

## Фильтрационные испытания дисперсных грунтов



Не секрет, что механическое поведение дисперсных грунтов во многом определяется поровой жидкостью. От скорости рассеивания избыточного порового давления зависит время фильтрационной консолидации, реализация сопротивления сдвигу – а, следовательно, и надежность проектных решений. В связи с этим определение коэффициента фильтрации дисперсных грунтов становится важнейшей задачей, которую не так просто решить традиционными методами.

В новой статье из цикла о лабораторных методах испытаний авторы расскажут об установке для фильтрационных испытаний дисперсных грунтов.

**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.

Традиционно, течение воды в грунте принято описывать законом фильтрации А. Дарси. Действительно, при небольших скоростях течения поток жидкости можно рассматривать как ламинарный, и скорость потока прямо пропорциональна разности напоров между рассматриваемыми точками и обратно пропорциональна длине пути:

$$v = k_{\phi} \frac{\Delta H}{L} = k_{\phi} \cdot i$$

Коэффициент пропорциональности в данном случае называют *коэффициентом фильтрации*. Этот параметр является одним из основных элементов теории фильтрационной консолидации – ведь рассеивание порового давления происходит именно за счет фильтрации. Все методы определения коэффициента фильтрации регламентированы ГОСТ 25584-2016.

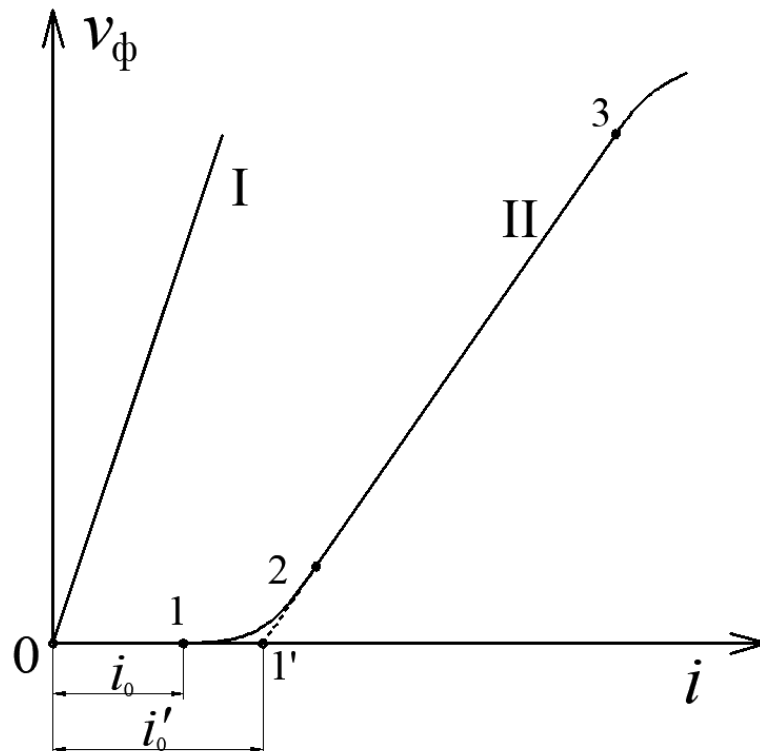
Для определения коэффициента фильтрации песчаных грунтов используются несложные приборы, позволяющие обеспечить небольшую разность напоров на верхнем и нижнем торце цилиндрического образца в металлическом кольце. Коэффициент фильтрации в данном случае определяется напрямую: путем сопоставления расхода за единицу времени и градиента напора. Испытание при нескольких различных значениях градиента напора позволяет нанести точки на график и построить линейную аппроксимацию.

В пылевато-глинистых грунтах коэффициент фильтрации имеет существенно меньшие значения, поэтому требуется более сложное оборудование – компрессионно-фильтрационный прибор («комфильметр»), разработанный Г.И. Тер-Степаняном. Перед началом непосредственного фильтрационного испытания к образцу прикладывается вертикальная нагрузка, аналогично испытаниям компрессионного сжатия. Далее устанавливается необходимый градиент напора, и по пьезометрам ведется наблюдение за процессом фильтрации.

К сожалению, экспериментальное определение коэффициента фильтрации связано с большими трудностями. Для песчаных грунтов результат в значительной степени зависит от плотности укладки образца в кольцо. Учитывая, что плотность сложения песчаных грунтов на практике обычно определяется косвенными методами, точность фильтрационных испытаний в лабораторных условиях не может быть высокой.

В случае пылевато-глинистых грунтов на качество определения коэффициента фильтрации будут влиять как конструктивные, так и физические факторы.

Физическим фактором, влияющим на качество испытания, является так называемый «начальный градиент напора». Известно, что в глинистых грунтах до определенных значений градиента напора фильтрация не начинается вовсе, либо протекает с пренебрежимо малой скоростью. Это объясняется влиянием связанной воды. Под действием напора фильтрация начинается только в свободной воде – связанная вода не подчиняется законам гидравлики. Тем не менее, по мере увеличения скорости фильтрации происходит постепенный отрыв отдельных молекул связанной воды, и они начинают участвовать в фильтрационном процесс. При этом пленки связанной воды становятся тоньше, сечение пор, по которым идет фильтрация, увеличивается – следовательно, увеличивается и скорость. В результате зависимость скорости фильтрации от градиента напора при малых скоростях становится выражено нелинейной. В качестве приближенного решения предлагается продлевать линейный участок до пересечения с осью абсцисс, полученную при этом точку  $i'_0$  называют «кажущийся начальный градиент напора». Фактический начальный градиент напора  $i_0$  имеет меньшее значение, но экспериментально устанавливается с большим трудом.



**Рис. 1** Зависимость скорости фильтрации  $v_{\phi}$  от градиента  $i$  для несвязных (I) и связных (II) грунтов

Таким образом, при малых градиентах напора экспериментально определить коэффициент фильтрации в компрессионно-фильтрационном приборе не удастся. Увеличение напора, в свою очередь, приведет к возникновению пристенной фильтрации. В компрессионных приборах неизбежно возникают зазоры между образцом и жестким металлическим кольцом, ограничивающим боковое расширение. Этот зазор не обязательно закрывается даже при нагрузке на штамп 100-200 кПа, и в результате фильтрация воды протекает вдоль стенки кольца, что приводит к завышению коэффициента фильтрации.

На практике часто применяется расчетный метод определения коэффициента фильтрации в глинистых грунтах путем пересчета из коэффициента фильтрационной консолидации. Испытание на консолидацию не требует специального оборудования и контроля градиента напора, а коэффициент фильтрации может быть выражен формулой:

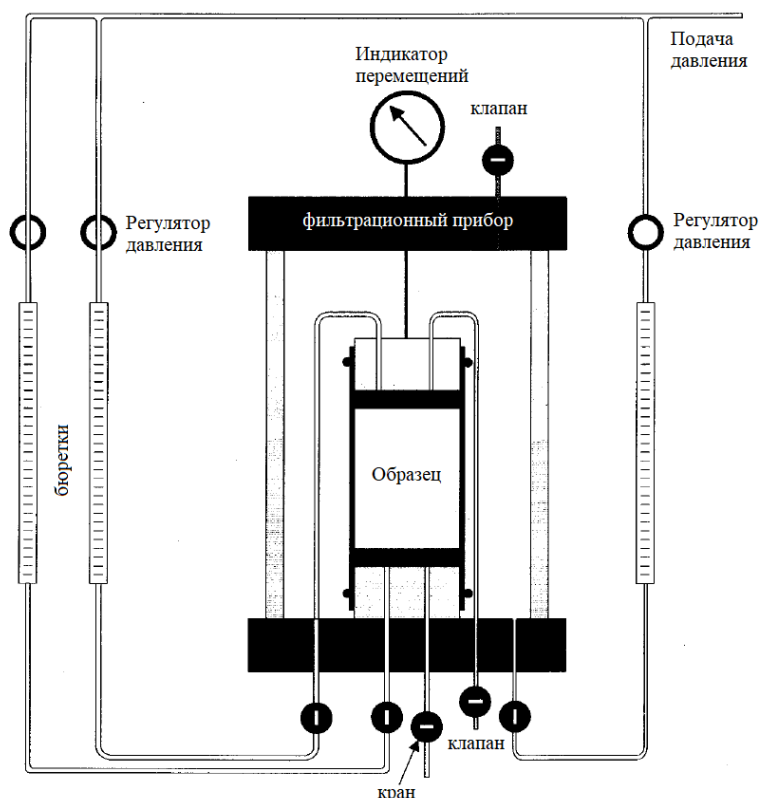
$$k_{\phi} = c_v m_v \gamma_w,$$

где  $k_{\phi}$  — коэффициент фильтрации;  $c_v$  — коэффициент фильтрационной консолидации;  $m_v$  — коэффициент относительной сжимаемости;  $\gamma_w$  — удельный вес поровой жидкости.

К сожалению, данный метод обладает существенными недостатками:

- неизвестен фактический градиент напора (избыточное поровое давление), при котором проводится испытание;
- точность определения коэффициента консолидации во многом определяется субъективными факторами, так как выполняется графическими методами;
- метод основан на аналитическом решении задачи одномерной фильтрационной консолидации, которая содержит ряд допущений (например, 100% водонасыщение грунта, абсолютная несжимаемость поровой жидкости и т.д.).

В качестве альтернативного метода определения фильтрационных характеристик дисперсных грунтов можно использовать испытания в приборах с гибкой стенкой. Данные испытания описаны в ASTM 5084-16. Оборудование для проведения испытания конструктивно напоминает камеру трехосного сжатия типа А, но без возможности приложения девиаторной нагрузки. Цилиндрический образец размещается в эластичной мембране внутри камеры, в которой можно увеличивать изотропное давление жидкости. К верхнему и нижнему штампам обеспечен подвод жидкости для водонасыщения и фильтрационного испытания. Дополнительно имеется возможность измерения высоты образца в ходе опыта.



**Рис. 2.** Схема фильтрационного прибора по ASTM D5084

В ходе испытания образец обжимается изотропно, что обеспечивает плотное прилегание мембраны к боковой поверхности и полностью исключает пристенную фильтрацию. Величина напора контролируется регуляторами давления, а расход – по изменению уровня жидкости в бюретках, подключенных к верхнему и нижнему штампам. Это позволяет проводить испытания как песчаных, так и пылевато-глинистых образцов при любых значениях градиента напора и действующего обжимающего давления, что делает прибор универсальным. Более того, испытания могут выполняться на одном и том же образце с постепенным увеличением давления и градиента, в результате чего снижается величина ошибки, связанной с неоднородностью строения отдельных образцов и различием в плотности.

ООО НПП «Геотек» предлагает прибор из серии АСИС Стандарт для проведения фильтрационных испытаний по ASTM D 5084-16. Прибор обеспечивает проведение фильтрационных испытаний глинистых грунтов при постоянном градиенте напора, с возможностью моделирования начальных граничных условий. В состав прибора входит

камера для выполнения фильтрационных испытаний в условиях изотропного сжатия, емкость для подготовки и хранения рабочей жидкости, панель со сменными бюретами для визуального измерения объема, система управления давлением в камере и поровом пространстве образца. В состав комплекса входит необходимая измерительная аппаратура. Испытания проводятся в полуавтоматизированном режиме с контролем всех параметров испытания.

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

### **Список литературы**

1. ASTM 5084-16 Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter
2. ГОСТ 25584-2016 Метод лабораторного определения коэффициента фильтрации
3. Тер-Степанян Г.И., 1956. Комфильметр – прибор для компрессионных и фильтрационных испытаний грунтов