

## Определение параметров консолидации



**В продолжение цикла статей о лабораторных методах испытаний дисперсных грунтов рассматриваются консолидационные испытания в приборах компрессионного сжатия, методики определения параметров фильтрационной консолидации и ползучести, принятые в практике инженерно-геологических изысканий, а также технические требования к оборудованию для подобных испытаний.**

**Мирный Анатолий Юрьевич**

Старший научный сотрудник Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, к.т.н.

**Идрисов Илья Хамитович**

Генеральный директор ООО «НПП «Геотек», к.т.н.

Многофазность, являющаяся важнейшей особенностью дисперсных грунтов приводит к тому, что при описании их механического поведения необходимо рассматривать взаимодействие различных фаз. В первую очередь это касается влияния поровой жидкости на поведение грунта в целом. В идеальном случае двухфазного грунта, поры скелета которого на 100% заполнены несжимаемой жидкостью, любое повышение нагрузки на образец приведет к росту порового давления. Деформирование за счет уменьшения объема пор будет происходить во времени по мере выдавливания жидкости из порового пространства, а скорость этого процесса будет определяться скоростью фильтрации. Именно поэтому данный процесс носит название *фильтрационной консолидации* – уплотнения во времени.

Теорию фильтрационной консолидации К. Терцаги начал разрабатывать более ста лет назад, в 1919 году, и на основании данных исследований предложил принцип эффективных напряжений (более подробно он рассмотрен в [статье](#) об определении параметров Скемптона, опубликованной ранее). Окончательно подход к проведению и интерпретации результатов консолидационных испытаний был сформулирован в работах А. Казагранде в период с 1926 по 1932 годы. Именно эти исследования легли в основу абсолютного большинства современных нормативных документов.

С точки зрения механики, процесс фильтрационной консолидации описывается законом эффективных напряжений, предполагающим, что любое увеличение внешней нагрузки  $\Delta\sigma$  будет распределяться между напряжением в скелете грунта  $\Delta\sigma'$  (эффективным напряжением) и давлением поровой жидкости  $\Delta u_w$ . Скорость рассеивания избыточного давления определяется фильтрационными свойствами, в предположении исключительно ламинарного течения жидкости. Но параметры фильтрации, в свою очередь, зависят от пористости – это означает, что по мере уплотнения скорость фильтрации будет снижаться. В результате анализа данного процесса было получено следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial u_w}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u_w}{\partial z^2}.$$

Если попробовать разобраться в его физическом смысле, то оно уже не покажется таким сложным. Скорость изменения (рассеивания) порового давления  $u_w$  прямо пропорциональна квадрату величины этого давления – то есть, чем больше напор, тем быстрее он снижается. Одновременно скорость изменения порового давления обратно пропорциональна длине пути фильтрации  $z$  – то есть, чем больший путь нужно пройти до точки разгрузки, тем больше потребуется времени. Сила этой пропорции регулируется коэффициентом  $c_v$ , известным как коэффициент консолидации:

$$c_v = \frac{k_f}{m_v \gamma_w}.$$

В выражение для определения коэффициента консолидации входит коэффициент фильтрации грунта  $k_f$ , а также коэффициент относительной сжимаемости  $m_v$  и удельный вес жидкости (воды)  $\gamma_w$ . В русскоязычной литературе данная теория известна под названием «Теория Терцаги-Герсеванова».

Коэффициент консолидации является одним из наименее понятных специалистам параметров. Это связано и с непривычной размерностью [ $\text{см}^2/\text{мин}$ ] или [ $\text{см}^2/\text{год}$ ], и с сравнительной редкостью данных испытаний – в нормативных документах на проектирование отсутствуют методики расчета с помощью данного коэффициента, значит и в технических заданиях он появляется не так часто. В редких случаях примерные значения данного параметра приводятся в справочной литературе с достаточно большим разбросом.

Другим процессом, вызывающим деформирование во времени без приращения нагрузки, является *ползучесть* скелета грунта, иногда называемая также *вторичной консолидацией*. Даже при отсутствии избыточного порового давления или при неполном заполнении пор жидкостью деформирование происходит во времени. Это объясняется вязким трением в пленках связанной воды, возникающим при проскальзывании на контактах отдельных частиц (агрегатов). В грунтах с высоким содержанием глинистых минералов (связывающих воду) ползучесть выражается очень сильно, а в песчаных грунтах практически не наблюдается.

Принято считать, что два этих процесса - фильтрационной консолидации и ползучести – следуют друг за другом. Безусловно, это в некоторой степени упрощение. Но скорость деформирования за счет ползучести на порядки ниже, чем скорость фильтрационной консолидации, что позволяет пренебречь вкладом ползучести в общую деформацию в течение рассеивания избыточного порового давления. Так, например, в зарубежных нормативных документах принимается, что фильтрационная консолидация в любом глинистом грунте завершается за 24 часа (в стандартном одометре). При этом деформации ползучести можно наблюдать на протяжении недель, месяцев и даже лет.

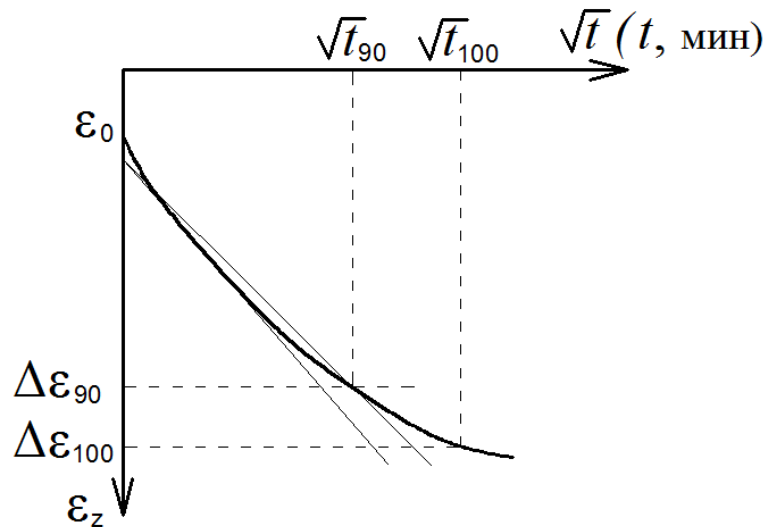
Консолидационные испытания чаще всего проводятся в стандартных приборах компрессионного сжатия, хотя гипотетически аналогичный результат можно получить и в приборах трехосного сжатия. Преимуществом одометра в данном случае является небольшая высота образца – время консолидации пропорционально квадрату пути фильтрации, и для образца высотой 25 мм будет в 9 раз меньше (!), чем для образца высотой 76 мм. Безусловно, это значительно сокращает время испытания и снижает его стоимость.

Нагрузка прикладывается в одну ступень, причем предполагается, что нагрузка прикладывается мгновенно, иначе при интерпретации результатов «смазывается» очень важный начальный участок зависимости. Считается, что более корректное приложение нагрузки реализуется в приборах с рычажной системой при помощи гирь. Тем не менее, современное оборудование с пневматическим или кинематическим приводом позволяет получить необходимую нагрузку за пренебрежимо малый период времени.

Специалисты часто задаются вопросом о выборе величины ступени нагружения. Действительно, ГОСТ 12248-2010 не дает конкретных указаний на ее величину, однако в п. 5.4.1.3 указано, что «диапазон давлений, при которых проводят испытания, определяется в программе испытаний с учетом напряженного состояния грунта в массиве», при этом оно должно превышать бытовое. В связи с этим наиболее рациональным выглядит использование ступени нагрузки, равной полному давлению от собственного веса грунта и сооружения для данной глубины, так как именно при этой нагрузке будет протекать консолидация в реальном основании.

В ходе опыта ведется регистрация вертикальной деформации образца и времени, что позволяет впоследствии построить зависимость относительной деформации от времени. Для определения параметров консолидации используется два графических метода интерпретации результатов, оба они предполагают изменение масштаба оси времени.

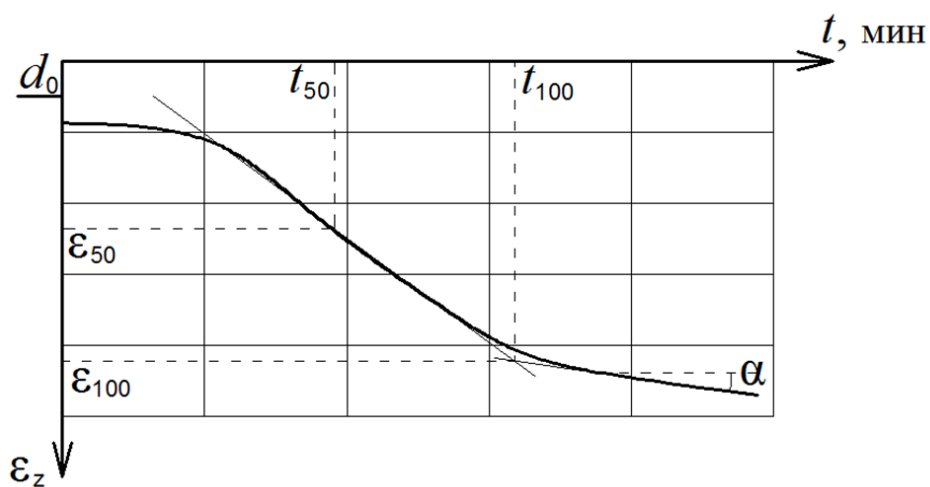
Первый метод - метод квадратного корня из времени – требует построения зависимости « $\varepsilon - \sqrt{t}$ ». На полученной кривой необходимо найти начальный линейный участок, обычно находящийся в пределах первых 50% сжатия и провести прямую наилучшего приближения. Далее абсциссы полученной прямой умножаются на 1,15, и по ним строится вторая прямая линия, которая пересекает опытную кривую в точке, соответствующей 90% консолидации.



Коэффициент фильтрационной консолидации можно определить, если известна высота образца  $h$  и время 90% консолидации  $t_{90}$ . Помимо этих параметров, в формулу входит еще теоретический коэффициент  $T_{90} = 0,848$  и температурный поправочный коэффициент  $f_T$ , учитывающий возможные отклонения от нормальных условий:

$$c_v = \frac{T_{90} h^2}{t_{90}} f_T.$$

Второй метод – метод логарифма времени – несколько более сложен, но является универсальным, и позволяет не только определить коэффициент фильтрационной консолидации, но и оценить параметр ползучести. Время по оси абсцисс откладывается в масштабе десятичного логарифма, это означает, что каждое следующее деление на шкале в 10 раз превосходит предыдущее. На графике при этом видны два выраженных линейных участка: первый совпадает с максимальным наклоном кривой и относится к фильтрационной консолидации, второй – последний – отражает ползучесть. Точка пересечения двух прямых линий, аппроксимирующих эти участки, соответствует времени 100% фильтрационной консолидации  $t_{100}$  и полной деформации за счет консолидации  $\epsilon_{100}$ .



Для определения коэффициента консолидации необходимо определить точку 50% консолидации. Она определяется как половина деформации за счет фильтрационной консолидации  $\epsilon_{50}$  – середина отрезка между  $d_0$  и  $\epsilon_{100}$ . Точка  $d_0$  – так называемый

«приведенный ноль компрессии», вычисляется как разность между значениями деформации в точках  $\lg(t) = 0,4$  и  $\lg(t) = 0,1$ :

$$d_0 = \varepsilon_{0,4} - \varepsilon_{0,1}.$$

Коэффициент фильтрационной консолидации определяется по формуле, аналогично методу квадратного корня, но при другом времени консолидации (и, соответственно, другим коэффициентом  $T_{50} = 0,197$ ):

$$c_v = \frac{T_{50} h^2}{t_{50}}.$$

По наклону последнего линейного участка можно определить коэффициент вторичной консолидации:

$$c_\alpha = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)}{\lg(t_2) - \lg(t_1)}.$$

Использование непривычного логарифмического масштаба в совокупности с неясными формулировками ГОСТ приводит к частым ошибкам при использовании метода. Считаем необходимым разобрать наиболее частые из них.

Коэффициент фильтрационной консолидации вычисляется с использованием значения  $t_{50}$ , имеющего размерность времени. Время может приниматься в любых удобных величинах – минутах, часах, сутках, важно только следить за размерностью. Но вычисление приведенного нуля компрессии  $d_0$  проводится на основании логарифмических значений, что, к сожалению, в ГОСТ не подчеркивается. Таким образом, под «абсциссами 0,1 и 0,4» понимаются точки, в которых логарифм времени имеет эти значения, а не само время опыта. Иначе возникает абсурдная ситуация, когда экспериментатор начинает поиск в протоколе отсчетов «0,1 минуты» и «0,4 минуты».

Коэффициент вторичной консолидации, или ползучести не имеет размерности, и рассчитывается уже на основании логарифмов времени. Но ось абсцисс маркируется в единицах времени, и на практике в знаменателе формулы часто оказываются единицы времени. Эта грубая ошибка приводит к занижению величины параметра на несколько порядков.

Еще одной сложностью при проведении данных опытов является их продолжительность. Для определения параметра ползучести необходимо продолжать опыт до однозначного определения последнего линейного участка. При недостаточной частоте снятия замеров – например, при применении индикаторов часового типа - может показаться, что опыт уже завершен, так как показания индикатора не меняются. В результате опыт завершается раньше времени, и значение параметра ползучести оказывается завышенным. Качественный результат требует проведения опыта в течение не менее 7 суток, что далеко не всегда может себе позволить производственная лаборатория в условиях сжатых сроков. Применение автоматизированных средств измерений с высокой частотой регистрации данных позволяет более уверенно выделять последний линейный участок.

Примечательно, что получаемые при данных испытаний параметры первичной и вторичной консолидации полностью совпадают с применяемыми в зарубежной практике.

В качестве «побочного» результата консолидационных испытаний можно определить коэффициент фильтрации. Действительно, на основании определения коэффициента консолидации его можно вычислить, все необходимые данные известны. На практике этот метод часто используется именно для определения коэффициентов фильтрации пылевато-глинистых грунтов. Тем не менее, необходимо помнить, что используемое при этом

аналитическое решение теории фильтрационной консолидации содержит в себе довольно серьезные допущения, и метод скорее относится к косвенным.

В составе комплексов АСИС Стандарт и АСИС Про, производства ООО НПП «Геотек», предлагается различное оборудование для компрессионных испытаний с целью определения параметров консолидации. Приборы комплектуются одометрами для образцов различных размеров и нагрузочными устройствами для создания вертикального силового воздействия. Приборы позволяют приложить статическую нагрузку и вести автоматизированную регистрацию данных с высокой частотой на протяжении длительного времени, что способствует повышению качества результатов опыта.

Более подробную техническую информацию можно получить у специалистов компании или на сайте [www.npp-geotek.ru](http://www.npp-geotek.ru).

### **Список литературы**

ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.

Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248-2010. М.: Прондо, 2014.

Герсеванов Н. М. Собрание сочинений: В 2 т. М.: Стройвоенмориздат, 1948.

Терцаги К. Строительная механика грунта на основе его физических свойств. Л.: Госстройиздат, 1933.

ASTM D 2435. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading.

ISO 17892-5:2017. Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil — Part 5: Incremental loading oedometer test.