

## Определение коэффициента относительного поперечного расширения



Новая статья из цикла о возможностях современного испытательного оборудования посвящена определению коэффициента относительного поперечного расширения. Долгое время данный параметр в рамках стандартной производственной лаборатории определить было практически невозможно, и в результате он до сих пор воспринимается как «справочный». Но современное оборудование делает эту задачу вполне разрешимой без дополнительных затрат.

**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.

Принято считать, что описание деформаций линейно-упругих тел требует единственного параметра – модуля упругости, о котором говорилось в предыдущей статье данного цикла. Однако это не так: модуль упругости определяет деформации только в направлении действия усилий, но не позволяет определить изменение размеров тела в перпендикулярных направлениях. Для этого необходим второй параметр – коэффициент Пуассона  $\mu$ , связывающий между собой приращения деформаций в поперечном и продольном направлениях, либо главные деформации:

$$\mu = \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3} .$$

При одноосном сжатии-растяжении знаки приращений деформации всегда будут разными (это хорошо видно на примере резиновой ленты: при растяжении ее ширина уменьшается), в связи с чем коэффициент Пуассона для абсолютного большинства материалов получается отрицательным. Для упрощения его обычно указывают по модулю. Тем не менее, существует группа материалов (*ауксетики*, например, пирит или чистые металлы), в которых это не так, но среди дисперсных грунтов таких не встречается.

Минимально возможное значение коэффициента Пуассона – ноль. Это означает, что при одноосном сжатии-растяжении не наблюдается изменение поперечного сечения, а осевые

деформации  $\varepsilon_1$  равны объемным  $\varepsilon_v$ . Такая ситуация характерна для хорошо сжимаемых материалов со слабыми внутренними связями, например, ваты или поролон. Максимальное значение 0,5 теоретически возможно только для абсолютно несжимаемых в объеме твердых тел и жидкостей, но практически такое высокое значение никогда не определяется. Более того, выполнение расчетов с таким экстремальным значением чаще всего заканчивается ошибкой из-за возникшего деления на ноль и бесконечной объемной жесткости – если действительно необходимо смоделировать такую среду, следует использовать значение 0,495–0,499.

Для линейно-деформируемых тел коэффициент Пуассона и коэффициент бокового давления связаны между собой следующим соотношением – оно справедливо при отсутствии поперечной деформации, то есть при компрессионном сжатии:

$$\xi = \frac{\mu}{1-\mu}, \text{ либо } \mu = \frac{\xi}{1+\xi}.$$

Как и в случае модуля упругости, который в случае первичного нагружения грунтов принято называть модулем общей деформации, так и коэффициент Пуассона называют в механике грунтов «коэффициентом относительного поперечного расширения». Это подразумевает, что в деформировании участвуют не только упругие связи, а происходит изменение структуры скелета грунта. Поэтому при первичном нагружении обычно определяется коэффициент относительного поперечного расширения, обозначаемый  $\nu$ , а при разгрузке – аналогичный параметр  $\nu_{ur}$ , однако и он не тождественен коэффициенту Пуассона для линейно-упругих тел.

Прямое определение коэффициента относительной поперечной деформации возможно только в приборах с измерением перемещений в двух перпендикулярных направлениях – устройствах одноосного и трехосного сжатия. При этом поперечные деформации часто имеют настолько небольшую величину, что с трудом регистрируются измерительной аппаратурой. Именно поэтому в течение длительного времени коэффициент относительной поперечной деформации считался справочным параметром и приводился в нормативных документах и справочниках для различных разновидностей дисперсных грунтов. При этом зависимость модуля общей деформации от диапазона напряжений всегда подчеркивалась, а коэффициент относительной поперечной деформации считался константой. В связи с этим у многих специалистов сформировалось мнение, что данный параметр не требует прямого определения и для выполнения расчетов не принципиален. Тем не менее, он должен определяться для каждого случая и обязательно на том же участке испытания, что и модуль общей деформации, ведь соотношение между радиальными и осевыми деформациями меняется в ходе нагружения.

Например, для рыхлых грунтов в начале девиаторного нагружения происходит доуплотнение, приращение радиальных деформаций незначительно, коэффициент относительной поперечной деформации достаточно мал. По мере приближения к предельному значению девиаторного напряжения он увеличивается и стремится к 0,5, то есть  $\Delta\varepsilon_\nu \rightarrow 0$ . В то же время, в пылевато-глинистых грунтах мягкопластичной и текучепластичной консистенции  $\nu$  изначально имеет достаточно высокие значения (то есть они малосжимаемы в объеме из-за высокой степени водонасыщения). Однако если такой грунт выдержать до завершения фильтрационной консолидации, то объемная деформация может быть относительно большой, а расчетный коэффициент относительной поперечной деформации уменьшится. Таким образом, данный параметр нельзя рассматривать

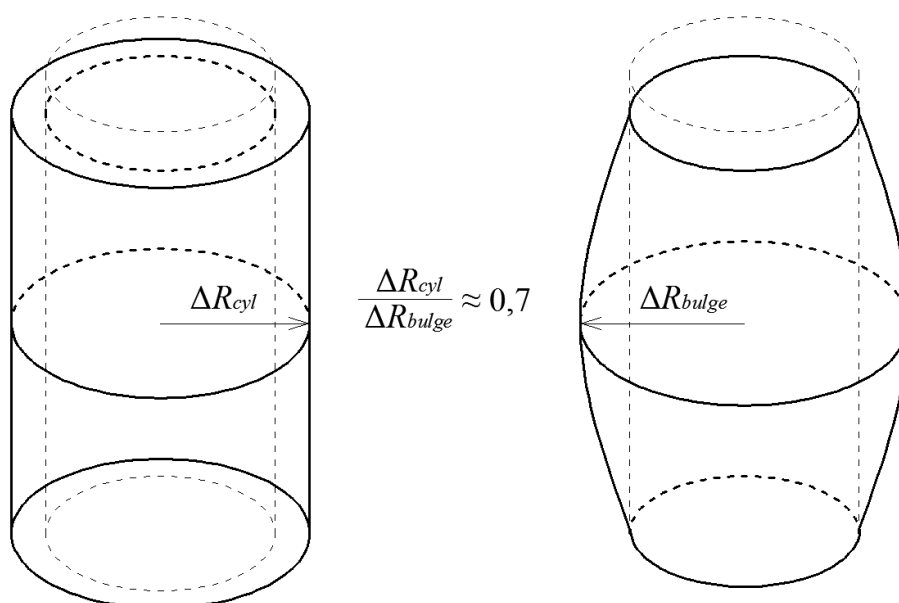
безотносительно режима испытаний, скорости нагружения, консистенции и плотности скелета грунта.

В связи с тем, что в грунтах при разгрузке остаточные деформации составляют значительную часть от общей деформации, бывает целесообразно определять механические характеристики по ветви разгрузки. При расчетах можно использовать два различных набора параметров: для первичного нагружения и для повторного нагружения/разгрузки. Несмотря на то, что определяют обычно только модуль деформации разгрузки и повторного нагружения  $E_{ur}$ , коэффициент относительной поперечной деформации также меняется. Для большинства дисперсных грунтов его величина составляет  $\nu_{ur} = 0,1 \dots 0,2$ , однако его определение на ветви разгрузки зачастую сопряжено с трудностями измерения малых величин.

Современный уровень технических возможностей испытательного оборудования и измерительной аппаратуры позволяет проводить определение коэффициента относительной поперечной деформации в рамках стандартных испытаний без дополнительных затрат. Коэффициент относительной поперечной деформации, как при первичном нагружении, так и при разгрузке, определяется как отношение приращения относительных поперечных деформаций к приращению относительных продольных деформаций, взятое по модулю. В обязательном порядке диапазон определения должен строго соответствовать диапазону определения модуля.

$$\nu = \left| \frac{\Delta \varepsilon_r}{\Delta \varepsilon_z} \right|.$$

Данная формула справедлива для случая прямого измерения радиальных перемещений при одноосном или трехосном сжатии. Необходимо помнить, что если в выбранном диапазоне напряжений наблюдается значительное изменение формы образца (отклонение от цилиндричности), то измеренное значение  $R_{bulge}$  следует привести к идеализированному цилиндру  $R_{cyl}$  с помощью коэффициента 0,7, иначе полученный параметр будет завышен. Для жестких грунтов (скальных и полускальных, твердых и полутвердых глин) этим можно пренебречь.

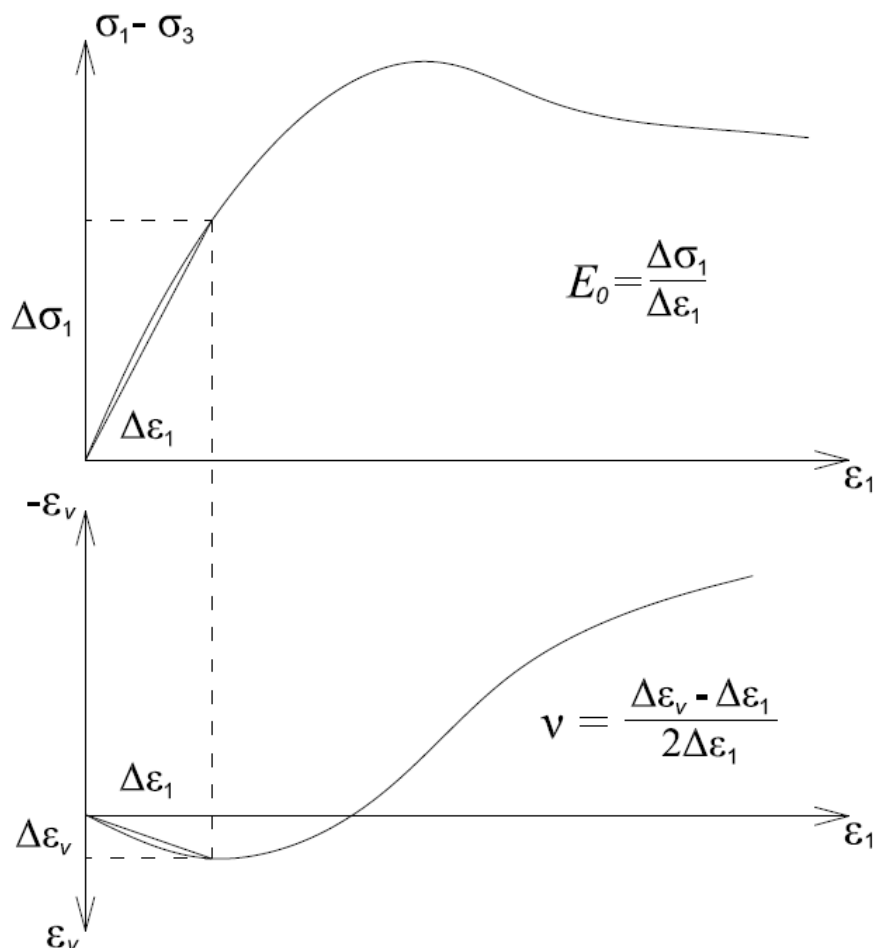


Однако чаще выполняется измерение объемных деформаций по объему жидкости, вытесненной из камеры или порового пространства, в связи с чем используется другая формула:

$$v = \left| \frac{\Delta \varepsilon_v - \Delta \varepsilon_1}{2\Delta \varepsilon_1} \right| = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \varepsilon_1} \right).$$

Несмотря на то, что в данном случае прямого измерения поперечных деформаций не проводится, в целом данный метод точнее, так как объемные деформации отражают весь объем образца, а не только небольшую его часть в середине высоты. Точность определения повышается при измерении объема жидкости, вытесненной из порового пространства, так как при этом снижается влияние качества дегазации жидкости и жесткости системы. К сожалению, для пылевато-глинистых грунтов этот способ измерения применим очень ограниченно в силу их низкой фильтрующей способности.

Как уже говорилось выше, диапазон определения коэффициента относительной поперечной деформации должен совпадать с диапазоном модуля общей деформации. Это можно представить графически с помощью зависимости объемных деформаций от осевых. На этом же графике видно, что диапазон определения  $E$  и  $v$  не должен выходить на область дилатансии, так как там пренебрегать нелинейными деформациями сдвига уже нельзя.



Отдельной задачей, возникающей в последнее время перед производственными лабораториями, является определение коэффициента относительной поперечной деформации на ветви разгрузки. Порядок измеряемых величин радиальных деформаций при разгрузке образцов дисперсных грунтов значительно уменьшается – вплоть до того, что изменение объема не регистрируется в принципе,  $\Delta \varepsilon_v = 0$ , а значит  $v_{ur} = 0,5$ . Этот же

эффект наблюдается при завышении скорости разгрузки: при упругом увеличении пористости возникает отрицательное поровое давление, жидкость всасывается. Но скорость этого всасывания подчиняется тем же фильтрационным законам, что и при первичном нагружении. Если разгрузка проводится без выдержки стабилизации или со слишком высокой скоростью, то параметры будут определены неверно.

Коэффициент относительной поперечной деформации, определяемый на ветви первичного нагружения и разгрузки, является неотъемлемым элементом механической модели, принятой в действующих нормативных технических документах. И если выполнение аналитических расчетов с использованием нормативных значений данного параметра с инженерной точностью позволяет получить удовлетворительный результат, то численное моделирование по «справочным» значениям теряет смысл.

### **Установки трехосного сжатия**

Установки трехосного сжатия производства ООО НПП «Геотек» обеспечивают определение коэффициента относительной поперечной деформации как на ветви нагрузки, так и разгрузки. Измерения относительных поперечных деформаций осуществляются при помощи специальных экстензометров или вычисляются по результатам измерений объемных деформаций. 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](http://www.npp-geotek.ru).

### **Список литературы**

- ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
- ГОСТ 26518-85. Грунты. Метод лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости при трехосном сжатии.
- ISO 17892-9:2018. Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil — Part 9: Consolidated triaxial compression tests on water saturated soils.
- Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов с комментариями к ГОСТ 12248-2010. М.: Прондо, 2014.
- Мирный А.Ю. Аналитическое сопоставление методов прямого определения параметров деформируемости грунта. Геотехника, № 1, 2018.
- Ухов С.Б. и др. Механика грунтов, основания и фундаменты. М.: АСВ, 2005