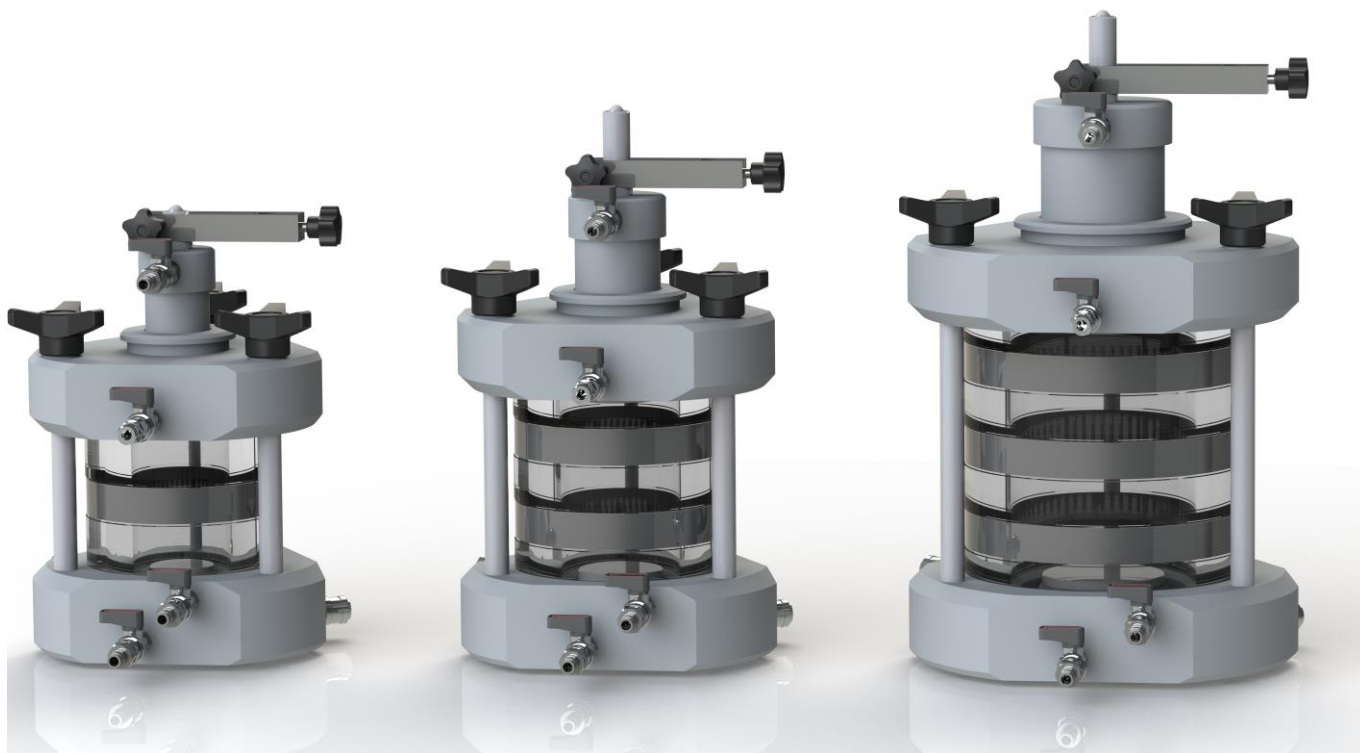


Трехосное сжатие в режиме анизотропной консолидации



Данной статьей открывается цикл публикаций, посвященных возможностям современного лабораторного оборудования в области инженерно-геологических изысканий. Каждая статья будет давать краткую информацию об актуальных методах испытаний и описывать возможности оборудования. В этом материале речь идет об испытаниях трехосного сжатия, которые дают возможность точного воспроизведения природного напряженного состояния перед началом опыта. В частности, как отмечают авторы, камеры трехосного сжатия типа «А» и типа «Б» позволяют формировать анизотропное напряженное состояние на этапе консолидации (предварительного уплотнения) образца.

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.

Все механические свойства дисперсных грунтов определяются уровнем действующих средних напряжений: чем выше среднее напряжение, тем выше жесткость и прочность. Это легко объяснить увеличением нормальных усилий на контактах между твердыми частицами и, как следствие, увеличением сопротивления взаимному смещению частиц.

Действительно, в песчаных грунтах наблюдается схожий механизм поведения. Однако для пылевато-глинистых грунтов не меньшее значение имеет анизотропия их строения, возникшая в ходе образования данных грунтов. Наличие постоянно действующих касательных напряжений (за счет разницы между вертикальным и горизонтальным бытовыми напряжениями) приводит к дополнительному взаимному смещению частиц и образованию новых контактов. Частицы и микроагрегаты при этом становятся ориентированными относительно осей действующих напряжений, что отражается на механических и фильтрационных свойствах таких грунтов.

Тем не менее, даже в изначально структурно-изотропных грунтах, например в большинстве песчаных грунтов, неравенство бытовых вертикальных и горизонтальных напряжений вызывает так называемую «наведенную анизотропию». Это означает, что деформации сдвига и прочностные характеристики песка зависят от направления главных напряжений. Более подробно с различными видами анизотропии, и ее влиянием на механическое поведение грунтов можно ознакомиться в специальной литературе.

Основным преимуществом испытаний трехосного сжатия является возможность точного воспроизведения природного напряженного состояния перед началом опыта. В частности, камеры трехосного сжатия как типа «А», так и типа «Б» позволяют формировать анизотропное напряженное состояние на этапе консолидации (предварительного уплотнения) образца. Такой режим получил название «анизотропной консолидации», и уже более полувека успешно применяется в научной и практической деятельности отечественными и зарубежными специалистами.

Тем не менее, текущая редакция ГОСТ 12248-2010 в качестве основного рассматривает режим изотропной консолидации, лишь формально упоминая о возможности проведения анизотропной (п. 5.3.5.2). Необходимо отметить, что проведение реконсолидации и консолидации исключительно в изотропном режиме является довольно грубым допущением. При использовании изотропной консолидации при давлении в камере, равном вертикальному бытовому давлению σ_{zg} , будет наблюдаться небезопасное завышение значений параметров, так как бытовое горизонтальное напряжение в большинстве случаев ниже вертикального. Если же в камере задавать давление равным горизонтальному бытовому σ_{xg} , то значения параметров будут занижаться. В текущей редакции ГОСТ 12248-2010, п. 5.3.5.3 не дает конкретных рекомендаций по способу учета бытового давления.

В настоящее время действует ГОСТ 56353-2015, регламентирующий определение динамических свойств грунтов – в п. 6.4.2 даются рекомендации по проведению анизотропной консолидации. Аналогичные рекомендации приведены в п. Б.1 СП 23.13330.2018. В приложении И 2-й редакции актуализируемого в настоящее время ГОСТ 12248.3 так же приведены рекомендации по выполнению анизотропной консолидации.

В общем случае данный режим предполагает, что вертикальные и горизонтальные напряжения при предварительном уплотнении не равны друг другу, а связаны между собой коэффициентом бокового давления покоя K_0 . Для нормально уплотненных грунтов величина $K_0 < 1$, то есть давление на штамп будет превышать давление в камере, что позволяет использовать камеры любых конструкций (типа «А» и типа «Б»). С ростом степени переуплотнения K_0 так же увеличивается и достигает единицы при коэффициенте переуплотнения $OCR \approx 3,5$. Это соответствует изотропной консолидации. Наконец, дальнейшее увеличение переуплотнения предполагает, что горизонтальные напряжения превышают вертикальные – для испытаний в таком режиме могут использоваться только

камеры типа «Б». Для камер типа «А» необходимо предусматривать жесткое соединение штока со штампом, иначе реализовать данное соотношение напряжений невозможно технически. Такие конструкции могут быть реализованы производителем оборудования по специальному заданию.

Необходимо отметить, что траектория нагружения при консолидации, при которой соотношение между горизонтальными и вертикальными напряжениями сохраняется постоянным на каждой ступени нагружения (линия K_0), является оптимальной для сохранения естественной структуры образца. Такая траектория нагружения в пространстве инвариантов « $p - q$ », где p – среднее напряжение, $(\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$, а q – девиатор напряжений, $|\sigma_1 - \sigma_3|$, представлена на рисунке 1. Если при традиционной изотропной консолидации траектория из точки O идет в точку A , а далее до точки разрушения C , то при анизотропной консолидации она совпадает с линией K_0 до точки B , то есть соответствует «естественному» нагружению образца.

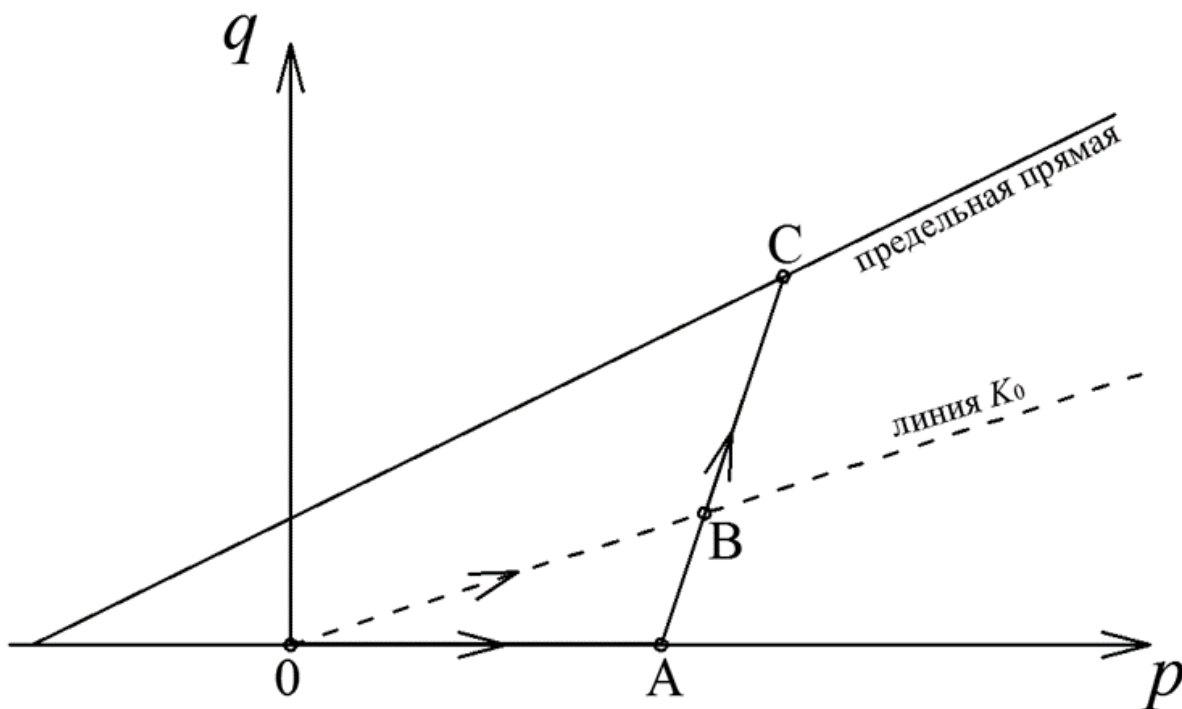


Рис. 1. Траектория нагружения при консолидации, при которой соотношение между горизонтальными и вертикальными напряжениями сохраняется постоянным на каждой ступени нагружения

Конкретная величина коэффициента бокового давления покоя для нормально уплотненных грунтов K_0^{nc} может приниматься по рекомендациям упомянутых выше нормативных документов, либо по технической литературе, например, обзорной статье Р. Мауне. Значение для переуплотненных грунтов K_0^{oc} зависит от степени переуплотнения, и должно определяться в рамках специальных испытаний – об этих испытаниях мы расскажем в следующих статьях.

В результате проведения анизотропной консолидации на момент начала девиаторного нагружения в образце уже действует некоторая величина девиатора, достигающая половины вертикального бытового давления. Это не приводит к разрушению образца, но

сокращает время девиаторного нагружения, так как для завершения опыта необходимо достичь меньшего приращения вертикального напряжения (отрезок ВС короче отрезка АВ). Следует отметить, что анизотропная консолидация образца позволяет получить в результате более плотную структуру и большее число контактов, что приводит к увеличению жесткости и сопротивления сдвигу такого образца. Это приближает моделируемое при испытаниях изменение НДС к фактическому в основании сооружения и позволяет избежать неоправданного занижения параметров.

Еще одним положительным эффектом применения анизотропной консолидации является более точное определение точки разрушения в дренированном режиме. В соответствии с требованиями действующих нормативных документов при отсутствии выраженного перегиба на графике зависимости относительных деформаций от девиатора напряжений за точку разрушения принимается точка с абсциссой $\varepsilon = 0,15$. В случае анизотропной консолидации за исходную высоту образца для расчета относительных деформаций будет принята меньшая величина $h_{k,an}$, что повышает общую чувствительность метода.

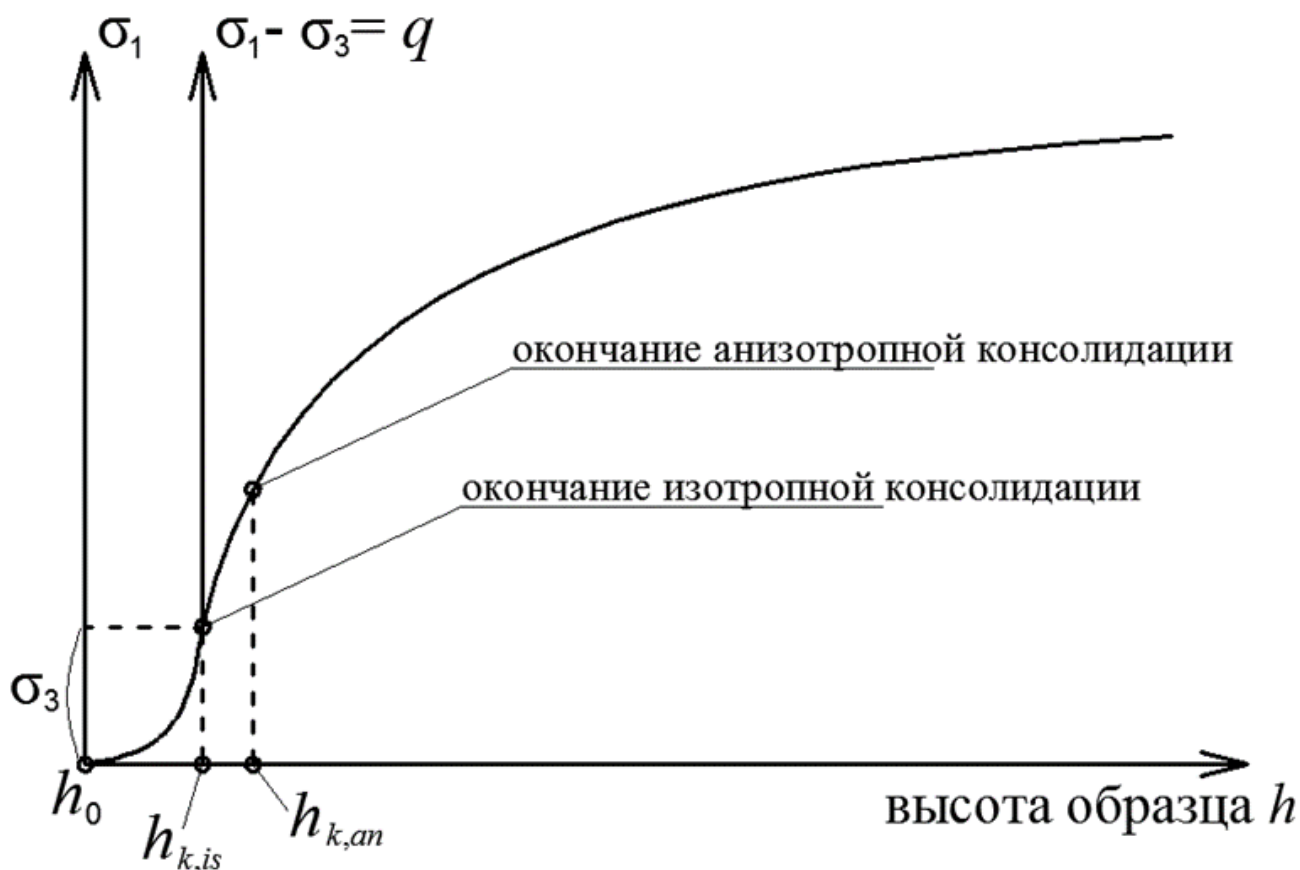


Рис. 2. Пример определения точки разрушения в дренированном режиме

Таким образом, проведение испытаний осесимметричного трехосного сжатия в режиме анизотропной консолидации обладает несколькими преимуществами:

- позволяет сохранить природную структуру дисперсных грунтов;
- повышает достоверность определяемых параметров за счет лучшего приближения к фактическому исходному НДС;

- сокращает длительность этапа девиаторного нагружения и, как следствие, общее время испытания.

ООО НПП «Геотек» предлагает **автоматизированный испытательный комплекс «АСИС Про»** для осесимметричных НН, КН, КД, К0 трехосных испытаний образцов грунта в режимах анизотропной и изотропной консолидации. В состав комплекса входят камеры объемного (тип «А») и радиального (тип «Б») сжатия для создания трехосного напряженного состояния, а также необходимое оборудование для создания вертикального силового воздействия, управления камерным и противодавлением. 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 НПП «Геотек»](#).

Список литературы

- ГОСТ Р 56363-2015. Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов.
- ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
- СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений.
- СП 23.13330.2018. Основания гидротехнических сооружений.
- 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., Идрисов И.Х. Исследования анизотропного поведения грунтов в условиях сложного напряженного состояния. Состояние вопроса. Части 1-2. Ж. Геотехника, №№ 5-6, 2017.
- Бугров А.К., Голубев А.И. Анизотропные грунты и основания сооружений. СПб: Недра, 1992.
- Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977.
- Bishop A.W., Henkel D.J. The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test. London: Edward Arnold, 1957.
- Mayne P., Kulhawy F. K_0 -OCR Relationships in Soil. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1982.