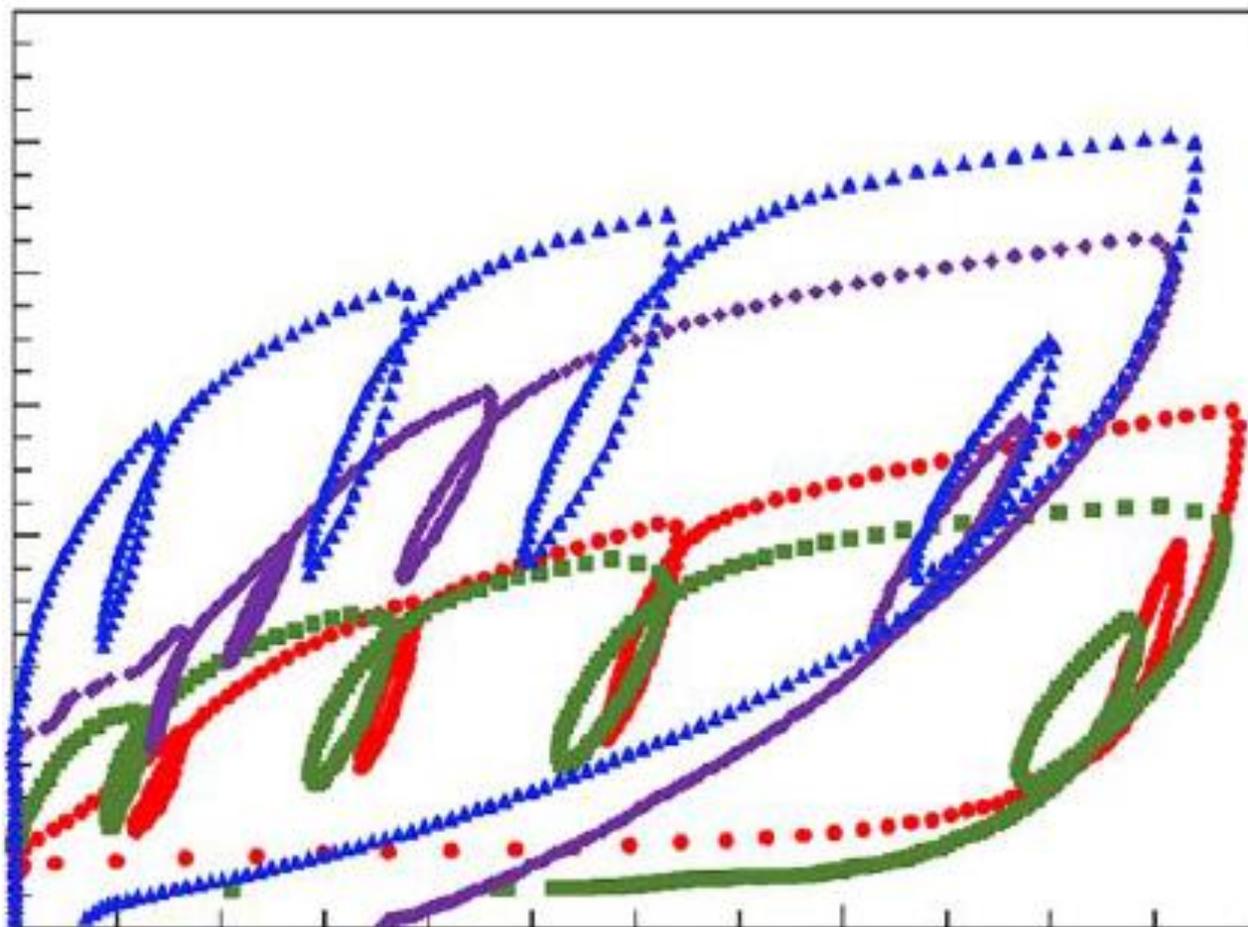


Исследования озерных глин с использованием самозабуривающегося прессиометра на озере Тайху (Китай). Часть 2



Ван Бинь (Wang Bin)

Главная государственная лаборатория геомеханики и инженерно-геотехнических работ Уханьского института механики горных пород и грунтов (г. Ухань) и Университет Китайской академии наук (г. Пекин), Китай
bwang@whrsm.ac.cn

Лю Кан (Liu Kang)

Колледж гражданского строительства при Технологическом университете Хэфэя, г. Хэфэй, Китай
k.liu@hfut.edu.cn

Ван Юн (Wang Yong)

Главная государственная лаборатория геомеханики и инженерно-геотехнических работ Уханьского института механики горных пород и грунтов, г. Ухань, Китай
yongwang93@163.com

Цзян Цюань (Jiang Quan)

Главная государственная лаборатория геомеханики и инженерно-геотехнических работ Уханьского института механики горных пород и грунтов (г. Ухань) и Университет Китайской академии наук (г. Пекин), Китай
qjiang@whrsm.ac.cn (ответственный за переписку)

Бершов Алексей Викторович
Генеральный директор ГК «Петромоделинг»

По инициативе и при поддержке ООО «Петромоделинг» редакция журнала «ГеоИнфо» продолжает знакомить читателей с прессиометрическими испытаниями грунтов. Данная группа методов большинством изыскателей и проектировщиков воспринимается просто как «более дешевая и простая альтернатива штамповых испытаний». На деле же это уникальные методы испытаний грунтов в массивах. Они используются 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 горизонтальные механические воздействия, например зависимостей между напряжениями и деформациями, а также прочности на сдвиг в недренированных условиях.

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

Предлагаем вниманию читателей вторую часть немного сокращенного адаптированного перевода статьи «Исследования озерных глин с использованием самозабуривающегося прессиометра на озере Тайху (Китай)» (ссылка на первоисточник имеется в конце). В этой части будут рассмотрены методы анализа данных, получаемых при испытаниях самозабуривающимся прессиометром, и некоторые результаты испытаний, выполненных авторами переведенной работы. Отметим, что нумерация рисунков и таблиц, соответствующая оригиналу, продолжит начатую в предыдущей части.

Техническая правка выполнена генеральным директором ГК «Петромоделинг» Алексеем Бершовым.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Модуль сдвига

Что касается получения модуля сдвига, существует два разных метода: линейный анализ и нелинейный анализ. В первом случае модуль сдвига для цикла «разгрузка – повторное нагружение» G_{ur} является постоянной величиной, тогда как во втором случае секущий модуль сдвига G_s меняется в зависимости от сдвиговой деформации.

Если принять, что грунт в процессе разгрузки является идеально упругим, то градиент цикла «разгрузка – повторное нагружение» в два раза превысит линейный модуль сдвига G_{ur} [7, 16]. Болтон и Уиттл [26] показали, что зависимость напряжения сдвига (касательного

напряжения τ) от относительной деформации γ (равной относительному изменению объема рабочей камеры прессиометра $\Delta V/V$) может хорошо описываться степенной функцией:

$$\tau = \alpha \gamma^\beta, \quad (1)$$

где α – коэффициент (константа), зависящий от жесткости; β – показатель степени, зависящий от упругости (величины α и β могут быть получены для стадий повторного нагружения циклов «разгрузка – повторное нагружение»).

При каждом испытании SBPM на этапе расширения полости было выполнено по три цикла «разгрузка – повторное нагружение» (рис. 3, а). В логарифмических координатах для стадии повторного нагружения существует сильная линейная корреляция между общим давлением в камере и деформацией сдвига (рис. 3, б). Следовательно, секущий модуль сдвига для случая нелинейного анализа можно выразить следующим образом:

$$G_s = \frac{\tau}{\gamma} = \alpha \gamma^{\beta-1}. \quad (2)$$

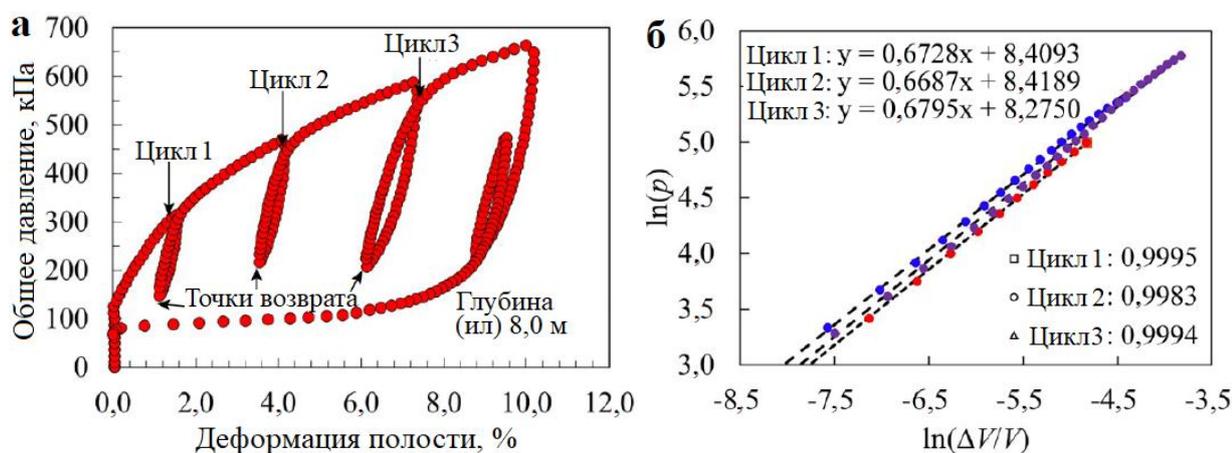


Рис. 3. Репрезентативные графики по результатам испытания самозабуривающимся прессиометром

Недренированная прочность на сдвиг

Прочность на сдвиг в недренированных условиях c_u может быть получена с использованием метода, предложенного Гибсоном и Андерсоном [27], в котором устанавливается взаимосвязь между общим давлением, начальным горизонтальным напряжением и c_u :

$$p = p_0 + c_u [1 + \ln(G/c_u)] + c_u \ln(\Delta V/V), \quad (3)$$

где p – общее давление; p_0 – начальное горизонтальное напряжение; G – модуль сдвига; $\Delta V/V = \gamma$ – относительное изменение объема полости (относительная деформация по объему).

На основе этого уравнения график зависимости между общим давлением и недренированной прочностью на сдвиг может быть построен в полулогарифмической

системе координат. Следует отметить, что хорошо известное решение Гибсона и Андерсона действительно относится к недренированному расширению цилиндрической полости в идеально-упругопластическом грунте. Однако для глины общепринятым является допущение, что все испытания самозабуривающимся прессиометром проводятся в недренированных условиях. При этом допущения о линейном и нелинейном упругом поведении грунта могут привести к различным решениям для напряжений и деформаций, но это не повлияет на полученную в результате недренированную прочность на сдвиг, равную отношению приращения общего давления к приращению логарифмической деформации сдвига грунта, так как более поздняя часть кривой соответствует пластической стадии, а наклон графика представляет собой недренированную сдвиговую прочность.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ САМОЗАБУРИВАЮЩИМСЯ ПРЕССИОМЕТРОМ

В этом разделе интерпретируются результаты полевых испытаний самозабуривающимся прессиометром с анализом горизонтального напряжения *in situ*, недренированной сдвиговой прочности и модуль сдвига грунтов по глубине. В частности, особое внимание уделяется уменьшению модуля сдвига с ростом сдвиговой деформации. Кроме того, с помощью вероятностных теорий представляются статистические характеристики и масштаб изменчивости свойств грунтов по вертикали.

Зависимость «напряжение – деформация» для грунтов

Для иллюстрации на рисунке 4 приведена зависимость между напряжением сдвига и сдвиговой деформацией, полученная при испытаниях самозабуривающимся прессиометром на разных глубинах. Следует отметить, что в самом начале кривая поднимается вдоль вертикальной оси. Причина этого заключается в том, что деформация не будет проявляться до тех пор, пока давление расширения p не достигнет величины горизонтального напряжения σ_{ho} . Когда значение p увеличится до величины давления «отрыва» p_0 (давления при первых признаках начала радиальной деформации стенок скважины), грунт может начать деформироваться, а давление расширения p будет расти с деформацией полости. На рисунке 4 хорошо видно, что напряжение сдвига продолжает увеличиваться с ростом сдвиговой деформации. По мере увеличения глубины кривые обычно поднимаются на графиках выше, отражая характер напряжения сдвига, положительно связанного с глубиной. Также стоит отметить, что кривая для исследованных грунтов на глубине 14 м по сравнению с остальными является наиболее полой, дающей наименьшее касательное напряжение. Это может свидетельствовать о наличии там пластичного слоя, что подтверждается стратиграфической колонкой, показанной на рисунке 2, из которой видно, что на глубинах примерно от 12 до 17 м залегает пластичная илистая глина.

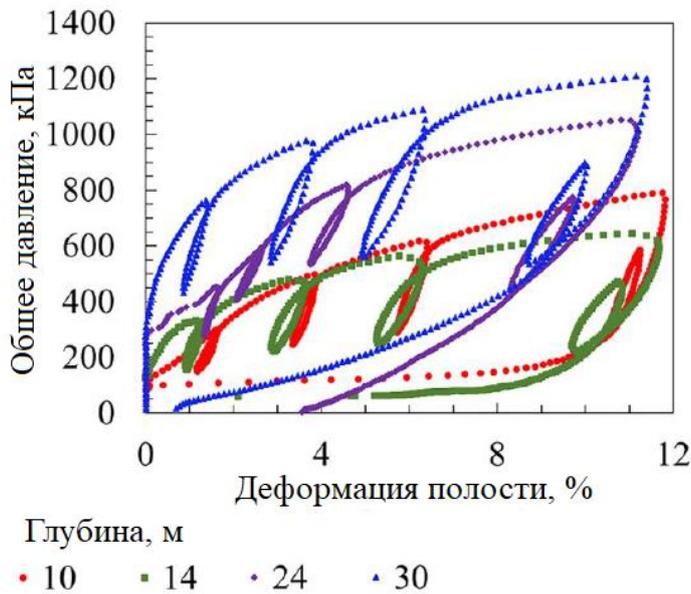


Рис. 4. Графики, иллюстрирующие зависимость «общее давление – деформация полости» при испытаниях самозабуривающимся прессиометром в скважине на разной глубине

На рисунке 5 показано распределение деформаций на пределе текучести для разных грунтов на разных глубинах. При этом:

$$\gamma_y = \exp \left[\left(\frac{p_{Limit} - p_0}{c_u} \right) - \left(\frac{1}{\beta} \right) \right]^{-1}, \quad (4)$$

где γ_y – деформация на пределе текучести, определяющая границу упругого поведения грунта; p_0 – эталонное давление в полости (соответствующее горизонтальному напряжению *in situ*); p_{Limit} – предельное давление.

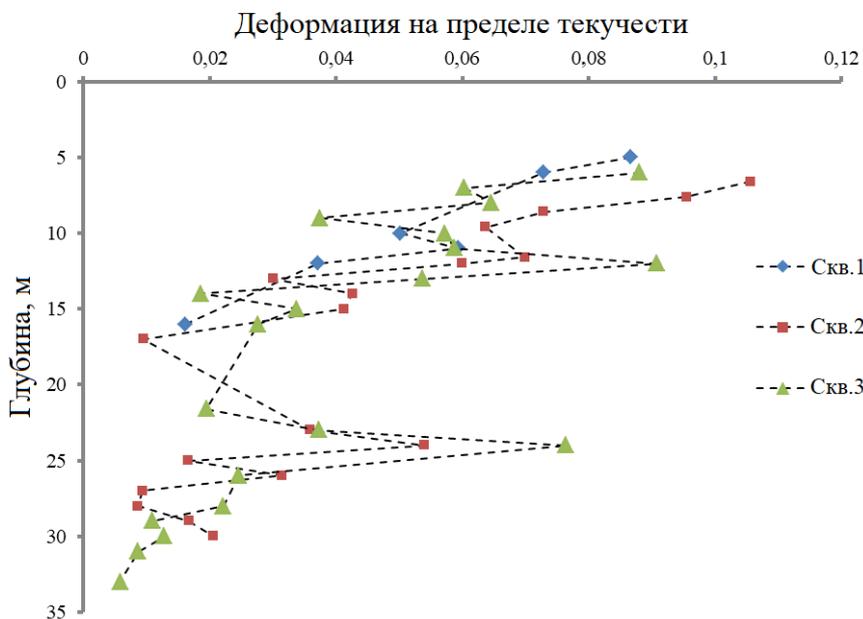


Рис. 5. Распределение по глубине деформаций на пределе текучести для разных грунтов

Из этого рисунка видна общая тенденция к уменьшению деформации на пределе текучести с глубиной. Показано, что с увеличением глубины грунт в процессе нагружения быстрее вступает в пластическую стадию. Еще один вывод заключается в том, что пластичная илистая глина в целом имеет наименьшую деформацию на пределе текучести, а ил – наибольшую. Это может быть связано с более высокой структурной целостностью пластичной илистой глины. Также можно отметить, что деформация на пределе текучести при полевых испытаниях самозабуривающимся прессиометром получается намного больше, чем при лабораторных трехосных испытаниях, которые отражают напряженное состояние лишь одного локального участка в пространстве. Это может быть связано с тем, что текучесть по данным испытаний SBPM характеризует напряженное состояние зоны массива вокруг полости (камеры прессиометра) в зависимости от степени нарушения структурной целостности грунта.

Прочность на сдвиг в недренированных условиях

Как было описано ранее, недренированная прочность на сдвиг c_u при испытании самозабуривающимся прессиометром может быть получена с помощью метода, предложенного Гибсоном и Андерсоном [27]. Изменения c_u с глубиной представлены на рисунке 6. Для сравнения приведены результаты серии лабораторных трехосных испытаний на сжатие в недренированных условиях. Обычно лабораторные данные бывают ниже по сравнению с полевыми. Это может быть связано с тем, что при взятии образцов нарушается структура грунта и снимается напряжение. Однако в целом соответствие между полевыми и лабораторными результатами может в некоторой степени доказать достоверность данных, полученных *in situ*.

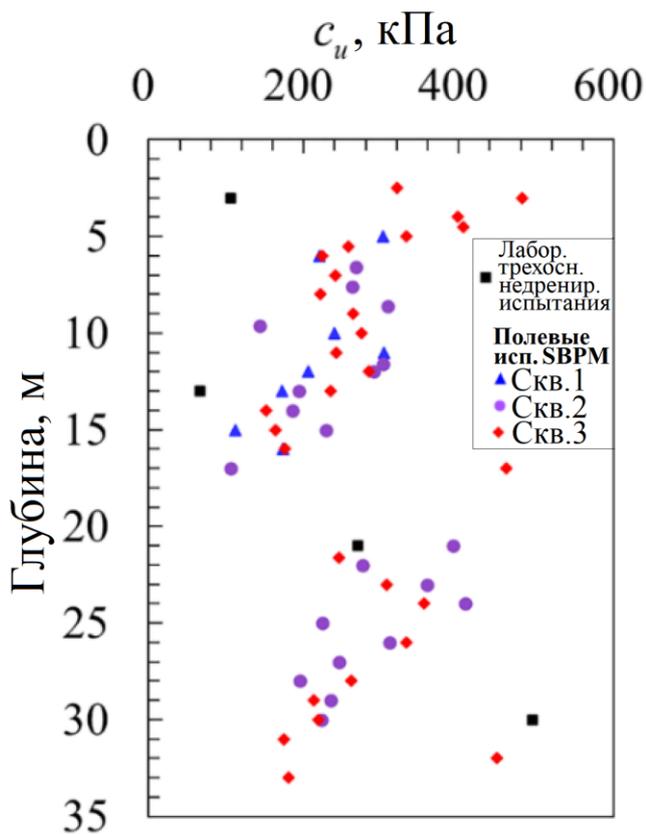


Рис. 6. Результаты определения недренированной прочности на сдвиг с помощью лабораторных трехосных испытаний и полевых испытаний самозабуривающимся прессиометром в скважинах 1, 2 и 3

Общепринято допущение, что все испытания SBPM в глине проводятся в недренированных условиях. Для этого есть две причины. Во-первых, глина обычно имеет очень низкую водопроницаемость. Во-вторых, скорость нагружения относительно высока, из-за чего грунт может не успеть рассеять поровое давление в процессе приложения нагрузки. В этом исследовании также измерялось поровое давление воды u на стенке рабочей камеры прессиометра. На рисунке 7 представлены изменения значений u по глубине в разных слоях грунта. Показан также согласующийся с этими результатами график для гидростатического давления на участке, где уровень грунтовых вод находится примерно на 1 м ниже поверхности грунта.

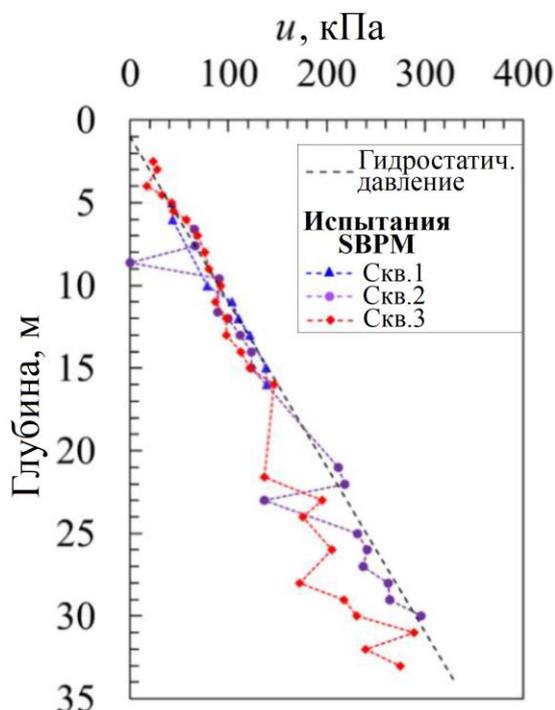


Рис. 7. Результаты определения порового давления воды с помощью испытаний самозабуривающимся прессиометром в скважинах 1, 2 и 3, сопоставленные с гидростатическим давлением

Таким образом, можно сделать вывод, что точность результатов испытаний самозабуривающимся прессиометром можно хорошо продемонстрировать путем сравнения с результатами лабораторных испытаний, а также аналитических решений для распределений гидростатического давления.

В следующей части статьи будут рассмотрены оставшиеся результаты испытаний, выполненных авторами переведенной работы.

Список литературы, использованной авторами переведенной статьи, можно посмотреть по адресу: mdpi.com/1424-8220/21/18/6026.

ИСТОЧНИК ДЛЯ АДАПТИРОВАННОГО ПЕРЕВОДА

Wang B., Liu K., Wang Y., Jiang Q. Site investigations of the lacustrine clay in Taihu Lake, China, using self-boring pressuremeter test // Sensors (Special Issue “Fault Detection and Data Analysis for Structure and Infrastructure Engineering”). 2021. Vol. 21 (6026). DOI: doi.org/10.3390/s21186026. URL: mdpi.com/1424-8220/21/18/6026.