

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРАКТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОЛЗУЧЕСТИ ГРУНТА (РМС)

Метод практического определения параметров ползучести глинистого грунта и применения их характеристик в расчетах грунтовых массивов был разработан под руководством канд. техн. наук, доц. кафедры «Геология, основания и фундаменты» К.В. Королева. Прежде чем перейти к описанию метода экспериментального определения параметров ползучести, приведем основные положения практической модели определения параметров ползучести грунта (РМС — «practical model of creep»).

Во-первых, явление ползучести учитывается в том случае, если развитие деформаций под воздействием этого процесса может привести к разрушению грунта. Отсюда следует, что явление ползучести проявляется в ограниченном диапазоне напряженного состояния. Границы этого диапазона принято характеризовать двумя парами прочностных характеристик грунта: параметрами мгновенной прочности $c_{\text{мгн}}$ и $\phi_{\text{мгн}}$ и параметрами длительной прочности $c_{\text{дл}}$ и $\phi_{\text{дл}}$.

Экспериментальное определение указанных характеристик в традиционной постановке заключается в построении по опытным данным кривых ползучести грунта (например, в сдвиговых испытаниях). Качественный вид кривой ползучести показан на рис. 1, где γ_{max} — скорость максимальной относительной деформации сдвига; t — время. В принципе эта кривая состоит из трех участков — неустановившаяся ползучесть (ОА), установившаяся ползучесть (АВ) и прогрессирующее разрушение (ВС) [1]. Результат данных опытов — определение времени до разрушения в зависимости от приложенных к образцу грунта нормального и касательного напряжения. Даже если не затрагивать трудные условия реализации таких опытов (например, сохранение влажности образца и продолжительность опыта), достаточно отметить один осложняющий фактор — это отсутствие нормативных документов по их проведению.

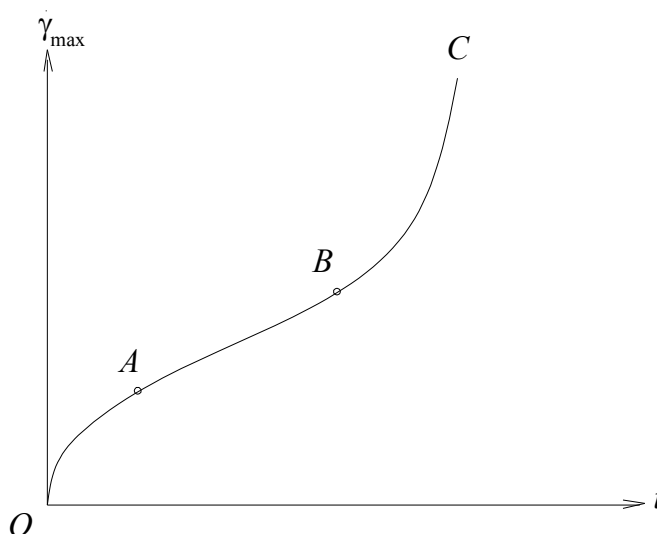


Рис. 1. Характерная кривая сдвиговой ползучести глинистого грунта

Практически приемлемый метод определения параметров мгновенной и длительной прочности грунта был предложен Н.Н. Масловым в рамках применения физико-технической теории ползучести глинистых грунтов [2].

Данная теория позволяет на практике определять эти основные параметры ползучести глинистых грунтов с достаточной точностью и в разумных временных пределах.

В рамках теории плотности-влажности Н.Н. Маслова сопротивление сдвигу глинистых грунтов определяется зависимостью

$$\tau_{\text{пр}} = \sigma \operatorname{tg} \varphi_w + \Sigma_w + c_c, \quad (1)$$

где φ_w — истинный угол внутреннего трения грунта; Σ_w — связность грунта, обусловленная водно-коллоидными, восстанавливающимися связями в грунте; c_c — структурное сцепление грунта, определенное цементационными, невосстанавливающимися связями в грунте.

Общее сцепление грунта c_w рассчитывается следующим образом:

$$c_w = \Sigma_w + c_c. \quad (2)$$

Для определения этих параметров разработана специальная методика проведения сдвиговых испытаний грунта, называемая «плашка по плашке». Графическое представление этого метода показано на рис. 2.

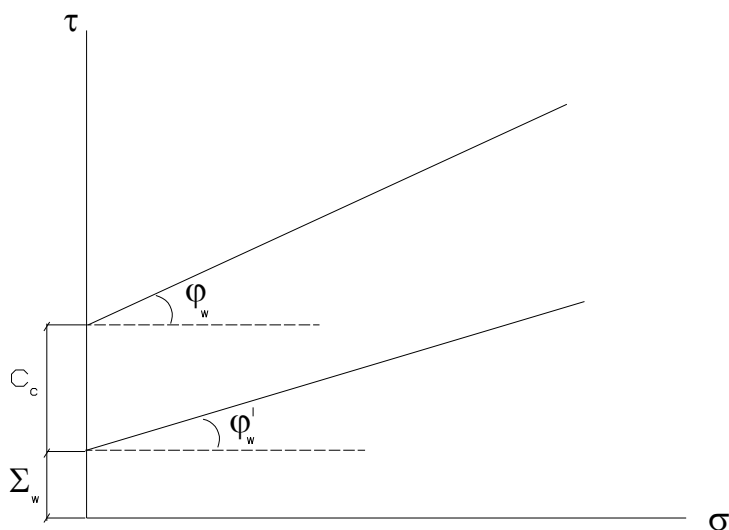


Рис. 2. Сдвиг «плашка по плашке» (повторный сдвиг)

Суть этих испытаний заключается в следующем. На первом этапе производится сдвиг целых образцов грунта по обычной методике. Затем образцы грунта разрезаются по поверхности будущего сдвига, и разрезанные половинки образца устанавливаются друг на друга. В таком состоянии разрезанный и сложенный образец выдерживается под нагрузкой три или более часов. Предполагается, что за это время водно-коллоидные связи в глинистом грунте будут восстановлены. Затем этот образец подвергается испытанию на срез.

Таким образом, испытывая серии образцов-близнецов в целом и разрезанном виде, можно получить две прямые сдвига грунта, как это показано на рис. 2.

На основании физико-технической теории ползучести Н.Н. Маслова параметры мгновенной и длительной прочности грунта (или «порога ползучести» грунта) определяются в соответствии со следующими условиями [2]:

$$1) \text{ при } \tau > \sigma \operatorname{tg} \varphi_w + \sum_w + c_c \quad (3)$$

происходит мгновенное разрушение грунта;

$$2) \text{ при } \tau < \sigma \operatorname{tg} \varphi_w + c_c \quad (4)$$

прочность грунта обеспечена на весь период работы объекта и деформации от воздействия ползучести отсутствуют;

$$3) \text{ при } \tau < \sigma \operatorname{tg} \varphi_w + \sum_w + c_c \text{ и } \tau > \sigma \operatorname{tg} \varphi_w + c_c \quad (5)$$

проявляются деформации от проявления ползучести грунта.

Напряженное состояние в области развития деформаций от ползучести устанавливается из уравнения Кулона — Мора (для условий плоской деформации):

$$s = \sigma \sin \varphi + 2c \cos \varphi, \quad (6)$$

где $s = \sigma_1 - \sigma_3$ и $\sigma = \sigma_1 + \sigma_3$.

Промежуточные значения прочностных характеристик $c_{\text{дл}} \leq c \leq c_{\text{мгн}}$ и $\varphi_{\text{дл}} \leq \varphi \leq \varphi_{\text{мгн}}$ рассматриваются как показатели напряженного состояния и определяются с помощью одного параметра k :

$$\begin{aligned} c &= c_{\text{дл}} + k(c_{\text{мгн}} - c_{\text{дл}}), \\ \varphi &= \varphi_{\text{дл}} + k(\varphi_{\text{мгн}} - \varphi_{\text{дл}}). \end{aligned} \quad (7)$$

Рассчитаем скорость максимальной относительной сдвиговой деформации по простейшей зависимости (для условий плоской деформации)

$$\gamma_{\max} = (d\dot{\gamma}_1 - d\dot{\gamma}_3) = \frac{d\gamma}{dt} = \chi s = \chi(\sigma_1 - \sigma_3), \quad (8)$$

где $\chi = \frac{1}{\eta}$ — коэффициент ползучести, обратный по величине коэффициенту вязкости грунта η .

Ясно, что величина $\chi = \infty$ при $k = 1$ и $\chi = 0$ при $k = 0$. Качественный вид функции показан на рис. 3.

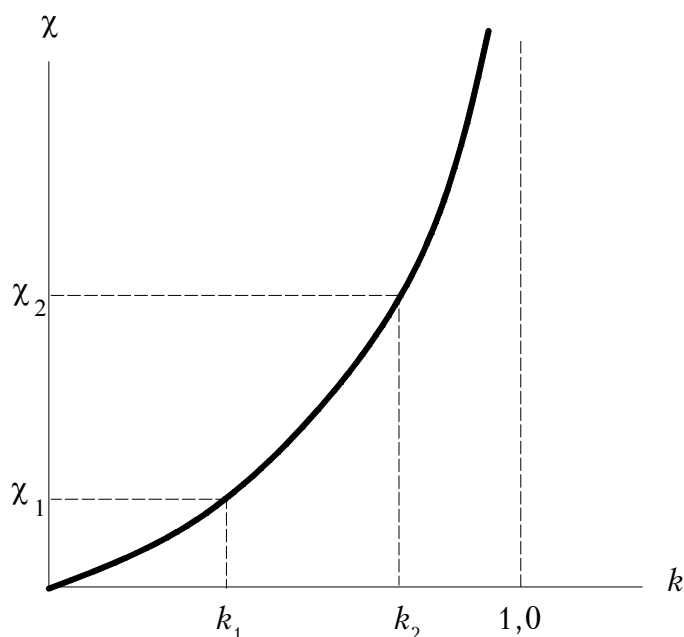


Рис. 3. Функция $\chi(k)$

Для практических расчетов функция $\chi(k)$ была представлена в виде:

$$\chi = a \left(\frac{k}{1-k} \right)^m. \quad (9)$$

Параметры a и m определяются по результатам стабилометрических испытаний грунта на ползучесть при постоянных напряжениях. Например, пусть одно испытание отвечает значениям χ_1 и k_1 , а другое — значениям χ_2 и k_2 . Тогда параметры a и m можно вычислить по формулам:

$$m = \frac{\lg \frac{\chi_1}{\chi_2}}{\lg \left[\frac{k_1(1-k_2)}{k_2(1-k_1)} \right]}, \quad (10)$$

$$a = \frac{\chi_1}{\left(\frac{k_1}{1-k_1} \right)^m} = \frac{\chi_2}{\left(\frac{k_2}{1-k_2} \right)^m}.$$

Рассмотрим результаты опытного определения параметров образца грунта. Исследовался мягкопластичный суглинок с одного из производственных объектов. Характеристики грунта: удельный вес $\gamma = 18,3 \text{ кН/м}^3$, удельный вес частиц грунта $\gamma_s = 26,8 \text{ кН/м}^3$, влажность $w = 0,29$, влажность на пределе пластичности $w_p = 0,36$ и текучести $w_L = 0,21$, число пластичности $I_p = 15 \%$, показатель текучести $I_L = 0,53$.

На первом этапе определялись параметры мгновенной и длительной прочности грунта. Опыты производились методом прямого сдвига на сдвиговом приборе Гидропроекта на кафедре «Геология...» СГУПС. Сдвиг целых образцов грунта показал: $\varphi_w = 25^\circ$, $c_w = 0,36 \text{ кПа}$. Повторный сдвиг («плашка по плашке») дал результаты: $\varphi_w = 21^\circ$, $\Sigma_w = 28 \text{ кПа}$. Соответственно параметры мгновенной прочности грунта были приняты следующие: $c_{\text{мгн}} = 36 \text{ кПа}$ и $\varphi_{\text{мгн}} = 25^\circ$, а параметры длительной прочности $c_{\text{дл}} = 36 - 28 = 8 \text{ кПа}$ и $\varphi_{\text{дл}} = 21^\circ$.

Отметим, что у Н.Н. Маслова, как правило, $\varphi_{\text{дл}} = \varphi_{\text{мгн}}$. В нашем случае эти показатели существенно различаются. Объяснение этого факта заключается в том, что данные грунты насыщены мелкозернистыми включениями, которые оказывают существенное влияние на коэффициент трения в грунте. Однако после предварительного разреза образца, имитирующего формирование поверхности сдвига, вследствие перемещения частиц влияние этих включений заметно уменьшается, что и приводит к снижению сопротивления глинистого грунта трению.

На втором этапе определялся коэффициент ползучести по результатам стабилометрических испытаний. Эти опыты проводились на стабилометре АСИС в грунтовой лаборатории Сибжелдорпроекта. В этом стабилометре предусмотрено измерение вертикальных ε_1 и объемных ε_v деформаций. Соответственно максимальная относительная деформация сдвига определялась по формуле

$$\gamma_{\text{max}} = \frac{3\varepsilon_1 - \varepsilon_v}{2}. \quad (11)$$

Опыты на стабилометре заключались в воздействии на образец грунта постоянными напряжениями σ_1 и σ_3 и фиксации развития деформаций образца грунта во времени вплоть до достижения режима установившейся ползучести.

Для расчета величины напряжений σ_1 и σ_3 были приняты следующие два значения параметра k : $k = k_1 = 0,3$ и $k = k_2 = 0,7$. Далее рассчитывались параметры напряженного состояния c и φ :

для $k = k_1 = 0,3$

$$c = c_{дл} + k(c_{мгн} - c_{дл}) = 8 + 0,3(36 - 8) = 16,4 \text{ кПа},$$

$$\varphi = \varphi_{дл} + k(\varphi_{мгн} - \varphi_{дл}) = 21 + 0,3(25 - 21) = 22,2^\circ;$$

для $k = k_2 = 0,7$

$$c = c_{дл} + k(c_{мгн} - c_{дл}) = 8 + 0,7(36 - 8) = 27,6 \text{ кПа},$$

$$\varphi = \varphi_{дл} + k(\varphi_{мгн} - \varphi_{дл}) = 21 + 0,7(25 - 21) = 23,8^\circ.$$

Для проведения стабилометрических испытаний были выбраны следующие величины бокового давления на образец грунта $\sigma_3 = 0,05$ МПа ($k = 0,3$) и $\sigma_3 = 0,1$ МПа ($k = 0,7$). Соответственно было рассчитано вертикальное давление:

для $k = k_1 = 0,3$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} = 0,05 \frac{1 + \sin 22,2^\circ}{1 - \sin 22,2^\circ} + \frac{2 \cdot 0,0164 \cos 22,2^\circ}{1 - \sin 22,2^\circ} = 0,16 \text{ МПа};$$

для $k = k_2 = 0,7$

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} = 0,1 \frac{1 + \sin 23,8^\circ}{1 - \sin 23,8^\circ} + \frac{2 \cdot 0,0276 \cos 23,8^\circ}{1 - \sin 23,8^\circ} = 0,32 \text{ МПа}.$$

В таблице приведены результаты этих испытаний, на рис. 4 для наглядности показаны графики зависимости $\gamma_{\max}$ от времени.

Развитие деформаций во времени

Время t , мин	$\gamma_{\max} (k = 0,3)$	$\gamma_{\max} (k = 0,7)$
0	0	0
0,5	0,00375	0,003625
1	0,005125	0,0045
3	0,00575	0,005125
10	0,006375	0,00575
30	0,006625	0,006375
60	0,0075	0,006625
120	0,008625	0,00725
240	0,010125	0,0095
600	0,0115	0,01025
1320	0,0125	0,01125
2040	0,013	0,011625
2760	0,01325	0,011875
3480	0,0135	0,012125
4200	0,0137	0,012375

На основании полученных данных (таблица и графики на рис. 4) были приняты значения $\dot{\gamma}_{\max 1} = 0,000125 \text{ сут}^{-1}$ при $k = k_1 = 0,3$ и $\dot{\gamma}_{\max 2} = 0,0005 \text{ сут}^{-1}$ при $k = k_2 = 0,7$.

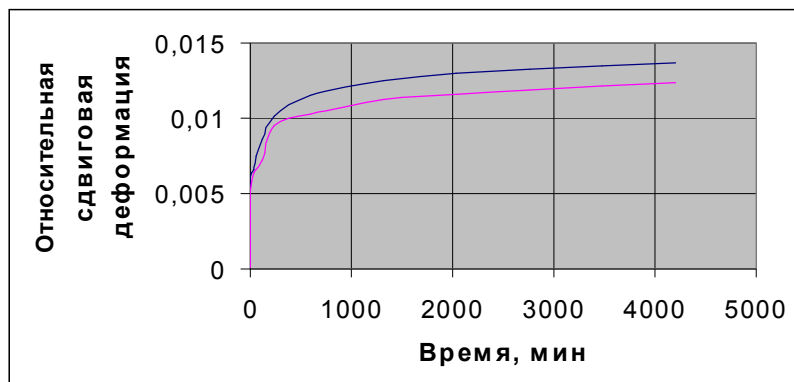


Рис. 4. Развитие сдвиговых деформаций во времени

Коэффициенты ползучести были вычислены по формулам:

$$\chi_1 = \frac{\dot{\gamma}_{\max}}{\sigma_1 - \sigma_3} = 0,00114 \text{ (сут} \cdot \text{МПа)}^{-1} \quad (k = k_1 = 0,3),$$

$$\chi_2 = \frac{\dot{\gamma}_{\max}}{\sigma_1 - \sigma_3} = 0,00227 \text{ (сут} \cdot \text{МПа)}^{-1} \quad (k = k_2 = 0,7).$$

Параметры a и m находим из решения уравнений:

$$m = \frac{\lg \frac{\chi_1}{\chi_2}}{\lg \left[\frac{k_1(1-k_2)}{k_2(1-k_1)} \right]} = 0,407,$$

$$a = \frac{\chi_1}{\left(\frac{k_1}{1-k_1} \right)^m} = \frac{\chi_2}{\left(\frac{k_2}{1-k_2} \right)^m} = 0,00161 \text{ (сут} \cdot \text{МПа)}^{-1}.$$

Выполненный цикл опытов позволяет достаточно точно определить параметры практической модели ползучести грунта. Количество экспериментов было минимальным для однозначного определения параметров модели. Такой вариант выбран для наглядности обработки опытных данных. В то же время эта методика проведения опытов может быть реализована и в рамках статистической оценки параметров.

Представленный метод определения параметров ползучести грунта может быть реализован в производственной грунтовой лаборатории, поскольку не требует специальных приборов и соответствует нормативным методикам испытания глинистых грунтов.

Библиографический список

1. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Стройиздат, 1963. 636 с.
2. Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства. М.: Стройиздат, 1977. 320 с.