

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ПЕРЕУПЛОТНЕННЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ В ДИАПАЗОНЕ МАЛЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

НИКИТИН М.С.

Научный сотрудник лаборатории исследования влияния геологических факторов на физико-химическое закрепление грунтов геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва

mikes.nikitin@gmail.com

УСОВ А.Н.

Аспирант кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва

alexeynusov@gmail.com

ВОЗНЕСЕНСКИЙ Е.А.

Профессор кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, д.г.-м.н, г. Москва

eugene@geol.msu.ru

Аннотация

Рассмотрены особенности деформирования глинистых грунтов при трехосных испытаниях в диапазоне малых деформаций. Установлены существенные различия значений, полученных по результатам измерения полных и локальных деформаций. Показана зависимость деформируемости глинистого грунта от скорости нагружения в диапазоне малых деформаций. Доказано отсутствие пороговой деформации при развитии порового давления при статических испытаниях глинистого грунта

Ключевые слова

Малые деформации; трехосные испытания; локальные измерения; пороговая деформация

Введение

Современные технические средства позволяют несколько по-другому взглянуть на закономерности деформирования грунтов. Общепринятая и привычная модель поведения грунта предполагает, что на начальных стадиях деформирования он ведет себя упруго. Затем начинаются пластические деформации, и со временем они начинают преобладать [5]. Однако, если внимательно присмотреться к этим деформациям, можно увидеть, что собственно линейной стадии, строго говоря, и нет (рис. 1). Поэтому линейная аппроксимация развития малых деформаций очень удобна, но не отражает действительного поведения грунта. С помощью измерителей малых деформаций можно показать нелинейность графика при их величинах уже как минимум в тысячные доли процента.

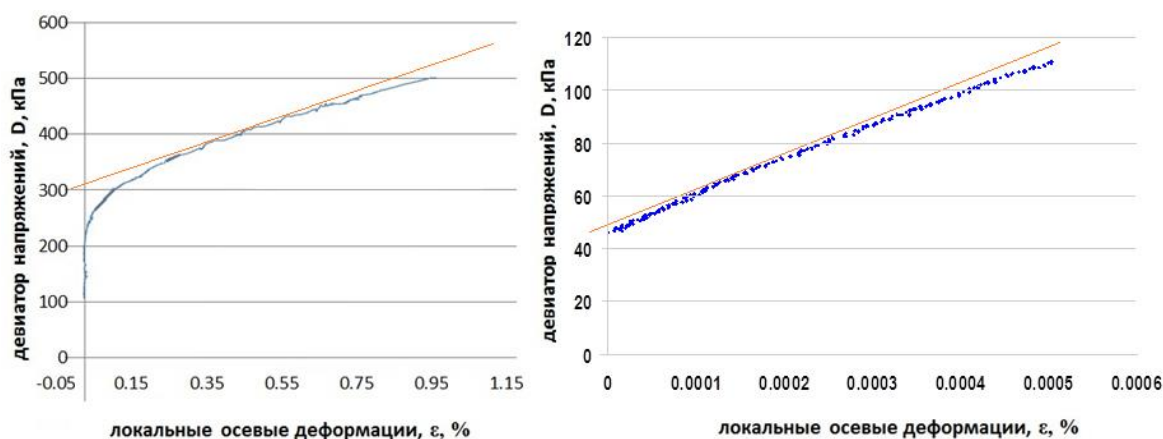


Рис. 1. Зависимость локальной осевой деформации от девиатора напряжений. Синяя линия - фактические осевые локальные деформации; оранжевая линия - линия аппроксимирующей прямой

Мировой опыт инженерных изысканий и проектирования показывает, что при возведении сооружений высокого уровня ответственности все чаще применяются новые модели для проектирования. Некоторые из них предполагают использование данных о физико-механических свойствах грунтов при малых деформациях [7, 10, 15 и др.]. Тогда сразу встает вопрос методики определения малых деформаций и, конечно, ее точности.

В современной международной практике изучения грунтов сложилось подразделение деформаций на сверхмалые (менее 10^{-5}), малые (10^{-5} - 10^{-4}), промежуточные (10^{-3}) и большие (10^{-2} и более). Малые деформации методически оправданно измерять только как *локальные*, которые измеряются непосредственно на «теле» образца. В отличие от них *полные* деформации определяются снаружи прибора, обычно по перемещению нагрузочного штампа либо пьедестала камеры трехосного сжатия. Они включают в себя деформации системы нагружения, камеры, пористых керамических и бумажных фильтров на торцах образца, небольшие зазоры между всеми этими элементами, а также погрешности, обусловленные незначительными неровностями торцов, их непараллельностью и неидеальной соосностью штампа и образца (рис. 2).

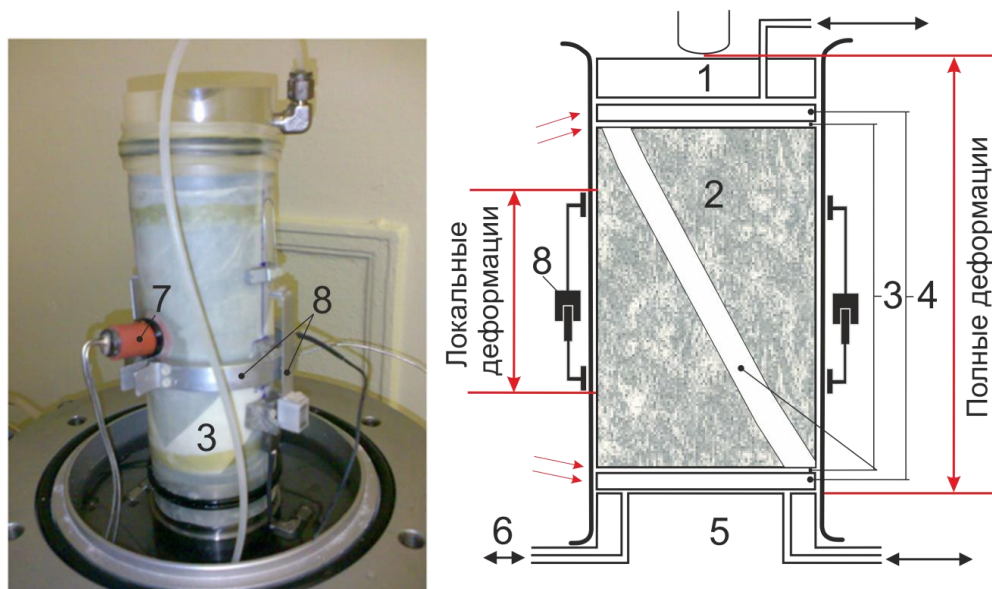


Рис. 2. Схема установки локальных датчиков деформаций и порового давления в средней части образца грунта: 1 - верхний штамп; 2 - образец грунта; 3 - фильтровальная бумага; 4 - пористый керамический фильтр; 5 - пьедестал трехосной камеры; 6 - нижняя дренажная линия (к датчику порового давления); 7 - пробник локального датчика порового давления; 8 - осевой и радиальный датчики локальной деформации

Техника измерения локальных деформаций образцов грунта начала разрабатываться с 1940-х годов. Работы таких исследователей, как А.И. Боткин [2], С. Браун [6], Дж. Бурланд и М. Саймс [8], Ю.П. Васильев [3], стали одними из первых. Было установлено, что низкие значения модуля деформации, получаемые в лаборатории (как считалось раньше, за счет эффекта нарушения структуры образцов), в действительности были результатом погрешностей измерения осевой деформации на полной базе образца. При измерениях локальных деформаций в центральной части образца на базе, которая меньше его высоты, получаемые значения жесткости ближе к тем, которые наблюдаются в основаниях реальных сооружений [1].

В данной работе освещаются некоторые методические аспекты измерения полных и локальных деформаций, а также сравнения получаемых результатов.

Объект и методика исследования

В качестве объекта исследования были выбраны переуплотненные глинистые грунты котлинского горизонта нижнего венда (V_{1kt}), отобранные на территории г. Санкт-Петербурга с глубин от 50 до 90 м. Грунты представлены суглинками серо-зеленоватыми тяжелыми пылеватыми полутвердыми.

Эксперименты проводились на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова на автоматизированной установке динамического трехосного сжатия (рис. 3) по схеме недренированных испытаний водонасыщенных образцов с контролем деформаций и порового давления (как полных, так и локальных в центральной части образца). Каждый отдельный консолидированно-недренированный эксперимент проводился в несколько последовательных стадий.

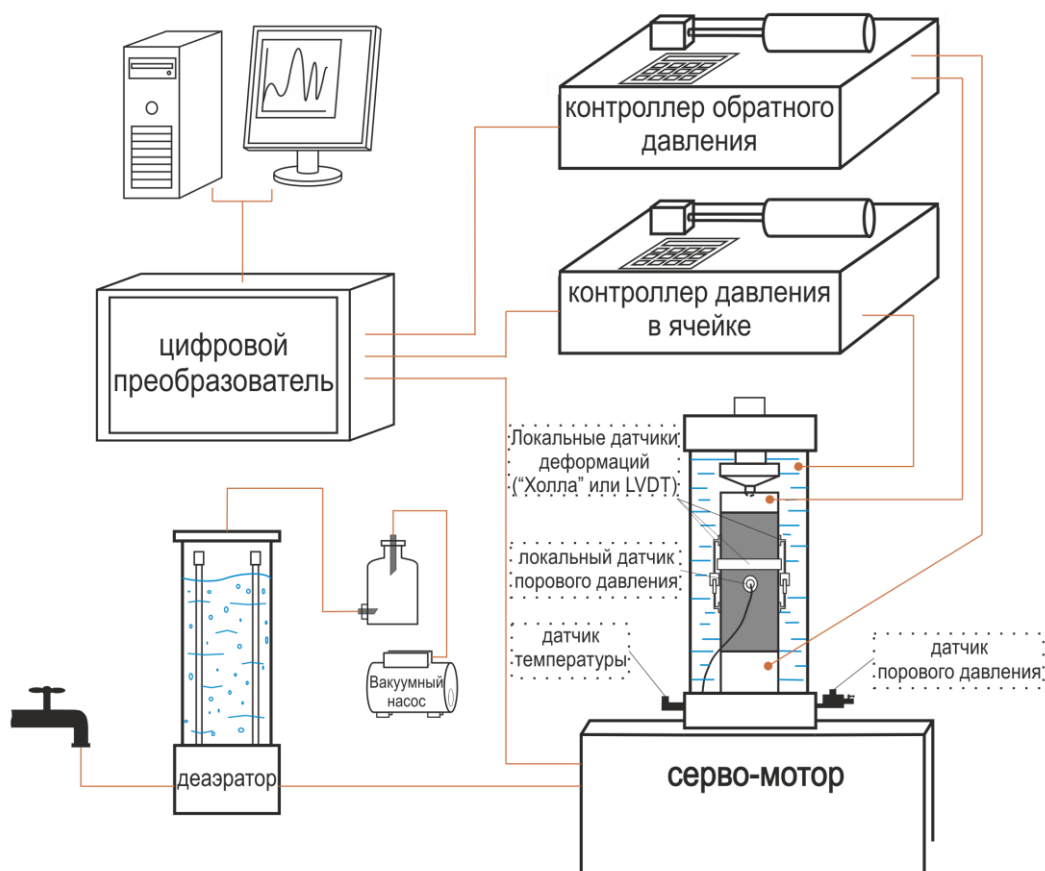


Рис. 3. Схема автоматизированной установки динамического трехосного сжатия производства компании GDS (Великобритания)

Методика заключается в проведении серий опытов с последовательными - циклическими - нагружением и разгрузкой одного и того же объема грунта с различной скоростью, но в едином для каждой серии диапазоне деформаций (рис. 4). Эксперимент планируется таким образом, чтобы на образце возможно было провести несколько серий опытов при различном уровне предельных деформаций. Минимальная скорость деформации задавалась в соответствии с критерием условной стабилизации деформаций при трехосных испытаниях по ГОСТ 12248-96 ($0,0001$ д.ед./сут, или $4,17 \times 10^{-4}$ %/ч). Последующие циклы нагрузки-разгрузки проводились при скоростях, больших, чем скорость критерия стабилизации в 5, 10, 20, 40 и 100 раз.

Подробности установки и работы датчиков локальных деформаций описаны в работе [4].

Полученные результаты и их обсуждение

Было выполнено более 25 опытов с различными значениями скорости деформации и в различных диапазонах нагрузок. Длительность опытов зависела от величины предельной деформации и составляла 20 суток с предельной деформацией 0,1%. Наименее длительное испытание заняло 87 мин. при максимальной скорости и величине предельной деформации 0,03%. В результате выполненных экспериментов были получены данные, которые можно разделить на три блока.

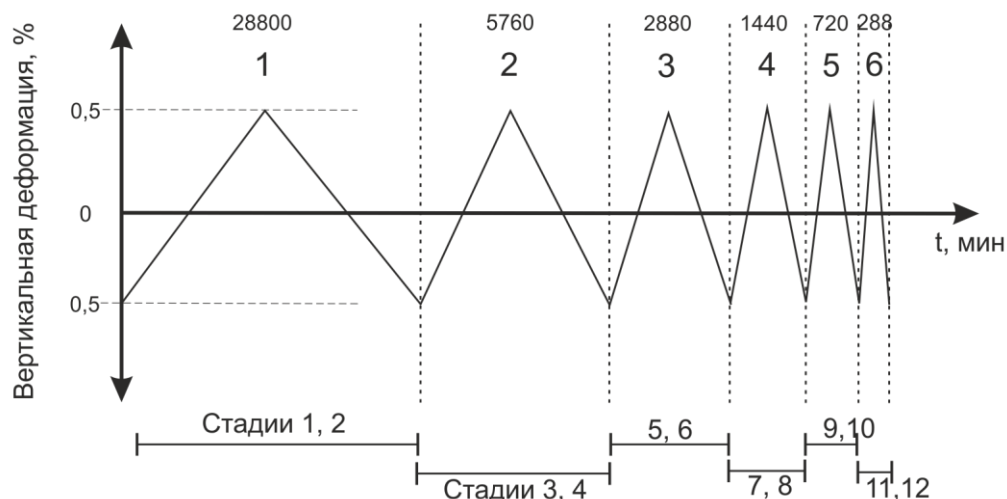


Рис. 4. Схема проведения эксперимента с диапазоном деформаций 1%. Скорость нагружения: 1 - соответствующая критерию условной стабилизации ($4,17 \times 10^{-4}$ %/ч); 2 - пятикратная; 3 - десятикратная; 4 - двадцатикратная; 5 - сорокакратная; 6 - стократная

1-й блок. Установлены существенные различия в развитии полных и локальных деформаций исследованных грунтов. Независимо от диапазона рассматриваемых деформаций и скорости деформирования образцов установлены следующие закономерности.

1-1. Существуют значительные различия измеренных величин полных и локальных деформаций исследованных грунтов. Максимальные значения локальных деформаций во всех случаях меньше полных, а минимальные по окончании разгрузки - больше (рис 5, а). Эти различия иногда достигают 2 и более крат. Это обусловлено тем, что при измерении осевой деформации на полной базе образца имеют место погрешности, связанные с описанными выше обстоятельствами, а также с разной деформируемостью грунта вблизи загруженных торцов и в центральной части. Таким образом, при измерении локальных деформаций можно получить более достоверные данные о деформируемости образца грунта.

1-2. Максимальные значения полных и локальных деформаций не совпадают по времени. Развитие локальных деформаций продолжается частично и в фазе разгрузки, что не фиксируется в

полных деформациях (рис. 5, б). Это объясняется значительным уровнем нагрузки, прикладываемой к образцу.

1-3. Развитие локальных деформаций на каждой следующей фазе нагрузки начинается не сразу, а с некоторым запозданием (рис. 5, в). Это связано с тем, что после начала фазы нагрузки происходит деформирование как грунта, так и бумажных фильтров, пористых камней, штампа, которые не фиксируются датчиками локальных деформаций. Происходящие же в это время деформации грунта настолько невелики, что разрешающей способности датчиков локальных деформаций недостаточно, чтобы их зафиксировать.

1-4. Величины остаточных деформаций при полных и локальных измерениях различаются, причем полные меньше локальных в 1,5-2 раза независимо от скорости деформирования и его диапазона (рис. 6). Объясняется это тем, что в состав полных деформаций входят и упругие деформации измерительной системы.

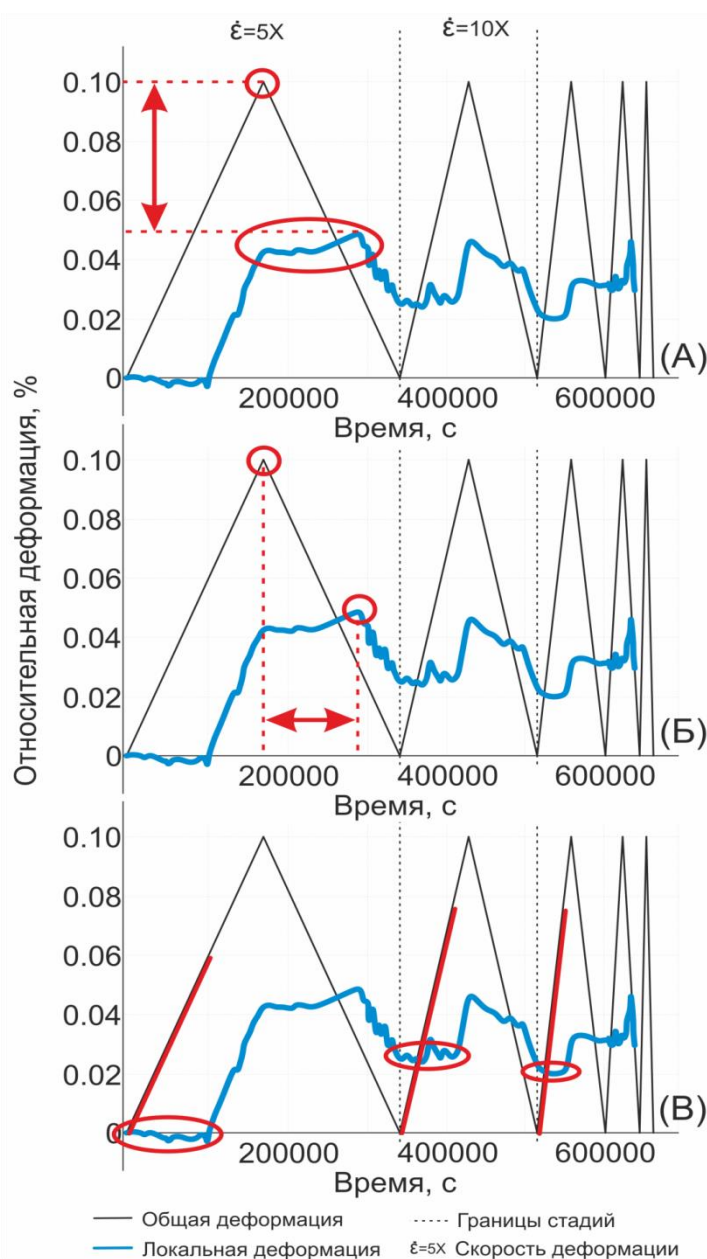


Рис. 5. Графики развития деформаций грунта во времени. Красными контурами выделены: а - несовпадения максимальных значений полных и локальных деформаций; б - несовпадения пиковых значений деформаций во времени; в - запаздывание развития локальных деформаций

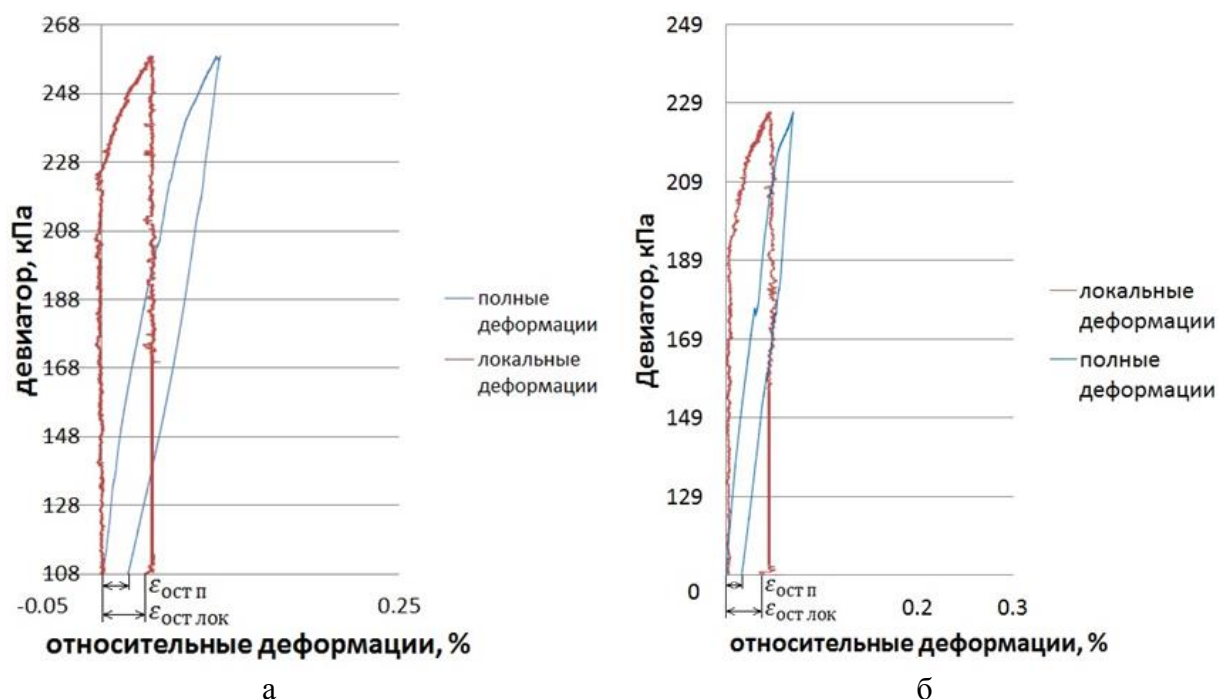


Рис. 6. Графики зависимости девиатора напряжений от относительной деформации. $\epsilon_{\text{ост п}}$ - полная остаточная деформация; $\epsilon_{\text{ост лок}}$ - локальная остаточная деформация

2-й блок. Деформируемость глинистых грунтов и в диапазоне малых деформаций существенно зависит от скорости процесса нагружения.

По результатам всех опытов были построены диаграммы нагружения (рис. 7) в координатах «относительные локальные деформации - девиатор напряжений». Характер практически всех кривых весьма схож. Они имеют характерную точку перегиба (точка А на рис. 7, а), разделяющую их на две части: первая часть кривой (ОА) отражает рост нагрузки до некоторой пороговой величины без возникновения деформаций; вторая часть (АВ) соответствует «линейному» деформированию образца грунта, по которой возможно определение модуля деформации E_u для недренированных условий по формуле:

$$E_u = \frac{\sigma_k - \sigma_n}{\epsilon_{\text{влк}} - \epsilon_{\text{влн}}},$$

где σ_k - вертикальная нагрузка на момент окончания прямолинейного участка, σ_n - вертикальная нагрузка на начальный момент прямолинейного участка, $\epsilon_{\text{влк}}$ - вертикальная локальная деформация на момент окончания прямолинейного участка, $\epsilon_{\text{влн}}$ - вертикальная локальная деформация на начальный момент прямолинейного участка.

На рисунке 7, б приведены диаграммы нагружения в координатах «относительные локальные деформации - девиатор напряжений» для одного и того же образца при разных скоростях нагружения. По различному углу наклона участка АВ всех кривых можно предположить различие характеристик деформируемости. Модуль деформации для недренированных условий E_u был рассчитан в интервале нагрузок от 0,22 до 0,26 МПа на тех образцах, для которых это было возможно. Результаты расчета приведены в табл. 1.

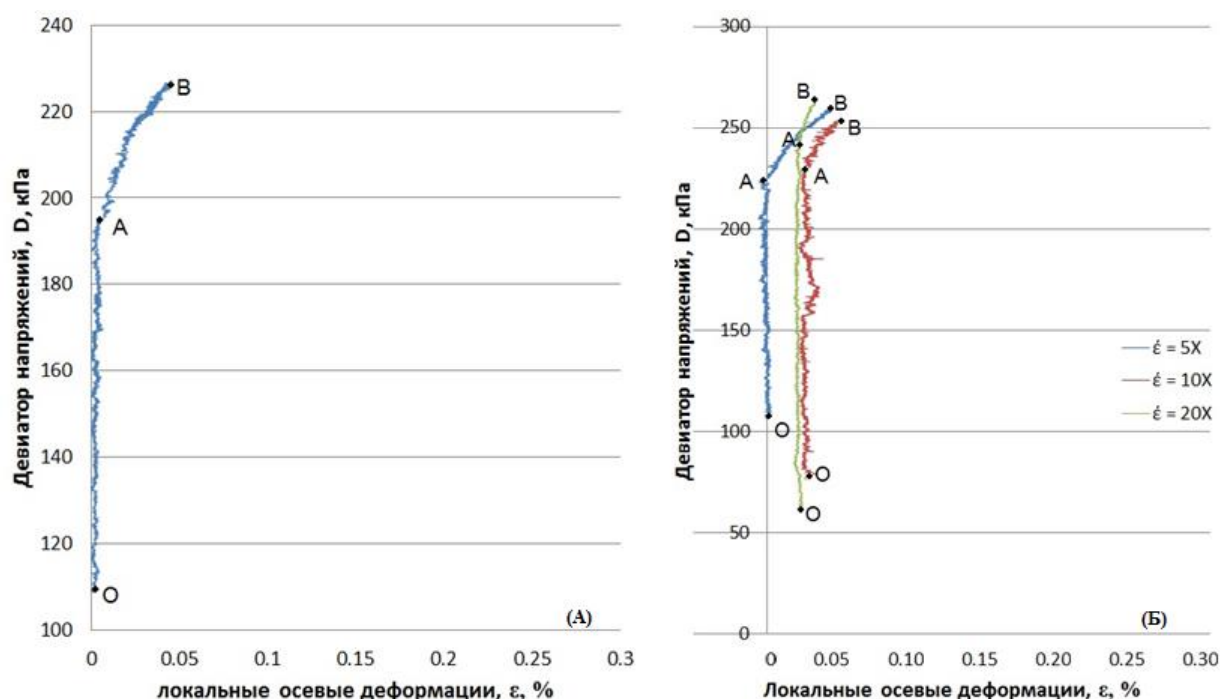


Рис. 7. Графики зависимости локальных осевых деформаций от девиатора напряжений при различных скоростях деформирования

Табл. 1

Значения модуля деформации для недренированных условий E_u (МПа) в диапазоне напряжений 0,22-0,26 МПа для образцов с различной предельной деформацией и разной скоростью нагружения

Предельная деформация, %	Скорость деформации $\dot{\epsilon}$, %/ч ($\times$), относительно скорости критерия стабилизации по ГОСТ 12248-96					
	$4,17 \times 10^{-4}$ (1 $\times$)	$2,09 \times 10^{-3}$ (5 $\times$)	$4,17 \times 10^{-3}$ (10 $\times$)	$8,34 \times 10^{-3}$ (20 $\times$)	$1,67 \times 10^{-2}$ (40 $\times$)	$4,17 \times 10^{-2}$ (100 $\times$)
0,03	164	-	-	-	-	-
0,07	-	72	-	-	-	-
0,10	-	74	101	156	-	-
1,00	-	-	31	69	79	82

Эти данные демонстрируют существенное влияние скорости нагружения и в диапазоне малых деформаций. Так, с ростом скорости деформирования величина модуля деформации увеличивается, при этом иногда до 2,5 раза. А при росте предельной деформации (при одной и той же скорости приложения нагрузки) его величина снижается (см. табл. 1). Отсюда видно, что в зоне малых деформаций проявляется выраженная нелинейность, которая может быть не видна на графике, однако хорошо прослеживается по результатам расчета модуля деформации.

3-й блок. Не было обнаружено пороговой деформации для развития порового давления. Ранее рядом зарубежных исследователей изучались закономерности поведения грунтов в области малых деформаций [11-13]. Ими было установлено, что существует предел, до которого не происходит развития порового давления. М. Вучетич [13] назвал это явление объемной пороговой деформацией сдвига. Для глинистых грунтов им был получен ее диапазон 0,03-0,06% [12].

В результате проведенного эксперимента не было обнаружено «пороговой деформации», что следует из характера изменения порового давления во времени, приведенного на рис. 8. Видно, что поровое давление растет сразу после начала деформации на каждой ступени. Диапазон 0,03-0,06% меньше задававшейся в наших опытах амплитуды деформации образцов, но эффект «пороговой деформации» не проявился. Наиболее вероятно, что это обусловлено различием условий проведения опытов. М. Вучетич [12, 13] создавал динамические условия нагружения, а мы в своей работе - монотонные. А это обуславливает различия скоростей деформации на порядки. В условиях динамического нагружения появление пороговой объемной деформации сдвига могло быть обусловлено конечной скоростью миграции влаги внутри образца под действием перепада напряжений. При больших скоростях нагружения влага в образце с малой проницаемостью не успевает мигрировать достаточно быстро, в результате чего происходит запаздывание возникновения порового давления и проявление «пороговой деформации». А при малых скоростях нагружения влага в образце успевает мигрировать и развитие порового давления происходит синхронно с нагружением. Эффект пороговой деформации не проявляется. Значит, можно предположить, что пороговая деформация является артефактом динамической схемы нагружения, то есть появляется с увеличением скорости нагружения образца грунта.

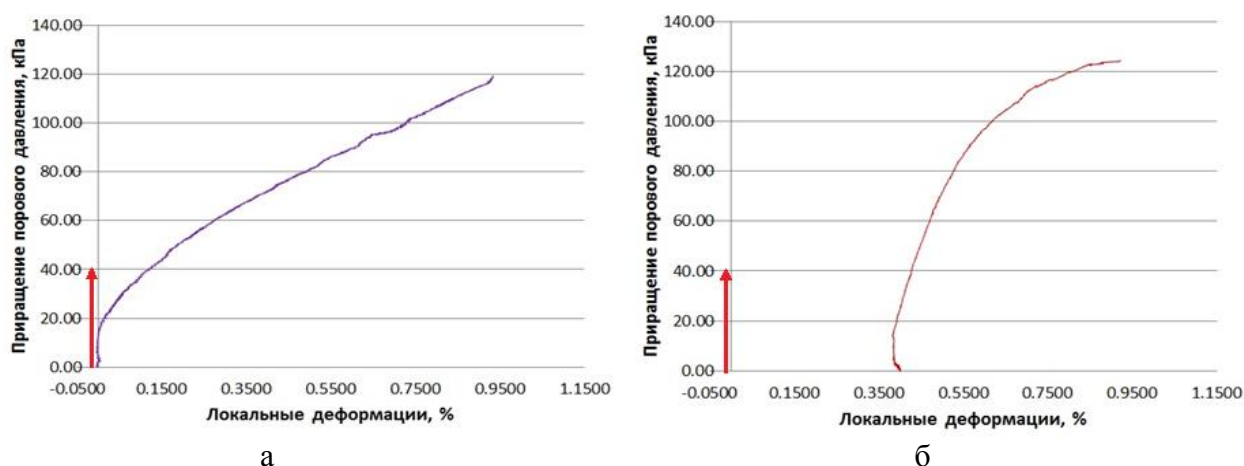


Рис. 8. Графики зависимости приращения порового давления от локальных деформаций

Выводы

На основе анализа полученных результатов можно отметить несколько важных методических аспектов измерения деформаций глинистых грунтов в диапазоне малых деформаций.

1. Установлены следующие существенные различия в развитии полных и локальных деформаций исследованных грунтов независимо от диапазона рассматриваемых деформаций и скорости деформирования образцов:

- общие величины максимальных и минимальных значений деформаций по результатам полных и локальных измерений различаются до 2,5 раза, а их пики по времени не совпадают;
- развитие деформаций по результатам локальных измерений отстает от их роста по данным измерений на полной базе образца, что вызвано значительным уровнем нагрузки, прикладываемой к образцу;
- заметно различаются доли остаточных деформаций при полных и локальных измерениях - в 1,5-2 раза.

Все отмеченные эффекты обусловлены тем, что при измерении осевой деформации на полной базе образца имеют место погрешности, связанные с деформируемостью штампа и фильтровальной бумаги, влиянием торцов и возникающих местных напряжений, непараллельностью и несоосностью штампа и образца. При измерении локальными датчиками

удается избежать всех этих погрешностей и неточностей и получить более достоверные данные о деформируемости грунта.

2. Показана зависимость деформируемости глинистых грунтов от скорости нагружения в диапазоне малых деформаций. По результатам расчетов модулей деформации для недренированных условий E_u в одинаковых диапазонах нагрузок от 0,22 до 0,26 МПа видны закономерное увеличение деформируемости при увеличении скорости нагружения (в одном и том же диапазоне деформаций), а также снижение модуля деформации при увеличении предельной деформации и неизменной скорости нагружения.

3. В результате проведенных экспериментов установлено отсутствие пороговой для развития порового давления деформации, ранее описанной другими авторами. Видимо, она является последствием выбора динамической схемы испытаний, так как при больших скоростях нагружения влага внутри образца не успевает мигрировать достаточно быстро. При малых скоростях приложения нагрузки миграция происходит синхронно с нагружением и «порог» не проявляется.

- *Исследования поддержаны грантом РФФИ № 13-05-01048-а «Закономерности деформирования дисперсных грунтов в диапазоне малых деформаций».*

Список литературы

1. *Болдырев Г.Г.* Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. Пенза: Изд-во ПГУАС, 2008. 696 с.
2. *Боткин А.И.* О прочности сыпучих и хрупких материалов // Известия НИИ гидротехники. М., 1940. Т. 26. С. 205-236.
3. *Васильев Ю.П.* Расчетно-экспериментальный метод определения деформационных характеристик грунтов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л.: Изд-во ЛПИ им. М.И. Калинина, 1989. 22 с.
4. *Вознесенский Е.А., Никитин М.С., Усов А.Н.* Методические аспекты измерения порового давления в глинистых грунтах в диапазоне малых деформаций // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2011. № 6. С. 46-51.
5. *Ухов С.Б., Семенов В.В., Знаменский В.В., Тер-Мартirosян З.Г., Чернышев С.Н.* Механика грунтов, основания и фундаменты: учебник / под ред. С.Б. Ухова. М.: АСВ, 1994. 527 с.
6. *Brown, S. F. and, An Instrumented Triaxial Cell for Cyclic Loading of Clays / S.F. Brown, G. Austin, R.F. Overy // Geotechnical Testing Journal. 1980. V. 3. № 4. P. 145-152.*
7. *Burland J.B.* Ninth Laurits Bjerrum memorial lecture: «Small is beautiful» - the stiffness of soils at small strains // Canadian Geotechnical Journal. 1989. V. 26. № 4. P. 499-516.
8. *Burland J.B., Symes M.* Simple axial displacement gauge for use in the triaxial apparatus // Geotechnique. 1982. V. 32. № 1. P. 62-65.
9. *Clayton C.R.I.* Stiffness at small strain: research and practice // Geotechnique. 2011. V. 61. № 1. P. 5-37.
10. *Clayton C.R.I., Khattrush S.A., Bica A.V.D., Siddique A.* The use of hall effect semiconductors in geotechnical instrumentation // Geotechnical Testing Journal. 1989. V. 12. P. 69-76.
11. *Dobry, R., Ladd, R. S., Yokel, F. Y., Chung, R. M., and Powell, D.* Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method // Nat. Bureau of Standards Build. Sci. Series. 1982. 138. Washington, D. C.
12. *Hsu C, Vucetic M.* Threshold shear strain for cyclic pore-water pressure in cohesive soils // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2006. V. 132. № 10. P. 1325-1335.
13. *Hsu C, Vucetic M.* Volumetric threshold shear strain for cyclic settlement // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004. JAN. P. 58-70.
14. *Jardine R.J., Fourie A., Maswoswe J., Burland J.B.* Field and laboratory measurements of soil stiffness // Proceedings of the 11-th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. San Francisco, 1985. V. 2. P. 511-514.

15. *Jardine R.J., Symes M.A., Burland J.B.* The measurement of soil stiffness in the triaxial apparatus // *Geotechnique*. 1984. V. 34. № 3. P. 323-340.
16. *Matasovic N, Vucetic M.* A pore pressure model for cyclic straining of clay // *Soils and Foundations*. 1992. V. 32. № 3. P. 156-173.

Выходные данные: Журнал «Инженерные изыскания», №5-6/2014, С. 14-18