

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 μ , 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 ε_1 равны объемным ε_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 ν , а при разгрузке – аналогичный параметр ν_{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 ν 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

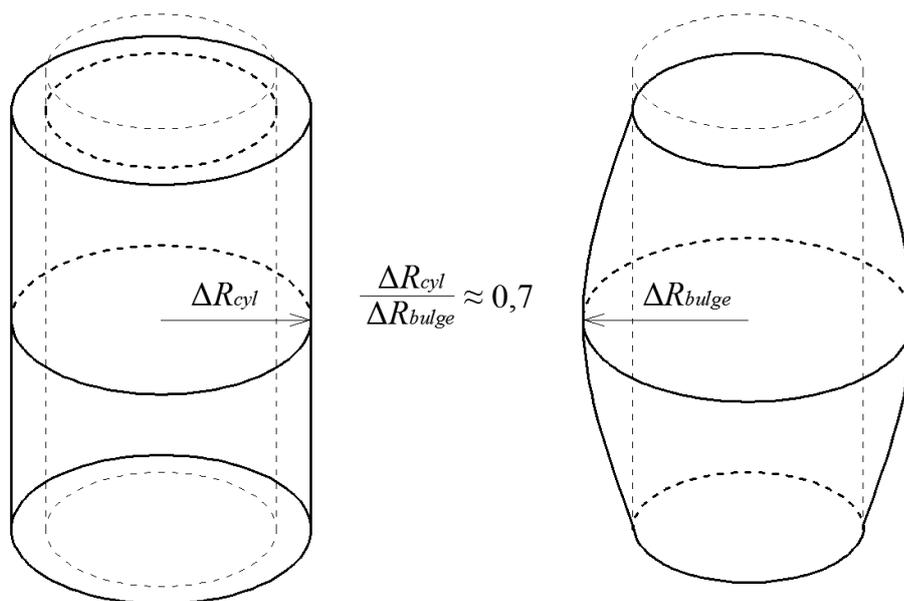
безотносительно режима испытаний, скорости нагружения, консистенции и плотности скелета грунта.

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.

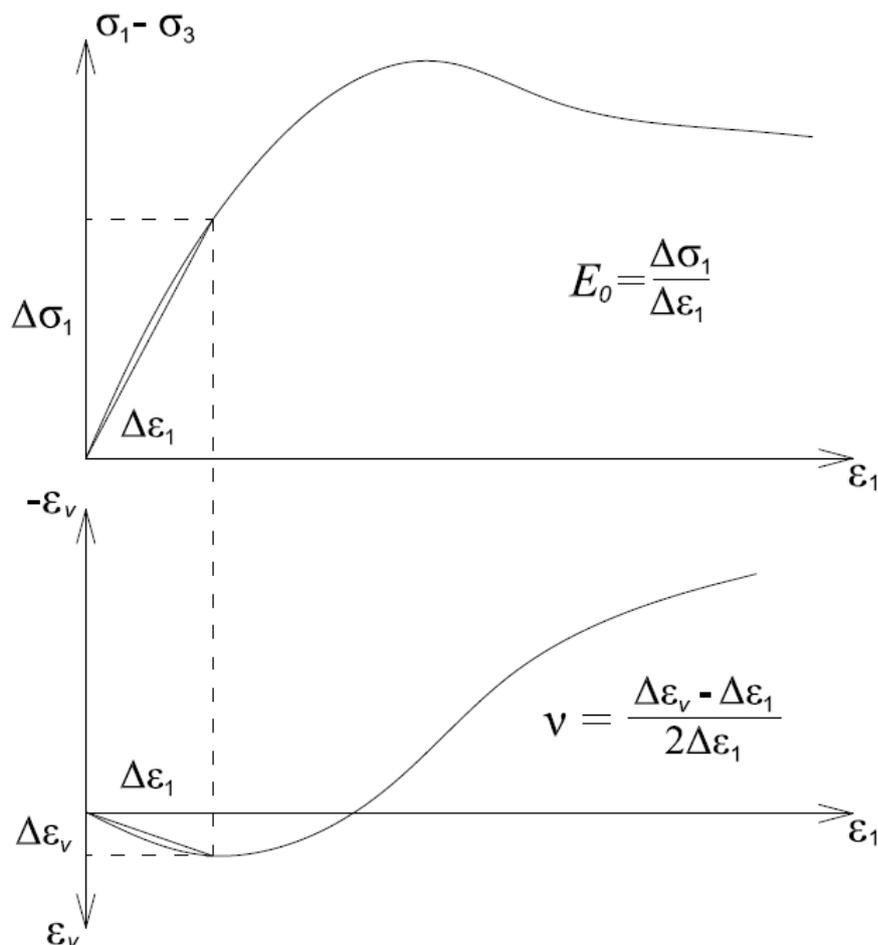


Однако чаще выполняется измерение объемных деформаций по объему жидкости, вытесненной из камеры или порового пространства, в связи с чем используется другая формула:

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

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.

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