

Определение параметров сжимаемости



В прошлой статье из цикла о лабораторных методах испытаний дисперсных грунтов обсуждались принципы испытаний компрессионного сжатия и используемые в мировой практике режимы нагружения. Результатом любого такого опыта является компрессионная кривая, характеризующая сжимаемость грунтов. В настоящей работе рассматривается методика интерпретации результатов и параметры, применяемые для количественной оценки сжимаемости.

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.

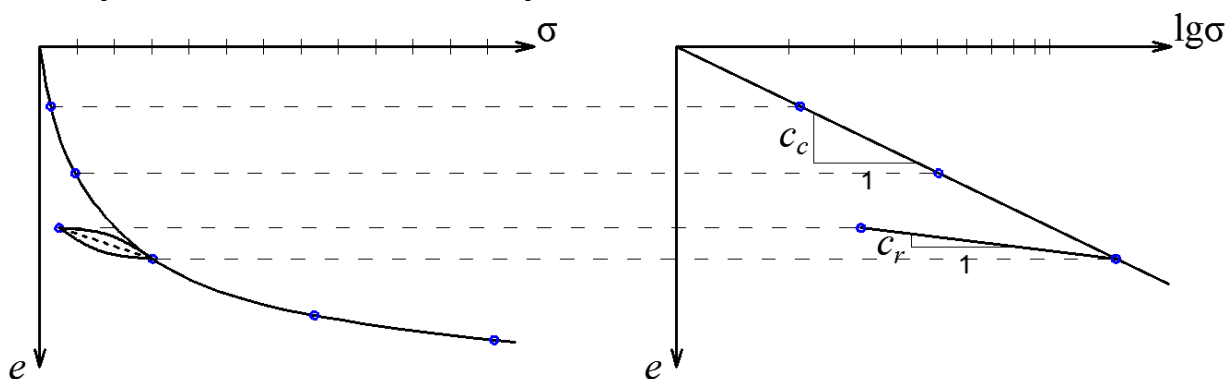
Основной задачей компрессионных испытаний является определение параметров сжимаемости для дальнейшего расчета осадки основания. Для этого необходимо аппроксимировать фактическую компрессионную кривую с помощью некоторой функции в зависимости от выбранной механической модели. Параметрами этой функции и будут искомые параметры сжимаемости. Именно это обстоятельство является причиной широкого разнообразия методик интерпретации результатов.

Как уже говорилось ранее, компрессионная кривая устанавливает связь между действующими напряжениями и соответствующими значениями коэффициента

пористости. В большинстве случаев она имеет нелинейный вид, позволяющий использовать различные математические подходы для ее аппроксимации. Исторически первой было предложено использовать логарифмическую функцию. В работах К. Terzaghi и А. Casagrande показано, что большинство компрессионных кривых (в особенности на образцах нарушенной структуры или грунтовой пасте) хорошо аппроксимируются зависимостью вида:

$$e = a \ln \sigma + C.$$

У данного подхода есть выраженное преимущество: он позволяет описать нелинейную компрессионную кривую в широком диапазоне напряжений. Для нормально уплотненных грунтов с невыраженной структурной прочностью с помощью единственного параметра a возможно проводить расчет осадок независимо от конкретных нагрузок. При необходимости аналогичным образом можно обработать и кривую разгрузки / повторного нагружения. В мировую практику вошли понятия «индекс компрессии» C_c , описывающий первичное нагружение, и «индекс рекомпрессии» C_r , описывающий разгрузку и повторное нагружение. Данные параметры включены в большинство численных программных комплексов в качестве вспомогательных; подробнее об их применении и закономерностях можно узнать из многочисленных публикаций В. Васенина.



Необходимо отметить часто возникающую трудность перевода. При нагружении в компрессионном приборе образец испытывает объемное сжатие, а при разгрузке, соответственно, объемное расширение (*swelling*). Зачастую этот термин переводят как «набухание», что для отечественных специалистов несет принципиально иной смысл и касается увеличения объема при замачивании. В связи с этим в переводной литературе часто встречается «индекс набухания» или «коэффициент набухания», относящийся к упругому объемному расширению скелета, а не к набуханию в привычном смысле слова. Использование решений теории упругости в механике грунтов потребовало перехода от изменения коэффициента пористости к относительной деформации и, как следствие, модулю деформации. Относительные деформации могут быть выражены исходя из граничных условий опыта:

$$\Delta \varepsilon_z = \Delta e / (1 + e_0).$$

Очевидно, что в случае логарифмической зависимости модуль деформации не является константой, а увеличивается с ростом напряжений. Подробнее это явление рассмотрено в работах К. Terzaghi и N. Janbu. Математически модуль деформации в данном случае будет обратно пропорционален производной от зависимости относительной деформации от напряжений. Такой модуль обозначается E_{oed} , является *касательным* и носит название одометрического. Он характеризует жесткость грунта при компрессионном сжатии и связан с объемным модулем K при изотропном сжатии:

$$\begin{cases} E_{oed} = \Delta\sigma_z / \Delta\varepsilon_z \\ K = \Delta\sigma_m / \Delta\varepsilon_v \\ \Delta\varepsilon_z = \Delta\varepsilon_v \\ \Delta\sigma_m = \Delta\sigma_z \left(\frac{1+2K_0}{3} \right) \end{cases} \Rightarrow K = E_{oed} \cdot \left(\frac{1+2K_0}{3} \right) \approx \frac{2}{3} E_{oed}$$

К сожалению, в отечественной практике принят менее универсальный метод интерпретации результатов. В работах Н.М. Герсеванова и Н.А. Цытовича предлагается аппроксимировать компрессионную кривую линейной зависимостью на некотором участке. При этом Н.А. Цытович приводит предельное значение напряжений в 300 кПа, выше которого данная аппроксимация неприменима. В результате на участке напряжений (обычно от 100 до 200 кПа) компрессионная кривая заменяется прямой линией, наклон которой характеризуется *коэффициентом сжимаемости* m_0 :

$$m_0 = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma}.$$

В терминах коэффициента пористости с помощью данного параметра может быть выполнен расчет осадок. Но для дальнейшего использования решений теории упругости необходимо перейти к относительным деформациям и модулю деформации. Для этого используется промежуточный параметр – *коэффициент относительной сжимаемости* m_v . Он обратно пропорционален модулю деформации, который в данном случае будет *секущим*, так как проходит через две точки компрессионной кривой; по смыслу такой модуль близок к касательному одометрическому (в небольшом диапазоне напряжений они практически равны). Важно подчеркнуть, что в отечественных нормативных документах он обозначен так же, как и касательный – E_{oed} .

$$m_v = \frac{m_0}{1+e_0}$$

$$E_{oed} = 1/m_v$$

Однако в расчетах он напрямую не используется, так как в реальном основании у грунта есть возможность бокового расширения. Это учитывается с помощью коэффициента β , выводимого на основании граничных условий из закона Гука в общем виде – данный коэффициент зависит от коэффициента Пуассона. В результате получается модуль E_k – модуль продольной деформации по результатам компрессионного сжатия.

$$E_k = \frac{\beta}{m_v} = \frac{1+e_0}{m_0} \beta,$$

$$\beta = 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}.$$

На этом развитие и использование точных аналитических решений в действующих нормативных документах было приостановлено, вместо них перешли к эмпирическим методам.

В первую очередь, с 1974 года в отечественных нормативных документах применяются эмпирические коэффициенты m_k , разработанные И.А. Агишевым и впоследствии уточненные О.И. Игнатовой. Данные коэффициенты устанавливают корреляцию между модулями деформации по результатам штамповых и компрессионных испытаний – предполагается, что «штамповый» модуль деформации наилучшим образом отражает поведение основания при деформировании и должен использоваться при расчетах осадок.

Соответственно, для определения модуля деформации по компрессионным испытаниям использовалась формула:

$$E = E_{oed} \cdot \beta \cdot m_k$$

Впоследствии при пересмотре ГОСТ 12248-96 было принято решение не проводить вычисление коэффициента β в связи с частым отсутствием данных о фактических значениях коэффициента Пуассона. Это объясняется техническими сложностями определения данного параметра, о которых говорилось ранее в статье о трехосном сжатии. В результате были определены фиксированные значения β для различных разновидностей грунтов: 0,8 – для песков; 0,7 – для супесей; 0,6 – для суглинков и 0,4 – для глин. При этом в нормативных документах на проектирование (СНиП 2.02.01-83* и развивающие его СП) данный коэффициент уже указан как «безразмерный коэффициент, равный 0,8».

Наконец, в последней редакции СП 22.13330.2016 отсутствует упоминание коэффициента β вообще, он введен в табличные значения коэффициентов m_{oed} (бывших m_k). В результате точное аналитическое решение оказалось «смешано» с эмпирическими коэффициентами, действующими только для четвертичных отложений в фиксированном диапазоне напряжений. Во избежание ошибок необходимо помнить: основным методом определения модуля деформации по результатам компрессионных испытаний является определение *секущего* модуля E_{oed} в диапазоне напряжений 100–200 кПа. Для сопоставления со штамповыми испытаниями используется коэффициент:

$$m_{oed} = m_k \cdot \beta.$$

Тем не менее, в составе изменений №2 к СП 22.13330.2016 от 24 января 2019 представлено новое приложение П – Методические рекомендации по определению нормативных значений модуля деформации на основе компрессионных испытаний грунтов. В нем описано определение *касательного* одометрического модуля – то есть того модуля, который принято использовать за рубежом. Так же в приложении приведены корреляционные уравнения для перехода от касательного одометрического модуля к штамповому. Они составлены для различных разновидностей грунта, а в качестве параметра используют коэффициент пористости.

Таким образом, основным методом количественной оценки сжимаемости по-прежнему остается определение секущего модуля деформации и корреляция со штамповыми испытаниями, но приложение П допускает определение и касательного модуля так, как это принято в документах ISO и ASTM. Возможности аппроксимации всей компрессионной кривой логарифмической зависимостью в отечественных нормативных документах на настоящий момент не предусмотрено.

Независимо от выбранного метода интерпретации, залогом качества определения параметров сжимаемости является достоверная компрессионная кривая, полученная с использованием современного оборудования.

ООО НПП «Геотек» предлагает различное оборудование для испытаний на компрессионное сжатие дисперсных грунтов. В составе комплекса АСИС Стандарт имеются стандартные приборы для простых компрессионных испытаний по ГОСТ.

Комплекс АСИС Про предлагает оборудование для испытаний на сжатие в любом режиме – статическом, кинематическом, либо с релаксацией напряжений. Испытания проводятся в автоматизированном режиме с контролем всех параметров испытания в режиме реального времени.

Более подробную техническую информацию можно получить у специалистов компании или на сайте www.npp-geotek.ru.

Список литературы

- Васенин В.А. Исследование сжимаемости глинистых отложений в условиях компрессии для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга. Геотехника, № 5-6, 2018.
- 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.
- ГОСТ Р 58327-2018. Грунты. Метод лабораторного определения параметров релаксации.
- Мирный А.Ю. Аналитическое сопоставление методов прямого определения параметров деформируемости грунта. Геотехника, № 1, 2018.
- СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*
- Терцаги К. Строительная механика грунта на основе его физических свойств. М.: Госстройиздат, 1933.
- Ухов С.Б. и др. Механика грунтов, основания и фундаменты. М.: АСВ, 2005
- ASTM D 2435-03. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading.