по мере увеличения нормального напряжения.

Опыт показывает, что количественная оценка этого влияния может быть с достаточным приближением выражена зависимостью:

$$dS = \frac{\beta_0}{(\rho + \sigma_0)^m} d\rho, \quad (5)$$

где $\beta_0, m, \tilde{\sigma}_p$ - параметры, из которых $\tilde{\sigma}_p$ кг/см², учитывает влияние внутренних сил, причем $\tilde{\sigma}_p$ не совпадает здесь по величине с $\tilde{\sigma}_0$.

После интегрирования (5) находим:

$$S = \frac{\beta_0}{1-m} (\rho + \tilde{\sigma}_p)^{1-m} + C \quad (6)$$

Постоянная интегрирования C определяет часть сопротивления сдвигу, не зависящую от предварительного уплотнения грунта и от нормального к площадке сдвига напряжения. Для связных нецементированных грунтов, как показывает опыт, значение C практически равно нулю.

Величина $\tilde{\sigma}_p$, как нормальная (к площадке скольжения) составляющая внутренних сил и междучастичных связей грунта, может быть оценена через сопротивление разрыву R нормальное к той же площадке скольжения, полагая:

$$\tilde{\sigma}_p = \alpha R \quad (7)$$

где α - безразмерный параметр.

Учитывая найденные автором [1947 г.] для связных грунтов в состоянии грунтовой массы: эмпирическую зависимость сопротивления разрыву R от пористости:

$$R = \frac{\alpha_0}{\varepsilon - \varepsilon_k} \quad (8)$$

и зависимость пористости от давления ρ , которую автор принимает гиперболической:

$$\varepsilon = \frac{A}{\rho + \rho_c} + B, \quad (9)$$

получим, пользуясь (7) выражение:

$$\tilde{\sigma}_p = \frac{\alpha \alpha_0}{A} (\rho + \rho_c), \quad (10)$$

где ε - коэффициент пористости, $\alpha_0, \varepsilon_k, A, \rho_c$ и B - параметры, определяемые по результатам опытов на разрыв и компрессию. Значение α может быть установлено по результатам испытаний на сдвиг. Параметры ε_k и B отвечают неко-

НТБ
ДНУЖТ

тому условному предельному сжатию связного грунта, получаемому экстраполяцией соответствующей эмпирической зависимости. В связи с этим они близки между собой по абсолютной величине.

Подстановка (10) в начальное уравнение (6) определяет после упрощения зависимость (3), в которой:

$$n = 1 - m \quad (11)$$

$$\beta = \frac{\beta_0}{n} \left(1 + \frac{\alpha d_0}{A} \right)^n \quad (12)$$

$$\sigma_0 = \frac{\alpha d_0 P_c}{\alpha d_0 + A} \quad (13)$$

Здесь σ_0 - также определяет нормальную к площадке сдвига составляющую внутренних междучастичных сил, но в отличие от σ_p относится не к отдельной нагрузке, а ко всему процессу подготовки грунта, будучи функцией параметров A и P_c , характеризующих именно этот процесс.

Однако условие (3) может рассматриваться и как непосредственная эмпирическая зависимость между S и ρ .

Результаты использования (3), вместо прямолинейной зависимости Кулона, при $n = 0,5$ в теоретических исследованиях прочности сыпучей среды (В. В. Соколовский, 1948 и В. Г. Березанцев, 1952) показали возможность получения несложных решений этой задачи для инженерной практики. В то же время исследованиями автора [1947 г.] установлено, что уравнение (3) при значении $n = 0,5$ чаще всего удовлетворяет опытным данным для связных грунтов, испытанных в состоянии грунтовой массы при влажности, большей предела раскатывания на 0,25-0,5 числа пластичности.

Ш. УСЛОВИЯ ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ

Условие прочности, полученное пользуясь огибающей предельных кругов Мора (3), характеризует состояние предельного равновесия.

При отсутствии состояния предельного равновесия круги напряжений диаграммы Мора не касаются предельной огибающей (3). В процессе изменения напряжений первым коснется этой кривой больший из кругов и этим определится условие предельного равновесия для плоской задачи. Одновременно определится положение площадок скольжения, составляющих с направлением $\tilde{\sigma}_1$, углы, которые мы обозначаем $\pm \alpha$.

Вся третья глава диссертации посвящена выводам условий пластичности и прочности и уравнений зависимости между главными напряжениями и показателями сдвига. Эти выводы выполнены, пользуясь формулой (3) и предположением о том, что рассматриваемая система находится в состоянии предельного равновесия.

В результате установлено значение угла α , характеризующего положения площадки скольжения:

$$\cos 2\alpha = \frac{b + 2\tilde{\sigma}_0 - [(b + 2\tilde{\sigma}_0)^2 - 4n(1-n)a^2]^{0,5}}{2(1-n)a}, \quad (14)$$

где $b = \tilde{\sigma}_1 + \tilde{\sigma}_3$ (15)

$$a = \tilde{\sigma}_1 - \tilde{\sigma}_3 \quad (16)$$

Таким образом, если исходить из криволинейного характера огибающей, положение площадок скольжения зависит для данного грунта от напряженного состояния.

Выразим в условии предельного равновесия

$$\tau = S = \beta(\rho + \sigma_0)^n \quad (17)$$

составляющие τ , ρ через главные напряжения и используем зависимость (14). После преобразований получаем условие предельного равновесия в виде:

$$\begin{aligned} & 2(1-n)a^2 - (b + 2\sigma_0)^2 + (b + 2\sigma_0) \left[(b + 2\sigma_0)^2 - 4n(1-n)a^2 \right]^{0.5} = \\ & = 2^{3-4n} \beta^2 (1-n)^{2(1-n)} \left\{ (1-2n)(b + 2\sigma_0) + \left[(b + 2\sigma_0)^2 - \right. \right. \\ & \quad \left. \left. - 4n(1-n)a^2 \right]^{0.5} \right\}^{2n} \end{aligned} \quad (18)$$

Для практических целей удобнее пользоваться системой двух уравнений: полным уравнением (18) и приближенным уравнением

$$\kappa a^m + \gamma a = b + 2\sigma_0, \quad (19)$$

где $\gamma = \cos 2\alpha$ (20)

определяется по формуле (14) как среднее значение для данного интервала изменения главных напряжений,

$$\kappa = \frac{2 \sin^m 2\alpha}{2^m \beta^m} \quad (21)$$

и $m = \frac{1}{n}$ (22)

При этом α также принимается по среднему значению, тогда величины κ и m рассматриваются как постоянные параметры уравнения (19) для того же интервала главных напряжений.

По экспериментальным данным первоначально определяются параметры приближенного уравнения (19).

Из тех же исходных уравнений могут быть найдены зави-

симости между главными напряжениями и соответствующими показателями сдвига:

$$a = \frac{2S}{\rho + \tilde{\sigma}_0} \left[n^2 S'^2 + (\rho + \tilde{\sigma}_0)^2 \right]^{0,5} \quad (23)$$

$$\tilde{\sigma} = \frac{2nS'^2}{\rho + \tilde{\sigma}_0} + 2\rho \quad (24)$$

Частные случаи условия (18) могут быть установлены при определенных значениях параметра n , а именно при n равном 0, 0,5 и 1.

Полученные нами условия прочности, с учетом нелинейного уравнения сдвига (3), и вытекающие из них зависимости используются в качестве условий подобия по напряженному состоянию и виду деформации при разработке методов испытаний прочности грунтов. Они позволяют обосновать применение в различных случаях того или другого метода испытания на прочность (например, метода трехосного сжатия), получить количественные значения параметров уравнения сдвига (β , $\tilde{\sigma}_0$, n) и других характеристик (коэффициента бокового давления, напряжения начала пластического течения и т. п.) и установить их зависимость от вида и условий осуществляемой деформации.

Так, например, при $n = 0,5$ коэффициент бокового давления получается равным:

$$\zeta = \frac{\tilde{\sigma}_3}{\tilde{\sigma}_1} = 1 + \frac{\beta^2}{\tilde{\sigma}_1} - \frac{2\beta}{\tilde{\sigma}_1} (\tilde{\sigma}_1 + \tilde{\sigma}_0)^{0,5} \quad (25)$$

В случае пространственной задачи разрушение может наступить, если условие (18) будет удовлетворяться также и для еще одной из пар главных напряжений: $\tilde{\sigma}_1$ и $\tilde{\sigma}_2$ или $\tilde{\sigma}_2$ и $\tilde{\sigma}_3$. В этом случае:

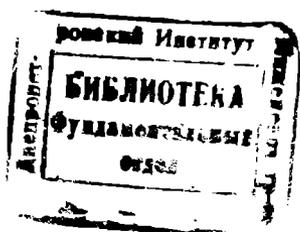
$$\tilde{\sigma}_2 = \tilde{\sigma}_1 \quad \text{или} \quad \tilde{\sigma}_2 = \tilde{\sigma}_3$$

Тогда второй или третий круги напряжений также коснутся предельной кривой (3) и, таким образом, необходимо будет введение дополнительного условия, отличающего пространственную задачу от плоской.

НТБ
ДНУЖТ

Будем считать, как это предлагает В. Г. Березанцев, среду находящейся в состоянии неполного предельного равновесия, когда выполняется только первое условие.

Для цилиндрического образца грунта, испытываемого методом трехосного сжатия в условиях осесимметричной задачи, по мере увеличения напряжений, будет достигнуто состояние лишь полного предельного равновесия.



НТБ
ДНУЖТ
17

IV. ПРИНЦИП ПОДОБИЯ

Естественное состояние пород изменяется в результате их геологического развития, а также под влиянием различных факторов, связанных с возведением и эксплуатацией инженерных сооружений. Вместе с тем, изменяется естественное напряженное состояние грунтов за счет выемки котлована, величин, порядка и скорости приложения нагрузок от веса элементов сооружения. Изменяется режим подземных вод, создаются условия напорной фильтрации в грунтах оснований гидротехнических сооружений и т. п. Подобные изменения физического и напряженного состояния и связанной с этим прочности пород необходимо предвидеть, количественно оценить и уметь учитывать в испытаниях. Последнее в свою очередь определяет условия и технологии метода исследований грунтов на прочность, названного нами "расчетным". В связи с этим, далеко не каждый из известных в настоящее время методов может быть использован для получения наиболее достоверных характеристик прочности грунта в конкретных условиях проектирования гидротехнических и промышленных сооружений.

Методы испытаний на прочность, обеспечивающие наиболее экономичное и в то же время надежное инженерное решение, чаще всего приходится разрабатывать заново в соответствии с поставленной задачей, в особенности, если в испытаниях должны быть учтены, кроме естественного состояния грунта и его возможного изменения, и другие, обычно не учитываемые факторы, как например: характер предполагаемой деформации грунта в проектируемом сооружении, величины, последовательность и скорости приложения внешних нагрузок (от веса сооружения и давления воды), поровое давление и т. п. Успешное построение методов исследований, учитывающих условия факти-

ческой работы грунта и его состояние в проектируемом сооружении, обеспечивается использованием, наряду с условиями прочности, принципа подобия условий эксперимента и природы. Их комплексное использование определяет метод построения основной или расчетной схемы (или методики) испытаний прочности связного грунта.

Как известно, теория подобия является основой метода моделирования. Последний обычно применяется для экспериментального изучения различных сложных систем, трудно поддающихся теоретическому анализу и позволяет практически осуществить необходимое заданное подобие между моделью и натурой. Изучение условий прочности и устойчивости гидротехнических сооружений, как теоретически сложная и ответственная задача, приводит к использованию более широкого по своим возможностям метода центробежного моделирования, предложенного проф. Г. И. Покровским. При изучении прочности грунтов на отдельных образцах в соответствующих приборах, призванных воспроизвести, в отличие от центрифуги, лишь заданную простую деформацию, оказалось вполне выполнимым крайне важное для грунтов первоочередное условие подобия по состоянию грунта и виду деформации. Практика использования этой возможности в каждом отдельном случае приводит к разработке надлежащего наиболее достоверного метода исследований прочности, который в сочетании с выбором типа прибора и метода инженерного расчета должен моделировать условия работы проектируемого сооружения.

Выполнение условий подобия во всех видах испытаний механических свойств грунтов определяет методику этих испытаний. В опытах необходимо обеспечить подобие условиям природы по состоянию грунта и прежде всего по пористости, влажности и степени заполнения пор водой, а также по относительному содержанию связанной воды, характеру распределения пор по их крупности, по степени нарушенности естественного строения, по химическому составу поровой воды, по степени разбухания или уплотнения породы в сопоставлении с ее начальными или естественными условиями. Необходимо обеспечить подобие

по виду деформации и напряженному состоянию, включая скорость и порядок приложения внешних нагрузок, то есть осуществить подобие по времени и истории загрузки.

Условия подобия, выполнимые при испытаниях на обычных приборах, прежде всего, должны быть обоснованы не только теоретическими проработками, но и результатами так называемых предварительных исследований изучаемых грунтов.

По результатам предварительных исследований устанавливается зависимость прочности исследуемого грунта от влажности, химического состава поровой воды, пористости, степени водонасыщенности в естественном состоянии, от степени предварительного насыщения без разбухания или с разбуханием, от степени предварительного уплотнения, а также от степени нарушенности естественной структуры и т. п. Производится также оценка степени влияния вида деформации на показатели прочности изучаемого связного грунта.

Удовлетворение перечисленных выше положений в испытаниях грунтов на прочность и составляет основы принципа подобия при разработке соответствующих методов исследований.

В соответствии с изложенным, первая часть испытаний на прочность заключается в специальной подготовке, придающей изучаемому грунту состояние, равноценное натурному (естественному или прогнозируемому) по всем перечисленным и другим показателям и в сохранении этого состояния неизменным в продолжении всего испытания. Этим обеспечивается выполнение условия подобия по состоянию грунта.

Условия подобия по виду деформации и напряженному состоянию осуществляются во второй части испытаний подготовленного грунта путем выбора конструкции прибора, установления схемы, порядка скорости приложения и величин размеров внешних нагрузок. Обе части опыта: подготовка изучаемого грунта и его непосредственное испытание на прочность - неотделимы друг от друга и вместе представляют собой законченную методику исследований, отвечающую комплексу условий подобия.

Путем практического использования перечисленных усло-

вий, применительно к комплексу природных факторов и инженерных требований, подобие которых необходимо осуществить в опыте, может быть получен ряд основных или расчетных методов испытаний прочности грунтов, применяемых преимущественно перед другими в соответствующих случаях. Изложенные выше соображения могут быть представлены в виде "условий подобия" опыта и натуры, определяющих расчетный метод испытаний.

Условия подобия для построения методов исследований прочности связных грунтов

А. Выполнение условий подобия по состоянию грунта при испытаниях в приборах любых конструкций

Предварительная подготовка исследуемых грунтов определяет их состояние:

1. Естественное состояние по пористости и влажности.
2. Естественное состояние по пористости. Влажность приведена в соответствие с пористостью и отвечает полному водонасыщению грунта. Поровая среда заменена частично или полностью водой заданного химического состава.
3. Заданное состояние характеризуется:
 - а) заданными значениями пористости-влажности, одинаковыми для образцов всего цикла испытаний;
 - б) значениями пористости и влажности, полученными в результате уплотнения под водой одной наибольшей или средней в испытаниях нагрузкой, одинаковой для всех образцов;
 - в) значениями пористости и влажности, полученными в результате свободного или ограниченного заданной деформацией или нагрузкой разбухания с одновременным полным насыщением грунта водой;
 - г) то же, без специальных требований к полному насыщению разбухшего грунта.

4. Состояние отдельных образцов грунта по пористости и влажности, доведенных до полного насыщения, отвечает ряду нормальных к плоскости сдвига нагрузок, при которых производится сдвиг или сжатие этих образцов.

5. Состояние грунта после нарушения естественной структуры характеризуется заданным весом скелета грунта и влажностью при полном заполнении пор водой. Различают способы подготовки или уплотнения грунта после нарушения его структуры:

а) путем компрессионного обжатия пасты, приготовленной при заданной влажности;

б) путем послойного трамбования и вибрации той же пасты.

Б. Выполнение условий подобия по виду деформации

При испытаниях грунтов, предварительно подготовленных любым указанным выше способом, на приборах различных конструкций могут осуществляться следующие деформации.

6. Сдвиг по заданной плоскости. Испытания производятся в одноплоскостных сдвиговых приборах.

7. Сжатие в условиях свободного бокового расширения. Испытания производятся в приборе на раздавливание.

8. Сжатие без возможности бокового расширения.

9. Сжатие с боковым расширением, ограниченным постоянным боковым напряжением.

10. Сжатие с боковым расширением, ограниченным заданной величиной боковой деформации или боковым напряжением постоянным, а также изменяющимся по заданному закону.

Виды деформаций, указанные в пп. 8-10, осуществляются в трехосном приборе - стабилометре.

В. Выполнение условий подобия по напряженному состоянию и скорости приложения напряжений

Испытания грунтов, подготовленных в соответствии с пра-

НТБ
ДНУЖТ

тической задачей, выполняемые в любых приборах, могут характеризоваться напряженным состоянием и скоростью приложения напряжений.

11. Начальные нормальные к плоскости сдвига, напряжения и порядок их изменения во времени задаются в соответствии с задачей исследований.

12. Начальные главные напряжения отвечают пространственному естественному напряженному состоянию исследуемого грунта. Дальнейшее развитие деформаций обуславливается порядком приложения и графиком изменения во времени главных напряжений в соответствии с условиями поставленной задачи.

13. Скорость увеличения сдвигающего напряжения в сдвиговом приборе или большего главного напряжения в трехосном приборе, а также скорость уменьшения (сработки) меньшего главного напряжения в трехосном приборе заданы, как и вся продолжительность опыта, исходя из условий инженерного проектирования и геологической обстановки.

Выполнение условий подобия не всегда может быть обеспечено в полной мере. Так, извлечение образца с больших глубин, сопровождающееся его разгрузкой, приводит обычно к ряду необратимых изменений его свойств, которые пока не могут быть восстановлены при подготовке образца к испытаниям. Однако выполнение условий подобия в той мере, в какой это практически возможно, резко повышает качество испытаний и дает значительно более достоверные результаты, чем при обычных методах испытаний, когда условия подобия, как правило, полностью или в значительной мере не удовлетворяются.

Следует отметить, что в применении к проектированию земляного полотна железных дорог аналогичная идея была впервые высказана профессором Г. М. Шахуняцем.

У. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЧНОСТИ ГРУНТОВ

Основной или расчетный метод исследования прочности определяет изучение грунта в заданном состоянии, подобном ожидаемому при возведении или эксплуатации сооружения в наиболее опасных в смысле его устойчивости условиях работы. Соответствующие ответственные периоды устанавливает совместно изыскатель и проектировщик, используя результаты предварительных исследований грунтов. Эти периоды могут быть названы расчетными. Каждому из них отвечает свое определенное состояние изучаемого грунта, эпюры величин и скоростей приложения напряжений, вид предполагаемой деформации и т.п., а следовательно и свой расчетный или основной метод испытаний. Практическая разработка последнего выполняется в соответствии с предложенным методом построения расчетной или основной схемы испытаний на прочность.

Расчетным, наиболее решающим, может быть строительный период и первое время эксплуатации при наличии в основании или откосах строящихся сооружений насыщенных водой связанных грунтов мягкопластичной консистенции ("старшцы", илы и др.). Период длительной эксплуатации может быть основным или расчетным при наличии ненасыщенных водой глинистых грунтов. Условия работы и опорожнения водохранилища или канала нередко определяют устойчивость сооружений в обоих указанных периодах.

Мягкие насыщенные водой связные грунты способны к значительному сдвигу и увеличению при этом прочности. По этой причине в качестве естественного основания возводимых сооружений они могут иметь более низкую прочность в строительный период и в первое время эксплуатации. Просадочные лессовые грунты могут иметь наименьшую прочность в процессе просадки

от замачивания, то есть в первое время эксплуатации возводимых на них гидротехнических сооружений.

Ненасыщенные водой глины и суглинки различного возраста, способные к разбуханию и насыщению, значительно снижают свою начальную прочность после увлажнения. В связи с этим, эти грунты как основание гидротехнических сооружений изучаются в состоянии полного насыщения водой под нагрузкой, соответствующей весу сооружения, для проверки устойчивости последнего в период эксплуатации.

Каждый полученный расчетный метод исследований, в зависимости от моделируемых им условий, отличается определенным сочетанием условий подобия.

В этой главе рассмотрены некоторые основные расчетные методы исследований прочности связных грунтов, отвечающие наиболее ответственным периодам работы проектируемых сооружений, а именно, методы, изучающие:

1. Прочность грунта в естественном состоянии.
2. Прочность грунта после полного водонасыщения.
3. Прочность грунта после предварительного одинакового обжатия.
4. Прочность грунта после полной стабилизации его состояния под нагрузкой.
5. Прочность грунта в условиях незавершенной консолидации.
6. Прочность грунта при заданной влажности и пористости, одинаковой для всех образцов.
7. Прочность грунта в условиях отсутствия или ограниченного бокового расширения.
8. Прочность связных грунтов нарушенной структуры.
9. Прочность просадочных грунтов.

Результаты практического использования многих из этих методов для одного и того же грунта, как и следовало ожидать, нередко различаются между собой в несколько раз.

VI. ПРИЕМЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ И УСТАНОВЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

В этой главе изложены приемы обработки результатов испытаний связных грунтов на прочность в приборах прямого сдвига и в стабилометрах. Приемы построены применительно к уравнению сдвига (3), условиям прочности и пластичности - полному (I8) и приближенному (I9) и позволяют установить, пользуясь экспериментальными данными, вероятные значения параметров указанных уравнений, а также положение площадок скольжения, образующихся в условиях испытания методом трехосного сжатия. Полученные характеристики определяют собой показатели прочности исследуемого грунта в условиях проведенного отдельного испытания. Их дальнейшее использование заключается в совместной комплексной обработке методами математической статистики раздельно для каждого метода исследований, то есть для каждого случая работы проектируемого сооружения. В результате этого будут установлены значения расчетных показателей прочности.

В этой же главе изложены основные пути и порядок установления расчетных значений показателей прочности связных грунтов по обработанным результатам исследований.

Показателями прочности грунтов являются параметры: β , b_0 , n уравнения сдвига, а при прямолинейной зависимости сдвига параметры - $tg \varphi$, C . Расчетные показатели прочности, как указывает их название, должны отвечать рассматриваемому расчетному периоду работы проектируемого сооружения, включая соответствующее состояние изучаемого грунта. Это относится ко всем горизонтам геологического профиля основания сооружения, прослоям и линзам более мягких и менее прочных пород, их контактам, областям древнего размыва и выветривания и т. п.

Установление расчетных показателей прочности выполняется по результатам комплексных инженерно-геологических изысканий и грунтовых исследований, с учетом условий совместной работы проектируемых сооружений и естественных оснований во времени, в соответствии с принципом подобия.

Некоторые специалисты еще рассматривают получение расчетных показателей, как их выбор из результатов испытаний отдельных "случайных" образцов после их предварительного уплотнения, то есть без моделирования состояния изучаемых пород в условиях рассматриваемого случая работы сооружений. Зато в целях наибольшей достоверности и объективности выводов предлагается использование математической статистики, в чем усматривается основная идея метода "выбора" расчетных показателей.

В противоположность подобному приему, в практику Гидропроекта, в соответствии с рекомендуемым принципом подобия, автором постепенно внедрялся более прогрессивный метод установления расчетных показателей. Основная схема этого метода предусматривала следующие разделы получения, обработки и анализа результатов комплексных изысканий и исследований:

1. Составление расчетного геологического профиля по результатам изучения разреза опорными скважинами, по сплошному керну, с учетом всех особенностей геологического строения, влияющих на прочность, устойчивость и долговечность проектируемых сооружений. В числе этих особенностей наличие прослоев и линз, древних оползней, контактов глин с напорными песками и т. п.

2. Оценка условий работы проектируемых сооружений, включая состояние грунтов основания и других элементов, для расчетных периодов и проектных случаев. Разработка методов предварительных исследований, их проведение в ограниченном объеме, позволяющем, однако, характеризовать прогнозируемое состояние грунтов для каждого проектного случая или расчетного периода работы сооружения.

3. Разработка расчетных методов испытаний, отвечающих, по результатам предварительных исследований, расчетным пе-

риодам и проектным случаям. Проведение самих испытаний, в соответствии с принципом подобия, для каждого расчетного слоя основания по 10-30 образцам. Количество образцов, надежно характеризующих изучаемый горизонт, устанавливается в зависимости от степени неоднородности грунта. На ранних стадиях проектирования количество испытанных на сдвиг образцов снижается до 7-10, а испытания производятся для одного-двух расчетных горизонтов, лимитирующих прочность основания, например: илов, мягких пластичных глин, грунтов зоны контакта и т. п.

Количество опытов на сдвиг может быть сокращено при наличии достаточно большого числа более простых испытаний: на раздавливание, расплющивание и определения физических свойств. Когда эти определения способны надежно характеризовать изучаемый расчетный горизонт, количество опытов на сдвиг может снижаться до минимума, при обязательном изучении характерных по влажности и состоянию образцов.

4. Комплексная обработка и анализ материалов изысканий и исследований, в процессе которой все основные расчетные горизонты характеризуются результатами исследований, сведенными в таблицы, графики рассеивания и повторяемости и средними статистическими значениями показателей вида, состояния, прочности и сжимаемости грунтов. При этом для таких показателей состояния, как влажность, пористость, консистенция, имеющих решающее влияние на прочность и для показателей сдвига (коэффициента трения и сцепления) производится корреляция полученных результатов методами математической статистики. Одновременно сопоставляются не только показатели естественного состояния пород, но и показатели полученного в опытах на сдвиг прогнозируемого состояния, при котором произведены испытания. В результате устанавливаются достоверные границы средних значений, при заданной вероятности, как для показателей состояния, так и для показателей сдвига. Первые характеризуются значениями, полученными по верхней достоверной границе среднего, вторые - значениями, полученными по нижней достоверной границе. Эти значения

показателей, установленные при вероятности от 0,95 до 0,999 по результатам испытаний расчетным методом образцов отдельного расчетного горизонта, могут рассматриваться в качестве расчетных, полученных в соответствии с требованиями принципа подобия.

Необходимо было уточнить требуемую величину вероятности при оценке доверительных пределов статистического среднего, чтобы обосновать их использование в качестве расчетных показателей прочности. Это было выполнено путем анализа условий возведения и работы безаварийно эксплуатируемых гидротехнических сооружений и в результате изучения оползневых естественных склонов, откосов различных выемок и т. п. В период строительства Волго-Дона подобный анализ в натуре с отбором и исследованием образцов глины был выполнен для откоса канала № 101, сложенного на высоту около 12 метров хвалынскими глинами, пришедшего в состояние предельного равновесия после значительного искусственного увлажнения глины в процессе намыва песка на прилегающую территорию.

Результаты этого анализа подтвердили, что расчетные значения показателей сдвига практически совпадают с нижней доверительной границей среднего, при вероятности, близкой к 0,999.

Это соответствовало также результатам исследований и наблюдений за оползневыми участками на строительстве канала имени Москвы, Угличской и Рыбинской гидроэлектростанций. В результате сделанных нами в то время выводов расчетные значения сдвига определялись как среднеминимальные значения. Их количественное совпадение с нижней доверительной границей среднего, при вероятности от 0,99 до 0,999 и числе определенных от 20 до 35 было дополнительно проверено по результатам анализа данных оползневого участка канала № 101 и подтверждено более поздними исследованиями. Таким образом, использование простейших методов математической статистики позволило объединить данные многолетней строительной практики по обоснованию выбора расчетных показателей прочности.

Использование указанных методов испытаний и установле-

ния расчетных показателей обеспечило необходимыми данными проектирование и строительство Волго-Донского канала имени В. И. Ленина, Цимлянского гидроузла, Волжской гидроэлектростанции имени В. И. Ленина и Волжской гидроэлектростанции имени XXII съезда КПСС, а также проектирование гидроэлектростанций на Каме и многих других гидротехнических сооружений.

УП. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕКОМЕНДУЕМЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Практическое применение рекомендуемых методов исследований прочности связных грунтов в целях гидротехнического и промышленного строительства осуществлялось одновременно с разработкой основных принципов испытаний. Начиная с проектирования и строительства канала имени Москвы (1934-1937 гг.), Угличской и Рыбинской гидроэлектростанций (1937-1942 гг.), все шире применялись новые методы исследований грунтов в целях обоснования строительства тяжелых гидротехнических сооружений на мягких грунтах. В расчетах устойчивости откосов земляных плотин канала имени Москвы впервые учитывалось изменение состояния и связанных с ним количественных характеристик грунта во времени. Зависимость сопротивления сдвигу глинистых грунтов от влажности учитывалась при проектировании земляных сооружений Рыбинской гидроэлектростанции и использовалась при их возведении способом гидромеханизации.

При проектировании Волго-Дона и Цимлянского гидроузла, а позже Волжской имени В. И. Ленина, Волжской имени XXII съезда КПСС и других гидроэлектростанций на Волге и Каме, наша свое применение и получила дальнейшее развитие рекомендуемая нами методика определения прочности связных грунтов. Использование при этом условий подобия и специальных предварительных исследований позволяло прогнозировать состояние и поведение грунтов во времени и соответственно уточнять их показатели прочности. Все это обеспечило возможность обоснования строительства крупных сооружений на мягких связных грунтах и позволило получить необходимые для проектирования, наиболее достоверные в данных условиях, характеристики

строительных свойств связных грунтов, как оснований возводимых бетонных и земляных сооружений и как материала для земляных плотин и дамб.

На водоразделе между Волгой и Доном и в пойме Дона развиты преимущественно третичные породы и весьма разнообразные по происхождению, составу и литологии четвертичные образования. На волжском склоне Волго-Донского канала имени В. И. Ленина были встречены сравнительно мало изученные в прошлом хвалынские и майкопские глины, выветрелые в обнажениях.

В районе Цимлянского гидроузла практический интерес представляло изучение киевского мергеля и песков донского аллювия с многочисленными линзами и прослоями старичных грунтов различного происхождения и возраста.

Среди покровных образований всех террас Дона и участков водораздела распространены лессовидные макропористые грунты, представленные преимущественно легкими суглинками, реже тяжелыми разностями супесей и средними суглинками. В районах строительства гидроэлектростанций на Волге и Каме были встречены, мало изученные в прошлом, кинельские тяжелые глины, уфимские суглинки и нижнемеловые глины неокома.

В комплекс геотехнических исследований этих грунтов входила также разработка приемов отбора образцов, методов изучения особенностей их структуры, текстуры, трещиноватости, засоленности, областей контакта, поведения при выветривании в открытых обнажениях или котлованах и т. п.

В соответствии с рассматриваемыми вопросами о наиболее достоверных методах изучения и практического установления наиболее вероятных значений показателей прочности связных грунтов в целях гидротехнического и промышленного строительства, в настоящей главе изложены результаты испытаний основных разновидностей пород, имеющих решающее значение при проектировании и строительстве упомянутых сооружений на Дону, Волге и Каме.

Рассмотрены результаты исследований следующих разновидностей грунтов: хвалынских глин, майкопских глин, старич-

ных грунтов донского аллювия, лёссовидных грунтов, киевского мергеля, кинельских глин, уфимских и казанских отложений и приведены выводы, сделанные в свое время для проектирования и строительства нормально эксплуатируемых в настоящее время сооружений.

Кроме конкретных выводов по каждой изученной разновидности грунта, отметим здесь некоторые общие положения.

Необходимость своевременного установления расчетного случая работы проектируемого сооружения и соответствующего ему основного или расчетного метода испытаний на прочность подтверждается резким различием результатов определений прочности, выполненных для одного и того же грунта различными методами. Однако, несмотря на эту необходимость установления основного или расчетного метода испытаний грунтов на прочность, еще нередко имеет место оторванность инженера-геолога и тем более проектировщика от участия в исследованиях, выборе расчетных случаев и методов испытаний. В то же время грунтовые лаборатории многих организаций выполняют испытания грунтов ответственных сооружений одним и тем же стандартным методом: после их предварительного уплотнения, что, как указывают наши данные, приводит в одних случаях к завышению стоимости строительства, в других - к авариям.

В 1936 г. лабораторные испытания ила для обоснования условий возведения на нем приканальных дамб канала имени Москвы выполнялись в условиях возможного сохранения его высокой естественной влажности, то есть без уплотнения. Полученные в этих опытах коэффициенты сдвига порядка 0,12-0,14 при нагрузках 1,5-2,0 кг/см², вместо 0,30-0,35 после уплотнения, позволили оценить расчетным путем причину выдавливания ила весом насыпи. Этого не могли обеспечить результаты опытов по принятому в то время методу испытаний после уплотнения образцов, состояние которых по влажности и пористости уже не соответствовало естественному, а также условиям строительного периода.

В процессе испытаний для Волго-Донского водного пути водонасыщенные мягкопластичные глинистые грунты андреевских, хазарских, бакинских отложений, хвалыньские глины и старич-

ные грунты аллювия изучались как после полного уплотнения, так и при влажности, близкой к естественной. Результаты последних, по условиям подобия, отвечали строительному периоду и первому году эксплуатации сооружений канала.

Для просадочных грунтов оснований плотин расчетным был установлен период начала эксплуатации, когда после насыщения водой в процессе просадки их прочность может быть наименьшей.

Соответственно этому был разработан лабораторный метод испытаний на сдвиг лессовых грунтов в процессе их просадки от замачивания.

Глинистые грунты оснований волжских гидроэлектростанций изучались одновременно несколькими методами: после уплотнения образцов в воде нагрузками, при которых производится сдвиг, после набухания и насыщения образцов под проектной минимальной нагрузкой и в состоянии естественной влажности и пористости, путем быстрого приложения к образцам внешних нагрузок. Результаты этих опытов, в соответствии с принципом подобия, определяли расчетные показатели для оценки устойчивости сооружений и прочности их оснований для нескольких расчетных периодов работы проектируемых сооружений. К ним относятся: строительный период, условия первого года эксплуатации, условия многолетней эксплуатации и поверочные случаи, связанные с опорожнением или сработкой водохранилища, ремонтом сооружений и т. п.

Изложенные в настоящей работе принципы исследований, по мере их практического освоения и построения соответствующих методов испытаний, использовались в инженерно-геологических изысканиях для обоснования гидротехнического и промышленного строительства.

УШ. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования, результаты которых использованы при проектировании и строительстве нормально эксплуатируемых крупных гидротехнических и промышленных сооружений, позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Для связных грунтов, характеризуемых развитием пластических деформаций, более достоверно разрушение путем сдвига, а не путем отрыва. Нарушение устойчивости сооружений на мягких грунтах, естественных склонов и откосов земляных сооружений происходит преимущественно в форме сдвига.

2. В испытаниях на прочность связных грунтов необходимо прежде всего воспроизвести вид деформации, возникающей при разрушении подобных сооружений. Этим оправдывается целесообразность преимущественного использования в определенных условиях каждого из известных в настоящее время приборов: прямого сдвига, сдвига с наклоном, стабилметра, прибора на раздавливание, на расплющивание и различных штампов: шарового, конического и т. п.

3. Прочность связных грунтов наиболее полно описывает теория прочности О. Мора, причем следует учитывать криволинейность огибающей. Целесообразность использования криволинейной огибающей подтверждается необходимостью повышения точности испытаний, особенно в стабилметре, в области малых и больших нормальных нагрузок, также необходимостью использования более точных экспериментальных данных при проектировании. Общее уравнение этой теории удовлетворяет предельным состояниям прочности и пластичности при соответственных значениях постоянных параметров.

4. На результаты испытаний прочности связных грунтов

оказывают большое влияние многие факторы: структура и состояние грунта, его влажность, пористость, поровое давление, химический состав поровой воды, вид деформации (конструкция прибора), порядок и скорости приложения внешних нагрузок, начальное напряженное состояние, способ предшествующей подготовки грунта: путем уплотнения, насыщения водой, разбухания и т. п.

5. Уравнение сдвига связных грунтов или криволинейной огибающей больших кругов диаграммы напряжений O . Мора, взамен известного уравнения Кулона, имеет вид:

$$S = \beta (p + \bar{\sigma}_0)^n$$

где S - сопротивление сдвигу и p - нормальное напряжение на площадке скольжения.

6. Поведение связного грунта под нагрузкой целесообразно характеризовать несколькими предельными состояниями: состоянием условной деформации, началом пластического течения или состоянием разрушения. Их использование предполагается в соответствии с условиями работы проектируемого сооружения.

7. Условие прочности при криволинейной огибающей главных кругов диаграммы O . Мора определяется уравнением предельного состояния (I8). Последнее, в зависимости от значений параметров β , $\bar{\sigma}_0$ и n , устанавливаемых опытным путем, определяет в общем виде перечисленные выше предельные состояния.

8. Обязательно использование принципа подобия в испытаниях на прочность связных грунтов в целях обеспечения наиболее достоверных результатов.

В диссертации показаны практические пути осуществления подобия условиям природы по состоянию грунта (пористости, влажности, химическому составу поровой воды, степени нарушенности естественного строения, степени допущенного в природе разбухания или уплотнения грунта), по виду деформации, напряженному состоянию, а также по времени и последовательности приложения внешних напряжений.

9. Установлены практические пути построения расчетных методов исследований прочности связных грунтов в предложенном автором методе составления расчетных схем (методик) исследований прочности, основанном на широком использовании принципа подобия эксперимента и природы, условия прочности, на предшествующем установлении характеристик расчетных периодов работы проектируемых сооружений и на результатах предварительных специальных исследований грунтов.

10. Многие известные методы исследований прочности грунтов являются либо расчетными методами, отвечающими условиям работы проектируемого сооружения в отдельные периоды, либо методами предварительных специальных исследований, например: метод проф. Ф. П. Саваренского, определяющий зависимость сцепления от предварительного уплотнения грунта, метод проф. А. А. Ничипоровича, устанавливающий зависимость трения и сцепления от пористости грунта, метод проф. Н. Н. Маслова, определяющий зависимость показателей сдвига от влажности и пористости грунта и т. п.

11. В приборах, подобных по конструкции, независимо от их размеров, для одних и тех же грунтов, при соблюдении условий взаимного подобия сопоставляемых экспериментов, будут получены практически одинаковые показатели сдвига. Это приводит к выводу, имеющему большое практическое значение, что результаты испытаний на прочность отдельных образцов грунта в приборах сравнительно ограниченных размеров, можно распространять на случаи деформации значительных масс грунта в натуральных условиях, а также, что диаметр срезователя сдвигового прибора для испытаний связных однородных грунтов, может иметь наименьший, практически допустимый размер. Однако в малых приборах труднее осуществлять условия подобия.

12. В целях обоснования наиболее экономичных и вполне надежных проектных решений при возведении тяжелых напорных гидротехнических и промышленных сооружений на мягких связных грунтах, необходимо проводить испытания с учетом нового состояния грунтов, возникающего под влиянием естественных и инженерных факторов в процессе работы сооружения.

13. Для успешного построения расчетных методов, необходимо проводить, по возможности, на ранних стадиях изысканий, специальные предварительные исследования связанных грунтов, устанавливающие количественное влияние на их прочность, перечисленных выше различных факторов.

Сочетанием тех же факторов необходимо характеризовать условия работы проектируемого сооружения, выделив наиболее характерные расчетные периоды: строительный, наполнения водохранилища, длительной эксплуатации и т. д., имея в виду, что сочетанием тех же факторов определяется и метод испытания грунтов на прочность.

14. В расчетах прочности естественных оснований и устойчивости сооружений необходимо использовать так называемые расчетные показатели прочности связанного грунта, количественно различные для каждого расчетного периода работы сооружения.

Установление значений расчетных показателей прочности рекомендуется в составе следующих обязательных основных этапов:

а) установление характеристик каждого рассматриваемого периода работы (возведения, эксплуатации и т. п.) проектируемого сооружения;

б) выбор расчетных методов исследования на прочность для каждого установленного периода работы сооружения и каждой разновидности грунта, пользуясь условиями подобия и результатами предварительных исследований;

в) установление значений расчетных показателей прочности по результатам испытаний каждого вида грунта, отдельно для каждого периода работы проектируемого сооружения и каждого соответствующего расчетного метода исследований;

г) определение величин расчетных показателей прочности по нижней доверительной границе статистического среднего при вероятности 0,999, пользуясь сводным графиком результатов испытаний на прочность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный нами метод установления прочности связных грунтов и количественной оценки значений расчетных показателей по нижней доверительной границе статистического среднего неоднократно был проверен и уточнен многочисленными экспериментами, а также исследованиями в натуре деформированных откосов и оползневых склонов. Это позволило в свое время впервые использовать указанные методы для обоснования строительства гидротехнических сооружений на мягких связных грунтах.

Применение метода установления расчетных показателей прочности связных грунтов, исходя из принципа подобия, обеспечило экономичные и одновременно надежные проектные решения при строительстве крупных гидротехнических сооружений. Полученные результаты проверены практикой многолетней эксплуатации таких сооружений как канал имени Москвы, Волго-Донской канал имени В. И. Ленина, Цимлянский гидроузел, Угличская, Рыбинская, Волжская имени В. И. Ленина и Волжская имени XXII съезда КПСС - гидроэлектростанции.

Дальнейшее развитие рекомендуемой методики исследований прочности связных грунтов должно предусматривать разработку и исследование следующих вопросов:

а) методика установления естественного пространственного напряженного состояния связных грунтов оснований крупных сооружений;

б) методика оценки количественных показателей состояния грунта, исходя из условий генезиса;

в) дальнейшая разработка принципа подобия в исследованиях прочности грунтов в направлении учета истории и характера процессов установления естественного или прогнози-

руемого состояния грунта и начального напряженного состояния основания, а также в целях получения эквивалентных состояний связного грунта, характеризующихся относительными количествами связанной и свободной воды;

г) дальнейшая разработка экспериментальной базы, позволяющей более эффективно осуществлять в опытах на прочность состояние грунта, подобное прогнозируемому по всем известным показателям.

Результаты практического использования основных положений настоящей работы указывают на целесообразность более широкого внедрения в практику строительства на мягких связных грунтах рекомендуемых принципов исследования прочности грунтов.

Одновременно необходимо, совершенствуя в указанных выше направлениях основные методы исследований, разработать способы расчета прочности оснований и устойчивости сооружений, исходя из уточненных условий пластичности и прочности.

В заключение отметим, что применение принципа подобия в испытаниях грунтов на прочность не только обеспечивает гораздо большую надежность результатов, но и значительно расширяет практические возможности самих исследований.

Л23802.

Гидропроект. Заказ № 42. Тираж 150 экз. 1962 г.

НТБ
ДНУЖТ