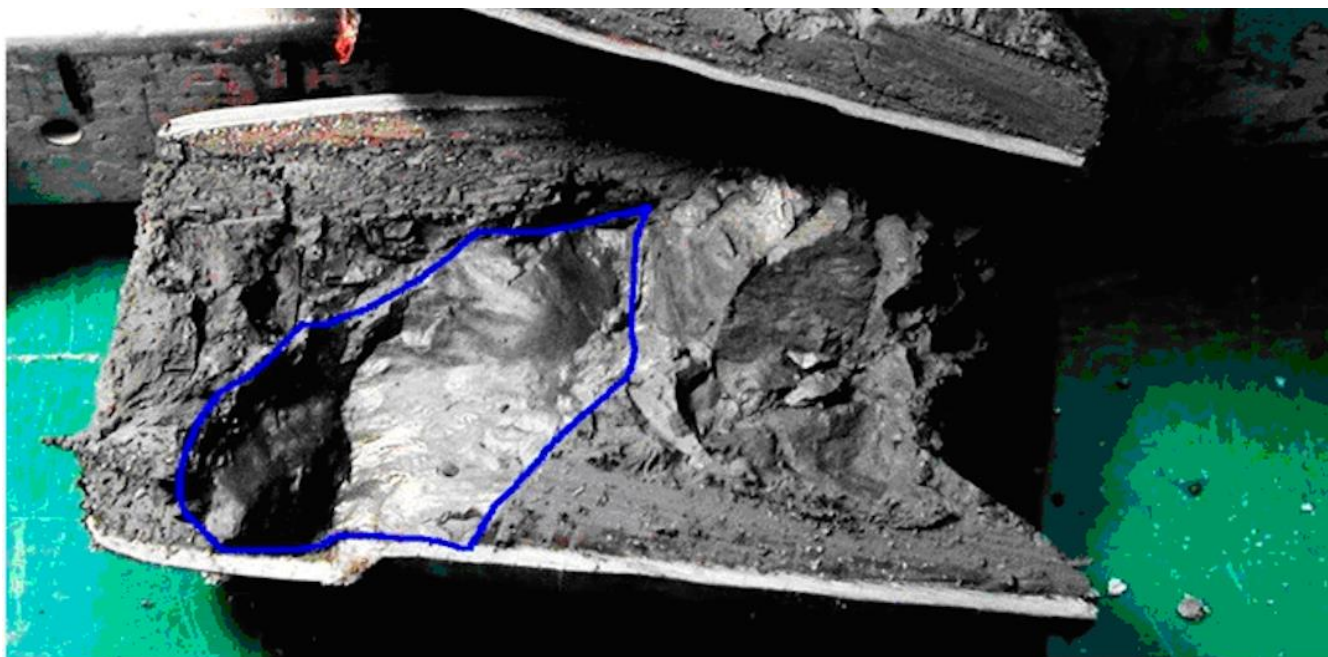


Об определении природного горизонтального напряжения в сизтлской глине с помощью прессиометра. Часть 3



По инициативе и при поддержке ООО «Петромоделинг» редакция журнала «ГеоИнфо» продолжает знакомство читателей с методом прессиометрических испытаний грунтов. Данные испытания большинством изыскателей и проектировщиков воспринимаются как «более дешевая и простая альтернатива штамповых испытаний». На деле эта технология является уникальным методом испытаний грунтов в массиве. Она используется для определения как действующих горизонтальных напряжений и коэффициента горизонтального давления грунта в состоянии покоя K_0 (без которого, как известно, невозможны оценка начального (природного) состояния геологической среды и дальнейшие расчетные обоснования конструкций), так и физико-механических откликов геологической среды на горизонтальное механическое воздействие. Например, таких как зависимость между напряжениями и деформациями и недренированная прочность.

Понимание методов оценки напряженно-деформированного состояния массива грунтов очень важно для эффективного перехода к трехмерному моделированию геологической среды и построению ее инженерных цифровых моделей. Это базовая часть информационной цифровой модели объекта капитального строительства, без которой любые информационные проектные построения просто «повисают в воздухе».

Сегодня предлагаем вниманию читателей третью (заключительную) часть обзора материалов статьи «Измерение горизонтального напряжения *in situ* в озерно-ледниковой сизтлской глине с использованием прессиометра» [1], написанной Оливером Хупсом и Джоном Хьюзом и опубликованной в 2014 году в «Журнале по геотехнике и геоэкологической инженерии» (*Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*), издаваемом Американским обществом инженеров-строителей (ASCE).

В предыдущих частях были описаны грунтовые условия на изученной территории, процедуры выполненных авторами статьи [1] испытаний и использованные ими методы оценки коэффициента K_0 . Сейчас будет рассмотрено сопоставление результатов полевых прессиометрических испытаний и лабораторных исследований на основе применения зависимости между коэффициентом K_0 и коэффициентом переуплотнения OCR и зависимости между K_0 и числом

пластичности PI. Отметим, что нумерация рисунков продолжит начатую в первой и второй частях обзора.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ СЛУЖБА ГЕОИНФО

info@geoinfo.ru

БЕРШОВ АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ

Генеральный директор Группы компаний «Петромоделинг»

alexey.bershov@petromodeling.com

ООО "ПЕТРОМОДЕЛИНГ"

Генеральный спонсор «ГеоИнфо»

info@petromodeling.com

Применение зависимостей « K_0 – OCR» и « K_0 – PI» для сопоставления результатов прессиометрических и лабораторных испытаний

Как указывают авторы статьи [1], зависимости между коэффициентом горизонтального давления грунта в состоянии покоя $K_0 = \sigma_{h0}/\sigma_{v0}$ (где σ_{h0} – общее горизонтальное напряжение *in situ*, σ_{v0} – общее вертикальное напряжение *in situ*) и коэффициентом переуплотнения OCR = σ_{vY}/σ_{v0} (где σ_{vY} – максимальное эффективное вертикальное напряжение, которое грунт выдерживал в прошлом, или давление предварительного уплотнения, обозначенное точкой D на рисунке 4 в первой части обзора), а также зависимости между K_0 и числом пластичности PI выводили по результатам наблюдений многие исследователи. Наиболее устоявшиеся из них были предложены Брукером и Ирландом (Brooker, Ireland, 1965), которые связали K_0 с PI и OCR и представили эту связь в графическом виде, и Мейном и Кулхави (Mayne, Kulhawy, 1982), которые получили следующую формулу:

$$K_0 = K_{0NC}(\text{OCR})^\alpha, \quad (1)$$

где K_{0NC} – величина K_0 при одномерном первичном сжатии (OCR = 1), обычно принимаемая равной $1 - \sin \phi'$; $\alpha = \sin \phi'$; ϕ' – эффективный угол внутреннего трения (Кулхави и Мейн рекомендовали использовать значение ϕ' , соответствующее напряжению на пределе прочности при обычном трехосном испытании (ϕ'_{TC})).

Это уравнение, как отмечают Хупс и Хьюз [1], применимо к простой траектории напряжений при осесимметричной одноосной разгрузке (после осесимметричного одноосного нагружения).

Авторы работы [1] выполнили 8 одометрических испытаний образцов довашонской (четвертичной) ледниково-озерной глины (Qpgl), извлеченных при изысканиях для строительства тоннеля на автомагистрали SR-99 в деловом центре города Сиэтл (США). Чтобы дополнить ограниченное количество полученных при этом данных, были взяты результаты испытаний на консолидацию (consolidation tests) из материалов нескольких предыдущих геотехнических изысканий в районе Сиэтла, проведенных для разных проектов. Кроме того, сами Хупс и Хьюз [1] выполнили 59 консолидационных испытаний на образцах довашонской озерно-ледниковой глины (Qpgl) и вашонской озерно-ледниковой глины Лотона (Qvgl).

При оценке вертикального эффективного напряжения текучести σ'_{vY} по данным этих испытаний авторы работы [1] сделали два основных наблюдения.

1. Кривые « $e - \lg \sigma'_{vc}$ » (где e – коэффициент пористости; σ'_{vc} – вертикальное эффективное напряжение консолидации, приложенное в одометре), полученные в результате

испытаний на консолидацию образцов сизтлской глины, при низких напряжениях демонстрируют ответы с «мягкими» переходами между состояниями и обычно не показывают четко определяемых пределов текучести. Как указывают Хупс и Хьюз [1], такое же поведение наблюдали в похожих глинах из разных регионов мира и другие исследователи (Grozic et al., 2003; Jefferies et al., 1987), которые пришли к выводу, что наиболее надежный метод оценки значения σ'_{vY} для глин, показывающих такое поведение, был предложен Беккером и др. (Becker et al., 1987). Этот метод, основанный на критерии работы W на единицу объема при консолидации в одометре

$$(W = \int \sigma'_{vc} d\varepsilon_v, \text{ где } \varepsilon_v - \text{вертикальная деформация}), \quad (2)$$

определяет величину σ'_{vY} как точку в координатной плоскости « $W - \sigma'_{vc}$ » определяемую пересечением линии, соответствующей точкам данных ниже природного вертикального эффективного напряжения σ'_{v0} , и линии, подобранной для точек данных при высоких напряжениях консолидации, расположение которых склонно быть линейным. И это, как указывают авторы статьи [1], «вводит» второе основное наблюдение по одометрическим испытаниям сизтлской глины.

2. В 27 из 59 испытаний на консолидацию, выполненных Хупсом и Хьюзом [1], образцы либо не были нагружены выше σ'_{vY} , либо не были нагружены достаточно далеко за пределами σ'_{vY} , чтобы показать линейный тренд в координатной плоскости « $W - \sigma'_{vc}$ » при высоких вертикальных напряжениях. Определение надежных значений σ'_{vY} для таких испытаний было невозможным с помощью какого бы то ни было метода из-за отсутствия четко выраженного поведения при первичном сжатии.

Значения OCR, полученные авторами работы [1] на основе результатов 32 испытаний, однозначно показали линейность зависимости « $W - \sigma'_{vc}$ » после предела текучести (рис. 13). Используя данные консолидационных испытаний, Хупс и Хьюз [1] аппроксимировали верхнюю и нижнюю границы σ'_{vY} для сизтлской глины (см. абсциссу точки D на рисунке 4 в первой части обзора) с помощью следующего неравенства:

$$\sigma'_{v0} + 1,2 \text{ МПа} < \sigma'_{vY} < \sigma'_{v0} + 3,9 \text{ МПа} . \quad (3)$$

Примеры кривых OCR, определяемых этими границами и полученных на основе средних значений σ'_{v0} , представлены на рисунке 13.

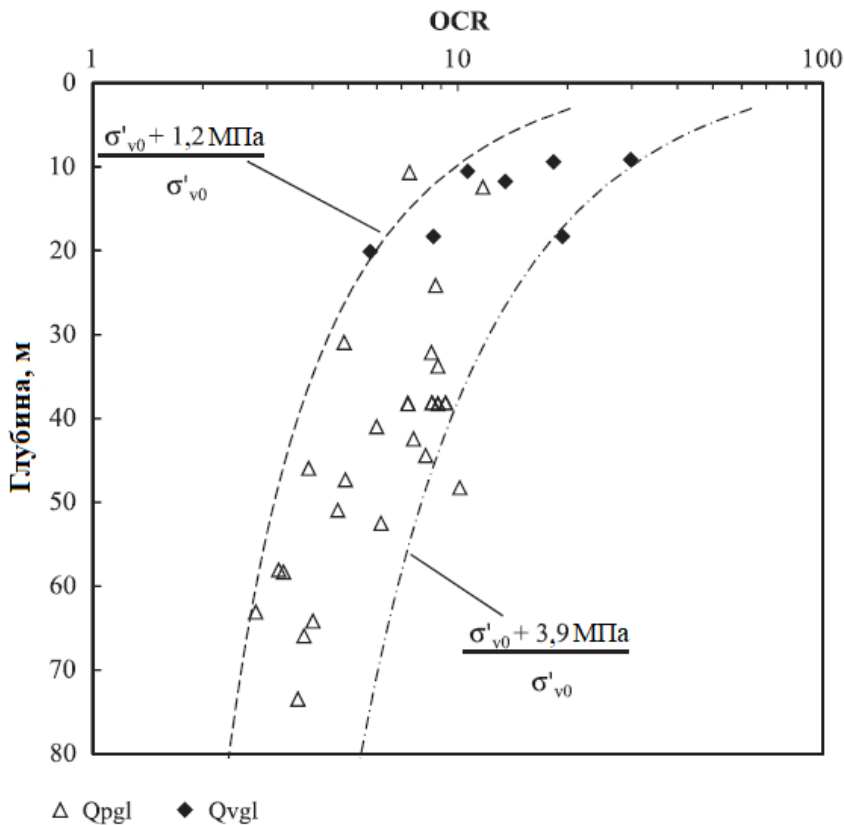


Рис. 13. Зависимости OCR от глубины и предельных соотношений σ_{vc}/σ_{v0} (см. неравенство (3)) по результатам одометрических испытаний образцов из скважин ТВ-318, ТВ-320 и ТВ-321 (по [1])

Далее авторы статьи [1] дают следующее пояснение. Хотя и трудно с уверенностью определить, какой процесс или какая их комбинация (например, нагрузка от ледника, сложные изменения в давлениях подледниковых поровых вод, накопление и эрозия отложений прогляциального вымыва GLF) вызвали в прошлом максимальные вертикальные эффективные напряжения в сизтлской глине, но эти напряжения были «записаны в памяти» глины об истории нагружения и могут наблюдаться в виде величин σ'_{vy} , получаемых при одометрических испытаниях. Другими словами, независимо от конкретных деталей концептуальной истории нагружения, например от времени возникновения максимальных напряжений (будь то в период последнего вашонского оледенения, как показано на рисунке 4 в первой части обзора, или, возможно, во время более раннего оледенения) или от причин их формирования (в результате нагрузки только от ледника, только от отложений прогляциального вымыва или от какой-либо комбинации факторов), величина максимального вертикального напряжения скорее всего попадет в диапазон, представленный в неравенстве (3).

Чтобы оценить профили K_0 при простой разгрузке, авторы работы [1] подставили в уравнение (1) верхнюю и нижнюю границы профилей OCR на основе неравенства (3) (рис. 14). Для оценки K_{0NC} и параметра разгрузки α использовалось максимальное значение ϕ'_{tc} , равное 29 град. (см. таблицу 2 в первой части обзора). На рисунке 14 также представлены диапазоны K_0 , полученные с помощью диаграммы Брукера и Ирлэнда (Brooker, Ireland, 1965), взятые из таблицы 3 (см. первую часть обзора) и вычисленные с помощью неравенства (3).

деформированные зоны являются прерывистыми в горизонтальном направлении, Хупс и Хьюз [1] предполагают, что со времени сдвига горизонтальные напряжения в этих зонах распространились на соседние менее нарушенные зоны.

Как видно из рисунка 14, многие из значений K_0 , полученные с помощью прессиометра, значительно выше, чем можно было бы ожидать на основе рассмотрения простой разгрузки (rebound) и использования методов Мэйна и Кулхави (Mayne, Kulhawy, 1982) или Брукера и Ирлэнда (Brooker, Ireland, 1965). Авторы статьи [1] не считают это свидетельством, ставящим под сомнение формулы, предложенные вышеуказанными исследователями. Они скорее рассматривают это как реальный пример способности глины сохранять трехмерную «память» об истории нагружения.

Далее авторы работы [1] ссылаются на выводы Месри и Хайата (Mesri, Hayat, 1993), которые показали, что горизонтальные эффективные напряжения σ'_h образцов глины, подвергнутых дренированному сжатию, ограниченному в поперечном направлении (то есть одометрической траектории напряжений), затем пассивному сдвигу (увеличению σ'_h при постоянном σ'_v), а затем повторному наложению боковых ограничений, не возвращаются к состоянию K_{0NC} после того, как рассеялось избыточное поровое давление. Вместо этого после рассеивания порового давления в образцах оставалось примерно 40% приложенных горизонтальных напряжений. Месри и Хайат предложили оценивать величину K_0 после пассивного сдвига во время одномерной вертикальной разгрузки путем замены коэффициента K_{0NC} в уравнении (1) на K_{0P} – коэффициент горизонтального напряжения, оцененный с использованием остаточного (или внутреннего) горизонтального напряжения после пассивного сдвига.

Хотя степень увеличения горизонтальных напряжений в глине из-за наступания довашонского ледникового языка и накопления ледниковой морены (Qpgt) неизвестна, уровень деформаций, проявляющийся во многих образцах довашонской озерно-ледниковой глины (Qpgl) из деформированных зон, навела авторов работы [1] на мысль о том, что горизонтальные напряжения, вероятно, были достаточно высокими для того, чтобы вызвать локальные пассивные нарушения (см. ординату точки В на рисунке 4 в первой части обзора). Другими словами, величина K_{0P} может составлять порядка $0,4K_P$ (где K_P – коэффициент горизонтального давления грунта в пассивном состоянии после ледникового сдвига). Использование уравнения (1) приведет эту величину к текущему значению K_0 *in situ*, которое будет значительно выше диапазона, оцененного при исследовании [1]. По предположению авторов статьи [1], это очевидное несоответствие связано с тем, что «бульдозерное» воздействие ледника и перекрытие глин толщей Qpgt во время оледенения, при котором сформировались рассматриваемые отложения Qpgl (а эти процессы, вероятно, вызвали самые высокие напряжения пассивного сдвига в Qpgl) произошли до вашонского оледенения и накопления вашонских отложений прогляциального вымыва GLF.

Далее Хупс и Хьюз [1] ссылаются на выводы Гудехуса (Gudehus et al., 1977) и Топольницкого (Topolnicki et al., 1990) с соавторами, которые показали, что после изменения направления траектории деформирования (например, от горизонтального деформирования пассивного типа к поперечно ограниченному вертикальным нагружению и разгрузке) переориентация частиц грунта склонна вызывать асимптотическое смещение направления траектории напряжений в сторону новой траектории деформирования, из-за чего грунт постепенно теряет «память» о первоначальной истории девиаторных напряжений (деформаций).

Резюме и выводы

Итак, авторами работы [1] был использован новый подход к оценке природных горизонтальных напряжений в грунте путем поиска равновесного давления с помощью тестов на ползучесть, выполняемых на стадии разгрузки при определенных давлениях, поддерживаемых в измерительной камере определенное время (balance pressure creep

testing – ВРС). В своем исследовании они использовали для этого результаты 10 испытаний указанным методом, выполненных в экспериментальном порядке во время геотехнических изысканий для строительства тоннеля на автомагистрали SR-99 в деловом центре Сиэтла (прессиометрические испытания при этом выполнялись силами компании In Situ Engineering из города Снохомиш штата Вашингтон США).

После написания основной части своей статьи [1] ее авторы продолжили развивать рассматриваемый новый подход, используя в последующих проектах усовершенствованные процедуры тестирования на его основе с попытками контролировать возможные эффекты скорости и продолжительности нагружения. К тому же, как отмечают Хупс и Хьюз [1], во время нагружения в недренированных условиях при прессиометрическом испытании развиваются поровые давления, которые также могут иметь некоторое влияние на характеристики ползучести. Однако, поскольку мембрана измерительной камеры прессиометра водонепроницаема, эти давления должны рассеиваться в грунтовом массиве. Кроме того, испытания на ползучесть проводятся только в течение примерно 2 минут. При этом авторы работы [1] допускают, что изменение диаметра полости обусловлено неуравновешенным (несбалансированным) полем давлений, а не диссипацией поровой воды. Поэтому они подчеркивают, что будут очень полезны дальнейшие экспериментальные исследования с измерением порового давления в контролируемых лабораторных условиях, чтобы помочь лучше понять взаимосвязь между изменением диаметра полости в результате ползучести и горизонтальным напряжением в окружающем грунте *in situ*.

Несмотря на вышеупомянутые неопределенные аспекты испытаний с использованием нового подхода, Хупс и Хьюз [1] обнаружили, что природные горизонтальные напряжения, оцененные с помощью этого метода, согласуются с их величинами, полученными с помощью подбора подходящих кривых комплексных геомеханических моделей грунта. Однако эти напряжения были значительно выше, чем предполагалось на основе зависимостей « $K_0 - OCR$ » и « $K_0 - PI - OCR$ », хорошо известных для стадии разгрузки. В некоторых случаях эти зависимости занижают горизонтальное напряжение *in situ* более чем в 2 раза. Поскольку в отложениях довашонской озерно-ледниковой глины (Qpgl) часто наблюдаются зоны интенсивных деформаций, то на основе указанных зависимостей вполне можно предположить, что эти грунты подверглись значительному горизонтальному сдвигу, а не простым ограниченному в горизонтальном направлении нагружению и разгрузке.

Как указывают авторы работы [1], измерения, выполненные в прошлом (во время строительства межштатной скоростной автомагистрали I-5 на территории Сиэтла в 1960-х годах), уже показали высокие природные горизонтальные давления в сиэтлской глине и были сочтены основной причиной нестабильности срезанных склонов и укрепленных бортов котлованов. Оползни в этих отложениях обычно связывают с инфильтрацией дождевой воды.

Однако, ссылаясь на результаты конечноэлементного моделирования, выполненного Данкэном и Данлопом (Duncan, Dunlop, 1969), авторы статьи [1] отмечают следующее. Если в модели удвоить величину K_0 для условий *in situ*, то оцененное максимальное напряжение сдвига в основании срезанного склона увеличится в 2 раза. Другими словами, полученное сопротивление сдвигу будет значительно ниже, чем измеренное при обычном трехосном испытании (на изотропное сжатие). Поскольку очень жесткие глины, такие как Qpgl и Qvgl, изначально демонстрируют отрицательное индуцированное давление поровой воды, то их прочность при начальном (недренированном) сдвиге обычно очень высока, что, как правило, приводит к временному стабильному состоянию срезанной части склона. Но, как только индуцированное отрицательное поровое давление рассеется (через дни, недели, месяцы или годы в зависимости от условий дренирования), прочность на дренированный сдвиг вдоль потенциальной плоскости скольжения может стать ниже, чем приложенное напряжение сдвига. Дождевая вода или грунтовые воды из линз и прослоев песка, встречающихся внутри глины, могут просачиваться в трещины, которые могут открыться во время разгрузки. Это может нарушить капиллярное и поровое давление и ускорить разрушение. Однако

объяснение таких разрушений только результатом инфильтрации подземных вод без учета высокого коэффициента горизонтального давления грунта в состоянии покоя K_0 упускает из виду потенциально критический долгосрочный характер нарушений грунта.

Источник

1. Hoopes O., Hughes J. In situ lateral stress measurement in glaciolacustrine Seattle clay using the pressuremeter // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE, 2014. V. 140. P. 04013054-1 – 04013054-11.

Список литературы, использованной авторами статьи [1]

Andrews G.H., Squier L.R., Klasell J.A. Cylinder pile retaining walls // *Structural Engineering Conf.*, 1966. Reston, VA: ASCE, 1966.

Becker D.E., Crooks J.H.A., Been K., Jefferies M.G. Work as a criterion for determining in situ and yield stresses in clays // *Can. Geotech. J.* 1987. Vol. 24. № 4. P. 549–564.

Booth D.B. Glacier physics of the Puget lobe, southwest Cordilleran ice sheet // *Geographie Physique et Quaternaire*. 1991. Vol. 45. № 3. P. 301–315 (in French).

Booth D.B. Glaciofluvial infilling and scour of the Puget Lowland, Washington, during ice-sheet glaciation // *Geology*. 1994. Vol. 22. № 8. P. 695–698.

Booth D.B., Hallet B. Channel networks carved by subglacial water: observations and reconstruction in the eastern Puget Lowland of Washington // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1993. Vol. 105. № 5. P. 671–683.

Briaud J.L. The pressuremeter. Rotterdam, Netherlands: Balkema, 1992.

Brooker E.W., Ireland H.O. Earth pressures at rest related to stress history // *Can. Geotech. J.* 1965. Vol. 2. № 1. P. 1–15.

Duncan J.M., Dunlop P. Slopes in stiff-fissured clays and shales // *J. Soil Mech. Found. Div.* 1969. Vol. 95. № 2. P. 467–492.

Gibson R.E., Anderson W.F. In situ measurement of soil properties with the pressuremeter // *Civ. Eng. Public Works Rev.* 1961. Vol. 56. № 658. P. 615–618.

Grozic J.L.H., Lunne T., Pande S. An oedometer test study on the preconsolidation stress of glaciomarine clays // *Can. Geotech. J.* 2003. Vol. 40. № 5. P. 857–872.

Gudehus G., Goldscheider M., Winter H. Mechanical properties of sand and clay and numerical integration methods: some sources of errors and bounds or accuracy. Chapter 3. Finite elements in geomechanics (ed. by G. Gudehus). London: Wiley, 1977. P. 121–150.

Hughes J.M.O. An instrument for in situ measurement in soft clays: PhD thesis. Cambridge, U.K.: Univ. of Cambridge, 1973.

Jefferies M.G. Determination of horizontal in situ stress in clay with self-bored pressuremeter // *Can. Geotech. J.* 1988. Vol. 25. № 3. P. 559–573.

Jefferies M.G., Crooks J.H.A., Becker D.E., Hill P.R. Independence of geostatic stress from overconsolidation in some Beaufort Sea clays // *Can. Geotech. J.* 1987. Vol. 24. № 3. P. 342–356.

Johnson K.A. Foundations Seattle Freeway Construction, Interstate 5: 1960–1966 // *Engineering geology in Washington* (ed. by R.W. Galster). Vol. II. Olympia, WA: Washington State Dept. of Natural Resources, 1989. P. 773–784.

- Kulhawy F.H., Mayne P.W. Manual on estimating soil properties for foundation design. Rep. № EL-6800. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute (EPRI), 1990.
- Ladanyi B. Expansion of a cavity in a saturated clay medium // *J. Soil Mech. and Found. Div.* 1963. Vol. 89. № SM4. P. 127–161.
- Laprade, William T. Geologic implications of pre-consolidated pressure values, Lawton clay, Seattle, Washington // *Proc. of the 19th Engineering Geology and Soils Engineering Symp.*, 1982. Boise, ID: Transportation Dept., 1982. P. 303–321.
- Marsland A., Randolph M. F. Comparisons of the results from pressuremeter tests and large in situ plate tests in London clay // *Geotechnique*. 1977. Vol. 27. № 2. P. 217–243.
- Mayne P.W., Kulhawy F.H. K_0 -OCR relationships in soil // *J. Geotech. Engrg. Div.* 1982. Vol. 108. № 6. P. 851–872.
- Mesri G., Hayat T.M. The coefficient of earth pressure at rest // *Can. Geotech. J.* 1993. Vol. 30. № 4. P. 647–666.
- Miller J.A. Landslide stabilization in an urban setting, Fauntleroy district, Seattle, Washington // *Engineering geology in Washington* (ed. by R.W. Galster). Vol. II. Olympia, WA: Washington State Dept. of Natural Resources, 1989. P. 681–690.
- Palladino D.J., Peck R.B. Slope failures in an overconsolidated clay, Seattle, Washington // *Geotechnique*. 1972. Vol. 22. № 4. P. 563–595.
- Powell J.J.M. A comparison of four different pressuremeters and their methods of interpretation in a stiff, heavily overconsolidated clay // *3rd. Int. Symposium on Pressuremeters*. London: Thomas Telford, 1990. P. 287–298.
- Rowe P.W. The relevance of soil fabric to site investigation practice // *Geotechnique*. 1972. Vol. 22. № 2. P. 195–300.
- Sherif M.A., Strazer R.J. Soil parameters for design of Mt. Baker Ridge tunnel in Seattle // *J. Soil Mech. Found. Div.* 1973. Vol. 99. № 1. P. 111–122.
- Sherif M.A., Wu M.J. Summary and practical implications of the University of Washington soil and engineering research (1965–1970): Univ. of Washington Soil Engineering Final Report. Seattle: Univ. of Washington, 1971.
- Skempton A.W., Schuster R.L., Petley D.J. Joints and fissures in the London clay at Wraysbury and Edgware // *Geotechnique*. 1969. Vol. 19. № 2. P. 205–217.
- Squier L.R., Klasell J.A. Cylinder pile walls along interstate highway 5, Seattle // *Engineering geology in Washington* (ed. by R.W. Galster). Vol. II. Olympia, WA: Washington State Dept. of Natural Resources, 1989. P. 785–796.
- Strazer R.J., Bestwick L.K., Wilson S.D. Design considerations for deep retained excavations in overconsolidated Seattle clays // *Workshop on Expansive Clays and Shales in Highway Design and Construction*, 1972. Denver: Federal Highway Administration, 1972.
- Thorson R.M. Glacioisostatic response of the Puget Sound area, Washington // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1989. Vol. 101. № 9. P. 1163–1174.
- Topolnicki M., Gudehus G., Mazurkiewicz B.K. Observed stress-strain behavior of remolded saturated clay under plane strain conditions // *Geotechnique*. 1990. Vol. 40. № 2. P. 155–187.
- Troost K.G., Booth D.B. Geology of Seattle and the Seattle area, Washington // *Geological Society of America reviews in engineering geology XX: Landslides and engineering geology of the Seattle, Washington area*, 2008 (ed. by R.L. Baum, J.W. Godt, L.M. Highland). Boulder, CO: Geological Society of America, 2008. P. 1–35.

Washington State DOT (WSDOT). Geotechnical design manual. Manual M46-03.07. Olympia, WA: WSDOT, 2012.