

Интерпретация данных статического зондирования грунтов



На сегодняшний день полевые испытания приобретают все большее распространение. Результатом статистического зондирования являются косвенные данные по физико-механическим свойствам грунтов, которые можно интерпретировать на основе полученных корреляционных зависимостей.

Целью данной работы является сравнение различных методик отечественных и зарубежных авторов для анализа результатов испытаний грунтов статическим зондированием. Выполнено сопоставление различных вариантов определения модуля деформации. Помимо этого, представлен расчет осадки, выполненный в программе RS2 программного комплекса Rocscience по данным двух разных методик определения модуля деформации.

Горобцов Денис Николаевич

Заведующий Кафедрой инженерной геологии Гидрогеологического факультета МГРИ, к.г.-м.н.

Фоменко Игорь Константинович

Профессор Кафедры инженерной геологии Гидрогеологического факультета МГРИ, д.г.-м.н.

ifolga@gmail.com

Новгородова Маргарита Алексеевна

Выпускник Кафедры инженерной геологии Гидрогеологического факультета МГРИ
marga_97@mail.ru

Сироткина Ольга Николаевна

Старший научный сотрудник Кафедры динамической геологии МГУ им. М.В. Ломоносова,
к.г.-м.н.

Введение

Полевые исследования грунтов с помощью конического зонда впервые были выполнены в 1932 г. в Голландии инженером П. Барентсенем. В дальнейшем было добавлено измерение трения грунта о боковую поверхность внедряемого прибора. В 1948–1949 годах Лабораторией механики грунтов Дельфтского университета была изготовлена электрическая версия пенетрометра с непрерывной записью величины лобового сопротивления по глубине [2].

Испытания грунтов методом статического зондирования также проводились в Советском союзе. Тема получила отражение в рекомендациях СН 448-72 «Указания по зондированию грунтов для строительства». Далее в 1974 г. был издан первый стандарт для статического зондирования ГОСТ 20069-74, с последующим переизданием в 1981 г. и разработкой ГОСТа «Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием» в 2012 г. [3]. В современной практике инженерно-геологических изысканий статическое зондирование используется в качестве обязательного метода полевых исследований (СП 446.1325800.2019) [4].

Суть статического зондирования грунтов заключается во вдавливании в грунт металлического зонда-конуса или, другими словами, индентора. С развитием теории статического зондирования и по мере накопления фактического материала было установлено, что измерение лобового сопротивления q_c , бокового трения f_s , и порового давления u^2 являются обязательным условием корректности получаемых данных. Дополнительные датчики служат для решения специальных задач.

Однако эти данные не являются конечным результатом, их интерпретируют в физико-механические свойства грунтов на основе полученных корреляционных зависимостей. Возникает вопрос – какие же корреляционные зависимости использовать и как оценивать их достоверность и надежность? В качестве примера приведем результаты определения недренированной прочности на основе результатов испытаний статическим зондированием по методике Муна (Moon, 2016), Мейна (Mayne, 2015) [1] (рис.1).

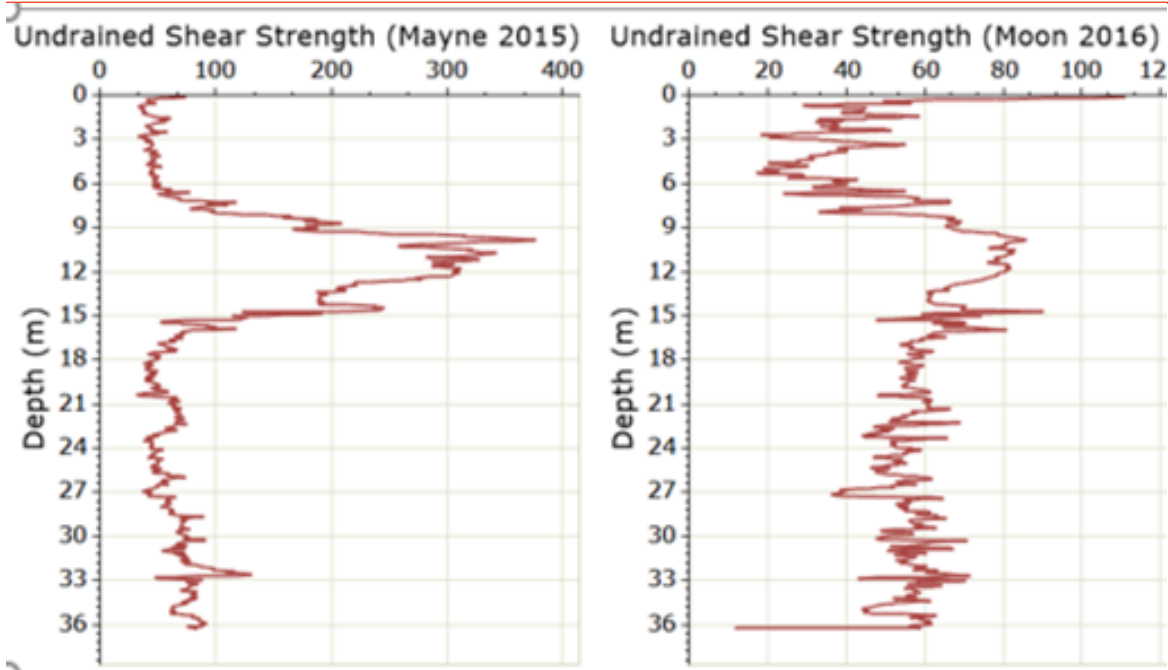


Рис. 1. Результаты определения недренированной прочности на основе результатов испытаний статическим зондированием по методике Муна (Moon, 2016), Мейна (Mayne, 2015)

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о несопоставимости полученных данных по недренируемой прочности грунтов.

Проблематика интерпретации данных статического зондирования

По данным измерений, полученным в процессе испытания, определяют значения q_c , Q_s (для механического зонда) или q_c , f_s (для электрического зонда), а также других дополнительно измеряемых параметров (для специальных зондов). По полученным данным составляют таблицы и строят графики изменения этих величин по глубине зондирования и во времени (при прерывистом зондировании).

Интерпретация параметров грунтов при помощи статического зондирования регламентируется в России в настоящее время приложением Ж СП 446.1325800.2019 [4], согласно которому возможно получить следующие параметры:

- Плотность сложения песков
- Нормативный модуль деформации E для песчаных грунтов
- Нормативный угол внутреннего трения Φ
- Нормативные значения модуля деформации E , угла внутреннего трения Φ и удельного сцепления C для глин, суглинков и супесей

На данный момент существуют положительные перспективы дополнения регламента, которые отражены в проекте СП «Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе» и работах Г.Г. Болдырева [5].

Одной из комплексных зарубежных программ, в которой возможна комплексная обработка результатов статического зондирования, является Settle 3D программного комплекса Rocscience [1]. Параметры, определяемые в Rocscience Settle 3D не являются абсолютно

истинными, но имеют некоторую степень достоверности и основаны, главным образом, на известной работе Р.К. Robertson [2]. Пример таких параметров приведен в Таблице 1.

Таблица 1. Неопределенность параметров, получаемых при интерпретации данных статического зондирования

Тип грунта	D_r	K_0	OCR	S_u	Φ'	E	G_0 *
Дисперсные несвязные (песок)	2-3	5	5		2-3	2-3	2-3
Дисперсные связные (глина)		2	1	1-2	4	2-4	2-4

Формулы расчета приведенных параметров в Rocscience Settle 3D имеют следующий вид:

$$D_r = 100 * (0,268 * \ln(q_{tl}) - b_x) \quad (1)$$

$$E = a_E (q_t - \sigma_{v0}) \quad (2)$$

$$OCR = 0,25 Q_t^{1,25} \quad (3)$$

$$S_u = (q_t - \sigma_v) / N_{kt} \quad (4)$$

$$\tan \Phi' = (\log(q_c / \sigma'_{v0}) + 0,29) \quad (5)$$

$$K_0 = 0,359 + 0,071 * K_D - 0,00093 * (q_c / \sigma_{v0}) \quad (6)$$

$$G_0 = (\gamma/g) * V_s^2 \quad (7)$$

где:

- D_r - relative density (удельная плотность)
- E, G - Young's and shear moduli (модуль Юнга и модуль сдвига)
- OCR - overconsolidation ratio (коэффициент переуплотнения)
- S_u - undrained shear strength (недренированная прочность на сдвиг)
- Φ' - peak friction angle (эффективный угол внутреннего трения)
- K_0 - in-situ stress ratio (коэффициент бокового давления в массиве грунта)
- G_0 - small strain shear modulus (малый модуль сдвиговых деформаций)

Не вызывает сомнения тезис о том, что свойства грунтов определяются их состоянием (в том числе и напряженным). Однако именно он является определяющим при сравнении подходов к интерпретации данных статического зондирования, принятых в России и за рубежом. Следует заметить, что данное отличие существовало не всегда. Игнорирование глубины погружения зонда на получаемые результаты по крайней до 90-х годов прошлого века наблюдалось и в зарубежных подходах. В частности, это можно заметить на примере классификационных диаграмм К. Robertson [2] 1986 и 1990 годов (рис.2).

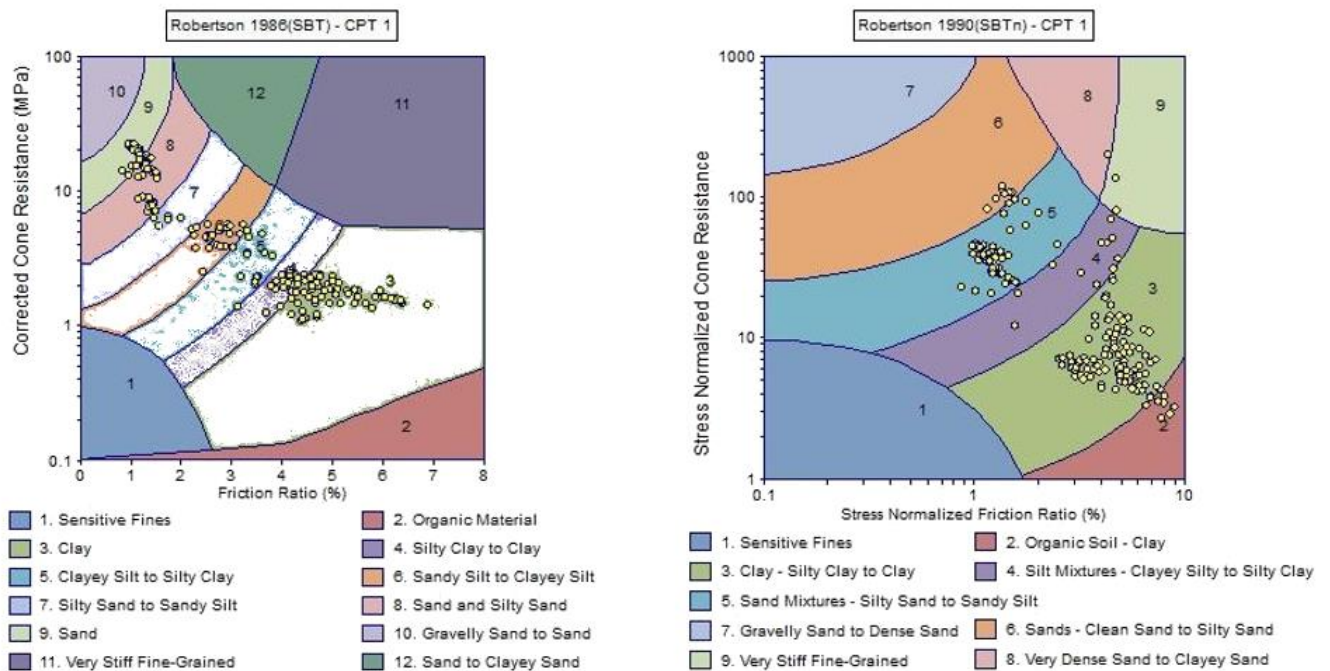


Рис. 2. Диаграммы Робертсона 1986 (ненормализованная) и 1990 (нормализованная с учетом глубины погружения зонда)

В данной работе в качестве параметра, используемого для сравнения, был взят модуль деформации. Как отмечено в работе [6], корреляционная зависимость между параметром статического зондирования q_t и параметрами деформационных свойств (модуль общей деформации E) в отечественной практике имеет вид:

$$E = a q_t \quad (8)$$

или

$$E = a q_t + b \quad (9)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты, зависящие от вида грунта.

В практике зарубежных исследований связь между E и сопротивлением грунта внедрению конуса при статическом зондировании q_t ранее так же имела вид:

$$E = a q_t \quad (10)$$

Однако в последнее время [2] используется иная зависимость:

$$E = a(q_t - \sigma) \quad (11)$$

где σ - природное давление.

На рисунке 3 приведено сопоставление графиков изменения модуля деформации, полученных на основе зависимостей (9) и (11).

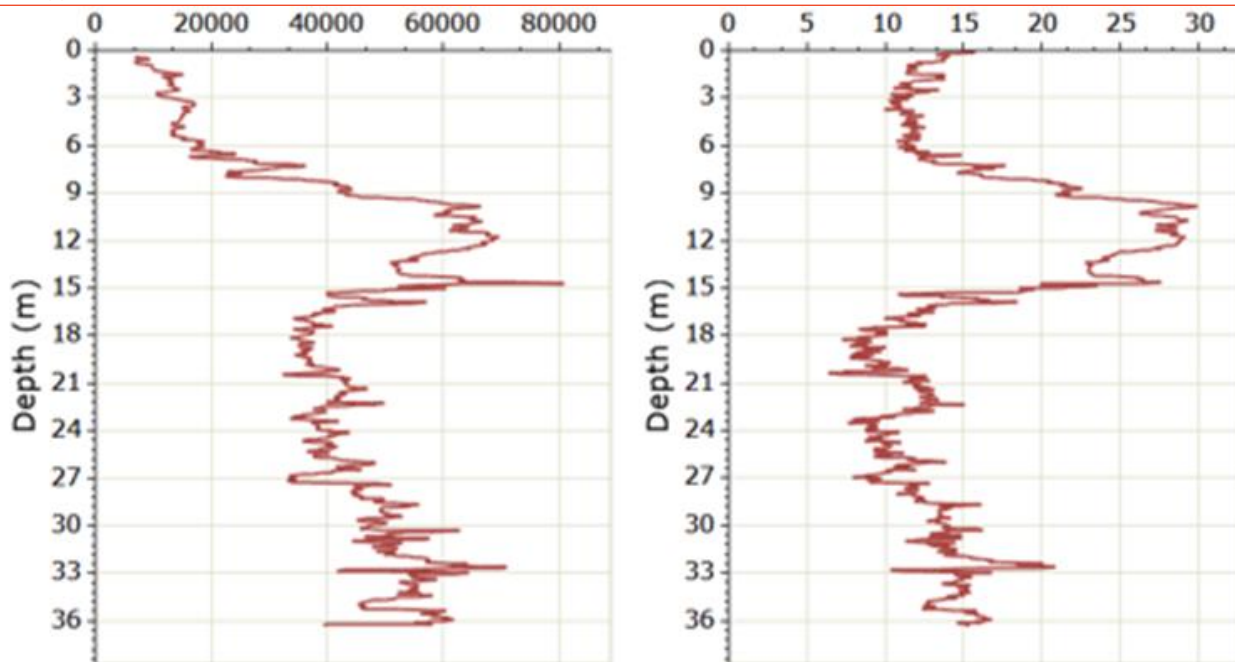


Рис. 3. Сопоставление графиков изменения модуля деформации, полученных на основе зависимостей 9 (слева), модуль деформации в КПа и 11 (справа), модуль деформации в МПа

Анализ результатов показывает различие в величинах модуля деформаций в 3-4 раза.

Последствия

О последствиях в различии результатов определения значений модуля деформации по результатам статического зондирования можно судить по результатам расчета осадки, используя одни и те же данные статического зондирования, проинтерпретированные по двум методикам: по российской и зарубежной (рис. 4). Как можно заметить, разница в значениях осадки различается практически в два раза (15,5 см и 8 см). Это говорит о том, что интерпретация данных статического зондирования очень неоднозначная тема, к которой следует приступать с осторожностью для получения максимально приближенных к реальности данных.

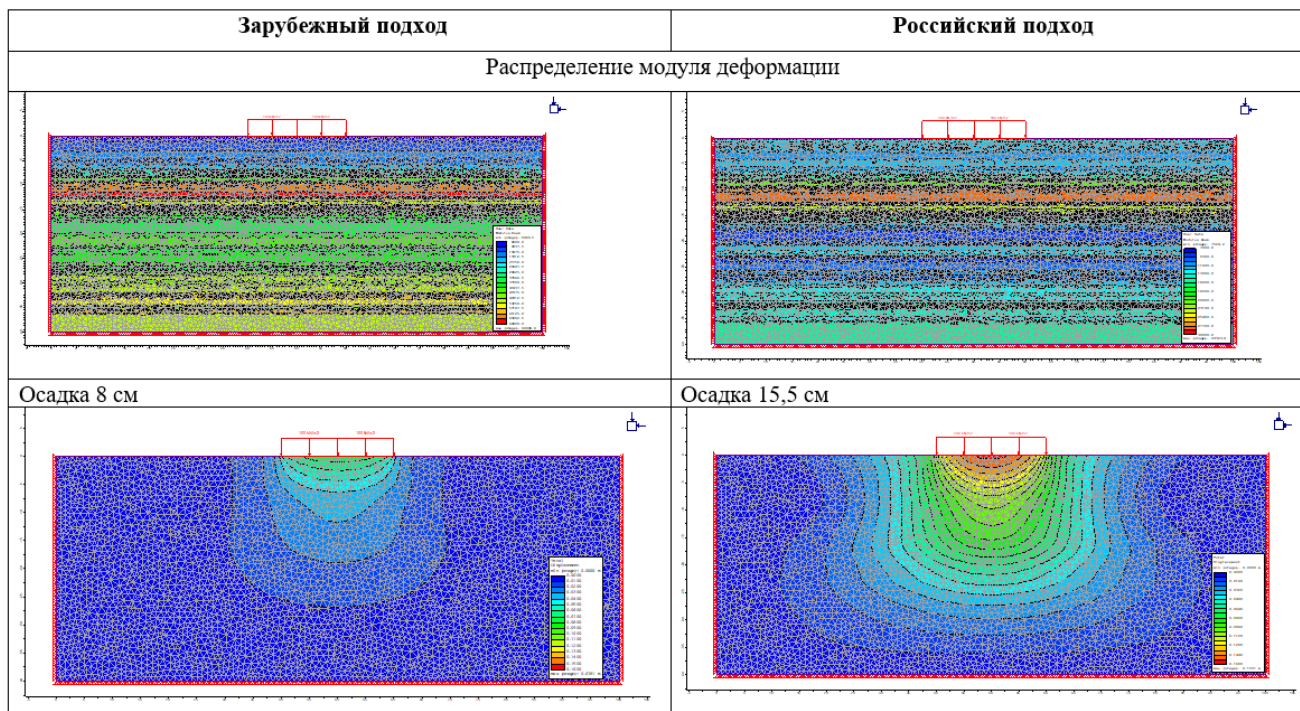


Рис. 4. Результаты расчета осадки на основе данных статического зондирования

Выводы

На сегодняшний день не существует унифицированной методики для интерпретации данных статистического зондирования. Использовать зарубежные практики – не самый подходящий вариант. Ее применение в российской практике требует комплексного анализа и апробации. Кроме того, нужна привязка методики к региональным особенностям – это сложные многолетние исследования, осуществимые только с государственной поддержкой, которая в настоящее время в области инженерно-геологических исследований практически полностью отсутствует.

Список литературы

1. CPT Data Interpretation Theory Manual. Rocscience Inc., 2016.
2. Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering By P. K. Robertson and K.L. Cabal (Robertson), 6th Edition, 2015.
3. ГОСТ 19912-2012 «Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием». Дата введения 2013-11-01, 27 стр.
4. СП 446.1325800.2019 «Инженерно-геологические изыскания для строительства». Дата введения 2019-12-06, 150 стр.
5. Болдырев Г.Г. Руководство по интерпретации данных испытаний методами статического и динамического зондирования для геотехнического проектирования. Изд-во, ООО Прондо, М., 2017, 476 с.
6. Зиангиров Р.С., Каширский В.И. Оценка деформационных свойств дисперсных грунтов по данным статического зондирования, 6 стр.