

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ГРУНТОВ

Болдырев Г.Г.

Профессор Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, директор по науке и инновациям ООО «НПП Геотек», д.т.н., г. Пенза, g-boldyrev@geotek.ru

Мельников А.В.

Инженер-исследователь ООО «НПП Геотек», к.т.н., г. Пенза, alexvmuller@gmail.com

Цель работы в рассмотрении возможностей современных программных средств для обработки результатов статического зондирования грунтов.

Актуальность темы определяется возрастающей ролью статического зондирования грунтов как быстрого и информативного метода полевых изысканий. Расширяются методы интерпретации результатов, особенно за рубежом. Значительно увеличилось количество получаемых данных в сравнении с ручной записью – измерения проводятся автоматически через малые интервалы глубины, что делает невозможным ручную обработку.

Ключевые слова: статическое зондирование, обработка результатов, программа, форма Excel, оценка характеристик грунтов.

ГОСТ 19912 содержит рекомендуемое приложение В с образцом графического оформления результатов испытания грунта методом статического зондирования. Ручная обработка и графическое оформление результатов зондирования трудоемки, в связи с чем для этого часто используются специализированные программы как отечественного, так и зарубежного производства: GEOEXPLORER, Datgel CPT Tool, Static Probing, NovoCPT, Geosoft. Указанные программы выполняют следующие основные функции:

- сбор исходной информации об испытании, такой как номер и местоположение точки зондирования, дата проведения, данные об использованном оборудовании, организации и конкретных специалистах, выполнивших зондирование, о заказчике и др.;
- графический вывод результатов зондирования в виде графиков зависимостей измеренных параметров по глубине;
- обработка результатов зондирования для выделения инженерно-геологических элементов и их классификации, количественной оценки физико-механических характеристик грунтов, определения несущей способности свай;
- отображение плана площадки изысканий, получение 3D-модели основания, автоматическое вычерчивание профилей;
- настройки стилей отображения информации, импорт и экспорт в изображения и файлы DXF и др.

Количественную оценку характеристик физико-механических свойств проводят на основе статистически обоснованных зависимостей между показателями сопротивления грунта внедрению зонда и результатами определения характеристик другими стандартными полевыми и лабораторными методами. Программы могут содержать больше сотни полученных различными авторами зависимостей для оценки таких характеристик грунтов как: коэффициент фильтрации K , недренированное сопротивление грунта срезу s_u (c_u), чувствительность S_t , недренированный модуль деформации для глин

E_u , модуль упругости E_s , угол внутреннего трения φ , показатель типа грунта I_c , одометрический модуль деформации M , коэффициент переуплотнения OCR , индекс плотности D_r , скорость поперечной волны V_s , упругий модуль сдвига G , коэффициент пористости e , удельный вес γ , коэффициент бокового давления K_0 . Для глинистых грунтов вместо раздельной оценки φ и c по данным статического зондирования за рубежом используют недренированную прочность c_u . В отечественной практике обычно оцениваются механические характеристики грунтов: угол внутреннего трения φ , сцепление c и штамповый модуль деформации E .

В настоящее время ГОСТ 25100 в классе дисперсных грунтов рекомендует выделять по генезису и вещественному составу соответственно типы, подтипы, виды и подвиды. Разновидности дисперсных грунтов выделяют по количественным показателям их вещественного состава, строения, состояния и свойств в соответствии с приложением Б.2 и В.2. При отсутствии прямой возможности непосредственного определения характеристик физических свойств грунтов их классификация затруднена, и однозначно определить подкласс (несвязные, связные) и виды, подвиды грунтов можно только после отбора образцов из скважины. Тем не менее, за рубежом Vegetmann Н.К.S. (1965), а потом и в России в СН-448-72 (в последних нормативах такой метод отсутствует) для классификации грунтов полевыми методами без отбора образцов стали использовать один из параметров, вычисляемых по результатам статического зондирования, так называемое фрикционное отношение $R_f = (f_s/q_c) * 100 \%$. В настоящее время в качестве классификационного наибольшее распространение получил показатель типа грунта $I_c = \sqrt{(3,47 - \log(Q_t))^2 + (\log F_r + 1,22)^2}$, где $Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}}$, $F_r = \frac{f_s}{q_n} 100\%$, σ_{v0} и σ'_{v0} – полное и эффективное бытовое давление, q_n и q_t – откорректированное соответственно по бытовому и поровому давлению удельное сопротивление. Применяются диаграммы, построенные с использованием нескольких измеряемых и вычисляемых параметров статического зондирования. Диаграммы разделены на зоны, каждой из которых соответствует своя разновидность грунта. Сами разновидности грунтов определяются по ГОСТ 25100, ASTM D-2487 или ISO 14688-2 в зависимости от физических характеристик. Указанные методы классификации по данным зондирования носят общий характер либо составлены по данным совершенно определенных регионов и должны использоваться лишь справочно. Кроме того, величина показателя типа грунта I_c сильно зависит от отношения f_s/q_c , которое более непостоянно, чем сами измеренные значения q_c и f_s . Из-за этого автоматизированная классификация выявляет заметно больше разнородных слоёв грунта, чем обобщение согласно ГОСТ 20522 в пределах инженерно-геологических элементов, выделенных согласно ГОСТ 25100. На рисунке приведен результат автоматизированного выделения слоёв грунта в программе Static Probing по методике Robertson (1986) на площадке ООО "НПП "Геотек"". В таблице приведены результаты определения физических характеристик грунтов лабораторными методами. Для суглинка полутвердого (ИГЭ-2) по результатам трехосных испытаний: модуль деформации $E = 19,9$ МПа, угол внутреннего трения $\varphi = 21^\circ$, удельное сцепление $c = 22$ кПа.

Таблица 1 Физические характеристики грунтов

Наименование ИГЭ	№ ИГЭ	Глубина заложения	Мощность	Природная влажность W , %	Плотность грунта ρ , г/см ³	Коэффициент пористости e	Коэффициент водонасыщения S_r	Число пластичности I_p	Показатель текучести I_L
Почвенно-растительный слой	1	0,3	0,3	-	-	-	-	-	-
Суглинок полутвердый	2	3,9	3,6	21	1,86	0,752	0,74	14	0,01
Глина полутвердая	3	6,0	2,1	21	1,96	0,683	0,84	20	0,18
Глина тугопластичная	4	10,6	4,6	23	2,00	0,674	0,93	20	0,34
Песок средней крупности средней плотности водонасыщенный	5	12,7	2,1	19	1,98	0,601	0,85	-	-

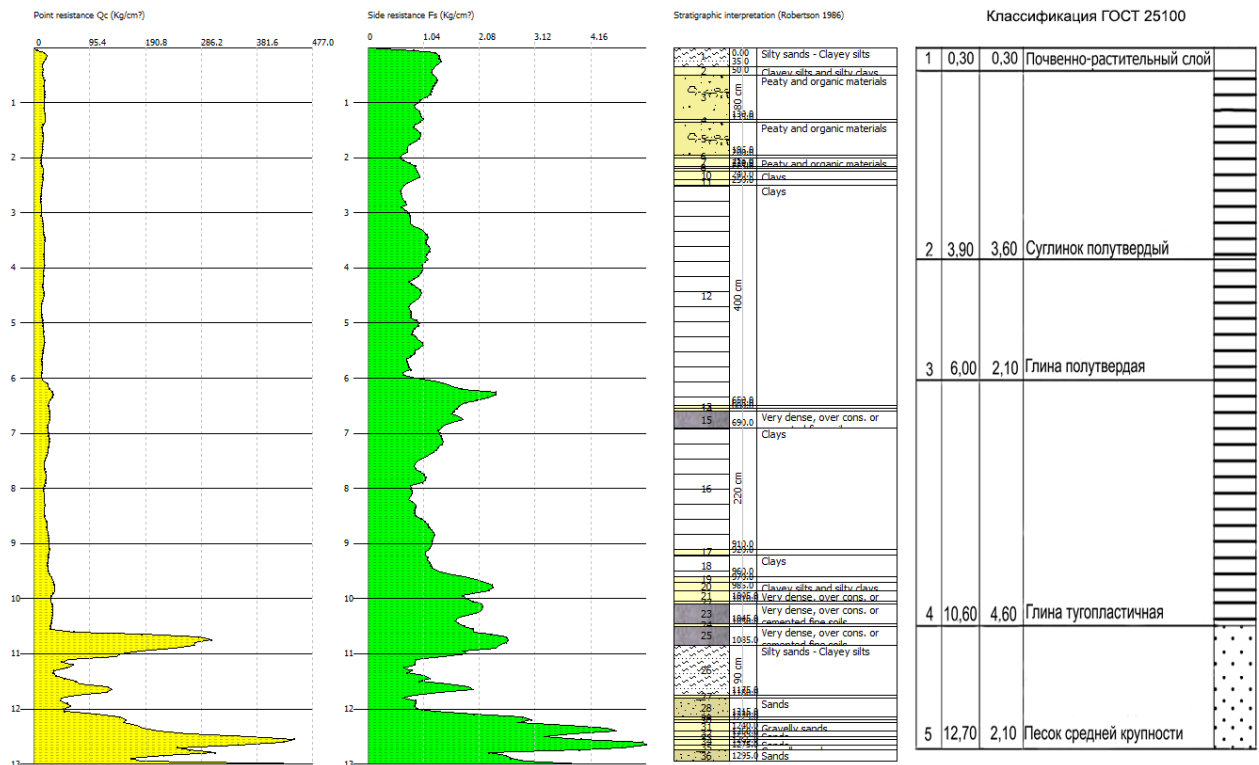


Рисунок 1 Автоматизированное выделение слоёв грунта по методике Robertson (1986)

Для облегчения обработки результатов статического зондирования, полученных зондом собственного производства, ООО "НПП "Геотек" была разработана форма в программе Excel. Форма позволяет вводить информацию об использованном оборудовании, номере и координатах точки зондирования, дате проведения испытания, организации и конкретных специалистах, выполнивших зондирование. На графиках и в табличной форме выводятся измеренные параметры зондирования: сопротивление под конусом q_c и по муфте трения f_s , угол отклонения от вертикали и скорость погружения зонда. Для упрощения интерпретации результатов зондирования добавлена автоматизированная классификация грунта по величине параметра I_c и диаграмме Robertson (1990), включающей 9 типов грунтов. В форме выполняется автоматизированный расчет по данным зондирования следующих механических характеристик в соответствии с типом и генезисом грунта. Штамповый модуль деформации E – по таблицам СП 47.13330.2012, ТСН 50-304-2001 и авторским формулам Lunne и Christophersen (1983), Kulhawy и Mayne (1990), Мельников (2015). Угол внутреннего трения φ – по таблицам СП

47.13330.2012, ТСН 50-304-2001 и формулам Robertson и Campanella (1983), Kulhawy и Mayne (1990), Robertson (2015). Удельное сцепление c – по таблицам СП 47.13330.2012, ТСН 50-304-2001. Справочно приводится диапазон недренированной прочности c_u по формулам других авторов. Результаты расчета для площадки ООО "НПП "Геотек"" приведены в таблице .

Таблица 2 Оценка характеристик грунтов по данным зондирования

№ ИГЭ	СП 47.13330.2012	ТСН 50-304-2001	Kulhawy и Mayne (1990), Lunne и Campanella (1983)	Мельников (2015)	СП 47.13330.2012	ТСН 50-304-2001	Robertson и Campanella (1983)	Kulhawy и Mayne (1990)	Robertson (2015)	СП 47.13330.2012	ТСН 50-304-2001	Almeida (2010), Hong (2010), Remai (2013) и др.	
	E , МПа				φ , °					c , кПа		c_u , кПа	
												от	до
2	10,8	10,8	13,5	11,8	20,3	20,5				20	27	60	188
3	10,5	10,5	23,3	10,8	17,8	20,5				32	26	56	176
4	17,5	17,5	22,5	17,4	20,0	21,5				37	30	93	292
5	36,9	50,9	50,3	57,9	34,5	38,6	39,0	33,6	29,1				

Выводы

1. Использование специализированных программ для обработки результатов статического зондирования необходимо для быстрой и качественной обработки результатов.

2. Для упрощенной обработки результатов зондирования без отображения плана площадки изысканий, получение 3D-модели основания, автоматического вычерчивания профилей и т.п. может быть использована специальная форма в MS Excel. Данный вариант привлекателен также возможностью корректировки шаблона без знаний в области программирования.

3. Различные методы интерпретации результатов при оценке характеристик грунтов могут давать различные результаты. Корреляционные зависимости носят региональный характер и получены на определенных разновидностях грунтов, потому применять их следует с учетом местного опыта.

4. Автоматизированная классификация грунта по данным одного лишь зондирования выявляет больше разнородных слоёв грунта, чем обобщение согласно ГОСТ 20522. Кроме того, критерии классификации ГОСТ 25100-2011 не соответствуют ISO 14688-2:2004, ASTM D 2487. Потому зарубежные классификационные диаграммы должны использоваться как справочная информация, облегчающая работу, а не окончательная истина.

Список литературы

1. ГОСТ 19912-2012. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием.
2. ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний.
3. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация.

4. Мельников А.В. Экспериментально-теоретические исследования метода статического зондирования грунтов: Дисс. канд. техн. наук / М.: НИУ МГСУ, 2015.
5. СН-448-70. Указания по зондированию грунтов для строительства.
6. СП 47.13330-2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения.
7. ТСН 50-304-2001. Основания, фундаменты и подземные сооружения. г. Москва.
8. ASTM D 2487. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified soil classification system).
9. Begemann H.K.S. The friction jacket cone as an aid in determining the soil profile // Proc. of the 6-th Int. Conf. Soil Mech. and Found. – Montreal, 1965. – Vol. 1. – P. 17-20.
10. ISO 14688-2:2004. Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil – Part 2: Principles for a classification. – 2013. – 13 p.
11. Kulhawy K.K., Mayne P.W. Manual on estimating soil properties for foundation design / Electric Power Research Institute Report EL-6800. – Palo Alto, 1990. – 306 p.
12. Lunne, T., Christoffersen H.P. Interpretation of cone penetrometer data for offshore sands // 15-th Annual OTC in Houston. – TX, 1983. – P. 181-192.
13. Robertson P. K., Cabal K.L. Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering / 6-th. edition. – Signal Hill, California, USA: Gregg Drilling & Testing, Inc., 2015. – 133 p.
14. Robertson P.K. Soil classification using the cone penetration test // Canadian Geotechnical Journal. – 1990. – No. 1. – P. 151-158.
15. Robertson P.K., Campanella, R.E.. Interpretation of cone penetration tests – Part I: Sand // Canadian Geotechnical Journal. – 1983. – No. 4. – P. 718-733.
16. Robertson P.K., Campanella R.E. Interpretation of cone penetration test, Part II: Clay // Canadian Geotechnical Journal. – 1983. – No. 4. – P. 734-745.