

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ НАРУШЕНИЯ ПРИРОДНОЙ СТРУКТУРЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ОБРАЗЦОВ ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ НА ТЕРРИТОРИИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА И ОКРЕСТНОСТЕЙ

<https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-6-48-65>

УДК 624.131

Фото: Crawford C.B., 1963. Cohesion in an undisturbed sensitive clay. Geotechnique, No. 13, pp. 132–146.



ВАСЕНИН В.А.

Институт «Геореконструкция», г. Санкт-Петербург, Россия,
 vavasenin@mail.ru
 Адрес: Измайловский пр., д. 4, оф. 414, г. Санкт-Петербург, 190005,
 Россия

Аннотация

В отечественных нормативных технических документах отсутствуют критерии оценки степени нарушения природной структуры лабораторных образцов связных дисперсных грунтов. В то же время такие грунты широко представлены в различных регионах страны, в частности, в Санкт-Петербурге. В работе обсуждаются различные критерии оценки степени нарушения природной структуры лабораторных образцов, а также рассмотрены различные методы восстановления их прочности. Основное внимание уделено оценке степени нарушения природной структуры лабораторных образцов при выполнении одометрических испытаний. Приведены статистические результаты такой оценки для более 3000 одометрических испытаний грунтов четвертичного возраста различного генезиса на основе деформационных критериев. Оценка качества лабораторных образцов производилась на 130 площадках выполнения инженерно-геологических изысканий (различными организациями) в г. Санкт-Петербурге в период с 2003 по 2018 гг. По результатам статистического анализа показано, что качество образцов по критерию относительного изменения их коэффициента пористости при действующем эффективном бытовом напряжении соответствует градации «плохое» или «очень плохое» (по шкале, предложенной Т. Луппе и др.). Описаны основные причины нарушения природной структуры образцов (отбор без грунтоносов, нарушение правил отбора и хранения, а также транспортировки образцов). По результатам статистического анализа деформационных параметров нарушения природной структуры лабораторных образцов грунта при выполнении комплексных инженерно-геологических изысканий в Санкт-Петербурге сделан вывод о невозможности использования результатов испытаний этих образцов для выполнения геотехнических расчетов по современным моделям механики грунтов без специальных процедур корректировки.

Ключевые слова:

гляциальные; постгляциальные отложения; инженерно-геологические условия Санкт-Петербурга; критерии нарушения природной структуры лабораторных образцов; одометрическая компрессия; компрессионный индекс; недренированная сдвиговая прочность

Ссылка для цитирования:

Васенин В.А., 2018. Статистическая оценка параметров нарушения природной структуры лабораторных образцов глинистых отложений при инженерно-геологических изысканиях на территории Санкт-Петербурга и окрестностей. Инженерная геология, Том XIII, № 6, с. 48–65, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-6-48-65>

EVALUATION OF DISTURBED PARAMETERS OF THE NATURAL STRUCTURE OF THE LABORATORY SAMPLES OF CLAY DEPOSITS DURING ENGINEERING AND GEOLOGICAL SURVEYS IN SAINT-PETERSBURG TERRITORY AND NEAREST AREAS

VLADISLAV A. VASENIN

«Georeconstruction» Institute, Saint-Petersburg, Russia, vavasenin@mail.ru
Address: Off. 414, Bld. 4, Izmailovsky Ave, 190005, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

In Russian technical standards there are no criteria for the natural structure disturbance degree of laboratory samples of coherent dispersed soils. At the same time, such soils are widely represented in various regions of the country, in particular, in St. Petersburg. The paper discusses various criteria for estimating the degree of natural structure disturbance of laboratory samples, and also considers various methods for restoring the strength of samples. The main attention is paid to the evaluation of the degree of violation of the natural structure of laboratory samples when performing oedometer tests. The statistical results of such an assessment are given for more than 3,000 oedometer tests of quaternary soils of different genesis based on deformation criteria. The quality assessment of laboratory samples was evaluated at 130 sites performing engineering and geological surveys (by various organizations) in St. Petersburg from 2003 and 2018. According to the results of statistical analysis, it was shown that the quality of samples by the criterion of the relative change in the porosity coefficient at the effective household stress corresponds to "poor" or "very poor" (according to the scale proposed by T. Lunne and others). The main causes of the violation of the natural structure of the samples (sampling without primers, violation of sampling and storage rules, as well as transportation of samples) are described. Based on the results of a statistical analysis of the deformation parameters of laboratory soil samples during the implementation of complex geological survey in St. Petersburg, it was concluded that it is impossible to use the test results of these samples for performing geotechnical calculations using modern models of soil mechanics without special correction procedures.

Key words:

glacial; postglacial deposits; engineering-geological conditions of Saint-Petersburg; criteria of disturbance laboratory samples; oedometer compression; compression index; undrained shear strength

For citation:

Vasenin V.A., 2018. Evaluation of disturbed parameters of the natural structure of the laboratory samples of clay deposits during engineering and geological surveys in Saint-Petersburg territory and nearest areas. *Engineering Geology*, Vol. XIII, No. 6, pp. 48–65, <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-6-48-65>

Введение

Основные физико-механические расчетные параметры лабораторных образцов грунтов в значительной степени зависят от качества их отбора и подготовки для испытаний. Природа эффекта нарушения структуры лабораторного образца заключается в потере части эффективных напряжений в грунтовом скелете. Эти потери особенно критичны для образцов глинистых грунтов с низкими значениями коэффициента переуплотнения, распространенных среди четвертичных отложений г. Санкт-Петербурга и ближайших окрестностей. Как правило, в каждом отчете по результатам инженерно-геологических изысканий в Санкт-Петербурге указывается, что нормативные значения физико-механических характеристик грунтов определены по результатам лабораторных испытаний грунтов ненарушенной структуры. При этом в отечественных нормативных документах отсутствуют параметры оценки нарушения природной структуры лабораторных образцов грунта, а также шкалы градации степени нарушения природной структуры с классификацион-

ными требованиями для выполнения различных видов лабораторных испытаний.

Степень сохранности природного сложения грунтов в первую очередь будет зависеть от качества отбираемых монолитов. В свою очередь качество лабораторных монолитов будет влиять на точность определения физических свойств грунтов. Работы отечественных изыскателей и геотехников в направлении разработки специального оборудования для отбора образцов начались на рубеже 60-х годов прошлого века. Был утвержден ГОСТ 12071-66 «Грунты. Отбор, упаковка, хранение и транспортирование образцов». Уже к 1970 г. трудами специалистов ПНИИИС Госстроя СССР^{1,2} были сформированы требования к конструкциям грунтоносных нормального ряда (вибрационный/забивной, обуривающий, вдавливаемые), а также приведены соответствующие рекомендации по отбору монолитов из буровых скважин согласно «Рекомендации по отбору монолитов грунтоносами нормального ряда».

Вопрос нарушения природной структуры лабораторных образцов при отборе, начиная с 70-х гг. прошлого

¹ Ребрик Б.М., 1973. Бурение скважин при инженерно-геологических изысканиях. Недра, Москва.

² Тычина Н.И., 1971. Исследования влияния конструкций грунтоносов и способов их погружения на свойства грунтов в монолитах, отбираемых из буровых скважин. Автореф. дис. ... канд. техн. наук, ПНИИИС, Москва.

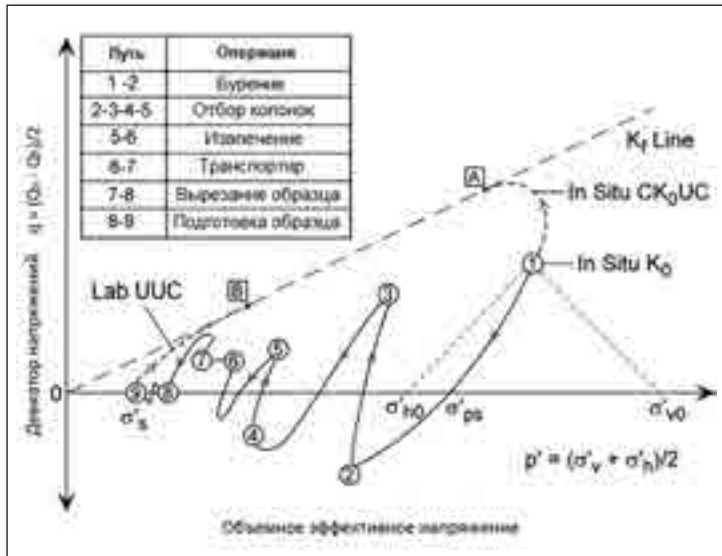


Рис. 1. Ожидаемый путь изменения напряжений при отборе и подготовке образцов глинистого грунта с низкими значениями степени переуплотнения [7, 11, 13]

Fig. 1. The expected path of stress change in the selection and preparation of samples of clay soil with low values of the degree of compaction [7, 11, 13]

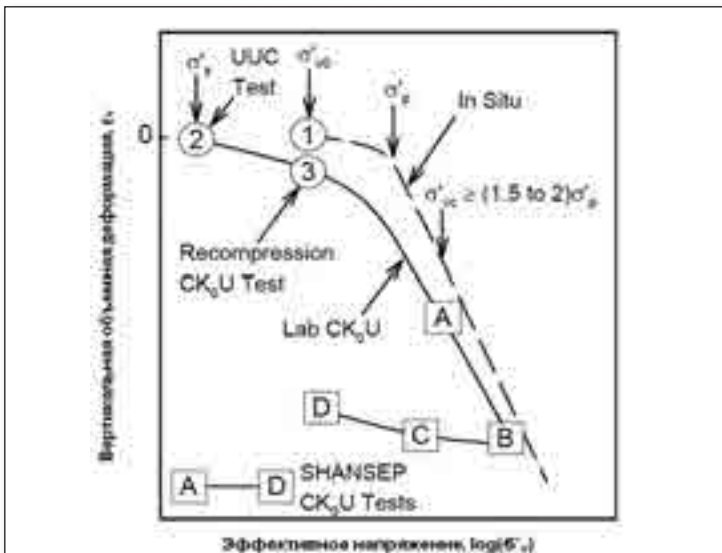


Рис. 2. Схема консолидационной процедуры при выполнении K_0 — консолидированно-недренированного трехосного испытания (CK_0U) С.С. Ладда [13]

Fig. 2. Consolidation procedure scheme when performing K_0 — consolidated undrained triaxial testing (CK_0U) C.C. Ladd [13]

века, активно исследовался в Ленинграде на кафедре оснований и фундаментов ЛИСИ под руководством Б.И. Далматова и А.В. Голли, в Горном институте³, ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева и др. Результатом этих исследований были разработки целого ряда эффективных

конструкций грунтоносов [2, 3, 4], а также специально-геотехнического оборудования для выполнения полевых и лабораторных испытаний, которые использовались преимущественно для выполнения специализированных научных исследований свойств грунтов. Как правило, эти исследования выполнялись на отдельных строительных площадках и сопровождалась целым рядом специализированных натуральных наблюдений с расчетным обоснованием^{4, 5, 6}.

Концепции учета нарушения природной структуры лабораторных образцов при испытаниях

Ряд исследователей [6, 11, 13] обратили внимание на процесс деградации эффективных напряжений при различных операциях на этапах бурения, отбора, извлечения, транспортировки, вырезания и подготовки образцов (рис. 1). Потеря эффективных напряжений в скелете на общем пути подготовки образца будет связана также со сдвиговыми и объемными деформациями. В результате такой деградации недренированная сдвиговая прочность образца снизится. По результатам компрессионных испытаний ряд исследователей [17] отмечает рост порового давления при действии сдвиговых напряжений на образец. Значительное увеличение поровых давлений отмечается, в первую очередь, для грунтов с невысокими значениями числа пластичности. К таким грунтам относятся гляциальные и постгляциальные разности, слагающие четвертичную осадочную толщу в Санкт-Петербурге [1].

Различными исследователями были предложены несколько концепций для оценки степени нарушения природной структуры лабораторных образцов при трехосных испытаниях. Кратко рассмотрим основные параметры оценки и концепции.

Среди наиболее интересных концепций оценки степени нарушения природной структуры (D) можно выделить концепцию образца «отличного» качества [11]. Концепция заключается в оценке величины изотропного эффективного давления in-situ (см. рис. 1):

$$\sigma'_{ps} = \sigma'_{v0} (K_0 + A_u (1 - K_0)), \tag{1}$$

где A_u — параметр Скемптона при полном водонасыщении,

$$A_u = \frac{\Delta u - \Delta \sigma_h}{\Delta \sigma_v - \Delta \sigma_h}, \tag{2}$$

K_0 — коэффициент бокового давления в состоянии покоя; Δu — изменение порового давления при изменении вертикальной $\Delta \sigma_v$ и горизонтальной $\Delta \sigma_h$ компонент напряжений. После определения эффективных напряжений при испытании σ'_s , возможно выполнение различных оценок степени нарушения структурных связей — D .

³ Дашко Р.Э., 1986. Теория и практика инженерно-геологического анализа и оценки водонасыщенных глинистых пород как основания сооружений. Дисс. ... докт. техн. наук, ЛГУ, Ленинград.

⁴ Лисюк М.Б., 1986. Прогноз осадок фундаментов с учетом изменения природного напряженного состояния пылеватоглинистых грунтов. Дисс. ... канд. техн. наук, ЛИСИ, Ленинград.

⁵ Парамонов В.Н., 1988. Развитие упруго-пластических деформаций основания, сложенного слабыми пылеватоглинистыми грунтами, в процессе фильтрационной консолидации. Дисс. ... канд. техн. наук, ЛИСИ, Ленинград.

⁶ Шашкин А.Г., 1991. Изменение напряженно-деформированного состояния пылеватоглинистых грунтов оснований и сооружений при квазистатическом нагружении. Дисс. ... канд. техн. наук, ЛИСИ, Ленинград.

Степень нарушения структурных связей можно оценивать нормализованным соотношением типа, предложенного С.С. Ladd [11]:

$$D = \sigma'_s / \sigma'_{ps}, \quad (3)$$

где σ'_s — измеренные остаточные эффективные напряжения по результатам испытаний.

Такой подход к оценке степени нарушения структурных связей является довольно непростым для инженерного использования, поскольку требует определения коэффициента бокового давления и параметра Скемптона, выражаемого уравнением (3). Оценка этих параметров становится еще более сложной в состоянии переуплотнения. Соответственно, использование концепции пути напряжения с учетом возможных ошибок в определении параметров может применяться, пожалуй, лишь при отборе большеразмерных образцов непосредственно из шурфов. В этом случае основной объем операций, значительно влияющих на структуру грунта, будет исключен. Концепция образца «отличного» качества определялась восстановлением структуры образца и проведением испытания в следующей последовательности: на предварительном этапе выполнялась анизотропная консолидация образца, которая доводилась до оценочного уровня эффективных напряжений, далее проводился недренированный сдвиг.

М.М. Valigh в 1985 г. предложил концепцию образца «идеального» качества [6]. Метод также предполагал выполнение на предварительном этапе анизотропной консолидации, но до достижения деформационных параметров разрушения образца, возникающих при внедрении трубы/грунтоноса. После этого выполнялся недренированный сдвиг. Метод оценки нарушения структуры получил название «метода пути деформации». Для его применения необходимо надежно оценивать компоненты деформаций, возникающих при внедрении элемента трубы в грунтовый массив. Для оценки таких компонентов деформаций различными авторами [21] использовались решения аналитических и численных задач пенетрации элементов в грунтовый массив в различных постановках. Анализировались, как правило, основные компоненты деформаций для задач осевой симметрии — внедрение труб, свай различных диаметров с различными отношениями толщины стенки и диаметра, в различных грунтовых условиях и на различных глубинах. Метод послужил началом серии аналитических работ по выработке оптимальных параметров грунтоносков [21, 22].

Другими путями учета нарушения природной структуры грунта при трехосных лабораторных испытаниях является инженерное применение класса реконсолидационных методов. Для выполнения процедур реконсолидации (восстановления природной структуры образца) используются два различных метода — рекомпрессионный метод [8] и SHANSEP (stress history and normalizing soil engineering properties) [12].

Фактически предложенные методы были призваны нивелировать основные недостатки неконсолидированно-недренированных испытаний. Как отмечают многие исследователи [13], в основном эти недостатки заключаются в следующем:

1. Нарушение природной структуры образца снижает величину недренированной прочности.



Рис. 3. Изолинии влажности при проведении дренированных и недренированных трехосных испытаний нормально уплотненной (восстановленной/реконсолидированной пасты) глины [9]

Fig. 3. Isolines of moisture content for drained and undrained triaxial tests of normally consolidated (reconstituted/reconsolidated paste) clay [9]

2. Достаточно быстрый сдвиг во времени завышает величину недренированной прочности.
3. Неучет анизотропного нагружения в природном напряженном состоянии завышает величину недренированной сдвиговой прочности.

Названные компоненты ошибок в оценке неконсолидированной недренированной сдвиговой прочности не могут быть компенсированы, поскольку никак не оцениваются в процессе испытания. Для снижения доли возможных ошибок в оценках недренированной сдвиговой прочности оба рекомпрессионных метода предполагают выполнение K_0 — консолидированно-недренированных испытаний (СК₀U).

Наиболее простое в этой ситуации решение было предложено L. Vjertum [8]. Решение состояло в анизотропной реконсолидации (K_0 — траектория) образца на начальном этапе давлением (σ'_{v0} ; σ'_{h0}) — траектория 3 на рис. 2. Такой учет нарушения природной структуры кажется довольно логичным, поскольку при реконсолидации по этой траектории происходят незначительные фиктивные потери влажности образца (М.М. Vjertum оценивал их в диапазоне 1–4%), поскольку часть деформаций компенсируется за счет упругой разгрузки образца при отборе.

Согласно результатам лабораторных трехосных испытаний нормально уплотненных грунтов, разрушение образцов в недренированных условиях происходит по поверхности текучести, т.е. по траектории эффективных напряжений. По данным серии таких испытаний глинистых грунтов или паст, выполненных различными исследователями, оказалось, что величина недренированной прочности прямо пропорциональна величине эффективных объемных напряжений.

Таким образом, в условиях однородного нормально уплотненного массива грунта величина соотношения «недренированная прочность — эффективное напряжение» должна быть постоянна с глубиной (4):

$$\frac{c_u}{\sigma'_v} = S = const \quad (4)$$

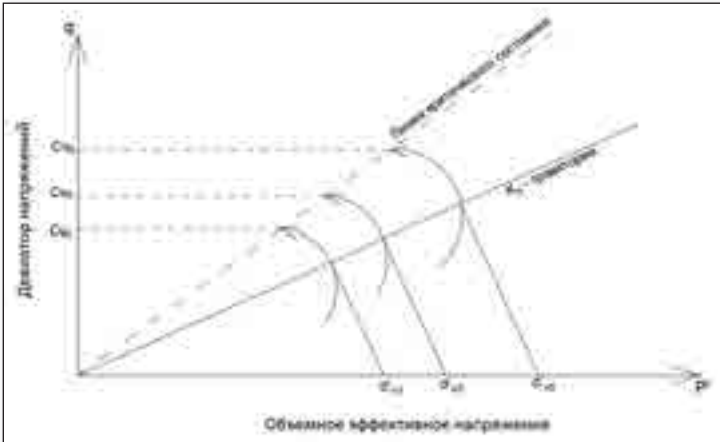


Рис. 4. Траектории эффективных напряжений при проведении трехосных консолидированно-недренированных испытаний нормально уплотненных глинистых образцов

Fig. 4. Effective stress trajectories when conducting triaxial consolidated undrained tests of normally compacted clay samples



Рис. 5. Оборудование для вырезания образца T. Shogaki [24]

Fig. 5. Equipment for cutting-out a sample by T. Shogaki [24]

Многочисленные лабораторные исследования нормально уплотненных преимущественно восстановленных глин и паст доказали возможность использования концепции «нормализации параметров грунта». Применительно к оценке недренированной сдвиговой прочности такая концепция была предложена в 1974 г. группой исследователей во главе с С.С. Ladd [12].

Действительно, уравнение (4) можно записать в виде:

$$\frac{c_{u1}}{\sigma'_{v1}} = \frac{c_{u2}}{\sigma'_{v2}} = \frac{c_{un}}{\sigma'_{vn}} = S = const. \quad (5)$$

В общем случае концепцию нормализации можно показать на работе нормально уплотненного грунта при проведении консолидированно-недренированных стабильметрических испытаниях (консолидация по траектории K_0) (рис. 4).

В случае, если мы имеем дело с переуплотненным грунтом, недренированная прочность должна расти с увеличением коэффициента переуплотнения. На основе обработки ряда экспериментов было предложено соотношение:

$$\left[\frac{c_u}{\sigma'_v} \right]_{oc} = \left[\frac{c_u}{\sigma'_v} \right]_{nc} OCR^m \quad (6)$$

Здесь m — константа, индекс oc — обозначает нормализованный параметр прочности в переуплотненном состоянии, nc — соответственно, в нормально уплотненном состоянии, OCR — коэффициент переуплотнения.

Учитывая (5), уравнение (6) можно записать в виде:

$$\left[\frac{c_u}{\sigma'_v} \right]_{oc} = S \cdot OCR^m \quad (7)$$

Здесь S — нормализованная величина недренированной сдвиговой прочности.

В общем виде уравнение (7) во многом повторяет соответствующее уравнение механики предельных состояний, получившей широкое развитие уже к концу 60-х годов прошлого века [20]. Степенной параметр m по результатам ряда экспериментальных исследований оказывается близким к теоретическому значению в соответствии с уравнением механики предельных состояний:

$$m \approx \Lambda = \frac{\lambda - \kappa}{\lambda}, \quad (8)$$

$$\lambda = C_c \ln(10); \quad \kappa = C_s \ln(10); \quad (9)$$

В уравнении (9) C_c — компрессионный индекс; C_s — соответствующее значение разгрузочного индекса.

Уравнение (7) интересно тем, что связывает прочностные и деформационные параметры. Метод позволяет для однородного связного грунта выполнить оценку изменения недренированной сдвиговой прочности в зависимости от истории нагружения (исторического давления переуплотнения). Или, наоборот, в случае переуплотненного образца ненарушенной структуры оценить величину давления переуплотнения. Для этого необходимо вывести образец на линию нормального уплотнения — в рассматриваемом сравнении — траектории А и В на рис. 2. Для контроля и измерения новых условий переуплотнения образец разгружается по траектории BCD. Для того, чтобы вывести образец на линию нормального уплотнения, выполняется компрессия (K_0 -траектория) до величины, в 1,5–2 раза превышающей предполагаемое давление переуплотнения образца (in situ). Концепция фактически предполагает, что независимо от физических механизмов, вызывающих переуплотнение в природном состоянии, одинаковое переуплотнение можно получить механическим уплотнением, достигнув соответствующей величины недренированной сдвиговой прочности.

Применительно к нарушению природной структуры грунта методика SHANSEP предполагает «стирание» эффекта нарушения природной структуры, выводя образец в нормально уплотненное напряженное состояние (на седиментационную кривую или близкие участки — см. рис. 2). Для нормально уплотненных сред (или близких к ним) это дает возможность правильно оценить проектную величину недренированной прочности. Для переуплотненных сред такой пересчет будет означать необходимость применения уравнения (7) и знание трех констант этого уравнения, что влечет за собой оценки давления переуплотнения и соотношений объемного компрессионного и разгрузочного индексов. Поскольку метод предполагает реконсолидацию до значений, превышающих величину исторического давления предуплотнения, то он будет неприменим для грунтов, обладающих высоким потенциалом структурных связей. Это, прежде всего, грунты с высокими индексами чувстви-

Параметры образцов в опытах T. Shogaki [24]
Sample parameters in the experiments of T. Shogaki [24] tests

Образец	Диаметр, d_d (см)	Площадь (см ²)	Отношение d_d/D
S ₁	7,5	44,18	1
S ₂	7,31	41,95	0,95
S ₃	7,12	39,86	0,9
S ₄	6,72	35,47	0,8
S ₅	6,3	31,44	0,7
S ₆	Паста (восстановленный образец)		

тельности, а также глинистые разности с цементационными связями. Также в качестве ограничений к методу можно отметить сложность его применения для грунтов с высокими коэффициентами переуплотнения. Такими грунтами для Санкт-Петербурга являются, как правило, постгляциальные озерные разности (твердой, полутвердой консистенции, залегающие вблизи поверхности), попавшие в зону аэрации в период гляциоизостатического подъема территории (преимущественно в южных частях города). Можно отметить, что на указанной территории эти отложения крайне редко используются в качестве оснований зданий и сооружений, поскольку непосредственно под ними залегают слабые грунты, не претерпевшие упрочнения за счет высыхания и аэрации (упрочнения за счет эффектов ионного обмена). Для чувствительных и значительно переуплотненных грунтов для оценок недренированной прочности и компенсации потерь за счет нарушения природной структуры образца может быть применена реконсолидационная процедура, предложенная L. Vjertum [8].

В качестве преимуществ метода SHANSEP можно отметить возможность его применения для нормально уплотненных грунтов. Кроме того, по-видимому, SHANSEP является единственным методом, применимым для недоуплотненных природных грунтов. Соответственно, метод предпочтительнее применять для разностей, обладающих невысокими значениями давления переуплотнения, а также низкими индексами чувствительности. Именно к таким грунтам относятся четвертичные и дочетвертичные дисперсные разности, слагающие территорию в границах г. Санкт-Петербурга.

Методы восстановления природной структуры образца в качестве основного критерия рассматривают критерий оценки недренированной прочности, и это понятно, поскольку основной инженерной задачей является обеспечение условий первой группы предельных состояний. Соответственно, другим возможным критерием восстановления природной структуры образцов является критерий жесткости как сдвиговой, так и объемной составляющих. С учетом этого критерия реконсолидационная процедура и SHANSEP не позволяют надежно восстановить реальную жесткость образца. Поскольку восстановление жесткости образца связано с восстановлением исторического давления переуплотнения (коэффициентом переуплотнения), то для оценок недренированной сдвиговой прочности в соответствии с уравнением (7) так или иначе необходимо надежно оценивать значение давления переуплотнения и, соответственно, реальную жесткость образца.

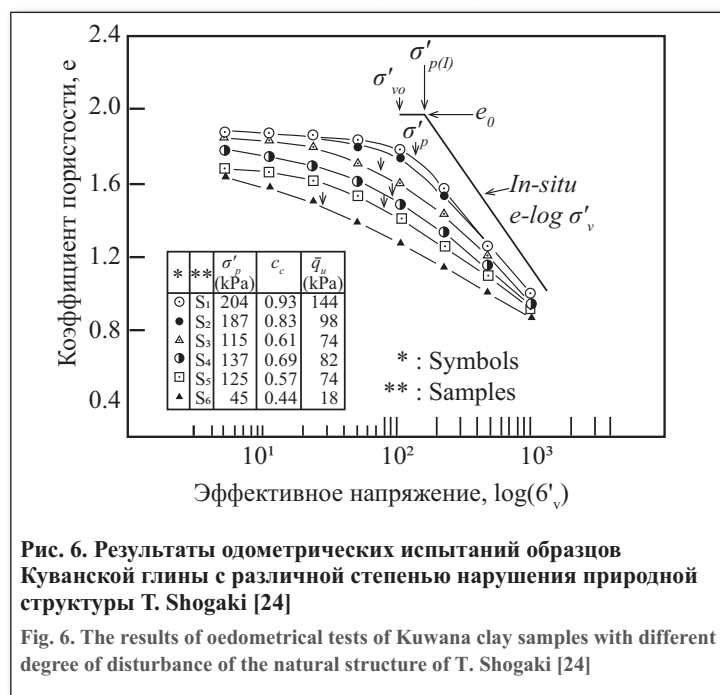


Рис. 6. Результаты одометрических испытаний образцов Куванской глины с различной степенью нарушения природной структуры T. Shogaki [24]

Fig. 6. The results of oedometer tests of Kuwana clay samples with different degree of disturbance of the natural structure of T. Shogaki [24]

Оценку исторического давления уплотнения можно произвести по результатам одометрических испытаний. Применительно к оценке коэффициента переуплотнения на первый план выходят критерии качества образца и их отбора. На сегодняшний день имеется много публикаций относительно использования специальных пробоотборников и грунтоносов, в том числе применительно к различным типам грунтов [2, 3, 4, 5, 21, 22]. В таких публикациях, как правило, рассматривается семейство одометрических кривых для образцов с использованием разных пробоотборников в сравнении с образцами, отобранными в виде грунтовых блоков или непосредственно из шурфов. По мнению автора, наиболее интересные и наглядные исследования в этом вопросе были проведены T. Shogaki [23, 24]. Исследование интересно тем, что проводилось на слабых голоценовых морских глинах, отобранных на побережье в различных районах Японии. Образцы морских глин (с различной пластичности) отбирались грунтоносами. Для образцов ненарушенной структуры выполнялся комплекс физико-механических испытаний. Для оценки степени нарушения структурных связей образцы грунта вырезались через специальное оборудование, нарушающее природную структуру образца (рис. 5, табл. 1). Оборудование представляло собой трубу, суженную на конце, с различными диаметрами

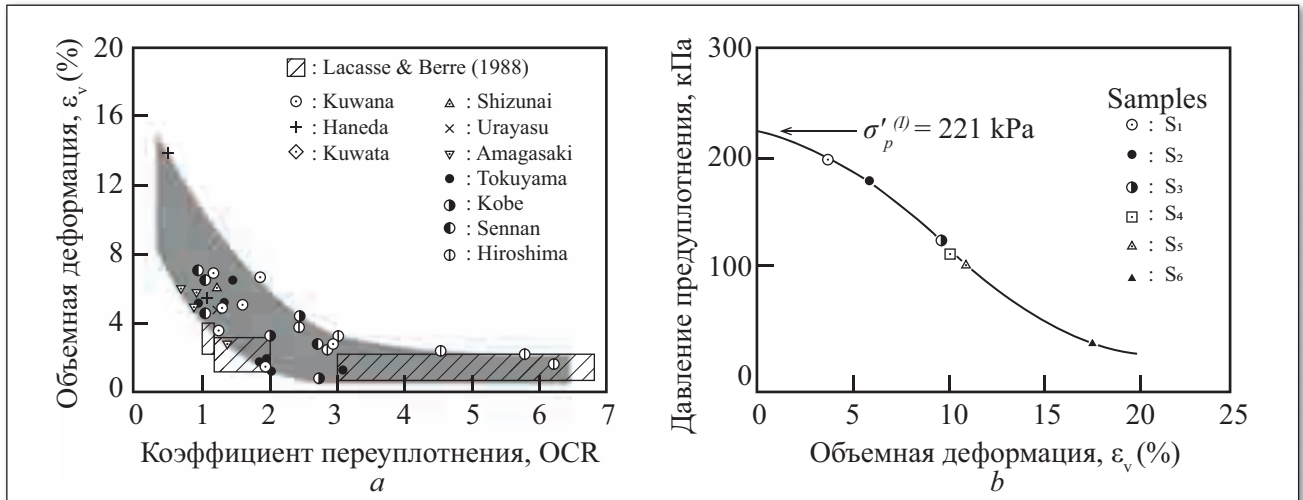


Рис. 7. Влияние нарушения природной структуры лабораторных образцов на историческое давление переуплотнения: а — соотношение коэффициента переуплотнения и объемной деформации при различной степени нарушения природной структуры лабораторных образцов; б — кривая деградации давления переуплотнения для образцов Куванской глины по Т. Shogaki [24]

Fig. 7. Influence of the degradation natural structure of the soil samples on the historical pressure: а — relation overconsolidation ratio with different volumetric strain; б — Degradation curve preconsolidation pressure vs volumetric strain Kuwana clay, T. Shogaki [24]

внешнего отверстия. Сужение моделировало процесс развития сдвиговых и объемных деформаций при внедрении буровой колонки. Результаты исследования также анализировались для полностью нарушенной структуры — пасты.

После приготовления образцов выполнялся стандартный комплекс 24-часовых одометрических испытаний. Типичные результаты серии испытаний для образцов морской Куванской глины с различной степенью нарушения природной структуры приведены на рис. 6. Рисунок наглядно показывает, что с учетом нарушения природной структуры происходит изменение жесткости образца. С учетом очевидного влияния качества образца на результаты лабораторных испытаний значительную актуальность приобретают количественные критерии оценки степени нарушения природной структуры лабораторного образца. Также на оценку степени нарушения природной структуры, например, для условий одометрической компрессии, будет влиять качество выполнения испытания и предварительной подготовки оборудования. Для оценки

Таблица 2
Table 2

Градация качества образца по критерию деформации по А. Andersen и Р. Kolstad [5]
Sample quality grades after A. Andersen, P. Kolstad [5]

Вертикальная деформация при σ'_{v0}	Градация качества образца
< 1%	A
1–2%	B
2–4%	C
4–10%	D
> 10%	E

качества образца по результатам испытаний рядом исследователей предлагались различные критерии. Наиболее интересными для условий проведения консолидационных испытаний по K_0 -траектории является критерий, предложенный А. Andersen, Р. Kolstad [5]. За индикатор качества образца была взята величина вертикальной де-

Таблица 3
Table 3

Градация качества образца по критерию деформации по К. Terzaghi и др. [25], Т. Lunne и др. [15]
Sample quality grades after K. Terzaghi et al. [25], T. Lunne et al. [15]

Градация качества образца (Terzaghi К. и др.)		Критерий $\Delta e / e_0$ (Lunne Т. и др.)			
Объемная деформация, %	Качество	$OCR = 1-2$	$OCR = 2-4$	$OCR = 4-6$	Качество образца
		$\Delta e / e_0$	$\Delta e / e_0$	$\Delta e / e_0$	
< 1%	A	< 0,04	< 0,03	< 0,02	Очень хорошее
1–2%	B	0,04–0,07	0,03–0,05	0,02–0,035	Хорошее
2–4%	C	0,07–0,14	0,05–0,1	0,035–0,07	Плохое
4–8%	D	> 0,14	> 0,1	> 0,07	Очень плохое
> 8%	E	–	–	–	–

формации при величине природного эффективного напряжения σ'_{h0} :

$$\varepsilon_v = \frac{H_0 - H_s}{H_0} \cdot 100(\%), \quad (10)$$

где H_0 — начальная высота образца; H_s — высота образца при величине природного эффективного напряжения σ'_{v0} .

Согласно этому критерию, чем меньшую деформацию будет испытывать образец при величине природного напряжения в скелете, тем более качественным будет образец и, соответственно, результаты одометрического испытания. В соответствии с выбранным критерием авторами [5] была разработана шкала оценки степени нарушения природной структуры образца (табл. 2). Согласно этой шкале образцы по степени нарушения природной структуры (по степени качества образца) разделены на пять категорий (А — хороший, Е — плохой).

Подобную же градацию качества образца, основываясь на результатах объемной деформации, предложили К. Terzaghi и др. [25]. Эта шкала, приведенная в табл. 3, является фактической адаптацией идей А. Andersen и Р. Kolstad.

Т. Shogaki [24] для оценки степени нарушения природной структуры грунта использовал, по сути, аналогичный критерий, применяя для выражения объемного компонента деформации изменение коэффициента пористости:

$$\varepsilon_v = \frac{e_0 - e_s}{1 + e_0} \cdot 100(\%), \quad (11)$$

e_0 — начальный коэффициент пористости; e_s — коэффициент пористости лабораторного образца при величине природного эффективного напряжения σ'_{v0} .

Позднее Т. Lunne и др. [16] предложили более общий критерий, выражающий относительное изменение коэффициента пористости $\Delta e / e_0$ при достижении природного эффективного напряжения на стадии реконсолидации σ'_{v0} . При этом критерий также был дифференцирован для различных диапазонов коэффициента переуплотнения. Соответствующая градация качества образца была определена четырьмя состояниями — от очень хорошего до очень плохого.

Кроме рассмотренных достаточно очевидных деформационных критериев нарушения природной структуры образца, рядом исследователей разработаны альтернативные критерии, которые используются в рамках отдельного класса неразрушающих методов. К этому классу относится метод контроля порового давления в образце (контроль давления подсоса — suction) М.С. Santagata and J.T. Germaine [12]. Также к этому классу относятся методы неразрушающего контроля, основанные на сравнении скоростей поперечных волн в грунтовой среде и в образце. Как правило, измерение скоростей поперечных волн в образце выполняется методом изгибаемых элементов. Эти методы более сложные и требуют выполнения трудоемких полевых измерений распределения скоростей поперечных волн в грунтовой среде.

Деформационные критерии оценки качества лабораторных образцов являются достаточно простыми и хорошо зарекомендовали себя на практике. Как правило, эти критерии устанавливались эмпирическим путем — в сравнении коэффициента переуплотнения (давления переуплотнения) образцов ненарушенной структуры с образцами различной степени нарушения структуры с

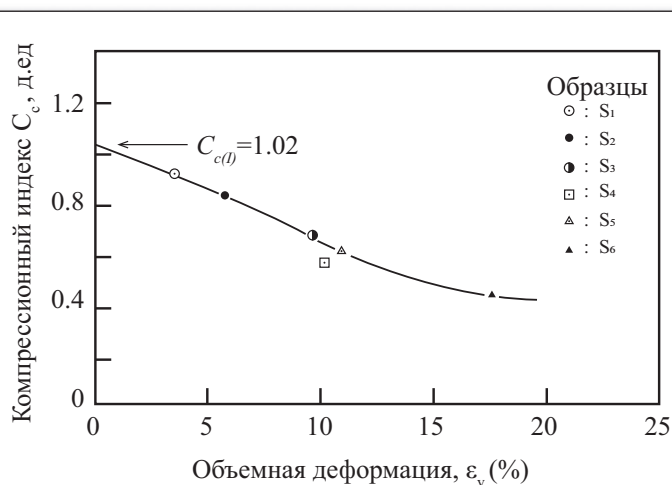


Рис. 8. Типичный график деградации компрессионного индекса в зависимости от величины объемной деформации для лабораторных образцов Куванской глины по Т. Shogaki [24]

Fig. 8. Degradation curve compression index from volumetric strain of Kuwana clay according to T. Shogaki [24]

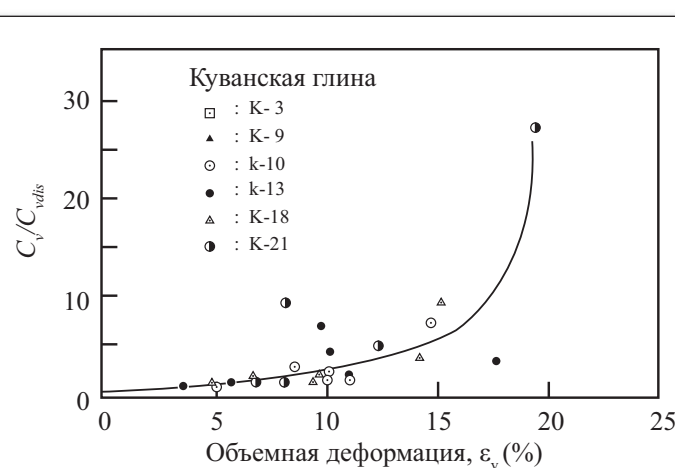


Рис. 9. График соотношения коэффициентов консолидации для образцов Куванской глины в зависимости от величины деформации [24]

Fig. 9. Graph of the ratio of consolidation coefficients for Kuwana clay samples depending on the volume strain [24]

известной долей объемной деформации [10, 17, 18]. Например, на рис. 7 представлен график деградации коэффициента переуплотнения (давления переуплотнения) в зависимости от объемной деформации (включая грунты морского генезиса с различных площадок на побережье Японии и Норвегии [18]). По результатам сравнения видно, что критерии ограничений, приведенные в табл. 2, 3, в целом достаточно неплохо оценивают качество лабораторных образцов. В образцах с объемной деформацией выше 6–7% (качества D, E), особенно для образцов с небольшими значениями коэффициента переуплотнения, происходит практически полное стирание истории нагружения.

Также наблюдается деградация коэффициентов консолидации и компрессионных индексов (рис. 8, 9). Снижение компрессионных индексов означает снижение сжимаемости лабораторных образцов. При проведении испытаний грунтов с различной степенью нарушения при-

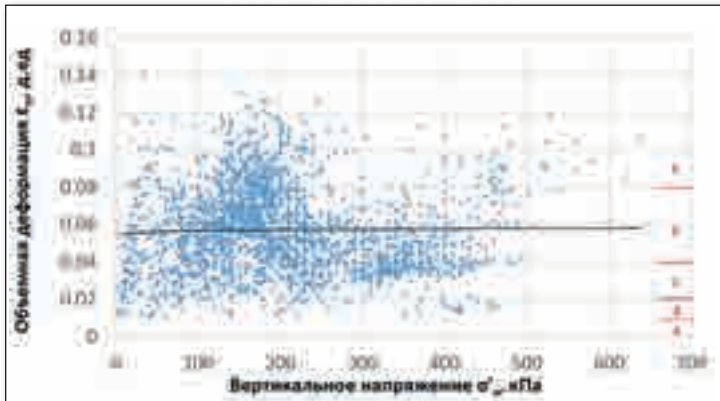


Рис. 10. Зависимость объемной деформации лабораторного образца от уровня бытовых вертикальных напряжений для четвертичных грунтов по результатам одометрических испытаний

Fig. 10. Dependence of the volumetric deformation of a laboratory sample on the level of household vertical stresses for quaternary soils according to the results of oedometer tests

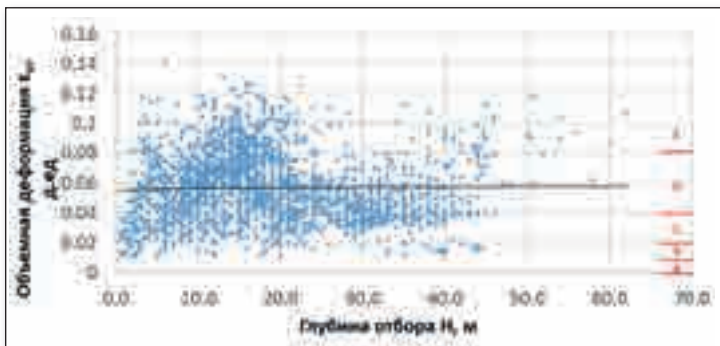


Рис. 11. Зависимость объемной деформации лабораторного образца от глубины отбора для четвертичных грунтов по результатам одометрических испытаний

Fig. 11. The dependence of the volume deformation of the laboratory sample from the depth of selection for Quaternary soils according to the results of oedometer tests

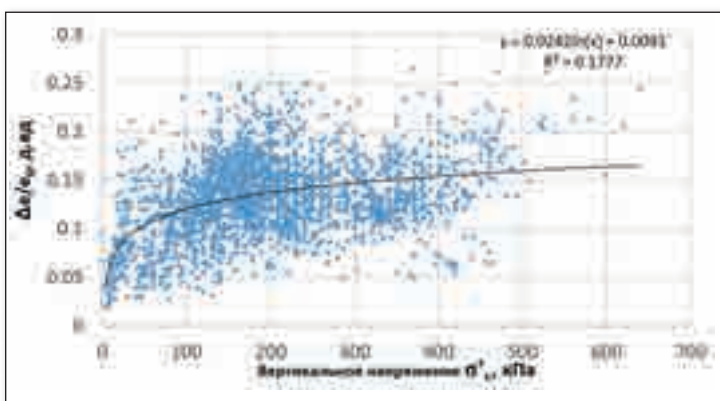


Рис. 12. Зависимость относительного изменения коэффициента пористости лабораторного образца от уровня бытовых вертикальных напряжений для четвертичных грунтов по результатам одометрических испытаний

Fig. 12. Dependence of the relative change in the porosity coefficient of a laboratory sample on the level of household vertical stresses for Quaternary soils according to the results of oedometer tests

также позволяет их рассматривать в качестве возможных критериев нарушения природной структуры.

Оценка качества лабораторных образцов грунта при выполнении инженерно-геологических изысканий в Санкт-Петербурге и пригородах

В обычной отечественной практике производства инженерно-геологических изысканий, как правило, не выполняется отбор образцов с помощью специальных грунтоносов, в результате чего степень нарушения природной структуры образцов значительно повышается. Основной объем лабораторных испытаний с целью определения прочностных и деформационных свойств грунтов — одометрические испытания, а также испытания на плоский сдвиг/срез. Поскольку отбор этих образцов из массива выполняется фактически без специального оборудования (грунтоносов), то очень интересным вопросом является статистическая оценка степени нарушения природной структуры. Для такой оценки при выполнении одометрических испытаний можно использовать критерии градации качества образца, приведенные в табл. 3, адаптированные по К. Terzaghi и др. [25] и Т. Lunne и др [16]. Как правило, эти наиболее простые критерии используют геотехники по всему миру.

На предварительном этапе автором были проанализированы закономерности изменения основных физических свойств четвертичных, а также древних вендских и кембрийских отложений. Для анализа использовались результаты инженерно-геологических изысканий на строительных объектах на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области [1]. География исследований представляла собой более 130 площадок, ограниченных территорией мегаполиса с юга, а на севере — территориями, примыкающими к Карельскому перешейку и границам Финляндии (Выборг, Сортавала, участками на побережьях Онежского и Ладожского озер). В выборке в основном присутствовали отложения вендской низины и вендской возвышенности. В нее не включались микулинские четвертичные морские отложения (имеющие большое содержание битумной органики), горизонты которых встречаются преимущественно в юго-восточной части города. На ряде площадок (более 90 участков) был выполнен комплекс одометрических и сдвиговых испытаний (прямой плоский сдвиг). Для оценки степени нарушения природной структуры образцов было обработано более 3000 лабораторных одометрических испытаний, выполненных различными подрядными организациями в период с 2003 по 2018 гг.

Одним из результатов ранее выполненных исследований [1] был вывод о сходных физико-механических свойствах грунтов четвертичного возраста в ряде северных стран на территории Фенноскандии и Санкт-Петербурга, что связано с терригенным характером происхождения минералов глинистых осадков. Можно отметить, что деформационные критерии и шкалы оценок качества лабораторных образцов разрабатывались в основном именно по результатам исследователей северных стран [5, 16], в частности, норвежского геотехнического института (NGI). Соответственно, применение критериев оценки нарушения природной структуры лабораторных образцов и шкал градации для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга будет оправданным.

Рассмотрены основные результаты статистических исследований в Санкт-Петербурге с учетом применения

родной структуры наблюдается снижение не только компрессионных индексов, но и рекompрессионных [14], что

критериев градации лабораторных образцов, приведенных в табл. 3. На рис. 10, 11 представлены зависимости параметра относительной деформации лабораторных образцов четвертичных грунтов от уровня бытового давления и глубины отбора. На графиках приведена модифицированная шкала оценки качества лабораторных образцов по К. Terzaghi и др. [25]. Из графиков видно, что основной объем образцов соответствует категории D и E. Это образцы плохого и очень плохого качества. Можно отметить, что критерии качества лабораторных образцов, основанные на оценках относительной объемной деформации, недостаточно полно характеризуют процесс деградации деформационных параметров, а также истории нагружения. Очевидно, что с учетом снижения коэффициентов пористости образца, например, при анализе качества плотных образцов с минимальными значениями коэффициента пористости (при приближении к точке Ω) потенциал сжимаемости будет ниже, и, соответственно, незначительными будут объемные деформации. При незначительных объемных деформациях критерий качества образца по рассматриваемым шкалам будет соответствовать качеству лабораторных образцов А или В. Однако это не будет соответствовать действительности, поскольку по результатам испытаний таких образцов, как правило, не удастся полностью восстановить значение деформации, недренированной прочности, а также давления переуплотнения in-situ. Это наглядно подтверждается на графиках, представленных на рис. 10, 11. Здесь преимущественно для значительно переуплотненных основных морен московской стадии оледенения (моренные суглинки и супеси) качество лабораторных образцов соответствует В, что, естественно, не подтверждается геотехническим анализом давления переуплотнения.

Более подходящим критерием для оценки степени нарушения природной структуры образцов на всем диапазоне коэффициентов пористости представляется критерий относительного изменения коэффициента пористости с градацией качества по критерию деформации по Т. Lunne и др. [16]. Эти критерии качества предполагают дифференцированную шкалу в зависимости от степени переуплотнения образца, что представляется оправданным. На рис. 12, 13 представлены графики относительного изменения коэффициентов пористости четвертичных грунтов в зависимости от глубины отбора и величины бытового давления.

По исследованиям автора (посвященным оценке давления переуплотнения) по классификации Т. Lunne качество образцов при одометрических испытаниях составляет, как правило, для интервала:

- $OCR = 1-2$ — 0,07 и более (в среднем 14–15%) — качество образца плохое и очень плохое;
- $OCR = 2-4$ — 0,06 и более (в среднем 12–15%) — качество образца плохое и очень плохое;
- $OCR = 4-6$ — более 0,07 (преимущественно 9–14%) — качество образца очень плохое.

На рис. 12, 13 на графиках относительного изменения коэффициентов пористости в зависимости от глубины отбора и величины природного эффективного давления также отмечаются выборки с низкими значениями коэффициентов (менее 5%). В эту выборку, как правило, попадают морские илы, лежащие в акваториях на незначительных глубинах (1–2 м с поверхности) и обладающие структурной прочностью. Естественно, что при незначитель-

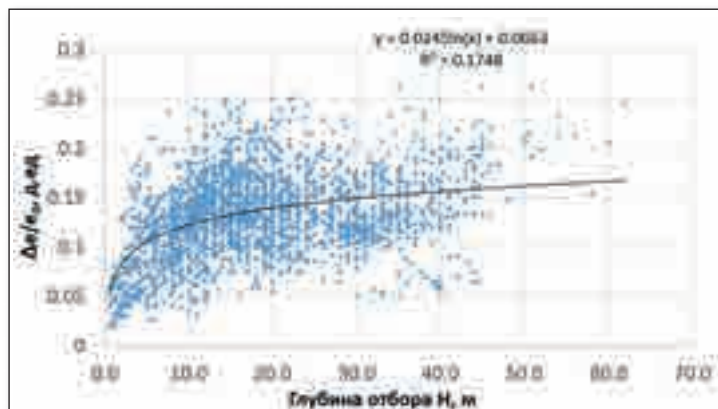


Рис. 13. Зависимость относительного изменения коэффициента пористости лабораторного образца от глубины отбора для четвертичных грунтов по результатам одометрических испытаний

Fig. 13. The dependence of the relative change in the coefficient of porosity of the laboratory from the depth of sampling for Quaternary soils according to the results of oedometric tests

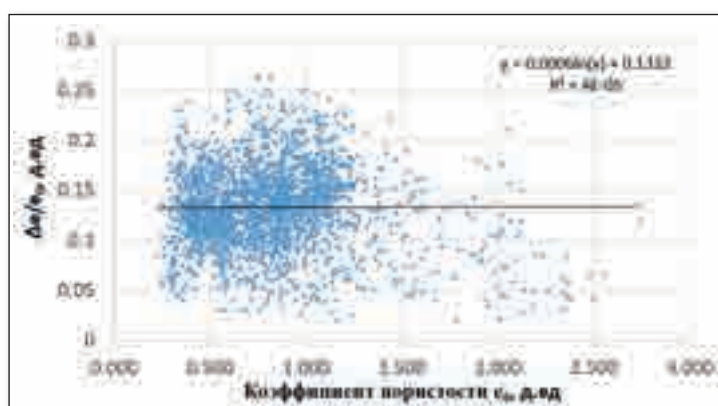


Рис. 14. Зависимость относительного изменения коэффициента пористости лабораторного образца от природного коэффициента пористости для четвертичных грунтов по результатам одометрических испытаний

Fig. 14. Dependence of the relative change in the porosity coefficient of a laboratory sample from the natural porosity coefficient for Quaternary soils according to the results of oedometric tests

ных эффективных напряжениях относительное изменение коэффициента пористости будет незначительным, и образец по рассматриваемому критерию может классифицироваться как «хороший» (либо находится на границе «хороший-плохой»). Можно отметить, что таких грунтов в выборке достаточно мало (рис. 14–16), их отбор в акваториях или береговой линии может производиться непосредственно из шурфов ручным способом, что снижает степень нарушения структурных связей в образцах.

Если рассматривать среднюю величину относительного изменения коэффициента пористости при отборе четвертичных грунтов, то ее значение составляет порядка 0,15, т.е. по классификации Т. Lunne и др. [16] среднее качество образцов характеризуется как «очень плохое». По результатам статистического анализа качества образцов при выполнении стандартных одометрических испытаний четвертичных глинистых отложений в Санкт-Петербурге практически не наблюдается зависимости качества образца от его генезиса, степени переуплотнения,

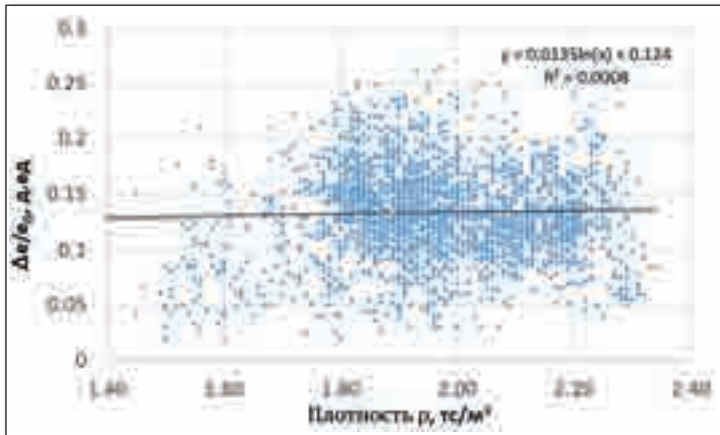


Рис. 15. Зависимость относительного изменения коэффициента пористости лабораторного образца от природной плотности для четвертичных грунтов по результатам одометрических испытаний

Fig. 15. Dependence of the relative change in the porosity coefficient of a laboratory sample on the natural density for quaternary soils according to the results of oedometer tests

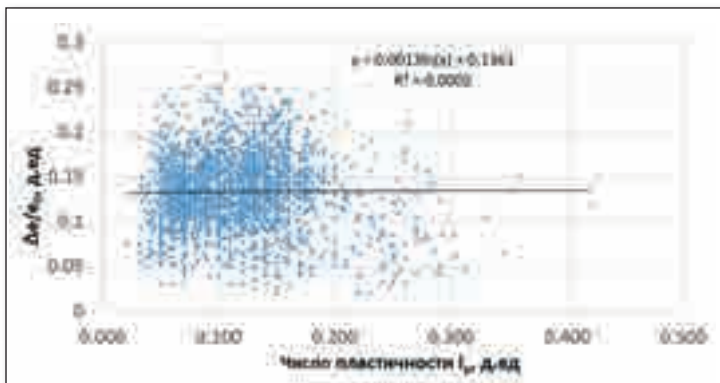


Рис. 16. Зависимость относительного изменения коэффициента пористости лабораторного образца от числа пластичности для четвертичных грунтов по результатам одометрических испытаний

Fig. 16. Dependence of the relative change in the porosity coefficient of a laboratory sample on the plasticity index for quaternary soils according to the results of oedometer tests

плотности сложения или пластичности (см. рис. 14–16). Также не наблюдается никакой статистической зависимости качества образцов от производителя инженерно-геологических изысканий (персонала изыскательских организаций).

Можно отметить, что приведенные критерии качества лабораторных образцов справедливы для нормальной работы лабораторного оборудования и соответствующей выдержки каждой ступени приложения нагрузки. В реальных условиях нередко в процессе выполнения одометрического испытания происходит:

- заиливание или загрязнения дренажных отверстий;
- загрязнение деталей штока с последующим заклиниванием;
- заклинивание или развитие избыточного трения стенок штампа о кольцо и пр.;
- высыхание образца в процессе испытания либо на этапе подготовки.

По этим причинам рассматриваемые критерии необходимы, но не достаточны в плане оценки качества выполненных испытаний. Из большой статистики исследований

компрессионных свойств четвертичных отложений в г. Санкт-Петербурге можно сделать парадоксальный, на первый взгляд, вывод, что если критерии качества образца выполняются, то речь идет о нештатной работе лабораторного оборудования, нарушении времени выдержки либо о высыхании образца в процессе испытания. Такие испытания легко распознаются по маленькой величине деформации при давлениях более 600 кПа либо по нехарактерной изломанной форме компрессионной кривой. Для контроля выполнения испытания в мировой практике обычно используется изменение порового давления, что не является обязательным требованием отечественных норм.

Проблемы отечественных стандартов, регламентирующих производство инженерно-геологических изысканий, и технического регулирования в отрасли

В соответствии с ГОСТ 12071-2014 «Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов», термин образец природного сложения — образец грунта определенной формы, в котором при отборе из массива грунта сохраняются ненарушенное сложение и влажность. В соответствии с этим документом (п. 4.4.6) при отборе монолитов из буровых скважин необходимо применять грунтоносы.

Согласно ГОСТ Р 54477-2011 «Методы лабораторного определения характеристик деформируемости в дорожном строительстве», термин ненарушенная структура грунта означает структуру грунта в образце, отобранном из массива и сохранившем природную структуру. ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация» так трактует понятие структуры грунта: пространственная организация, определяемая размером, формой, характером поверхности, количественным соотношением структурных элементов грунта и характером связи между ними.

При этом в действующих нормативных технических документах полностью отсутствует система оценки и контроля параметров нарушения природной структуры лабораторного образца.

В 2020 г. Федеральным агентством по техническому регулированию планируется ввести ГОСТ Р ИСО 22475-1-2017 «Геотехнические исследования и испытания. Методы отбора проб и измерения подземных вод. Часть 1. Технические принципы для выполнения» (в настоящее время действие этого стандарта приостановлено). Согласно этому стандарту, выделяются три категории проб. Для определенных грунтовых условий эти категории качества определяют возможный лабораторный класс качества образцов (от 1 до 5). Документ регламентирует методы производства работ в определенных инженерно-геологических условиях для получения образцов необходимого качества для геотехнических целей. Согласно ряду требований Еврокода 7 и упомянутых выше ГОСТ, в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга лабораторные образцы грунта также должны отбираться с помощью грунтоносов. Эти требования касаются не только определений характеристик деформируемости, но и определения физических характеристик грунтов.

Уже отмечалось, что выполнение отбора образцов в Санкт-Петербурге и области осуществляется, по существу, без использования грунтоносов и специального оборудования для транспортировки и хранения, чего требуют все вышеперечисленные стандарты.

Можно отметить, что ГОСТ 12248-2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости» при определении давления переплотнения рекомендует учитывать их частичное разуплотнение после отбора образца, выражаемое зависимостью (для полностью водонасыщенных образцов):

$$\varepsilon_p = \frac{(1 - S_r) e_0}{1 + e_0} \quad (12).$$

Для критерия относительной деформации эта зависимость примет вид:

$$\frac{\Delta e}{e_0} = 1 - S_r \quad (13).$$

В формулах (12, 13) S_r — степень водонасыщения образца после подъема на поверхность.

Для оценки возможности коррекции величин деформируемости и давления предуплотнения таким методом выполнялось сравнение величины относительной объемной деформации образцов по результатам одометрических испытаний с теоретическими значениями, определенными с учетом коэффициента относительного водонасыщения (в соответствии с соотношениями 12, 13). Результаты такого сравнения для четвертичных грунтов приведены на рис. 17, 18. Так, результаты теоретической оценки объемных деформаций и относительного изменения коэффициентов пористости с учетом изменения степени водонасыщения образцов показывают, что подавляющее большинство образцов имеет очень хорошее качество. Это не соответствует оценкам параметров нарушения структурной прочности по результатам одометрических испытаний. Теоретические значения деформаций не соответствуют истинным потерям напряжения в грунтовом скелете. Соответственно, применение этих критериев для корректировки параметров деформируемости, коэффициента переплотнения, а также реологических параметров является практически бесполезным, в первую очередь, для слабых четвертичных отложений, как, впрочем, и для дочетвертичных (кембрийских и вендских).

На графиках имеются значения, в которых теоретические величины деформации, вычисленные с учетом степени водонасыщения, оказываются выше значения объемной деформации образца, полученной в результате компрессионных испытаний. Это является отражением проблем выполнения одометрических испытаний, описанных выше. Кроме того, нередко это связано с тем, что изыскательские организации на начальных ступенях нагружения для экономии времени выдерживают ступени не более 2–3 часов, в результате чего деформации просто не успевают реализоваться.

В результате нарушения природной структуры средняя величина объемной деформации лабораторного образца по результатам статистических исследований, составляет порядка 6–7%. Чтобы выяснить, насколько такие деформации будут критичны, кратко рассмотрим в качестве примера результаты геотехнических расчетов.

На рис. 19 приведены результаты наблюдений и численного расчета семиэтажного здания в Петроградском районе Санкт-Петербурга. В основании проектируемого здания залегает мощная 17-метровая толща слабых грунтов. Такая ситуация типична для исторического центра Санкт-Петербурга. За период наблюдений в 25 лет осадка здания достигла 23 см. Поверочные расчеты осадок здания выполнены автором с применением модели Soft Soil Creep (SSC)

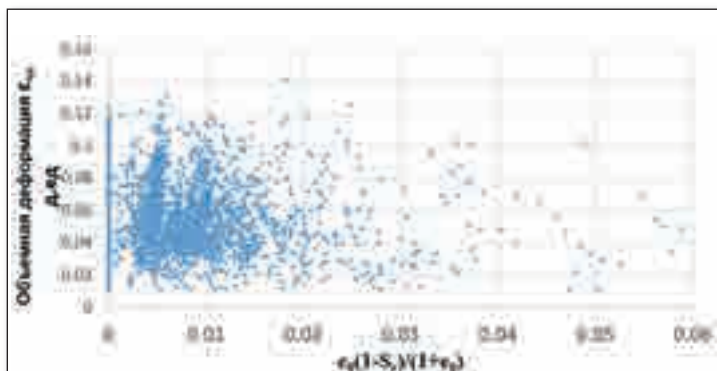


Рис. 17. Зависимость объемной деформации лабораторного образца при величине бытового эффективного напряжения от величины объемной деформации образца, вычисленной при изменении степени водонасыщения

Fig. 17. The dependence of the volume strain of the laboratory sample with the value of the household effective stress on the value of the volume strain of the sample, calculated by changing the degree of water saturation

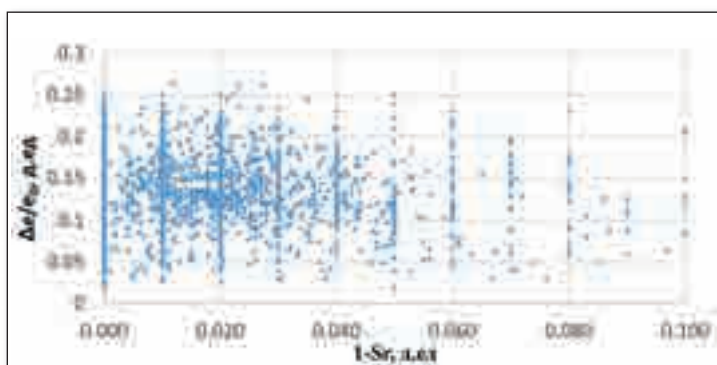


Рис. 18. Зависимость относительного изменения коэффициента пористости лабораторного образца при величине бытового эффективного напряжения от изменения степени водонасыщения образца после отбора

Fig. 18. Dependence of the relative change in the porosity coefficient of a laboratory sample when the value of the household effective stress is relative to the change in the degree of water saturation of the sample after selection

с учетом переуплотненной грунтовой толщ. На рис. 20 и 21 приведены соответствующие изолинии объемных и сдвиговых деформаций. Можно отметить, что такой характер распределения осадок является типичным для существующей городской застройки. По результатам расчета видно, что максимальная величина объемных деформаций грунта в основании здания составит до 2,6%. Средняя величина объемных деформаций по слабой грунтовой толще составит 0,8%. Примерно близкие значения по слою имеют сдвиговые компоненты деформаций (не считая зон вблизи крайних боковых участков плитного фундамента, где сдвиговые компоненты деформаций достигают 7%). По результатам расчетов деформаций здания на слабом основании оказывается, что интервал объемных и сдвиговых деформаций в грунтовом массиве не менее чем в шесть–семь раз меньше, чем среднестатистическая величина деформаций, возникающих при подготовке лабораторного образца. В рассматриваемом примере деформации здания превысили практически в два раза предельные значения (12 см), в результате чего значительно пострадала соседняя охраняемая историческая застройка. Собственно, по этой причине в

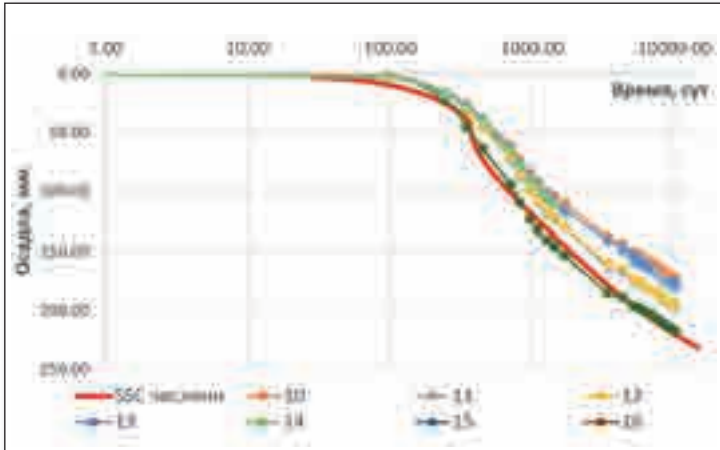


Рис. 19. График развития осадки здания на плите во времени. Здание построено в Петроградском районе Санкт-Петербурга. Сравнение результатов длительных наблюдений (точки 10–16) и численного расчета (красная кривая — модель Soft Soil Creep)

Fig. 19. Graph of development of precipitation of the building on the plate in time. The building was built in the Petrograd district of St. Petersburg. Comparison of the results of long-term observations (points 10 – 16) and numerical calculation (Soft Soil Creep model — red curve)

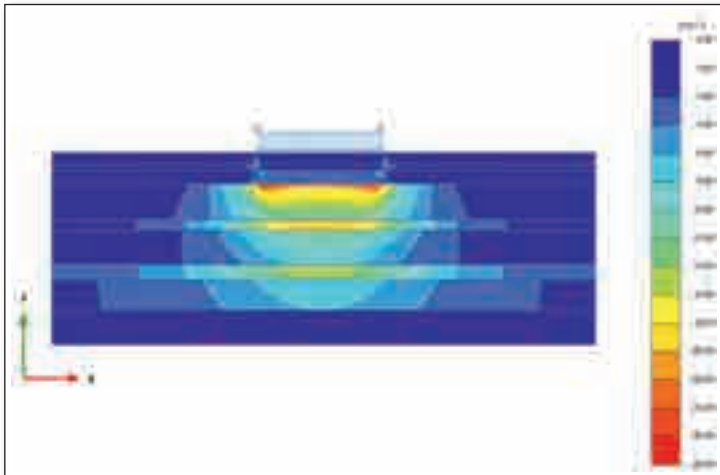


Рис. 20. Изолинии объемных деформаций (д. ед.) в грунтовом массиве в основании здания

Fig 20. Volume strain isolines (results of calculations) in the soil mass at the base of the building

распоряжении автора и имеются результаты этих наблюдений. В центральных районах города, где сосредоточено значительное количество исторических зданий существующей застройки, дополнительные деформации их оснований ограничиваются, как правило, величиной 5 мм. В условиях необходимости ограничения деформаций инженер-геотехник начинает работать еще с меньшими диапазонами объемных и сдвиговых компонентов деформаций. В результате деформации лабораторных образцов оказываются не менее, чем в восемь–десять раз больше этого диапазона (и это только на уровне бытовых напряжений). В таких условиях работа инженера-геотехника превращается в настоящее искусство, особенно при расчетном обосновании для принятия проектных решений.

Действительно, если оценивать среднюю величину объемной деформации за счет нарушения природной структуры лабораторных образцов на величину 6–7% или среднюю величину относительного изменения коэффици-

ента пористости на 14–15%, то основные расчетные параметры компрессионного индекса (либо модуля деформации), давления предуплотнения, коэффициента консолидации коэффициента вторичной консолидации будут значительно меняться и, соответственно, определяться некорректно. Поскольку методы определения характеристик деформируемости, приведенные в ГОСТ 12248-2010, применимы лишь для категории качества лабораторного образца «очень хороший / хороший» либо «А/В», то его применение для определения характеристик деформируемости является бессмысленным. В этом легко убедиться, применив к любому из одометрических испытаний слабых четвертичных грунтов процедуру определения давления переуплотнения Casagrande, которая превратится в упражнение в начертательной геометрии, поскольку вся история нагружения образца (включая часть напряжений от собственного веса) будет стерта. Наряду с деградацией давления предуплотнения произойдет увеличение объемной и сдвиговой жесткости, а также снижение коэффициентов консолидации (первичной и вторичной).

В отечественной практике инженерно-геологических изысканий, как минимум, начиная с начала 60-х гг. прошлого века, параметры деформируемости, определяемые по результатам лабораторных испытаний, во многом подчинены методу послойного суммирования. Этот метод, который до сих пор является основным, в отечественных стандартах во многом является развитием метода «американских инженеров». Вычисление осадок идет непосредственно по компрессионной кривой без коррекции компрессионного параметра — секущего модуля деформации (поскольку метод не делит деформации на траектории переуплотнения и нормального уплотнения). Естественно, что вычисление осадки инженерным методом потребует ограничения сжимаемой толщи. Вычисленная осадка инженерным методом послойного суммирования и методом Терцаги должна быть одинакова. Соответственно, глубина сжимаемой толщи должна иметь одинаковое значение в обоих методах. Оценим мощность сжимаемой толщи для метода Терцаги, которая записывается в следующем виде (для однородного сжимаемого слоя h_0):

$$S = \frac{C_s}{1 + e_0} h_0 \lg \left(\frac{p_{str}}{\sigma_{zg,0}} \right) + \frac{C_c}{1 + e_0} h_0 \lg \left(\frac{\Delta p + \sigma_{zg,0}}{p_{str}} \right) \text{ при } \Delta p > p_{str}, \quad (14)$$

C_c — компрессионный индекс; C_s — рекомпрессионный индекс; $\sigma_{zg,0}$ — величина бытового давления; p_{str} — структурная прочность (в частном случае давление предуплотнения); Δp — приращение полезной нагрузки по отношению к бытовому напряжению; S — расчетная величина осадки слоя.

В качестве критерия ограничения сжимаемой толщи можно принять равенство нулю второго компонента осадки в уравнении (14). Этот критерий эквивалентен критерию общих напряжений:

$$\Delta p + \sigma_{zg,0} = p_{str} = OCR \cdot \sigma_{zg,0}, \quad (15)$$

OCR — коэффициент переуплотнения.

Выражение (15) сводится к виду:

$$\Delta p = (OCR - 1) \sigma_{zg,0}. \quad (16)$$

Выражение (16) определяет границы сжимаемой толщи. В действующих нормативных технических докумен-

тах принимается критерий сжимаемой толщи с условием: $\Delta p = 0,5 \sigma_{zg,0}$, что эквивалентно рассмотрению толщи с постоянным по глубине коэффициентом переуплотнения $OCR = 1,5$. При увеличении сжимаемости грунта нормативные документы предлагают рассматривать среду с низким постоянным коэффициентом переуплотнения по глубине ($OCR = 1,2$). Грунты с таким коэффициентом переуплотнения в границах, например, Санкт-Петербурга встречаются лишь в акваториях и имеют возраст до 1,5 тыс. лет.

Инженерные критерии оценки сжимаемой толщи, содержащиеся в нормативных технических документах, увеличивают глубину сжимаемой толщи и призваны компенсировать увеличение модуля деформации лабораторных образцов, возникающее при отборе (с целью вычисления осадок, близких к наблюдаемым). Понятно, что увеличение сжимаемой толщи в условиях, например, значительно переуплотненных грунтов, залегающих с поверхности, приведет к излишней переоценке величин осадок и, соответственно, к неоправданному удорожанию проектов нулевого цикла. Устранение проблем фиктивного увеличения осадок предполагалось за счет увеличения модулей деформации при их корректировке по результатам штамповых испытаний. Так, например, в Санкт-Петербурге обширные исследования корректирующих повышающих коэффициентов приведения одометрических испытаний к штамповым в конце шестидесятых–середине семидесятых годов прошлого века выполнялись институтом «Фундамент-проект». По этим исследованиям коэффициенты составляли для озерно-ледниковых отложений — 1,5; для морены — 2–2,5.

С введением коэффициентов приведения к штамповым модулям нормативными техническими документами было фактически легитимизировано использование лабораторных испытаний образцов нарушенной структуры. Действительно, зачем тратить значительные средства на отбор, транспортировку и хранение образцов при выполнении инженерно-геологических изысканий, если результирующие значения лабораторных испытаний увеличатся на 150–250%? Для значительно переуплотненных грунтов эта величина составит до 700%. Более того, за продолжительное время использования лабораторных образцов плохого и очень плохого качества (см. табл. 3) сформировались поверочные корреляционные зависимости, которые используются государственными отделами контроля инженерных изысканий в качестве критериев правильности оценки и возможности регистрации результатов изысканий.

По результатам статистических оценок степени нарушения природной структуры лабораторных образцов грунта применительно к инженерно-геологическим условиям Санкт-Петербурга очевидным является бессмысленность оценок:

- давления переуплотнения в соответствии с ГОСТ 12248-2010;
- коэффициента фильтрации (консолидации) в соответствии с ГОСТ 12248-2010;
- коэффициента вторичной консолидации в соответствии с ГОСТ 12248-2010;
- прочностных параметров методом неконсолидированного быстрого плоского прямого сдвига ГОСТ 12248-2010;



Рис. 21. Изолинии сдвиговых деформаций (д. ед.) в грунтовом массиве в основании здания

Fig. 21. Shear strain isolines (results of calculations) in the soil mass at the base of the building

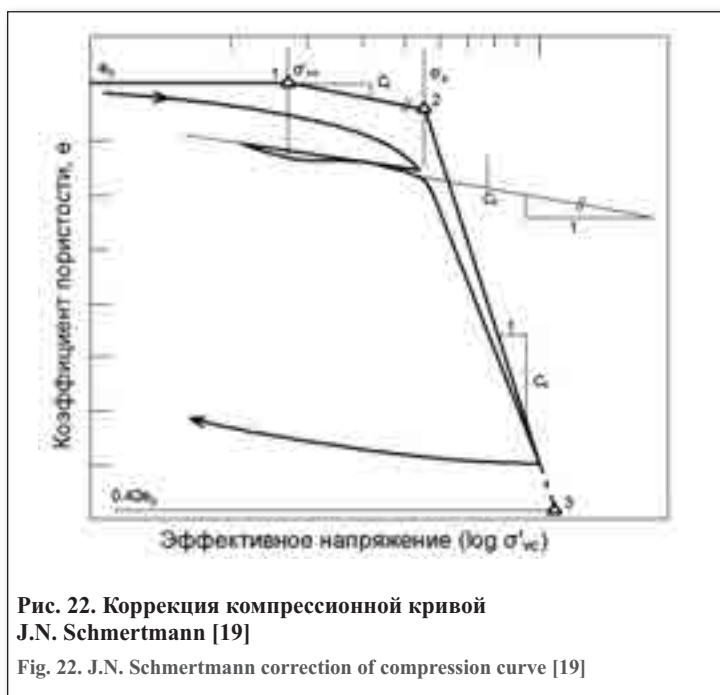


Рис. 22. Коррекция компрессионной кривой J.N. Schmertmann [19]

Fig. 22. J.N. Schmertmann correction of compression curve [19]

— исследования малых деформаций образцов в полном составе (начальные модули сдвига и кривые деградации).

Все перечисленные испытания являются необходимыми для выполнения численного моделирования любой геотехнической ситуации с помощью стандартного набора упрочняющихся моделей грунтовых сред, как правило, содержащихся в соответствующих конечно-элементных комплексах.

Естественно, что помимо неправильных оценок результатов основных лабораторных испытаний возникают противоречия в трактовках серии полевых испытаний. Типичным примером является несоответствие коэффициентов консолидации в слабых четвертичных отложениях, полученных по результатам статического зондирования и лабораторных компрессионных испытаниях, а также несоответствие деформируемости по результатам прессиометрических, трехосных и одометрических ис-

пытаний. Например, в Санкт-Петербурге это проявляется при анализе результатов прессиометрических испытаний твердых переуплотненных дочетвертичных вендских глин, обычно имеющих слоистую структуру. В результате нарушения природной структуры этих грунтов нередко становится критически сложным оценить реальную картину их возможного деформирования. По результатам прессиометрических испытаний деформируемость в массиве часто оказывается меньше, чем по результатам одометрических и трехосных испытаний. Также практически всегда на стадии консолидации трехосного образца объемная деформация оказывается довольно значительной и практически равной вертикальной деформации, что говорит о явлениях наведенной анизотропии. Это нередко делает невозможным правильную интерпретацию деформируемости, поскольку, например, ГОСТ 20276-2012 «Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости» прессиометрические испытания при вычислении коэффициента перехода от горизонтальных компонентов деформации к вертикальным значениям использует коэффициент соотношения одометрических модулей деформации в горизонтальном (E_{oedH}) и вертикальном направлениях (E_{oed}):

$$K_a = \frac{E_{oed}}{E_{oedH}}. \quad (17)$$

При этом в ГОСТ 20276-2012 «Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости» отсутствует проверка на предмет наведенной анизотропии, поскольку отсутствуют критерии качества лабораторных образцов.

Модуль деформации или компрессионный индекс ?

Очевидно, что для выполнения численных расчетов необходимо надежно оценивать параметры деформируемости лабораторных образцов во всем диапазоне расчетных значений. Значительное нарушение их природной структуры не позволит надежно выполнять статистические исследования изменения модуля деформации в зависимости от основных физических характеристик, поскольку в природном состоянии грунты имели различную недренированную прочность и степень переуплотнения. Кроме того, модули деформации вычисляются в определенном интервале напряжений, что делает статистические исследования крайне затруднительными. В этих условиях работа с исходной компрессионной кривой является достаточно сложной, поскольку в компрессионную кривую трудно внести корректирующие процедуры. Последние проще проводить с участком компрессионной кривой, который вышел на линию нормального уплотнения. Наклон этой линии в логарифмическом масштабе напряжений называется компрессионным индексом. Коррекцию компрессионной кривой можно выполнить с помощью упрощенной процедуры J.N. Schmertmann [19].

С помощью этой процедуры можно корректировать, соответственно, значение компрессионного индекса и величину давления переуплотнения (коэффициент переуплотнения).

Процедура состоит из нескольких шагов (рис. 22):

— Из точки с начальным коэффициентом пористости e_0 проводится горизонтальная линия в точку с абсциссой σ'_{v0} .

— Из этой точки можно провести линию с наклоном, равном разгрузочному индексу при компрессии C_r . Линия с траекторией разгрузки проводится до точки с известным давлением переуплотнения (оценивается по методу Casagrande).

— Из точки $0,42e_0$ на оси ординат проводится горизонтальная линия до пересечения с компрессионной кривой.

— Соединяя полученные точки, получаем корректированную компрессионную кривую.

Эта процедура достаточно широко применяется при оценке компрессионных свойств по результатам одометрических испытаний.

Необходимо отметить, что упрощенная процедура коррекции компрессионной кривой более подходит для образцов хорошего качества, поскольку требует оценки давления переуплотнения. Для образцов плохого качества необходима разработка специальных методов оценки давления переуплотнения.

Обсуждение результатов исследований и основные выводы

Сложившаяся практика инженерно-геологических изысканий в Санкт-Петербурге (несмотря на усилия и имеющиеся разработки специалистов отечественной школы инженерных изысканий и геотехники) в части отбора, транспортировки, хранения и подготовки лабораторных образцов не обеспечивает их необходимое качество для надежных оценок расчетных характеристик прочности и деформируемости, требуемых для выполнения численных расчетов по современным моделям грунтовых сред. В соответствующих нормативных технических документах и сложившейся практике инженерно-геологических изысканий отсутствуют критерии нарушения природной структуры лабораторных образцов грунта. Также полностью отсутствуют методы восстановления прочностных и деформационных характеристик.

По результатам статистической обработки более 3000 одометрических испытаний в Санкт-Петербурге, выполненных в период с 2003 по 2018 гг., средняя величина относительных объемных деформаций лабораторного образца четвертичного возраста при величине природного эффективного напряжения составит порядка 6–7%. Относительное изменение коэффициента пористости составит порядка 14–15%. По классификации, предложенной Т. Lunne и др. [16], качество образцов определяется как «плохое» и «очень плохое». Учитывая плохое качество лабораторных образцов грунта, стандартные методы (приведенные в ГОСТ) определения расчетных прочностных и деформационных характеристик для выполнения численных расчетов оказываются неприменимыми. Для выполнения численных расчетов с использованием современных моделей грунтовых сред необходимо использовать специальные методы восстановления:

- недренированной сдвиговой прочности;
- давления переуплотнения;
- одометрического модуля / компрессионного индекса;
- сдвиговой жесткости;
- консолидационного параметра;
- реологических параметров.

Одним из возможных является метод оценки изменения этих свойств, предложенный Т. Shogaki [23, 24]. Метод предполагает отбор образцов ненарушенной струк-

туры с последующим их разуплотнением с определенной долей деформации. В результате серии лабораторных испытаний образцов с различной степенью разуплотнения строятся кривые деградации расчетных параметров либо их относительных величин. К недостаткам такого подхода, вероятно, можно отнести необходимость проведения большого количества испытаний грунтов с различными числами пластичности и коэффициентами пористости. Для инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга выполнение таких исследований могло бы быть актуальным с учетом общего терригенного характера происхождения осадочной толщи [1].

Возможными путями восстановления расчетных геомеханических параметров моделей грунтовых сред являются статистические оценки этих распределений в определенных границах нарушения структурных связей лабораторных образцов с последующим применением алгоритмов их восстановления. Оценки эффективности восстановления деформационных и прочностных свойств первоначально необходимо верифицировать на основе моделирования результатов полевых испытаний (статического зондирования, штамповых и прессиометрических испытаний).


Важность разработки статистических оценок изменения основных прочностных и деформационных параметров, а также разработки эффективных алгоритмов / приемов их восстановления крайне актуальна, например, для исследования гляциальных отложений, а также дочетвертичных отложений, залегающих в отдельных районах на достаточно больших глубинах. Ледниковые отложения основных морен, а также флювиогляциальные отложения, в отдельных районах города оказываются богатыми валунами и галькой. Естественно, что зачастую в таких условиях применение грунтоносом может быть затруднено или вообще невозможно.

Важнейшим звеном в верификации параметров моделей грунтовых сред является сравнение с результатами длительных наблюдений за осадками зданий и сооруже-

ний на территории, а также сравнение с результатами наблюдений в различных геотехнических ситуациях на более коротких промежутках времени, например, за время устройства подземных сооружений (в процессе экскавации котлована).

Помимо разработки методов восстановления прочностных и деформационных свойств лабораторных образцов важной является разработка более представительных критериев оценки степени нарушения их природной структуры и соответствующее уточнение градаций качества для уже известных критериев применительно к инженерно-геологическим условиям Санкт-Петербурга.

Результаты настоящей работы показывают необходимость качественной переработки отечественных норм, регулирующих проведение и верификацию результатов инженерно-геологических изысканий, а также практики выполнения геотехнических расчетов, с целью их гармонизации с международными стандартами. Это особенно необходимо при проведении геотехнических работ на шельфе, прибрежных участках в зонах акваторий. Для Санкт-Петербурга особняком стоит проблема создания намывных территорий на слабых грунтах (отдельные участки которых располагаются в зонах палеодолин) с последующим строительством зданий, дорожной и инженерной инфраструктуры. Отчасти именно поэтому в настоящей работе автором были приведены кривые деградации геотехнических параметров морских отложений на побережьях по результатам комплексных исследований японских коллег.

Существующие на сегодня стандарты и сложившиеся методы выполнения инженерно-геологических изысканий, которые в ряде случаев являются некачественными, де-факто перекладывают ответственность на инженеров-геотехников, которые вынуждены часто принимать довольно сложные проектные решения, руководствуясь лишь своим практическим опытом, а не результатами сложного численного моделирования. 

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васенин В.А., 2018. Оценки изменения физических свойств глинистых отложений на территории Санкт-Петербурга и их связь с механизмами переуплотнения. *Геотехника*, № 3, с. 70–86.
2. Голли А.В., Тихомирова Л.К., 1979. Грунтонос. Авторское свидетельство СССР на изобретение. № 881196 кл. G 01 N 1/04.
3. Голли А.В., Тихомирова Л.К., Шашкин А.Г., 1990. Грунтонос. Авторское свидетельство СССР на изобретение. № 1612228 кл. G 01 N 1/04.
4. Голли А.В., Лисюк М.Б., Шулятьев О.А., 1986. Грунтонос. Авторское свидетельство СССР на изобретение. № 1259133 кл. G 01 N 1/04.
5. Andersen A., Kolstad P., 1979. The NGI 54-mm samplers for undisturbed sampling of clays and representative sampling of coarser materials. *Proceedings of the International Conference on Soil Sampling*, Singapore.
6. Baligh M.M., 1985. The strain path method. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 111, No. 9, pp. 1108–1136.
7. Baligh M.M., Azzouz A.S., Chin C.T., 1987. Disturbances due to ideal tube sampling. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 113, No. 7, pp. 739–757.
8. Bjerrum L., 1973. Problems of soil mechanics and construction on soft clays. *Proceedings of the 8th ICSMFE*, Moscow, Vol. 3, pp. 111–159.
9. Henkel D.J., 1960. The Relationships between the Effective Stresses and Water Content in Saturated Clays, *Geotechnique*, No. 10, pp. 41–54.
10. Lacasse S, Berre T, 1988. Triaxial testing methods for soils. In: Donaghe RT, Chaney RC, Silver ML (eds). *Advanced triaxial testing of soil and rock*, ASTM STP 977. ASTM, Philadelphia, PA, pp. 264–289.
11. Ladd C.C., Lambe T.W., 1963. The Strength of Undisturbed Clay Determined From Undrained Tests. *Symposium on Laboratory Shear Testing of Soils*, ASTM STP 361, pp. 342–371.

12. Ladd C.C., Foot R., 1974. New design procedure for stability of soft clays. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 4, pp. 540–615.
13. Ladd C.C., Don J. DeGroot, 2003. Recommended Practice for Soft Ground Site Characterization: Arthur Casagrande Lecture. 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, pp. 1–55.
14. Leonards G.A., 1976. Estimating consolidation settlements of shallow foundation on overconsolidation clay. TRB, Special report, 163.
15. Lunne T., Berre T., Strandvik S., 1997. Sample disturbance effect in soft low plasticity Norwegian clay. *Proceedings of the Conference on Recent Developments in Soil Mechanics*, Rio-de-Janeiro, 1997, pp. 81–102.
16. Lunne T., Berre T.V., Strandvik S., 1998. Sample disturbance effects in deep water soil investigations. *Offshore Site Investigation and Foundation Behaviour 'New Frontiers: Proceedings of an International Conference*, 22–24 September, London, UK, pp. 81–102.
17. Nakase A., Kusakabe A., Nomura H., 1985. A method for correcting undrained shear strength for sample disturbance. *Soils and foundation*, Vol. 25, No. 1, pp. 52–64.
18. Santagata M.C., Germaine J.T., 2002. Sampling disturbance effects in normally consolidated clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 128, No. 12, pp. 997–1006.
19. Schmertmann J.N., 1955. The undisturbed consolidation behavior of clay. *Transactions of ASCE*, pp. 1201–1227.
20. Scofield A.N., Wroth C.P., 1968. *Critical state soil mechanics*. London: McGraw-Hill.
21. Siddique A., 1990. A numerical and experimental study of sampling disturbance. Thesis diss.
22. Simons N., Menzies B. Matthews M., 2002. *A short course in geotechnical site investigation*. London: Thomas Telford.
23. Shogaki T., 1994. Effects of samples on strength and consolidation parameter of soft clay. *Soil and foundation*, Vol. 34, No. 3, pp. 1–10.
24. Shogaki T., 1996. A method for correcting consolidation parameters for sample disturbance using volumetric strain. *Soils and Foundations*, Vol 36, No. 3, pp. 123–131.
25. Terzaghi K., Peck R.B. Mesri G., 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley and Sons, New York.

REFERENCES

1. Vasenin V.A., 2018. Evaluation of clay deposits physical properties changed regularities in Saint-Petersburg territory and their communication with overconsolidation mechanisms. *Geotechnics*, № 3, pp. 70–86. (in Russian)
2. Golli A.V., Tikhomirova L.K., 1979. Sampler. Author's certificate of the USSR for invention. № 881196 v. G 01 N 1/04. (in Russian)
3. Golli A.V., Tikhomirova L.K., Shashkin A.G., 1990. Sampler. Author's certificate of the USSR for invention. № 1612228 v. G 01 N 1/04. (in Russian)
4. Golli A.V., Lisyuk M.B., Shulyatiev O.A., 1986. Sampler. Author's certificate of the USSR for invention. № 1259133 v. G 01 N 1/04. (in Russian)
5. Andersen A., Kolstad P., 1979. The NGI 54-mm samplers for undisturbed sampling of clays and representative sampling of coarser materials. *Proceedings of the International Conference on Soil Sampling*, Singapore.
6. Baligh M.M., 1985. The strain path method. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 111, No. 9, pp. 1108–1136.
7. Baligh M.M., Azzouz A.S., Chin C.T., 1987. Disturbances due to ideal tube sampling. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 113, No. 7, pp. 739–757.
8. Bjerrum L., 1973. Problems of soil mechanics and construction on soft clays. *Proceedings of the 8th ICSMFE*, Moscow, Vol. 3, pp. 111–159.
9. Henkel D.J., 1960. The Relationships between the Effective Stresses and Water Content in Saturated Clays, *Geotechnique*, No. 10, pp. 41–54.
10. Lacasse S, Berre T, 1988. Triaxial testing methods for soils. In: Donaghe RT, Chaney RC, Silver ML (eds). *Advanced triaxial testing of soil and rock*, ASTM STP 977. ASTM, Philadelphia, PA, pp. 264–289.
11. Ladd C.C., Lambe T.W., 1963. The Strength of Undisturbed Clay Determined From Undrained Tests. *Symposium on Laboratory Shear Testing of Soils*, ASTM STP 361, pp. 342–371.
12. Ladd C.C., Foot R., 1974. New design procedure for stability of soft clays. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 4, pp. 540–615.
13. Ladd C.C., Don J. DeGroot, 2003. Recommended Practice for Soft Ground Site Characterization: Arthur Casagrande Lecture. 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, pp. 1–55.
14. Leonards G.A., 1976. Estimating consolidation settlements of shallow foundation on overconsolidation clay. TRB, Special report, 163.
15. Lunne T., Berre T., Strandvik S., 1997. Sample disturbance effect in soft low plasticity Norwegian clay. *Proceedings of the Conference on Recent Developments in Soil Mechanics*, Rio-de-Janeiro, 1997, pp. 81–102.

16. Lunne T., Berre T.V., Strandvik S., 1998. Sample disturbance effects in deep water soil investigations. Offshore Site Investigation and Foundation Behaviour 'New Frontiers: Proceedings of an International Conference, 22–24 September, London, UK, pp. 81–102.
17. Nakase A., Kusakabe A., Nomura H., 1985. A method for correcting undrained shear strength for sample disturbance. Soils and foundation, Vol. 25, No. 1, pp. 52–64.
18. Santagata M.C., Germaine J.T., 2002. Sampling disturbance effects in normally consolidated clays. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 128, No. 12, pp. 997–1006.
19. Schmertmann J.N., 1955. The undisturbed consolidation behavior of clay. Transactions of ASCE, pp. 1201–1227.
20. Scofield A.N., Wroth C.P., 1968. Critical state soil mechanics. London: McGraw-Hill.
21. Siddique A., 1990. A numerical and experimental study of sampling disturbance. Thesis diss.
22. Simons N., Menzies B. Matthews M., 2002. A short course in geotechnical site investigation. London: Thomas Telford.
23. Shogaki T., 1994. Effects of samples on strength and consolidation parameter of soft clay. Soil and foundation, Vol. 34, No. 3, pp. 1–10.
24. Shogaki T., 1996. A method for correcting consolidation parameters for sample disturbance using volumetric strain. Soils and Foundations, Vol 36, No. 3, pp. 123–131.
25. Terzaghi K., Peck R.B. Mesri G., 1996. Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley and Sons, New York.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ВАСЕНИН ВЛАДИСЛАВ АНАТОЛЬЕВИЧ

*Заместитель генерального директора института «Геореконструкция»,
к.т.н., г. Санкт-Петербург, Россия*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

VLADISLAV A. VASENIN

*Deputy General Director of the «Georeconstruction» Institute, PhD
(Candidate of Science in Technics), Saint-Petersburg, Russia*

