ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ОСНОВАНИЙ И ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ
имени Н.М. ГЕРСЕВАНОВА
ГОССТРОЯ СССР

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УЧЕТУ ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ НАЗНАЧЕНИИ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ МАЛОЙ СТЕПЕНИ ЛИТИФИКАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОСНОВАНИЙ

МОСКВА-1979

gost.e-ecolog.ru

УДК 624.131.43

В Рекомендациях даны предложения по учету ползучести глинистых грунтов малой степени литификации при назначении характеристик прочности. Рекомендации составлены на основании проведенных экспериментальных исследований прочности при различных режимах испытания глинистых грунтов с ненарушенной структурой и структурой, искусственно сформированной в лаборатории. Учтены полученные и приведенные в литературе закономерности уменьшения прочности грунтов со временем для грунтов, находящихся в определенном напряженном состоянии, т.е. при постоянной плотности.

Рекомендации могут быть использованы инженерно-техническими работниками грунтовых лабораторий и проектно-изыскательских отделов.

Рекомендации составлены старшим научным сотрудником Г.В.Сорокиной Института оснований и подземных сооружений имени Н.М.Герсеванова Госстроя СССР. В проведении экспериментальных исследований и подготовке рукописи к печати принимали участие старшие инженеры И.В.Пчелина и Н.А.Смирнова.

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Настоящие рекомендации распространяются на исследование прочности грунтов малой степени литификации и оценку ползучести при назначении прочностных характеристик грунтов оснований.

I.2. К грунтам малой степени литификации относятся осадочные глинистые отложения субаквального происхождения в начальной стадии формирования (ила, сапропеля, ленточные глины и суглинки, текучепластичные и мягкопластичные глины) и грунты, образовавшиеся в условиях переменного режима избыточного увлажнения (торф, заторфованный грунт).

I.3. Проектировать основания на указанных грунтах рекомендуется на основе данных изысканий и исследований грунтов, выполненных в соответствии с требованиями главы СНиП II-9-78 "Инженерные изыскания для строительства. Основные положения" и других нормативных документов по инженерным изысканиям и исследованиям грунтов, утвержденных Госстроем СССР, и с учетом настоящих "Рекомендаций".

I.4. Рекомендации основываются на положении о возможном уменьшении прочности грунтов малой степени литификации под нагрузкой во времени благодаря ползучести. При этом предполагается, что прочность уменьшается, в основном, за счет уменьшения сцепления. Прочность грунтов малой степени литификации в природном состоянии зависит от скорости приложения касательных напряжений или скорости деформирования грунта и практически не зависит от среднего нормального напряжения σ, т.е. $\tau = C$; $\varphi = 0$.

I.5. Рекомендуется прочность (минимальное сцепление) с учетом ползучести или фактора времени называть порогом прочности и обозначать τ^{∞}.

I.6. При установлении метода определения прочности грунтов рекомендуется учитывать их физическое состояние в природном залегании, метод строительства и напряженное состояние, возникающее в грунте - основании под нагрузкой. Также необходимо учитывать возможность возникновения в результате действия нагрузки нестабилизированного состояния основания, сложенного грунтами малой степени литификации, вследствие уменьшения касательного напряжения на площадке скольжения за счет образования избыточного давления в поровой воде u.

$$\tau = (\sigma - u)\operatorname{tg}\varphi + c,$$

где τ - касательное напряжение на площадке скольжения;

σ - нормальное напряжение на площадке скольжения;

φ - расчетный угол внутреннего трения грунта;

C - расчетное значение удельного сцепления.

I.7. Для объективного суждения об изменении прочности грунта под нагрузкой во времени рекомендуется определять порог прочности τ^{∞} в трехосных приборах при сохранении в течение опыта определенного напряженно-деформированного состояния грунта, т.е. постоянной его плотности - влажности. Для этого следует определять прочность консолидированных образцов, находящихся в стабилизированном состоянии в течение опыта.

Перед определением прочности каждый образец грунта обжимается под заданным гидростатическим давлением, равным среднему нормальному напряжению при испытании.

Величина гидростатического давления определяется проектным заданием.

Определение порога прочности грунта природной плотности возможно на образцах, уплотненных давлением, равным $\sigma_{стр.}$ (горизонтальный участок на компрессионной кривой), или в случае разуплотнения грунта при подъеме образца на поверхность давлением $\sigma_э$.

Величина $\sigma_э$ устанавливается по методу, изложенному в прил. I.

I.8. Для определения предельного состояния грунтов малой степени литификации рекомендуется использовать условие прочности Мора-Кулона (прил.2).

2. НОМЕНКЛАТУРА ГРУНТОВ МАЛОЙ СТЕПЕНИ ЛИТИФИКАЦИИ

2.I. Грунты малой степени литификации следует подразделять по генезису на морские, переходные (лагунные, лиманные, дельтовые) и континентальные (аллювиальные, озерные, болотные).

По литологическому составу эти грунты могут быть глинами, суглинками и супесями; глинистые грунты могут иметь тонкие прослойки песка.

Грунты малой степени литификации полностью водонасыщены ($G > 0{,}85$) и имеют скрытотекучую, текучепластичную или мягкопластичную консистенцию, характеризуются тиксотропно-коагуляционными связями (по П.А.Ребиндеру).

Структурные связи грунтов обусловлены молекулярными силами Ван-дер-Ваальса.

По минералогическому составу глинистых фракций эти грунты

могут быть монтмориллонитовыми, каолинитовыми или гидрослюдистыми.

Активные микробиологические процессы, сопровождающие формирование грунтов в начальной стадии, обусловливают в их составе наличие органических веществ.

2.2. К грунтам малой степени литификации, образовавшихся в болотных условиях, относятся торфы и заторфованные грунты. Торфы образуются в отличие от илов и сапропелей при переменном режиме избыточного увлажнения из остатков высших растений.

Для процесса торфообразования характерно наличие окислительных процессов при затрудненном поступлении кислорода, что ведет к образованию гумусовых веществ. Схема классификации грунтов малой степени литификации приведена в табл.I.

2.3. Грунты с содержанием органических веществ следует подразделять на гумусированные с содержанием гумуса и заторфованные, содержащие кроме гумуса растительные остатки.

2.4. Грунты малой степени литификации характеризуются высокими коэффициентами пористости и способностью непрерывно менять под нагрузкой характеристики деформируемости, фильтрации и прочности, а также медленным протеканием осадок во времени под постоянной нагрузкой (коэффициент консолидации $C_v \leq 1 \cdot 10^2 \frac{см^2}{год}$).

3. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРОГА ПРОЧНОСТИ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ МАЛОЙ СТЕПЕНИ ЛИТИФИКАЦИИ

3.I. Для определения прочности грунтов малой степени литификации с учетом фактора времени в условиях ползучести можно пользоваться теорией течения твердого тела или теорией течения вязкопластических тел с начальным сцеплением (предельным напряжением сдвига), используя обобщенное уравнение Шведова-Бингама:

$$\tau = \tau^{пр} + \eta \dot{\varepsilon},$$

где τ – касательное напряжение;

$\tau^{пр}$ – касательное напряжение, соответствующее предельному напряжению сдвига или порогу прочности;

η – пластическая вязкость;

$\dot{\varepsilon}$ – градиент скорости деформации сдвига на стадии установившейся ползучести.

Таблица I

Схема классификации грунтов малой степени литификации
(Позднe- и послеледниковые современные отложения)

Генетические типы	Морские отложения		
Литологический состав	супесчаные, суглинистые, глинистые илы		
Подклассы грунтов	илы	глинистые отложения	
	Скрытотекучие	Текучепластичные	Мягкопластичные
Условия формирования	В условиях избыточного увлажнения. При микробиологических процессов уменьшается		
Показатель консистенции J_L	> I	I-0,75	0,75-0,5
Полная влагоемкость W, %			
Минералогический состав глинистой фракции	Монтмориллонитовый, каолинитовый,		
Содержание органических веществ, %	Менее IO		
Характер структурных связей	Тиксотропно-коагуляционные		

Типичные представители	Илы морских *бассейнов:* Черноморского, Балтийского, Каспийского, Тихого океана	Мягкопластичные *глины морских* бассейнов

Продолжение табл.I

Лиманные, лагунные, дельтовые отложения			Континентальные отложения				
			озерные		речные	болотные	
и супеси, суглинки, глины						Органо-минеральные и органические грунты	
илы	глинистые отложения		илы	глинистые отложения		заторфованные грунты	торфы
Скрыто-текучие	Текуче-пластичные	Мягко-пластичные	I. Минеральные 2. Органические	Текуче-пластичные	Мягко-пластичные		
активном участии микроорганизмов. Активность по мере уплотнения и уменьшения влажности						При переменном режиме избыточного увлажнения. При окислительных процессах, при затрудненном поступлении кислорода	
> I	I-0,75	0,75-0,50	> I	I-0,75	0,75-0,5	-	
						< 500	от 500 до 1500
гидрослюдистые							
			I. до IO 2. от IO до 90	< IO		< 50	> 5
						Губчатая структура почти неразложившейся волокнистой массы отмерших растений. При разложении переходит в зернистую с коагуляционными связями	
Илы днепро-Бугского лимана, Днестровского лимана и др.	Ископаемые глины		Илы озера Сасык-Сиваш. Сапропелевые отложения.	Озерные ленточные отложения.		Заторфованные грунты и торфы Западной Сибири	

Можно обобщить представление о вязко-пластическом теле Шведова-Бингама, предположив, что величина порога ползучести определяется условием пластичности Ренкина-Прандтля (Кулона), т.е. начальное сопротивление сдвигу зависит от нормального напряжения.

3.2. Для определения скорости деформирования рекомендуется использовать кривые ползучести в координатах $\varepsilon \sim t$ (деформация - время), получаемые при трехосном сжатии или кручении под всесторонним гидростатическим давлением. Эти кривые, состоящие в общем случае из трех характерных участков: неустановившейся ползучести АБ, установившейся ползучести БВ, прогрессирующего течения ВГ или затухающей ползучести (рис.I), - позволяют по углу наклона участка установившейся ползучести, практически прямолинейного, установить скорость деформации сдвига.

3.3. Для получения достоверных кривых ползучести необходимо соблюдение принципа однородности напряженно-деформированного состояния образца грунта в процессе всего опыта.

Для этого рекомендуется проводить испытание образца в трехосном приборе или в приборе на кручение под гидростатическим давлением в полностью стабилизированном состоянии, при сохранении постоянных среднего нормального напряжения и плотности-влажности по методикам, изложенным в Руководстве.*

3.4. Образец грунта перед испытанием на ползучесть рекомендуется выдерживать до стабилизации объемных деформаций под гидростатическим давлением, равным среднему нормальному напряжению.

Для устранения возникающего дополнительного давления в поровой воде при приложении осевой нагрузки в условиях трехосного сжатия всестороннее гидростатическое давление надо уменьшать на I/3 этой нагрузки.

3.5. Для сохранения постоянной величины осевого напряжения рекомендуется увеличить осевую нагрузку в соответствии с поперечным расширением образца, которое может быть определено из условия несжимаемости материала по формуле:

$$F_n = \frac{F_0}{1 - \frac{\Delta h}{h}},$$

где F_0 - начальная площадь поперечного сечения образца;

$\frac{\Delta h}{h} = \varepsilon$ - относительная осевая деформация сжатия образца.

---

*) Руководство по определению прочности илов и заторфованных грунтов. М., Стройиздат, 1977.

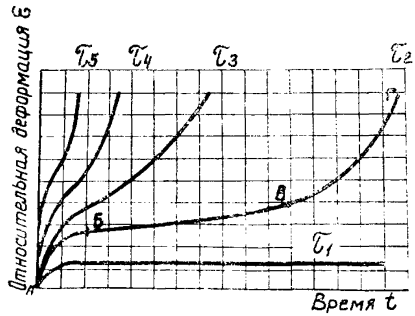

Рис I. Кривые ползучести при различных касательных напряжениях τ

В ходе опыта осевую нагрузку на образец можно увеличивать с помощью рычага специальной конструкции.

3.6. Для построения кривых ползучести рекомендуется испытать серию образцов при заданном среднем нормальном напряжении при различных касательных напряжениях, составляющих 60,70,80,90% от касательного напряжения при быстром разрушении грунта в тех же условиях. В результате получают семейство кривых ползучести с различным временем до разрушения. При использовании теории течения твердого тела на основе кривых ползучести может быть построена зависимость между касательными напряжениями, вызывающими разрушение грунта, и соответствующим временем разрушения (рис.2). Эта кривая носит название кривой длительной прочности. Точка кривой на ординате соответствует мгновенному загружению и называется мгновенной прочностью. За прочность в условиях ползучести принимается предел длительной прочности $\tau^{\infty} = \tau^{пр}$. За предел длительной прочности принимают напряжения, при которых деформации затухают и разрушения не происходит.

При использовании теории течения вязкопластических тел с начальным сцеплением на участке установившейся ползучести для каждой кривой ползучести определяют скорость деформации (п.3.2), вычисляют интенсивность деформации или градиент скорости $\dot{\varepsilon}$ и строят кривую зависимости $\dot{\varepsilon}$ от τ на пределе разрушения (рис.3). Участок $\tau^{пр}$ на оси касательных напряжений рекомендуется принимать за порог прочности или прочность в условиях ползучести.

3.7. С целью повышения экономической эффективности исследований за счет сокращения времени испытания и обеспечения возможности определения порога прочности неоднородных грунтов рекомендуется пользоваться методами: а) деформирования, который заключается в разрушении серии образцов грунта при различных постоянных скоростях деформирования в интервале от 4 до 0,01 мм/мин (рис.4). Точка А - критерий разрушения. Порог прочности определяют по теории течения вязкопластических тел в соответствии с п.3.6; б) медленного, ступенчатого приложения нагрузки на образец с выдержкой каждой ступени до условной стабилизации деформации. За условную стабилизацию принимается деформация, не превышающая 0,01 мм за 12 ч. Первая ступень нагрузки не должна составлять более 60%, а каждая последующая ступень не должна увеличиваться более чем на 10% от величины касательного напряжения при быстром разрушении (мгновенная прочность). За величину порога прочности

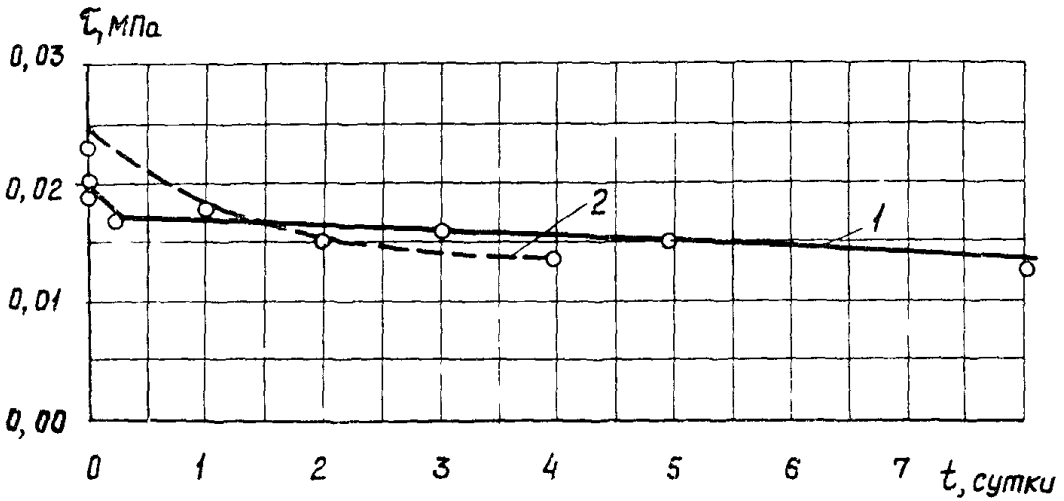

Рис.2. Зависимость касательного напряжения клов на пределе разрушения от времени при σ_3 = 0,025 МПа; 1-γ_i = I,03, 2-γ_i = 0,70

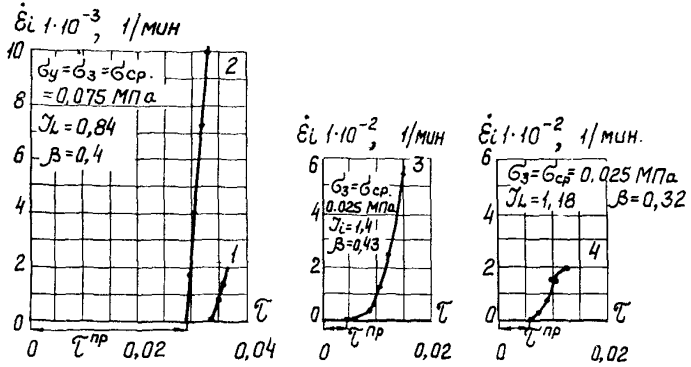

Рис.3. Зависимость интенсивности касательных напряжений на пределе разрушения от градиента скорости деформирования искусственно подготовленных образцов из глинистого ила. Опыты проведены: I – под постоянной нагрузкой; 2,3,4 – с постоянной скоростью деформирования

$\tau^{пр}$ рекомендуется принимать касательное напряжение, соответствующее ступени нагрузки, предшествующей разрушению (точка А на кривых рис.5). Метод применим только при условии сохранения определенного напряженно-деформированного состояния в течение всего опыта.

3.8. Опыты на ползучесть и определение прочности рекомендуется проводить в приборах трехосного сжатия или методом кручения под гидростатическим давлением. Рекомендуемые конструкции приборов приведены в работе института "Руководство по определению прочности илов и заторфованных грунтов".

4. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ МАЛОЙ СТЕПЕНИ ЛИТИФИКАЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФАКТОРА ВРЕМЕНИ И РЕЖИМА ИСПЫТАНИЯ

4.1. При оценке прочности глинистых грунтов малой степени литификации рекомендуется учитывать реологические свойства, проявляющиеся в виде ползучести и падения прочности под нагрузкой во времени.

Характер ползучести (затухающая и незатухающая) зависит от величины приложенной нагрузки (см.рис.4).

В каждом семействе кривых ползучести при заданном среднем нормальном напряжении продолжительность ползучести грунта зависит от величины напряжения сдвига. С увеличением напряжения сдвига уменьшается стадия течения с постоянной скоростью, увеличиваются вертикальные деформации стадии неустановившегося течения. Минимальная разница в касательных напряжениях (0,001 МПа) резко увеличивает или уменьшает скорость течения грунта.

4.2. Падение прочности во времени может быть определено по кривой зависимости τ от времени t (см.рис.2), описываемой для грунтов малой степени литификации уравнениями вида $\tau = a t^{-n}$.

Справедливость применения указанной зависимости подтверждается выравниванием кривых $\tau \sim t$ при построении их в координатах $\ln \tau \sim \ln t$ (рис.6, а и б и 7, а и б).

4.3. Зависимости касательных напряжений на пределе разрушения τ_{max} грунтов малой степени литификации от градиента скорости деформирования $\dot{\varepsilon}$ (рис.8) следует описывать уравнениями типа

$$\tau_{max} = \tau^{пр} + \eta \dot{\varepsilon}^{k},$$

где $\tau^{пр}$ – порог прочности.

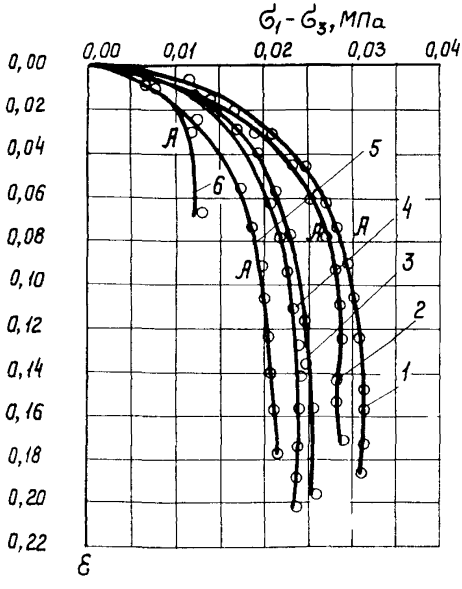

Рис.4. Зависимость относительной деформации от девиатора напряжений $\sigma_1 - \sigma_3$ для серии искусственно подготовленных образцов из ила при скорости деформирования в мм/мин: I-2; 2-I; 3-0,5; 4-0,25; 5-0,I0; 6-0,0I.

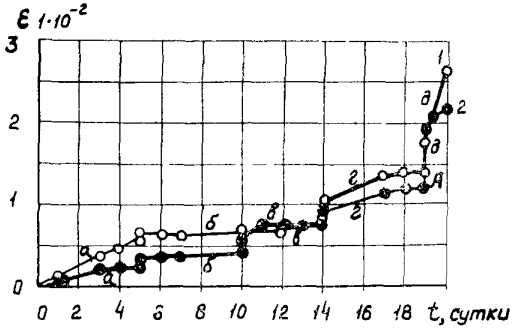

Рис.5. Зависимость относительной деформации ε илов Днепро-Бугского лимана от времени t при загружении ступенями с выдержкой до условной стабилизации 0,01 мм за 12 ч при σ = 0,01 МПа:

опыт 1: а – τ = 0,0054МПа; б – τ = 0,0063 МПа;
в – τ = 0,0074МПа; г – τ = 0,0085МПа;
д – τ = 0,0096МПа;
опыт 2: а – τ = 0,0049МПа; б – τ = 0,0059МПа;
в – τ = 0,0070МПа; г – τ = 0,0078МПа;
д – τ = 0,0090МПа

η – вязкость;

K_r – коэффициент.

Величины τ^{∞}, η и K_r в уравнении зависят от влажности (консистенции) и структурной связности грунта.

На определенном участке градиентов скоростей эта зависимость может быть прямолинейной (например, см.рис.3, прямые I; 2), т.е. закономерности деформаций при сдвиге подчиняются закону Шведова-Бингама.

4.4. При оценке прочности глинистых грунтов следует исходить из установленной зависимости уменьшения прочности грунтов малой степени литификации с увеличением времени испытания при любом режиме загружения (постоянная нагрузка, ступенчатое нагружение, монотонное непрерывное увеличение нагрузки с постоянной заданной скоростью деформирования). Прямолинейные зависимости $\ln\tau \sim \ln t$ на пределе разрушения грунтов получены при определении прочности с учетом ползучести во всех режимах загружения, т.е. как при выдерживании образцов под различными постоянными нагрузками (рис.6 а и б), так и при разрушении образцов с различной скоростью деформирования (рис.7, а и б).

Величины прочности грунтов малой степени литификации, полученные в условиях ползучести (длительная прочность) и при различных режимах загружения образца (монотонное, ступенчатое), отличаются несущественно (см.табл.2).

Некоторое уменьшение величин прочности, полученное при монотонном приложении нагрузки с постоянной скоростью деформирования, объясняется, по-видимому, тиксотропным характером структуры этих грунтов.

Прочность и порог прочности τ^{∞}, полученные любыми методами, закономерно увеличиваются с уменьшением коэффициента пористости e и консистенции J_L (рис.9 и I0).

Следовательно, в условиях дренирования скорость объемной ползучести будет уменьшаться с уплотнением грунта в процессе консолидации, а прочность увеличиваться.

4.5. Рекомендуется прочность в условиях ползучести сопоставлять с мгновенной прочностью (быстрое разрушение грунта) и со стандартной прочностью (медленное ступенчатое приложение нагрузки с выдержкой каждой ступени до условной стабилизации деформации $< 0{,}0I$ мм/мин или с прочностью, полученной при постоянной скорости деформирования 0,I мм/мин).

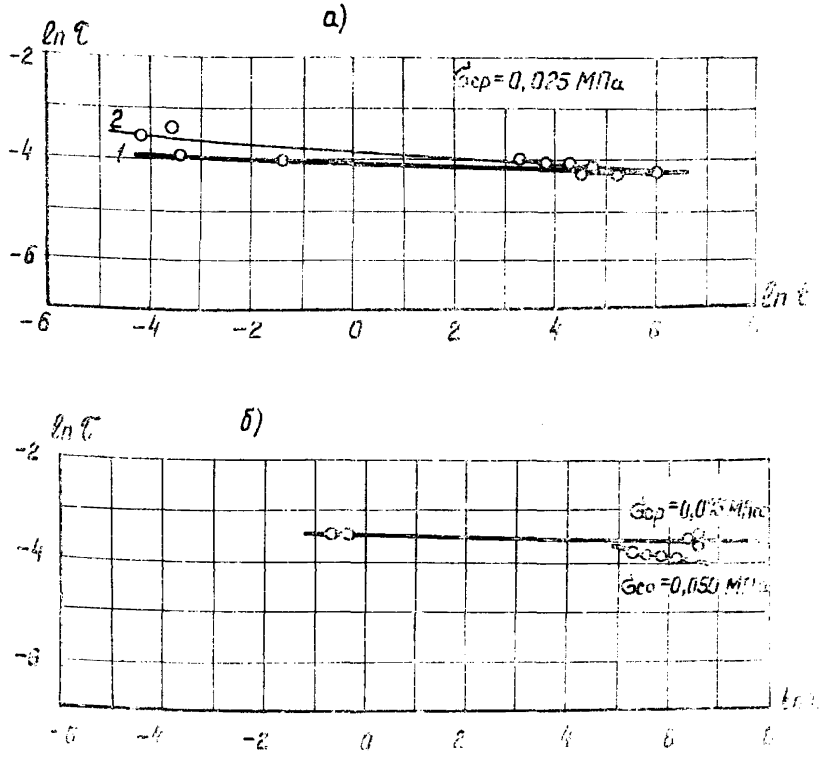

Рис.6. Зависимости касательного напряжения на пределе ра[illegible] шения от времени в логарифмических координатах для илов и текуче-пластичных глин при испытании под постоянной нагрузкой а - I - $\mathcal{X}$ = I,03; 2 - $\mathcal{X}$ = 0,70; б - $\mathcal{X}$ = 0,88

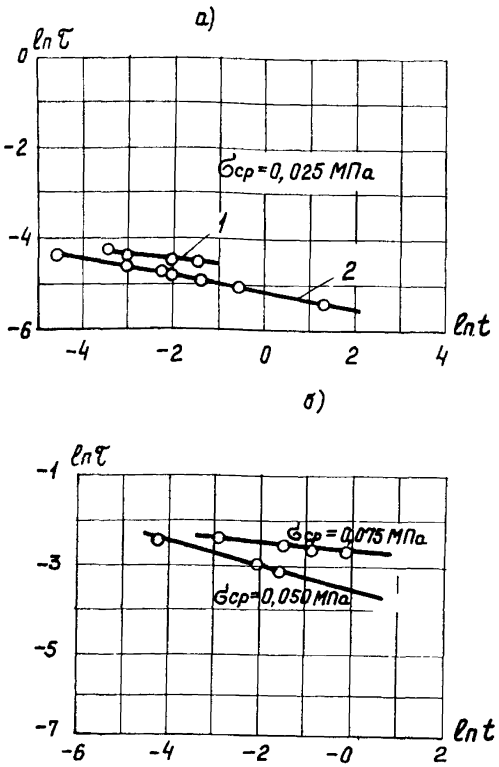

Рис.7. Зависимости касательного напряжения на пределе разрушения от времени в логарифмических координатах для илов и текучепластичных глин при испытании с постоянной скоростью деформирования: а - I - $\mathcal{J}_L$ = I,I8; 2 - $\mathcal{J}_L$ = I,36; б - $\mathcal{J}_L$ = 0,83.

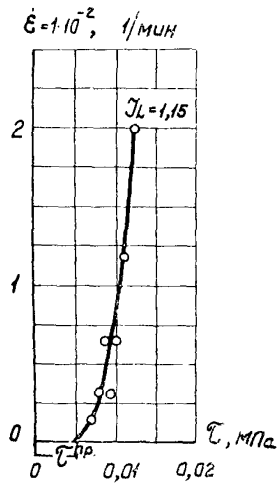

Рис.8. Зависимость касательных напряжений на пределе разрушения от градиента скорости деформирования образцов ила

Наименование грунта	Консистенция $J_L^{ср}$	Структурная связность $(1-\beta)_{ср}$	Давление уплотнения σ_y, МПа	Среднее нормальное напряжение $\sigma_з$, МПа	Режим приложения нагрузки				
					С постоянной скоростью деформирования		Ступенями		Постоянная нагрузка на серию образцов
					Скорость деформирования 2 мм/мин	Скорость деформирования 0,5-0,01 мм/мин	Быстро	При стабилизации деформации 0,01 мм за 12 ч	
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10
					Прочность в МПа				
					$\tau^{нг}$	$\tau^{пр_3}$	$\tau^{нг}$	$\tau^{пр_2}$	$\tau^{пр_1}$
Искусственно подготовленные образцы ила глинистого	0,82	0,433	0,075	0,075	0,031	0,024	0,045	0,023	0,028
	0,86	0,240	0,050	0,050	0,033	0,0149	0,0496		0,0177
Ил глинистый (Днестровский лиман)	0,81	0,366	0,025	0,025	0,0166	0,0085	0,0205	0,011	–
	0,97	0,218	0,050	0,050	–	–	0,023	0,013	–
	0,90	0,218	0,050	0,050	0,0231	0,014	–	–	–
	0,60	0,218	0,050	0,050	0,024	0,0135	–	–	–
Ил глинистый уплотненный (Днепро-Бугский лиман)	0,96	0,127	0,015	0,015	0,015	0,012	0,017	0,013	0,012
	0,89	0,127	0,010	0,010	–	–	0,011	0,0085	–
	–"–	0,127	0,010	0,010	–	–	0,0102	0,0078	–
	0,77	0,127	0,010	0,010	–	–	0,019	–	0,0145

Продолжение табл. 2

I	2	3	4	5	6	7	8	9	I0
	0,8I	0,I73	0,0I0	0,0I0	-	-	0,02I	0,0I7	-
Ленточная глина	0,98	0,2I2	0,025	0,025	0,0I57	0,008	-	-	-
	I,0I	0,2I2	0,025	0,025	-	-	0,0I6	0,0092	-

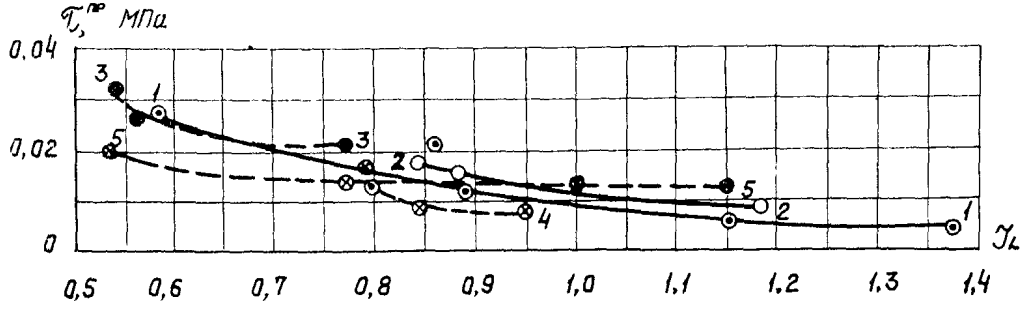

Рис.9. Зависимость порога прочности глинистых грунтов малой степени литификации от консистенции J_L.
Образцы с искусственно сформированной структурой: $J_p^{ср.}$=27; I- $\sigma_{ср.}$ =0,025 МПа; 2- $\sigma_{ср.}$ =0,5 МПа;
3- глина морская: $J_p^{ср.}$=25; $\sigma_{ср.}$=0,05-0,035 МПа;
4-ил Днепро-Бугского лимана: $J_p^{ср.}$=75; σ_y= $\sigma_{ср.}$ =0,0I МПа;
5-ил Днестровского лимана: $J_p^{ср.}$=62; σ_y = $\sigma_{ср.}$ =0,05 МПа

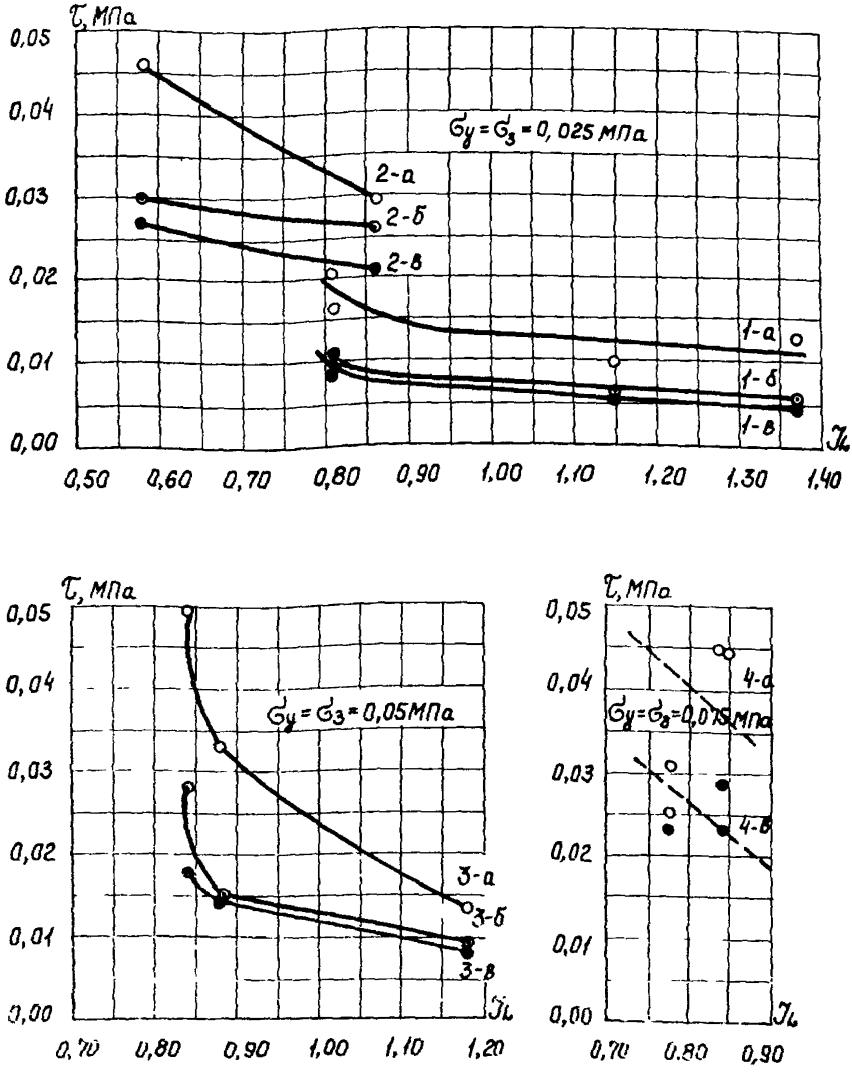

Рис.10. Зависимость сопротивления сдвигу искусственно сформированных в лотках образцов из глинистого ила Черного моря от консистенции (J_L), испытанных при различных условиях разрушения (о – быстрое; ● – медленное; ● – в условиях ползучести):
1-а,б,в– $\sigma_y = \sigma_з = 0,025$МПа ср. данные по 25 опытам;
2-а,б,в– $\sigma_y = \sigma_з = 0,025$МПа ср. данные по 10 опытам;
3-а,б,в– $\sigma_y = \sigma_з = 0,05$МПа ср. данные по 17 опытам;
4-а,в – $\sigma_y = \sigma_з = 0,075$МПа ср. данные по 17 опытам

Таблица 3

№ серии опытов	Давление уплотнения в лотке σ_y, МПа	Количество опытов	Пластичность, %			Консистенция	Коэффициент пористости	Степень насыщения	Структурная связность
			W_L	W_P	J_P	J_L^{φ}	e_{φ}	G_{φ}	$(1-\beta)_{\varphi}$
I	2	3	4	5	6	7	8	9	I0
		Искусственно сформированная структура образцов							
I	0,025	7	57	35	22	I,37	I,747	I,0	0,43
2	0,025	II	63	37	26	I,I5	I,845	I,0	0,3I7
4	0,025	5	58	30	28	0,8I	–		0,400
7	0,025	5	63	32	3I	0,94	I,650	0,94	0,332
8	0,025	2	63	32	3I	0,8I	–	I,00	0,332
II	0,025	5	59	34	25	0,58	I,276	I,00	–
5	0,050	4	59	34	25	0,88	I,524	0,95	0,338
I2	0,050	7	6I	32	29	0,84	I,494	I,00	0,I4I
3	0,050	6	58	30	28	I,I8	I,70I	I,00	0,254
6	0,025	8	59	34	25	0,77	I,432	I,00	0,433
I0	0,025	3	59	34	25	0,84	I,474	I,00	0,433
9	0,025	6	59	34	25	0,84	I,476	0,99	0,433
		Искусственно сформированная структура образцов							
I	0,0I75	7	II4	57	57	I,I2	2,934	0,98	0,4I2
2	0,025	7	I20	5I	69	I,03	2,984	I,0	0,37
3	0,025	8	I20	5I	69	0,70	2,39I	I,0	0,33
		Искусственно сформированная структура образцов							
I3	0,050	20	25	I3	I2	0,88	0,636	I,0	0,I08

Продолжение табл.3

Характеристики прочности при разных условиях испытания					Падение $\tau^{пр}$ в % по отношению к	
Уплотнение в стабилометре σ_y, МПа	Среднее напряжение $\sigma_{ср}=\sigma_3$, МПа	$\tau^{мг}$, МПа	$\tau^{неф}=\tau^{сл}$, МПа	$\tau^{пр}$, МПа	$\tau^{мг}$, МПа	$\tau^{неф}=\tau^{сл}$, МПа
II	I2	I3	I4	I5	I6	I7
грунта из глинистого ила, отобранного в Черном море						
0	0,025	0,0I3	0,0057	0,0047[x]	63,9	I7,6
0	0,025	0,0I0	0,0067	0,0058[x]	42	I4
0,025	0,025	0,0I66	0,0098	0,0085[x]	48,8	I3,3
0,025	0,025	0,0296	0,0259	0,0209	29,4	I9,4
0,025	0,025	0,0205	-	0,0II	46,7	-
0,025	0,025	0,0463	0,0298	0,0268	42,I	I0,I
0,050	0,050	0,033	0,0I5	0,0I49[x]	54,8	0,7
0,050	0,050	0,0496	0,0277	0,0I77	64,3	36,I
0	0,025	0,0I38	0,0094	0,0085[x]	38,4	I0
0,075	0,075	0,03I0	0,0255	0,0238	23,3	6,7
0,075	0,075	0,045		0,023	48,0	-
0,075	0,075	0,045	-	0,0285	36,7	-
из глинистого ила, отобранного в районе Тихого океана						
0,00	0,020	0,0II	0,0074	0,0069	37,3	6,8
	0,025	0,0202	0,0I85	0,0I3	35,6	29,7
	0,025	0,0302	0,0206	0,0I53	49,3	25,7
грунта из суглинка						
0	0,05	0,04	0,03I	0,03	25	3,3

x) Разрушение образцов при разной скорости деформирования

При этом установлено существенное уменьшение падения прочности в условиях ползучести (порог прочности) по отношению к мгновенной прочности (до 64%) и во всех случаях меньшее по отношению к стандартной прочности (табл.3).

Прочность образцов грунта с искусственно сформированной структурой в условиях ползучести уменьшается в среднем на 43% ± II,7% по отношению к мгновенной прочности и на I5,9% ± 7,4% по отношению к стандартной прочности. На абсолютную величину прочности и величину относительного падения прочности в условиях ползучести влияет структурная связность грунта и его упрочнение во времени. Это подтверждается данными, приведенными на рис.II.

Относительные величины падения прочности в условиях ползучести для грунтов природного сложения приведены в табл.4. Во всех случаях для грунтов природного сложения наблюдается меньшее падение прочности, чем для грунтов с искусственно сформированной структурой. В условиях ползучести прочность грунтов ненарушенного сложения по отношению к мгновенной прочности уменьшается в среднем на 26,2% ± 9%, а по отношению к стандартной прочности - на I0% ± 6,I%.

5. УЧЕТ ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ НАЗНАЧЕНИИ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ МАЛОЙ СТЕПЕНИ ЛИТИФИКАЦИИ

5.I. При проектировании и строительстве на основаниях, сложенных грунтами малой степени литификации, рекомендуется учитывать влияние на несущую способность грунтов фактора времени или их ползучесть.

Влияние ползучести грунтов может оцениваться порогом прочности $\tau^{пр}$ или параметрами длительной прочности c' и $tg\varphi'$, в основном за счет уменьшения сцепления.

Степень уменьшения сцепления в расчетах определяется сложностью, назначением и продолжительностью эксплуатации возводимого сооружения.

Рекомендуется проводить комплексные исследования прочности подстилающей сооружение толщи грунта. В эти исследования должны входить быстрые неконсолидированные испытания по закрытой схеме для характеристики грунта к началу строительства, консолидированные испытания для характеристики прочности основания в результате предпостроечного уплотнения или уплотнения в процессе строительст-

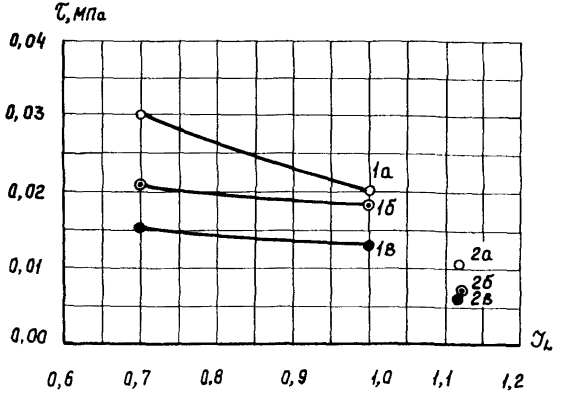

Рис.II. Зависимость сопротивления сдвигу τ искусственно сформированных в лотках образцов из глинистого ила района Тихого океана от консистенции J_L, испытанных при различных условиях разрушения (о–быстрое; ● – медленное; ● – в условиях ползучести): Iа,б,в – $\sigma_y = \sigma_3$ = 0,025МПа (ср.данные по I5 опытам); 2а,б,в – $\sigma_y = \sigma_3$ = 0,0I75МПа (ср.данные по 8 опытам)

Таблица 4

№ серии опытов	Глубина, м	Пластичность, %			Консистенция	Коэффициент пористости	Степень насыщения	Структурная связность
		W_L	W_p	J_p	J_L^{cp}	e_{cp}	G_{cp}	$(1-\beta)_{cp}$
I	2	3	4	5	6	7	8	9
	Ил супесчаный $Q_4 m$ северо-западный район							
I		32	26	6	I,20	0,888	I,0	-
	Глина мягкопластичная $Q_4 m$							
2	I9,3	46	26	20	0,54	0,957	I,0	0,I82
3	I2,2	48	29	I9	0,4I	0,970	I,0	0,363
4	I9,3	46	26	20	0,56	0,938	I,0	0,I82
	Глина текучепластичная $Q_4 m$ из Балтийского							
5	I3,3	56	30	26	0,77	I,254	I,0	0,338
	Глина текучепластичная (Днепро-Бугский лиман)							
6	2,7	I56	50	I06	0,75	3,435	I,0	
7	6,9	I48	62	86	0,97	3,93I	0,98	0,II2
8	8,5	I34	7I	63	I,28	3,947	0,98	0,225
9	9,I	I56	59	97	0,95	4,II9	0,98	0,I27
I0	I3,7	II2	48	64	0,68	2,54I	0,97	0,27I
II	I2,3	I20	50	70	0,8I	2,890	0,98	0,I78
I2	II,I	I25	55	70	0,84	2,964	0,98	0,I37
I3	II,I	I25	55	70	0,95	3,206	0,96	0,I87
I4	I0,3	I46	56	90	0,77	3,436	0,97	-
	Ил уплотненный (Днестровский лиман)							
I5	7,8	98	5I	47	I,I4	2,737	I,0	0,2I7
I6	7,6	98	5I	47	0,90	2,434	0,96	0,27
I7	7,6	I54	57	77	0,60	2,682	0,89	0,2I9
	Глина ленточная							
I8	6,3	7I	24	47	I,0I	I,920	I,0	0,I54
I9	6,3-7,6	64	24	40	I,02	I,76I	I,0	0,2I7

x) Разрушение образцов при разной скорости деформирования.

Продолжение табл.4

Характеристика прочности при разных условиях испытания					Падение $\tau^{пр}$в % по отношению	
σ_y, МПа	Среднее напряжение $\sigma_{ср}=\sigma_з$, МПа	$\tau^{мг}$, МПа	$\tau^{медл}$, МПа	$\tau^{пр}$, МПа	$\tau^{мг}$, МПа	$\tau^{медл}$, МПа
I0	II	I2	I3	I4	I5	I6
Черного моря						
0,03	0,03	0,042	0,03I	0,03	25	3,3
0,05	0,05	0,036	–	0,032[x]	II,2	–
0,0I5	0,0I5	0,044	0,036	0,035[x]	20,5	2,8
0,05	0,05	0,036	–	0,026[x]	27,8	–
бассейна						
0,035	0,035	0,0328	–	0,02I[x]	36	–
0,0I5	0,0I5	0,0207	–	0,0I29	38,7	–
0,0I5	0,0I5	0,0I45	–	0,0II7[x]	I9,4	
0,0I5	0,0I5	–	0,0I40[x]	0,0I26		I0
			0,0I90			34,7
0,0I5	0,0I5	0,0I7	0,0I59	0,0I44	I5,3	9,5
0,0I5	0,0I5	0,0I7	–	0,0II7	3I,2	–
0,0I0	0,0I0	0,02I5	–	0,0I73	I9,5	–
0,0I0	0,0I0	0,0I0I	–	0,0085	I5,8	–
0,0I0	0,0I0	0,0I08	–	0,0079	27	
0,0I0	0,0I0	–	0,0I75	0,0I46	–	I6,5
0,05	0,05	0,0I75	–	0,0I3	26,0	–
0,05	0,05	0,0I87	–	0,0I4I[x]	24,6	
0,05	0,05	0,02I	–	0,0I3I	37,6	
0,025	0,025	0,0I6	–	0,0096	40	
0,025	0,025	0,0I57	0,0I0	0.008[x]	49,I	20

ва и эксплуатации сооружения и испытания на ползучесть в условиях однородного напряженно-деформированного состояния грунта для каждой заданной плотности грунта. Уплотняющие давления могут быть равными $\sigma_{стр.}$, $\sigma_{э}$ (см.прил.I) или проектным нагрузкам.

Прочность грунтов в условиях ползучести в производственных лабораториях можно определять в приборах трехосного сжатия на одном образце путем ступенчатого приложения вертикальной нагрузки с выдержкой каждой ступени до затухания деформаций (условная стабилизация деформации $<$ 0,0I мм за I2 часов) при условии сохранения однородного напряженного состояния грунта в течение всего опыта.

5.2. Для определения параметров прочности глинистых грунтов малой степени литификации образцы, уплотненные заданным давлением, должны разрушаться в трехосном приборе не менее чем при трех средних нормальных напряжениях и при трех режимах загружения-быстром (мгновенная прочность), медленном (стандартная прочность), в условиях ползучести (порог прочности).

Образцы могут быть разрушены при средних нормальных давлениях, меньших давления уплотнения, т.е. при консолидированном состоянии или при больших средних нормальных напряжениях, когда возникнет нестабилизированное состояние образца.

Во втором случае для определения порога прочности можно пользоваться только способом деформирования образца с постоянной скоростью и испытание проводить по закрытой схеме. Скорость деформирования следует выбирать в интервале от 2 до 0,I мм/мин (при высоте образца до 80 мм). Сравнительно быстрые испытания по закрытой схеме позволяют сохранить постоянное состояние образца в течение опыта.

В качестве примера на рис.I2,а и б приведены огибающие к кругам Мора по испытаниям суглинка с искусственно сформированной структурой.

Результаты обработаны по полным и эффективным напряжениям.

5.3. Количество опытов по определению прочности для каждого инженерно-геологического элемента устанавливается в соответствии с ГОСТ 20522-75[x].

---

x) Грунты. Метод статистической обработки результатов определений характеристик. М., Издательство стандартов, I975.

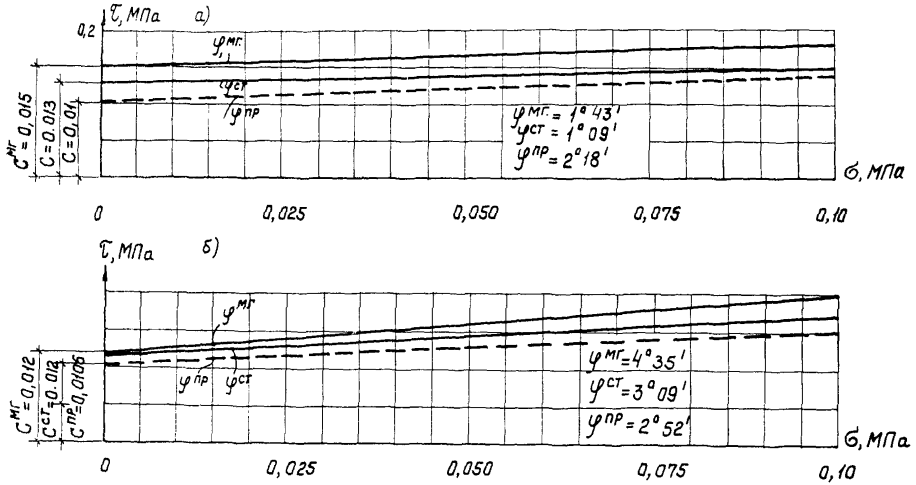

Рис.I2.Огибающие Мора, выраженные через полные (а) и через эффективные (б) напряжения по результатам неконсолидированно-недренированных испытаний образцов с искусственно сформированной структурой, подготовленных из суглинка (γ_0 = I2; $J_L^{ср.}$ = 0,88; разрушение произведено при скоростях деформирования: $\varphi^{мг}$; $C^{мг}$ - I мм/мин; $\varphi^{ст}$; $C^{ст}$ - 0,I мм/мин; $\varphi^{пр}$; $C^{пр}$ - в условиях ползучести)

5.4. Нормативные значения параметров прочности грунтов при всех режимах испытания следует вычислять по методу наименьших квадратов для всей совокупности опытных величин τ в инженерно-геологическом элементе в соответствии с п.3.2 ГОСТ 20522-75 и с использованием рекомендаций Руководства.

5.5. Расчетные значения параметров прочности грунтов при всех режимах испытания следует определять в соответствии с п.3.5 ГОСТ 20522-75.

В качестве примера в табл.5 приведены нормативные и расчетные значения параметров прочности, вычисленные по комплексным исследованиям 4-метровой толщи илов в основании дамбы Днестровского лимана. Приведенные нормативные и расчетные значения параметров прочности илов, уплотненных давлением 0,05 МПа, соответствуют давлению от 5-метрового слоя песка, намытого для предпостроечной консолидации. Разрушение образцов произведено быстро по закрытой схеме при средних нормальных напряжениях 0,05; 0,075; 0,10 МПа

Порог прочности $\tau^{пр}$ определен при среднем нормальном напряжении 0,05 МПа, равном давлению уплотнения.

Средняя нормативная величина $\tau^{пр}$ близка к расчетной величине τ при доверительной вероятности 0,95, полученной при быстрых испытаниях грунта в нестабилизированном состоянии.

Порог прочности $\tau^{пр}$, определенный при среднем нормальном напряжении 0,1 МПа, несколько меньше расчетной величины τ при быстром разрушении, полученной при доверительной вероятности 0,95.

5.6. Время для любой заданной степени консолидации грунта может быть определено по формуле:

$$t = \frac{T H^2}{C_v},$$

где T - фактор времени;

H - мощность расчетного слоя в см;

C_v - коэффициент фильтрационной консолидации в $см^2$/год;

Фактор времени $T = \frac{C_v t}{H^2}$ - безразмерная величина.

Степень консолидации U является функцией фактора времени.

Поскольку характеристики грунта и мощность сжимаемого слоя входят в уравнение для определения степени консолидации только в комбинации, представленной безразмерным фактором времени T, значение U будет одним и тем же для любого слоя грунта, который консолидируется в одинаковых условиях нагрузки и дренирования.

Таблица 5

Уплотнено гидростатическим давлением	Средние характеристики грунтов после предварительного уплотнения и разрушения		Количество определений	Характеристики прочности Средние нормативные		
σ_y, МПа	e_{cp}	J_L^{cp}	n	$tg\varphi_н^{\circ}$	$\varphi_н^{\circ}$	$C_н'$, МПа
I	2	3	4	5	6	7
0,05	2,499	0,63	I4	Разрушено при $\sigma_3 > 0,05$		
				0,0I7	I	0,0208
				Разрушено при $\sigma_3 < 0,I0$		
0,I0	2,2I0	0,48	I0	0,I58	9	0,0I64

Продолжение табл.5

Характеристики прочности									
Средние минимальные			Расчетные с доверительной вероятностью 0,9			0,95			Порог прочности в условиях ползучести, средние значения при давлении уплотнения
$tg\varphi_I^{\circ}$	φ_I°	C_I', МПа	$tg\varphi_P^{\circ}$	φ_P°	C_P', МПа	$tg\varphi_{P_1}^{\circ}$	$\varphi_{P_2}^{\circ}$	C_{P_2}', МПа	$\tau_{cp}^{пр}$, МПа
8	9	I0	II	I2	I3	I4	I5	I6	I7
0,0I7	I°	0,0I65	0,0I6	0°58′	0,I48	0,0I6	0°58′	0,I30	0,0I3I
0,I28	7°I5′	0,0I62	0,I50	8°30′	0,0I05	0,I48	8°30′	0,0085	0,0I85

Значение степени консолидации было определено Терцаги с помощью дифференциального уравнения консолидации для всех условий, имеющих практическое значение.

Полученные результаты представлены в виде табл.6

Таблица 6

T \ U	0,I	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Дренаж односторонний	0,008	0,03I	0,07I	0,I26	0,I97	0,287	0,403	0,567	0,848
Дренаж двухсторонний	0,048	0,090	0,II5	0,207	0,28I	0,37I	0,488	0,652	0,933

Коэффициент консолидации C_v для грунтов малой степени литификации рекомендуется определять путем обработки экспериментальной кривой консолидации методом квадратного корня из времени.[x)]

5.7. Для установления величин допускаемой нагрузки на грунт в основании фундаментов должны быть использованы надлежащие величины коэффициентов запаса, в том числе коэффициенты запаса, относящиеся к параметрам прочности грунтов: C и $tg\,\varphi$.

С точки зрения определения возможного нарушения прочности грунтов, при оценке допускаемой нагрузки на глинистые грунты малой степени литификации со слабой водопроницаемостью решающим является начальное состояние грунта. При этом условии на стадии проектного задания в расчеты должны вводиться расчетные показатели прочности грунта, определенные в быстрых испытаниях при трехосном сжатии по закрытой схеме и отнесенные к полным напряжениям.

При определении расчетных показателей прочности нужно использовать доверительную вероятность 0,95.

5.8. При назначении характеристик прочности грунтов с учетом предпостроечной консолидации, а также в период строительства и в процессе эксплуатации сооружения рекомендуется учитывать одновременность протекания процессов консолидации и ползучести и возможное изменение прочности грунтов во времени. В этом случае следует использовать характеристики, полученные в условиях ползучести для соответствующей плотности грунта.

---

x) Тейлор. Основы механики грунтов. Пер. в английского. М., Госстройиздат, I960.

Время, необходимое для достижения определенной заданной степени консолидации, определяется в соответствии с п.5.6.

Особенно важное значение имеет учет ползучести глинистых грунтов при оценке прочности в толще откосов, склонов, в выемках, в засыпках высоких подпорных стен при глубоком залегании глинистых пластов под сооружением.

5.9. При назначении расчетных значений параметров прочности грунтов малой степени литификации следует учитывать инженерно-геологические условия площадки и свойства грунтов, способные влиять на их устойчивость, как-то: тиксотропию, анизотропию, условия строительства, возможные дополнительные нагрузки, вибрации от движения транспорта, работы машин и т.д.

Приложение 1

Методика определения величины давления, эквивалентного природному давлению на образец грунта

Давление, эквивалентное природному давлению $\sigma_э$ на образец грунта, рекомендуется определять по кривой сжимаемости (компрессионной кривой), построенной на основании испытания в одометре образцов грунта ненарушенного сложения в подводном состоянии при осевом фильтрационном потоке без возможности набухания (под аретиром).

Давление на образец передают ступенями, равными 0,005 МПа, до начала деформации грунта. Начало деформации грунта фиксируется по отклонению стрелки мессуры на величину, превышающую тарировочную поправку прибора. После установления давления $\sigma_{стр}$, при котором начинается деформация грунта, груз снимают и кладут первую ступень нагрузки в 2 раза более $\sigma_{стр}$, которую выдерживают до стабилизации деформации. Опыт на компрессию продолжают по обычной методике.

Вычисляют для исследуемого образца грунта начальный коэффициент пористости и степень насыщения. Если степень насыщения грунта меньше I, то по формуле В.Г.Булычева:

$$\Delta h = \frac{h e_0 (1-G)}{1+e_0},$$

где h – высота образца в мм;

e_0 – начальный коэффициент пористости;

G – степень влажности,

определяют величину набухания образца грунта при подъеме его на поверхность. Вычисляют относительную деформацию набухания.

Строят кривую зависимости относительной деформации от давления (см.рис.I3).

На кривой отмечают точку $\Delta h_н$ и соединяют ее пунктирной линией с осью давления. Получают давление, эквивалентное природному $\sigma_э$. Если степень водонасыщения равна единице, то за эквивалентное давление принимают давление, соответствующее горизонтальному участку ab на компрессионной кривой.

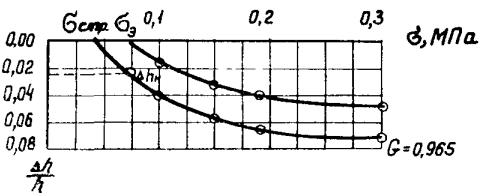

Рис.13. Кривая сжимаемости ила, полученная по данным испытания в компрессионном приборе.

Приложение 2

Определение условия прочности грунтов малой степени литификации

Для определения предельного состояния грунта, как правило, используется условие прочности Мора-Кулона, по которому параметрами диаграммы сдвига с прямолинейной огибающей предельных кругов служат угол внутреннего трения $\varphi_м$ и сцепление $C_м$. В условие прочности не входит промежуточное главное напряжение σ_2. Условия прочности Мора записываются следующим уравнением:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2C_м \operatorname{ctg} \varphi_м}.$$

Используются такие и другие условия прочности, в том числе условие Губера-Шлейхера, Губера-Мизеса-Боткина. Критерием для определения применяемости теорий прочности должны служить эксперименты.

Для того, чтобы определить, каким условием прочности следует пользоваться для определения предельного состояния глинистых грунтов малой степени литификации, были проведены эксперименты с одним и тем же уплотненным глинистым илом при различных значениях параметра Лодэ:

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - (\sigma_1 + \sigma_3)}{\sigma_1 - \sigma_3},$$

где σ_1, σ_2, σ_3 – главные напряжения.

Для этого образцы грунта были разрушены в трехосных приборах при $\sigma_2 = \sigma_3 \leq \sigma_1$; $\mu_\sigma = -1$ и кручением под гидростатическим давлением, т.е. при условии $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ и $\mu_\sigma = 0$.

Результаты проведенных экспериментальных исследований приведены в табл.7, а экспериментальные зависимости угла внутреннего трения по Мору от параметра μ_σ показаны на рис.14.

Угол внутреннего трения исследованных илов и текучепластичной глины незначительно изменяется с изменением параметра μ_σ. при этом чем меньше угол внутреннего трения, тем меньше влияние параметров Лодэ (μ_σ).

Учитывая, что прочность глинистых грунтов малой степени литификации в основном обусловливается сцеплением, а углы внутреннего трения этих грунтов даже в консолидированном состоянии не велики и, следовательно, будут мало зависеть от параметра μ_σ, рекомендуется при определении предельного состояния пользоваться условием прочности Мора-Кулона.

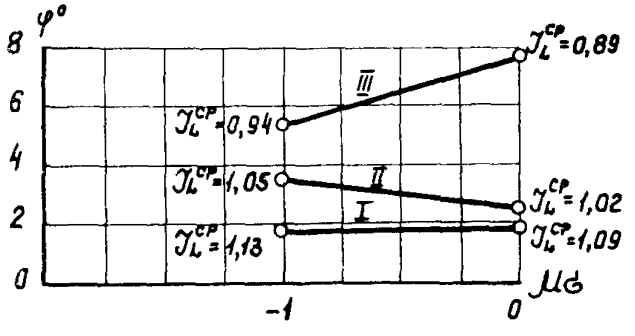

Рис.I4. Экспериментальные зависимости угла внутреннего трения по Мору глинистых илов от параметра Лодэ. Цифры I,II и III обозначают серию испытаний

Таблица 7

Результаты определения прочности глинистых илов при различных параметрах Лодэ

Давление		Условие испытания									
Уплотнения	Гидростатическое давление при испытании	Трехосное сжатие $\mu_\sigma = -1$									
		Характеристики грунта после испытания						Параметры прочности			
σ_y, МПа	σ_3, МПа	J_p	W, %	γ_o, г/см^3	e	G	χ	σ_i, МПа	$tg\varphi°$	$\varphi°$	C, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,075	0,075	34	62,8	1,64	1,660	1,0	1,12	0,0192	0,03	1°45′	0,020
0,075	0,050	34	63,2	1,64	1,667	1,0	1,13	0,0953			
0,075	0,025	34	63,3	1,64	1,679	1,0	1,15	0,0688			
		Среднее	63,1	1,64	1,668	1,0	1,13				Среднее
0,075	0,075	20	49,3	1,73	1,312	1,0	1,07	0,143	0,065	3°30′	0,027
0,075	0,050	20	48,5	1,73	1,300	1,0	1,03	0,114			
0,075	0,025	20									
		Среднее	48,9	1,73	1,306	1,0	1,05				Среднее
0,050	0,050	25	54,7	1,69	1,460	1,0	0,93	0,1297	0,094	5°30′	0,012
0,050	0,025		55,7	1,68	1,480	1,0	0,96	0,094			
		Среднее	55,2	1,68	1,470	1,0	0,94				Среднее

Условие испытания								
Кручение под гидростатическим давлением $\mu_б = 0$								
Характеристики грунта после испытания					Параметры прочности			
W, %	γ_0, г/см^3	e	G	J_L	τ, МПа	$tg\,\varphi^\circ$	φ°	C, МПа
I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	20	2I
62,7	I,63	I,674	I,0	I,I2	0,02II	0,032	I°50′	0,048
60,2	I,63	I,633	0,98	I,04	0,0I96			
62,9	I,64	I,662	I,0	I,I2	0,0I88			
62	I,63	I,656	0,99	I,09				
48,8	I,7I	I,332	0,98	I,04	0,0306	0,046	2°30′	0,027
48,2	I,70	I,309	0,98	I,0I	0,0298			
47,6	I,70	I,327	9,96	I,00	0,0275			
48,2	I,70	I,322	0,97	I,02				
53,I	I,69	I,428	I,0	0,89	0,0258	0,I36	7°45′	0,0I90
53,3	I,69	I,43I	I,0	0,90	0,0227			
53,2	I,69	I,429	I,0	0,89				

gost.e-ecolog.ru