

Компрессионное сжатие дисперсных грунтов



Компрессионное сжатие – один из старейших методов определения параметров дисперсных грунтов. За свою столетнюю историю он использовался крупнейшими исследователями и применяется в практике инженерных изысканий многих стран. Простой и доступный вид испытаний позволяет оценить сжимаемость, скорость консолидации, параметры переуплотнения. Цикл статей о лабораторных методах испытаний дисперсных грунтов продолжается работой об основных принципах испытаний компрессионного сжатия и методике проведения опыта.

Мирный Анатолий Юрьевич

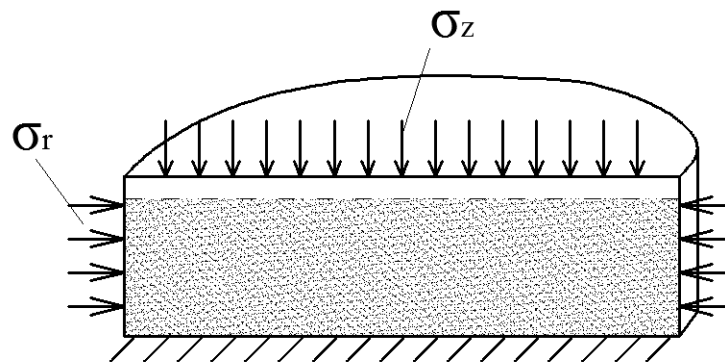
Старший научный сотрудник Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, к.т.н.

Идрисов Илья Хамитович

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

Механика грунтов в абсолютном большинстве случаев пренебрегает сжимаемостью отдельных частиц в скелете. Данное допущение вполне обосновано: даже с учетом концентрации напряжений в точке контакта, при инженерных уровнях нагрузок деформации минеральных частиц ничтожно малы по сравнению с общей деформацией скелета. Основной вклад вносит сжимаемость порового пространства - изменение объема пор вследствие перераспределения твердых частиц. Это обстоятельство предопределило использование приборов компрессионного сжатия для оценки сжимаемости.

Компрессионное сжатие является частным случаем одноосного сжатия с дополнительным граничным условием - невозможностью бокового расширения. В результате в испытуемом образце формируется достаточно однородное напряженно-деформированное состояние (НДС), в котором радиальные (поперечные) напряжения σ_r связаны с осевыми (продольными) σ_z величиной коэффициента бокового давления K_0 , поперечные деформации ε_r отсутствуют, а продольные деформации ε_z количественно совпадают с объемными ε_v :



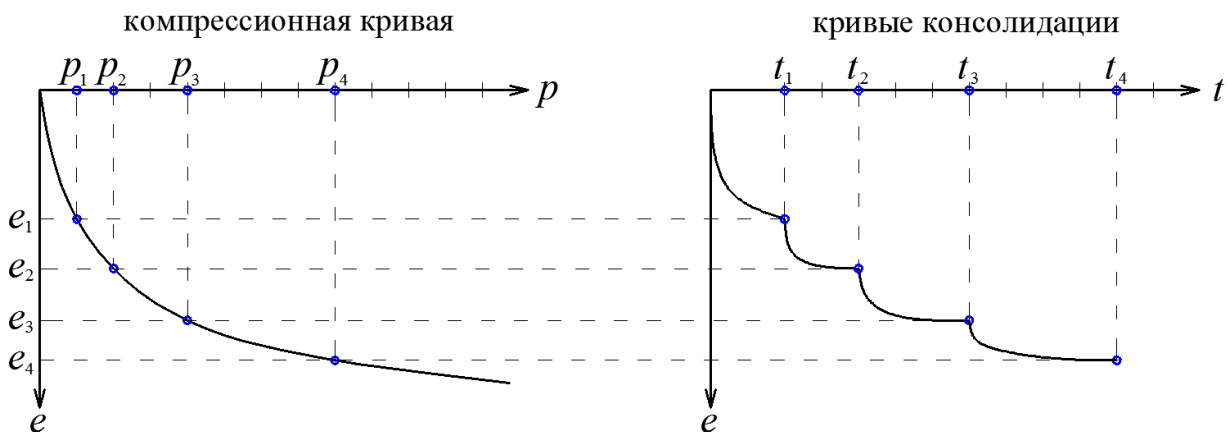
$$\sigma_r = \sigma_z \cdot K_0$$

$$\varepsilon_r = 0$$

$$\varepsilon_z = \varepsilon_v$$

Следует отметить, что данное НДС не меняется в ходе опыта, соотношения между компонентами сохраняются, а формоизменением образца можно пренебречь. Это выгодно отличает данный метод от большинства других видов испытаний, где в ходе испытаний с ростом деформаций возрастает и отклонение НДС от предполагаемого. Траектория нагружения при компрессионном сжатии так же постоянна, соотношение между объемным и сдвиговым сжатием определяется коэффициентом бокового давления среды.

В процессе компрессионного сжатия происходит уменьшение объема порового пространства и увеличение плотности скелета грунта. В случае заполнения пор только газом данный процесс проходит практически мгновенно, а в водонасыщенных грунтах - требует времени для отжатия свободной воды из пор. Объем твердых частиц при этом считается постоянным. Наиболее удобным методом описания данного процесса является оценка изменения коэффициента пористости e (мгновенного или во времени). Соответственно, результатом опыта будет зависимость коэффициента пористости от действующего напряжения - *компрессионная кривая*. Изменение коэффициента пористости во времени при постоянном напряжении (или на отдельной ступени нагрузки p) характеризуется *кривой консолидации*.



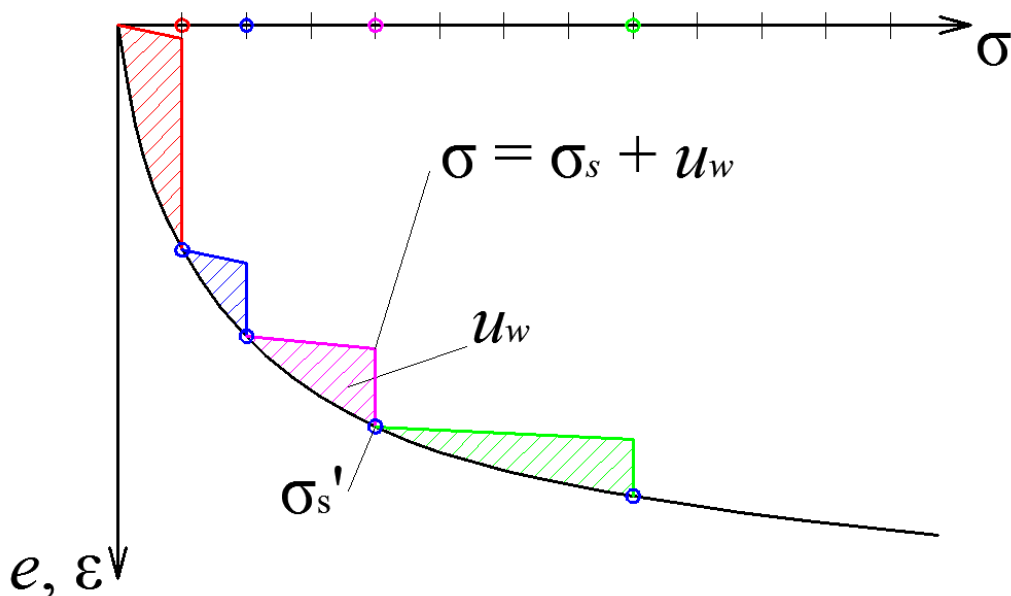
Для реализации данного метода используется особый прибор - *одометр* (от др.-греч. ὄδος «дорога» + μέτρον «мера» - «устройство для измерения пути»). Исходя из заданных граничных условий, данный прибор должен обеспечивать невозможность бокового расширения образца и равномерное распределение давления по его поверхности. Кроме того, для обеспечения возможности оттока жидкости из порового пространства, должна предусматриваться перфорация штампов или стенок прибора, использования фильтровальных элементов. Конструктивные решения могут быть различными, основное условие - высокая жесткость боковых стенок и штампа. Во избежание перекоса штампа и возможного подклинивания в большинстве современных конструкций применяется направляющий шток, обеспечивающий плоскопараллельное перемещение штампа - именно это перемещение является величиной, измеряемой в ходе опыта.

Наличие трения в приборе оказывает некоторое влияние на НДС в ходе опыта - трение образца о боковые стенки приводит к передаче части продольных напряжений на них, в результате чего в пристенных областях образец разгружается. Для снижения влияния этого эффекта на результат испытания диаметр образцов для компрессионных испытаний обычно в несколько раз превышает высоту (соотношение от 2,8 до 3,5 по ГОСТ 12248-2010). Силы трения в горизонтальном направлении, возникающие между образцом и штампом, так же искажают распределение горизонтальных напряжений, однако это не оказывает существенного влияния на результат опыта. Также действует ограничение на максимальный размер отдельных включений - не более 1/5 от диаметра образца.

Одним из первых исследователей, реализовавшим данный метод испытаний применительно к дисперсным грунтам был J. Frontard, в 1910 году опубликовавший свои результаты. В работе использовались образцы диаметром 14 дюймов и высотой 2 дюйма. Однако значительно более известны исследования К. Terzaghi и А. Casagrande, фактически, заложившие основы метода, и актуальные до настоящего времени. Ими были сформулированы теория фильтрационной консолидации и методики интерпретации результатов, до сих пор используемые в зарубежной практике инженерных изысканий.

В нашей стране основоположником использования испытаний компрессионного сжатия для определения параметров сжимаемости является Н.М. Герсеванов. Он полагал, что при первичном нагружении некоторого грунта каждому значению напряжения соответствует свое значение коэффициента пористости. Таким образом, компрессионная кривая может рассматриваться как некоторая интегральная характеристика конкретной разновидности

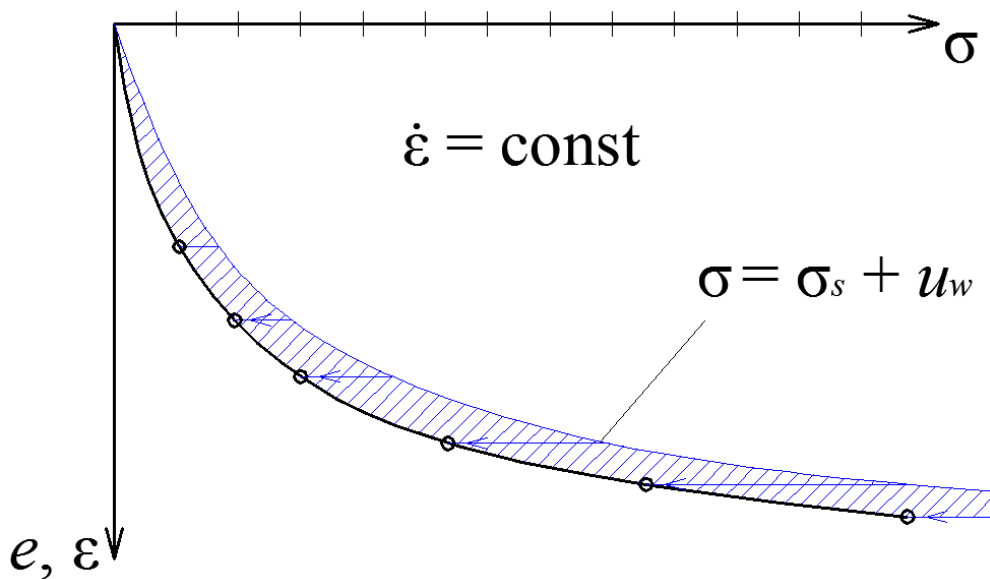
грунта, описывающая ее сжимаемость. Соответственно, задачей опыта является получение гладкой зависимости, либо отдельных точек, принадлежащих компрессионной кривой. В отечественной практике единственным регламентированным методом проведения опыта является ступенчатое статическое нагружение. Вертикальная нагрузка прикладывается ступенями, начальное значение определяется разновидностью грунта, а каждое последующее обычно равно удвоенному значению предыдущего. На каждой ступени производится выдержка до стабилизации деформаций - за это время рассеивается возникшее избыточное поровое давление u_w , и дальнейшее уплотнение скелета на данной ступени либо прекращается полностью, либо продолжается с низкой скоростью вследствие ползучести. После стабилизации деформаций фиксируется значение перемещений, далее прикладывается очередная ступень, вплоть до достижения нагрузки, указанной в задании на испытание. Таким способом может быть получено необходимое количество стабилизированных точек, принадлежащих компрессионной кривой. Построение можно проводить как для коэффициента пористости, так и для относительной деформации.



При необходимости оценки структурной прочности - прочности жестких связей между частицами в скелете грунта - в самом начале опыта нагружение осуществляется минимально возможными ступенями вплоть до достижения величины относительной деформации 0,5%. Предполагается, что жесткие связи не позволяют пористости существенно изменяться, а после их разрушения начинается уплотнение скелета. За величину структурной прочности принимается та величина нагрузки, при которой была достигнута указанная относительная деформация. Дальнейшее нагружение продолжается с постепенным увеличением ступеней.

В зарубежных странах применяется альтернативный режим испытания с кинематическим нагружением (*CRS - constant ratio of strain*). В данном режиме нагружение образца приводится не ступенчатым увеличением давления на штамп, а деформированием с постоянной скоростью деформации. Скорость определяется разновидностью грунта. В ходе принудительного деформирования идет измерение возникающей реакции, давления под штампом. Очевидно, что при таком режиме нагружения в образце неизбежно будет возникать некоторое избыточное поровое давление, которое не будет успевать

рассеиваться вследствие постоянно возрастающей нагрузки. Соответственно, получаемая посредством измерений зависимость между деформациями и напряжением под штампом не может рассматриваться как компрессионная кривая - ведь измеряются полные напряжения. В связи с этим следует проводить так же измерения порового давления, после чего вычитать его величину из измеренной реакции, и, таким образом, переходить к эффективным напряжениям. Для удобства измерения порового давления обычно проводят подобные испытания в режиме односторонней фильтрации: выход поровой жидкости происходит только на одном торце образца, а второй подключен к датчику порового давления.



Преимуществом данного метода является повышение скорости испытания - отсутствие необходимости дожидаться стабилизации позволяет выполнять опыт за несколько часов. Кроме того, данный метод позволяет получить не единичные точки, принадлежащие компрессионной кривой, а гладкую зависимость. Очень важным недостатком является ограничение применимости: метод *CRS* возможно использовать только для пылевато-глинистых грунтов с $I_l \geq 0,5$, так как в прочих случаях распределение порового давления в толще образца становится слишком неоднородным. Необходимость использования датчиков порового давления также сильно ограничивает распространение метода. Тем не менее, метод широко используется в зарубежной практике.

Третьим методом, вызывающим интерес у профессионального сообщества, является метод релаксации напряжений. Данный режим испытания сочетает в себе преимущества статического и кинематического нагружения, что позволяет сократить сроки испытания без потери качества результата и ограничения применимости. Более подробно данный метод будет рассматриваться в последующих работах.

Независимо от выбранного режима испытания, его результатом является компрессионная кривая. Полученная зависимость характеризует изменение пористости при компрессионном сжатии и может использоваться для определения параметров сжимаемости. Методика интерпретации результатов испытания постоянно пересматривается, меняются требования нормативных документов. Следующая работа данного цикла будет посвящена различным подходам к описанию компрессионной кривой и определению параметров сжимаемости.

ООО НПФ «Геотек» предлагает автоматизированный комплекс АСИС Про для испытаний методом компрессионного сжатия дисперсных грунтов. В состав комплекса входят компрессионные одометры для образцов различных размеров и нагрузочные устройства для создания вертикального силового воздействия. Приборы могут использоваться для проведения испытаний 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

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.

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.

ASTM D 4186M - 12. Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Controlled-Strain Loading.