

Исследования озерных глин с использованием самозабуривающегося прессиометра на озере Тайху (Китай). Часть 1



Заглавное фото: pixabay.com/ru/photos/китай-тайху-хучжоу-озерная-вода-3753590/

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 ГК «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 немного сокращенный адаптированный перевод статьи «Исследования озерных глин с использованием самозабуривающегося прессиометра на озере Тайху (Китай)». Ее авторы – китайские исследователи Бинь Ван, Кан Лю, Юн Ван и Цюань Цзян. Она была опубликована в 2021 году журнала Sensors («Измерительная аппаратура») – в его специальном выпуске по обнаружению нарушений и анализу данных для проектирования сооружений и инфраструктуры.

Полевые исследования грунтов при инженерных изысканиях очень важны для оценки условий площадки, что необходимо для проектирования и возведения на ней будущего строительного объекта. Тоннель Тайху на сегодняшний день является самым длинным из построенных под озерами в Китае. Его общая длина под водой составляет более 10 км. Однако из-за большой нехватки полевых данных по озерным глинистым отложениям озера Тайху там была дополнительно проведена серия испытаний самозабуривающимся прессиометром. На основе результатов этих испытаний были получены значения прочности на сдвиг в недренированных условиях. Они в основном оказались выше, чем полученные при лабораторных испытаниях. Это может быть связано с тем, что в процессе взятия образцов была нарушена их структура. Ухудшение текущего модуля сдвига грунта в основном исследовалось путем тщательного сравнения поведения различных слоев грунта. При этом модуль, как правило, переставал проявлять тенденцию к снижению и становился постоянным, когда деформация начинала превышать 1%. В то же время была обнаружена линейная зависимость между числом пластичности и модулем сдвига, а также между скоростью уменьшения модуля сдвига и числом пластичности. Дальнейший статистический анализ распределения недренированной сдвиговой прочности и модуля сдвига в исследованных грунтах показал, что прочность соответствует нормальному

распределению, в то время как модуль – логнормальному. Что еще более важно, интервал пространственной корреляции для модуля сдвига оказался намного меньше, чем для недренированной прочности.

Сегодня представляем первую часть переведенной статьи, в которой будут кратко рассмотрены история вопроса, использованная методика испытаний, площадка их проведения и ее грунтовые условия.

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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время исследования свойств грунтов обычно проводят с помощью лабораторных и полевых испытаний, при этом результаты последних считаются более надежными [1–4], так как испытания *in situ* практически не нарушают структуру грунта.

Самозабуривающийся прессиометр (SBPM) был разработан Уортом (Worth) и Хьюзом (Hughes) в 1973 году [5]. С тех пор испытания с его помощью считаются одним из наиболее важных методов полевых исследований свойств грунтов. Во время каждого испытания могут быть зарегистрированы как давление при расширении рабочей камеры прессиометра (полости), так и радиальная деформация. Это позволяет получить полную кривую зависимости давления в камере от относительной деформации грунта (относительного изменения объема или радиуса камеры), включая этапы нагружения и разгрузки. Кроме того, минимальная точность измерения радиального смещения для SBPM может составлять всего 1 мкм [6, 7], что даже лучше, чем при многих лабораторных испытаниях. Следовательно, испытания SBPM могут дать механические параметры, более близкие к таковым для грунтов в условиях их естественного залегания.

Как показано в работах Пальмера, Ладаньи и Багелина с соавторами [8–10], на основе испытаний самозабуривающимся прессиометром могут быть определены такие параметры, как прочность на сдвиг в недренированных условиях, модуль сдвига и другие.

Хоулсби и Уитерс [11] проанализировали свойства грунтов по прессиометрическим кривым на этапах разгрузки и нагружения и показали, что полученные значения недренированной сдвиговой прочности и модуля сдвига имеют хорошую точность по сравнению с результатами других типов испытаний.

Джеффрис [12] разработал подход к определению горизонтального геостатического напряжения глины шельфа моря Бофорта по данным испытаний SBPM.

Беллотти и др. [13] предложили способ коррекции жесткости, измеренной самозабуривающимся прессиометром в песке.

Феррейра и Робертсон [14, 15] разработали метод, включающий нелинейное поведение грунта при интерпретации результатов испытаний SBPM на стадиях как нагружения, так и разгрузки.

Шнайдер и др. [16] предложили метод коррекции (fitting) кривой, построенной по данным испытания самозабуривающимся прессиометром, для интерпретации показателей свойств гранитного сапролита. Полученные результаты были сопоставлены с итогами других видов тестов, в том числе полевых испытаний дилатометром и лабораторных трехосных испытаний.

Проанализировав результаты использования SBPM в чувствительной глине озера Шамплейн в канадской провинции Квебек, Сильвестри [17] выявил, что полученная недренированная сдвиговая прочность не была завышена, в отличие от результатов испытаний на сдвиг крыльчаткой.

Кайабаси [18] проанализировал предельное давление при прессиометрическом испытании и скорректированное количество ударов при испытаниях дилатометром, имеющим возможность самопогружения, и получил новую эмпирическую формулу, связывающую эти два параметра.

Используя степенную зависимость (power law) между жесткостью и деформацией, Уиттл и Лю [19] разработали единое уравнение для описания развития деформации и напряжения при изменении жесткости песка.

Ахмади и Кешмири [20] предложили новый подход к интерпретации горизонтального напряжения *in situ*, полученного по результатам испытаний самозабуривающимся прессиометром, с использованием конечноразностной модели. В качестве ключевого параметра для определения горизонтального напряжения *in situ* было выбрано давление в рабочей камере прессиометра при относительной деформации 10% ($P_{10\%}$), и были установлены новые зависимости между $P_{10\%}$ и другими параметрами грунта.

Следует также отметить, что природные дисперсные грунты считаются неоднородными. Кристиан и Бечер, Сантосо с соавторами и Ли с коллегами [21–23] продемонстрировали важность учета неоднородности грунта в отношении таких геотехнических особенностей, как фильтрация подземных вод, осадки и устойчивость склонов.

Фирузианбандпей и др. [24] исследовали как вертикальный, так и горизонтальный интервалы корреляции (correlation lengths) для песчаных отложений на основе данных статического зондирования конусным зондом с измерением порового давления (CPTu) на двух разных участках на севере Дании.

Де Гаст и др. [25] проанализировали результаты статического зондирования конусным зондом (CPT) сельской земляной дамбы в Нидерландах и оценили вертикальный интервал корреляции флуктуаций (vertical scale of fluctuation) для грунтов.

Поэтому в настоящей статье основное внимание уделялось двум аспектам. Во-первых, на озере Тайху в Китае было проведено большое количество испытаний самозабуривающимся прессиометром для того, чтобы получить четкое представление об изменениях показателей свойств грунтов, залегающих ниже уровня дна, в зависимости от глубины от этого уровня, а также от деформации под нагрузкой и т. д. Во-вторых, результаты испытаний были дополнительно интерпретированы с вероятностной точки зрения путем комбинированного статистического анализа, что могло предоставить проектировщикам необходимую информацию для оценки безопасности геологических условий.

ПРИБОР ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ И МЕСТО ИХ ПРОВЕДЕНИЯ

Место испытаний находилось в пределах мелководного озера Тайху недалеко от китайского города Уси (Сишань) (рис. 1), где проходит Южная автомагистраль «Су-Си-Чан». Пересекающий северную часть озера отрезок шоссе (показанный жирной черной линией на рисунке 1) построен в виде тоннеля с использованием открытого способа проходки. На сегодняшний день это самый протяженный тоннель в Китае, построенный под озером. Длина его подводной части составляет 10,67 км. Из-за изменчивости механических свойств озерных глинистых отложений владельцам проекта и проектировщикам были необходимы более подробные параметры для анализа безопасности строительства. Поэтому Уханьским институтом механики скальных и дисперсных грунтов Китайской академии наук вдоль трассы строительства этого тоннеля на дне озера Тайху были проведены испытания самозабуривающимся прессиометром.

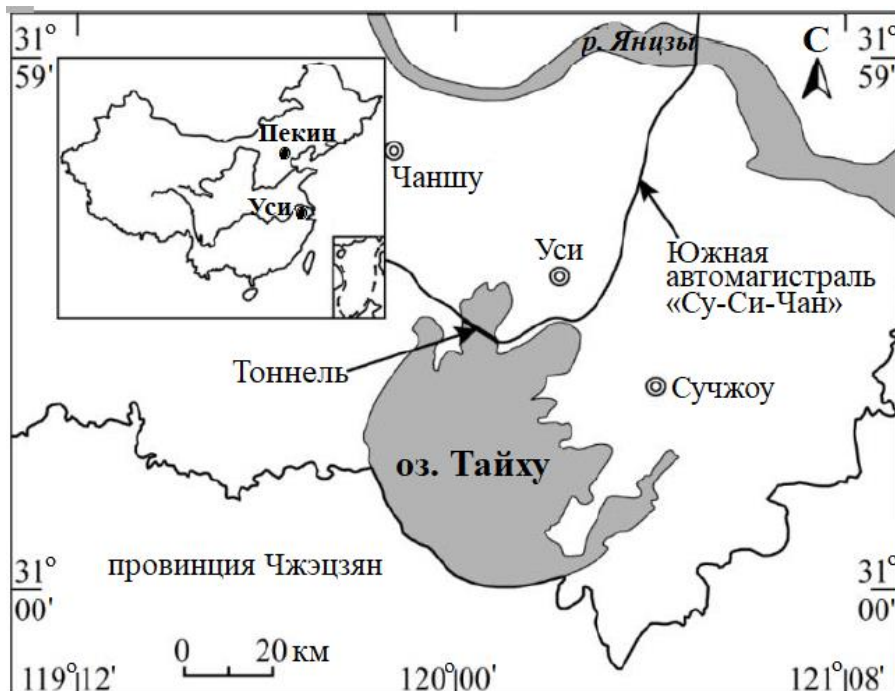


Рис. 1. Трасса тоннеля под северной частью озера Тайху (показанная жирной черной линией), где до строительства были проведены испытания самозабуривающимся прессиометром

Испытания проводились в скважинах с использованием самозабуривающегося прессиометра кембриджского типа, с помощью которого можно оценивать такие свойства грунта, как модуль сдвига, недренированная сдвиговая прочность, горизонтальное напряжение и др. Вдоль указанной части трассы тоннеля были проведены три серии испытаний SBPM при горизонтальном расстоянии между скважинами 5 м. Средняя глубина этих скважин составляла около 25 м, а высотные отметки их устьев были одинаковыми. Также была пробурена скважина, из которой отбирались образцы грунта для лабораторных испытаний в целях получения предварительной информации (рис. 2).

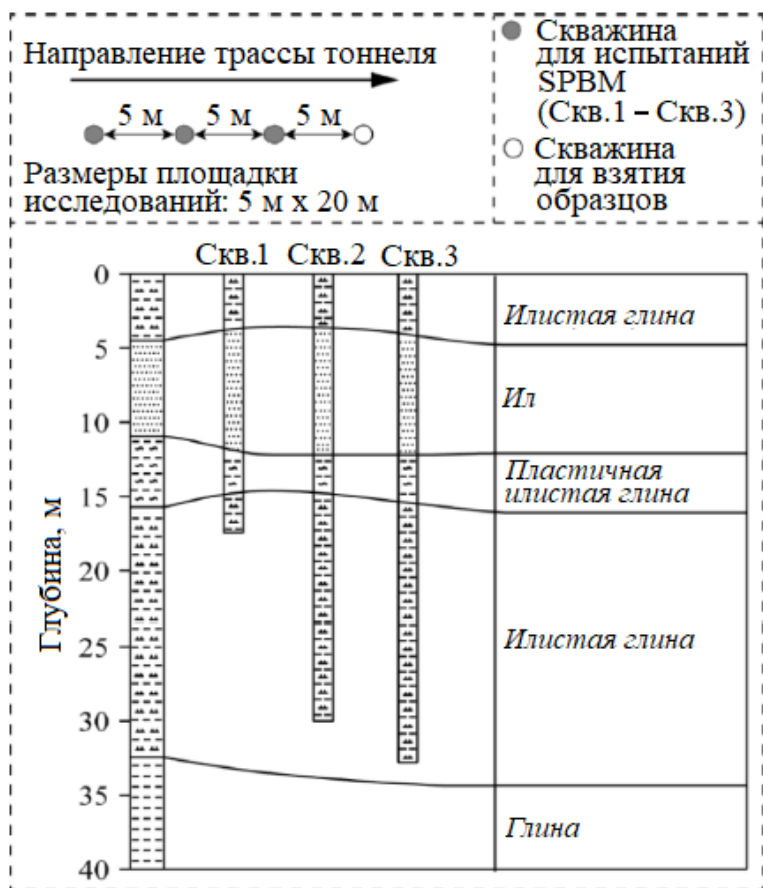


Рис. 2. Расположение скважин 1, 2 и 3 в плане (сверху), в разрезе (снизу) и стратиграфическая колонка (слева) для площадки изысканий

Результаты испытаний считывались по глубине через каждый метр. Разрез грунта на исследованном участке был построен на основе геологических карт данной местности. Он состоял из (сверху вниз):

- илистой глины (0–4,5 м);
- ила (4,5–12 м);
- пластичной илистой глины (12–17 м);
- илистой глины (17–34 м);
- глины (34–40 м).

В таблице 1 показаны некоторые основные физические свойства встреченных грунтов.

Таблица 1. Основные физические свойства грунтов исследованной площадки по данным лабораторных испытаний

Образец	Глубина, м	Удельный вес	Влажность, %	Коэффициент пористости	Плотность, (г/см ³)	Влажность на границе текучести, %	Влажность на границе пластичности, %	Число пластичности, %
ТН-SC1	3,0–3,5	2,72	27,3	0,835	1,92	35,1	20,6	14,5
ТН-S	8,0–8,5	2,70	31,1	0,774	1,96	33,2	22,7	6,9
ТН-SSC	13,0–13,5	2,74	36,4	1,099	1,91	38,4	19,0	15,4
ТН-SC2	18,0–18,5	2,74	23,2	0,677	2,00	35,0	19,6	15,3
ТН-SC2	21,0–21,5	2,72	22,0	0,746	2,02	32,9	16,5	16,4
ТН-SC2	30,0–30,5	2,72	29,5	0,996	1,88	31,2	15,6	15,6
ТН-C	41,0–41,5	2,74	26,6	0,709	1,94	36,9	21,4	15,5

Примечание. ТН относится к озеру Тайху, где были взяты образцы; SC – илестая глина; S – ил; SSC – пластичная илестая глина; C – глина.

В следующей части статьи будут рассмотрены методы анализа данных, получаемых при испытаниях самозабуривающимся прессиометром, и некоторые результаты выполненных испытаний.

Список литературы, использованной авторами переведенной статьи, можно посмотреть по адресу: [mdpi.com/1424-8220/21/18/6026](https://doi.org/10.3390/s21186026).

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.