

Метод релаксации напряжений



Очередная статья из цикла о лабораторных методах испытаний дисперсных грунтов посвящена методу релаксации напряжений – режиму компрессионного испытания, позволяющему значительно сократить его длительность. В работе рассмотрены принципы метода, его достоинства и недостатки, а также требования к испытательному оборудованию.

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.

Классический режим нагружения при компрессионном сжатии – ступенчатое нагружение с выдержкой каждой ступени – требует значительного времени для проведения опыта. В случае глинистых грунтов с очень низкими фильтрационными свойствами, стабилизация только одной ступени может длиться от нескольких часов до нескольких суток. В результате опыты длятся неделями, оборачиваемость оборудования снижается, и лаборатория вынуждена увеличивать количество приборов.

Одним из способов решения данной проблемы является метод релаксации напряжений, разработанный и апробированный А.Н. Труфановым (НИИОСП им. Н.М. Герсевича). В основе метода лежит комбинация ступенчатого и кинематического режимов нагружения, о

которых рассказывалось в предыдущих статьях. Это позволяет добиться сокращения времени стабилизации без искажения результатов испытаний (по данным разработчиков метода).

С точки зрения механики процесс стабилизации деформаций во времени – реологический: развитие деформаций, вызванных степенью нагружения, происходит не мгновенно, а запаздывает относительно момента приложения нагрузки. При этом напряжения остаются постоянными, а деформации постепенно возрастают. Но если поддерживать постоянной не величину давления на образец, а некоторую достигнутую деформацию, то будет наблюдаться *релаксация напряжений*.

Релаксацией напряжений называется процесс постепенного снижения напряжений при постоянном значении деформаций. Релаксация, как и ползучесть, связана с постепенной перестройкой скелета грунта, микросдвигами на контактах между отдельными частицами. С точки зрения механики этот процесс обратен ползучести (росту деформаций при постоянных напряжениях), но в случае испытаний грунтов такое изменение граничных условий действительно приводит к ускорению процесса. Для обоснования этого эффекта необходимо сопоставить процессы стабилизации при фиксации напряжений (статическое нагружение) и деформаций (режим релаксации).

При статическом ступенчатом нагружении в момент приложения нагрузки в образце практически мгновенно возрастает поровое давление – в идеализированном случае полностью водонасыщенного грунта скелет вообще не воспринимает нагрузки. Соответственно, так же мгновенно начинается процесс фильтрационной консолидации, в котором начальное значение порового давления равно давлению ступени или немного меньше его. По мере протекания процесса идет доуплотнение образца, его пористость снижается, как и избыточное поровое давление, что в результате приводит к квадратичному снижению скорости процесса. Наконец, когда избыточное давление рассеивается, начинается процесс ползучести – взаимного смещения частиц скелета при постоянном давлении. Стабилизация деформаций обычно фиксируется после выхода ползучести на постоянную невысокую скорость.

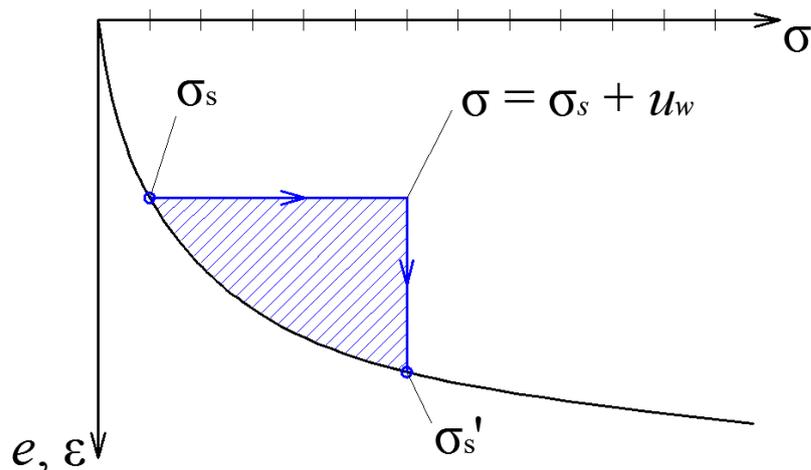


Рис. 1. Распределение порового и эффективного давления при ступенчатом нагружении

В режиме релаксации напряжений в ходе принудительного деформирования образца возникают избыточные напряжения, обусловленные сопротивлением скелета и давлением поровой жидкости. Скорость рассеивания избыточного порового давления определяется градиентом напора и пористостью образца. При кинематическом режиме нагружения

величина градиента напора на ступени может регулироваться в ходе эксперимента путем изменения скорости нагружения. Дальнейшее рассеивание избыточного порового давления происходит при постоянной пористости, так как деформации зафиксированы. В результате процесс фильтрации протекает в оптимальном режиме, время стабилизации на ступени уменьшается.

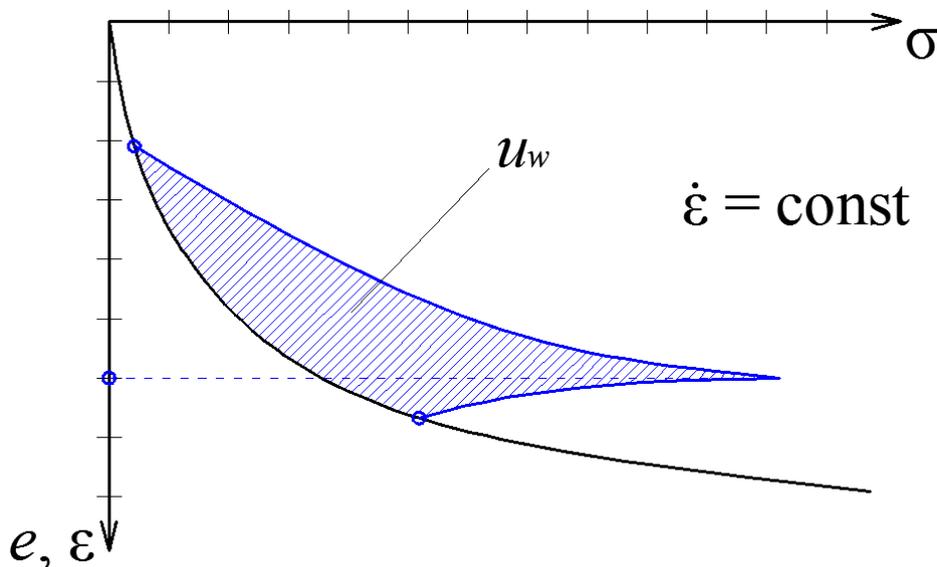


Рис. 2. Распределение порового и эффективного давления при нагружении в режиме релаксации напряжений

На представленном рисунке видно, как меняется поровое давление в ходе одной ступени нагружения и выдержки в режиме релаксации. В начале приложения ступени начинается постепенный рост порового давления, и, соответственно, процесс фильтрационной консолидации. В зависимости от выбранной скорости деформации будет меняться и предельное значение избыточного порового давления – высота «зубца». Для грунтов с низкой прочностью структурных связей следует выбирать более низкие скорости, иначе возможно разрушение структуры избыточным давлением.

После достижения заданной для данной ступени деформации начинается выдержка до стабилизации напряжений – собственно, релаксация. Теоретически, при этом деформации должны оставаться постоянными, а график напряжений – горизонтальным (пунктир на рисунке). На практике в ходе релаксации возникает некоторая дополнительная деформация образца: график опускается немного вниз. Это объясняется конечной жесткостью нагрузочного устройства и измерительной системы. При достижении максимальной нагрузки деформируется не только образец, но и рама, и динамометр. В ходе релаксации напряжений возникшие в них внутренние усилия перестают уравниваться реакцией образца, вследствие чего возникает дополнительная деформация.

Критерием стабилизации (окончания релаксации) является постоянство значений напряжений. Данная точка может считаться принадлежащей компрессионной кривой. Последовательное выполнение нескольких ступеней нагружения позволяет получить необходимое количество точек. Дальнейшая обработка компрессионной кривой может выполняться любым стандартным способом, о которых говорилось ранее. Помимо этого, автором метода разработаны способы интерпретации для определения параметров фильтрационной консолидации, а также реологических свойств.

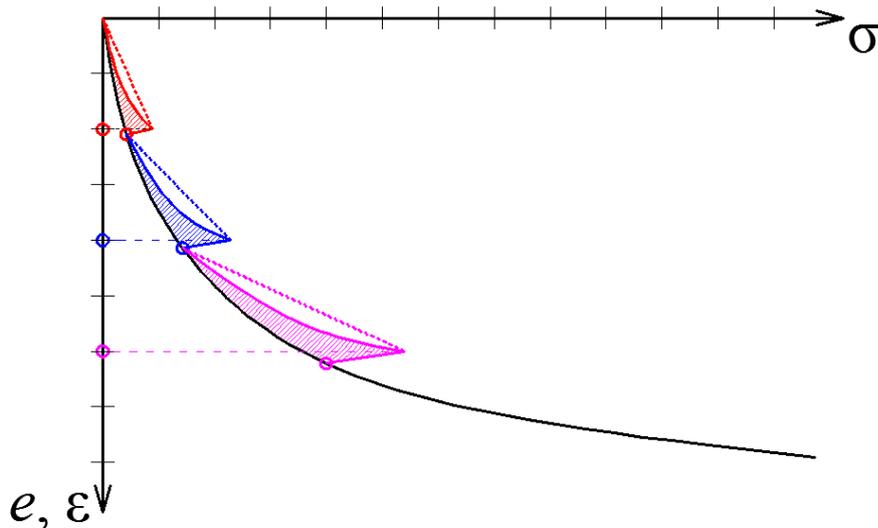


Рис. 3. Компрессионная кривая по результатам испытания методом релаксации напряжений

Несмотря на кажущуюся простоту, метод релаксации напряжений налагает определенные требования на испытательное оборудование. Во-первых, установка должна обладать возможностью кинематического нагружения – деформирования с постоянной скоростью. Для приборов трехосного сжатия это уже привычный режим нагружения, но абсолютное большинство приборов компрессионного сжатия в лабораториях нашей страны реализуют только ступенчатое статическое нагружение. При этом необходимо помнить, что автоматизированное кинематическое нагружение возможно реализовать только с помощью электромеханического привода: ни пневматический привод, ни, тем более, грузорычажный, по определению не могут передавать на образец деформации – данные типы привода работают в усилиях.

Во-вторых, установка должна обладать высокой жесткостью, это необходимо для точной выдержки условий нагружения. Это означает увеличение сечений элементов рамы и, как следствие, веса оборудования. К сожалению, полностью исключить паразитные деформации невозможно, так как все устройства измерения силы (динамометры) предполагают собственную деформацию. Тем не менее, современные системы электронного управления с обратной связью позволяют компенсировать собственные деформации на основании тарировочной кривой, ООО НПП «Геотек» имеет опыт разработки подобных алгоритмов управления.

В-третьих, методика проведения испытаний в настоящий момент закреплена только в СТО 60284311-003-2012, и доступ к ней возможен только после приобретения данного документа у правообладателя.

Автором метода проводились сопоставительные испытания методом компрессионного сжатия в режиме статического нагружения и релаксации напряжений на образцах-близнецах, показавшие хорошую сходимость. Между тем, для использования метода с различными видами грунтов необходимо экспериментально подбирать оптимальные скорости кинематического нагружения в зависимости от консистенции и разновидности грунта.

Комплекс «АСИС Про» производство ООО НПП «Геотек» обеспечивает выполнение компрессионных испытаний в режиме релаксации напряжений. В процессе испытаний обеспечивается силовое воздействие с контролем величины деформаций образца с

обратной связью. 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.

СТО 60284311-003-2012. Грунты. Метод компрессионных испытаний грунтов в режиме релаксации напряжений. НП СРО «КубаньСтройИзыскания», 2012.

Труфанов А.Н. Метод релаксации напряжений. Основания, фундаменты и механика грунтов, № 5, 2012.

Труфанов А.Н. Способ лабораторного определения деформационных характеристик грунтов: патент № 2272101. Бюллетень изобретений, № 8, 2006.

Труфанов А.Н., Чайкин А.А. Сравнительный анализ результатов компрессионных испытаний глинистых грунтов методом релаксации напряжений и по ГОСТ 12248-2010. Инженерные изыскания, № 6, 2014.