

ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГРУНТОВ ДИЛАТОМЕТРОМ МАРКЕТТИ¹

FIELD SOIL TESTING BY MARCHETTI'S DILATOMETER

ГУСЬКОВ И.А.

Инженер-геолог ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС», г. Москва,
iag@fugro.ru

GUSKOV I.A.

Engineering geologist of the «GEOINGHSERVICE» LLC, Moscow,
iag@fugro.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Полевые испытания грунтов; дилатометр Маркетти (DMT); сейсмический дилатометр Маркетти (SDMT); статическое зондирование (CPT); сейсмостатическое зондирование (SCPT); параметры грунтов.

KEY WORDS

Field soil testing; Marchetti's dilatometer (DMT); seismic Marchetti's dilatometer (SDMT), cone penetration testing (CPT); seismic cone penetration testing (SCPT), soil parameters.

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрен новый для отечественной практики полевой метод исследования грунтов — с использованием сейсмического дилатометра Маркетти (SDMT). Кратко описаны оборудование, методика испытаний, получаемые результаты. Проведено сравнение последних с результатами использования других методов (полевых и лабораторных).

ABSTRACT

The article considers a new (in the Russian practice) field soil testing method — using the seismic Marchetti's dilatometer (SDMT). The author briefly describes the equipment, technique, obtained results that are compared with the results of using other field and laboratory methods.

¹ До недавнего времени в русскоязычных источниках было принято написание Марчетти, однако корректной транскрипцией фамилии разработчика и, следовательно, названия самого инструмента является Маркетти.

ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

Дилатометр Маркетти как инструмент полевых испытаний грунтов был разработан профессором Сильвано Маркетти в США в 1980 г. [10]. Сам дилатометр состоит из стального лезвия с тонкой, круглой, расширяемой мембраной, расположенной на одной из сторон лезвия.

Дилатометрические испытания являются испытанием на вдавливание, то есть не требуют бурения лидерной скважины, что значительно сокращает длительность и стоимость работ, а также (благодаря этому и особой форме лезвия) позволяет исследовать грунт в условиях его естественного залегания с минимальным нарушением целостности.

Вдавливание лезвия дилатометра может производиться как при помощи установки статического зондирования (что является наилучшим вариантом для достижения максимальной глубины), так и с использованием буровой установки. Существуют и другие варианты вдавливания, например при помощи легкой зондировочной установки (рис. 1).

Вдавливание производится при помощи стандартных СРТ-штанг, через которые пропущен пневматико-электрический кабель, соединяющий лезвие дилатометра, находящееся в грунте, с блоком управления и газовым баллоном, находящимися на поверхности (рис. 2).

Каждые 20 см вдавливание прекращается и производится непосредственно испытание. С помощью блока управления из баллона к лезвию дилатометра под давлением подается газ (чаще всего используются сжатый азот или воздух). Под этим давлением круглая стальная мембрана, расположенная на одной из сторон лезвия, начинает расширяться в сторону грунта (в горизонтальном направлении). В процессе испытания регистрируются два уровня давления: P_0 — давление начала расширения мембраны и P_1 — давление, при котором расширение мембраны в ее центре достигает 1,1 мм. После этого давление из системы сбрасывается, и вдавливание продолжается до следующей глубины исследования. Оборудование компьютеризировано, запись

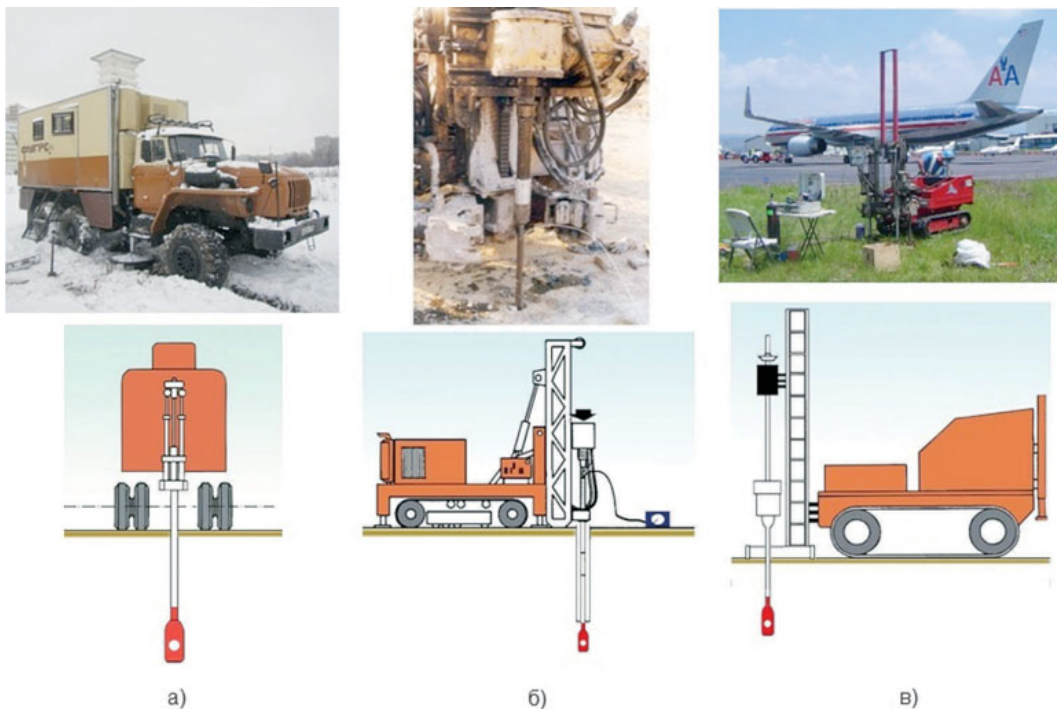


Рис. 1. Методы вдавливания дилатометра Маркетти: а — тяжелой установкой статического зондирования; б — буровой установкой; в — легкой зондировочной установкой [7]

значений ведется автоматически. Каждое испытание занимает около одной минуты. Оборудование позволяет нагнетать в систему давление газа до 8 МПа, что является вполне достаточным для испытаний практически всех дисперсных грунтов.

ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

В процессе обработки результатов по полученным данным давлений P_0 и P_1 рассчитываются так называемые промежуточные параметры. Среди них:

- индекс грунта I_D — показатель, на основе которого определяется тип грунта;
- дилатометрический индекс бокового давления в грунте K_D . Не следует отождествлять с коэффициентом бокового давления покоя в грунте K_0 ;
- дилатометрический модуль E_D . Параметр рассчитывается при решении задачи теории упругости и характеризует деформацию грунта в горизонтальном направлении.

На основе промежуточных параметров рассчитываются конечные:

- вертикальный модуль деформации M_{DMT} . Данный модуль деформации позиционируется разработчиками как одометрический и рассчитывается как дилатометрический модуль E_D , умноженный на некий коэффициент R_M . В этом коэффициенте, помимо значений индекса грунта и индекса бокового давления, учтена и поправка на анизотропию грунта. M_{DMT} позволяет уйти от заниженных расчетных модулей деформации, которые зачастую рассчитываются при проектировании с большим коэффициентом запаса, и, соответственно, снизить стоимость строительства;
- сопротивление недренированному сдвигу Cu ;
- на основе дилатометрического индекса бокового давления могут быть найдены коэффициент бокового давления K_0 и коэффициент переуплотнения OCR ;
- для песчаных грунтов может быть рассчитан угол внутреннего трения ϕ ;
- также для всех типов грунтов существует методика оценки их плотности.

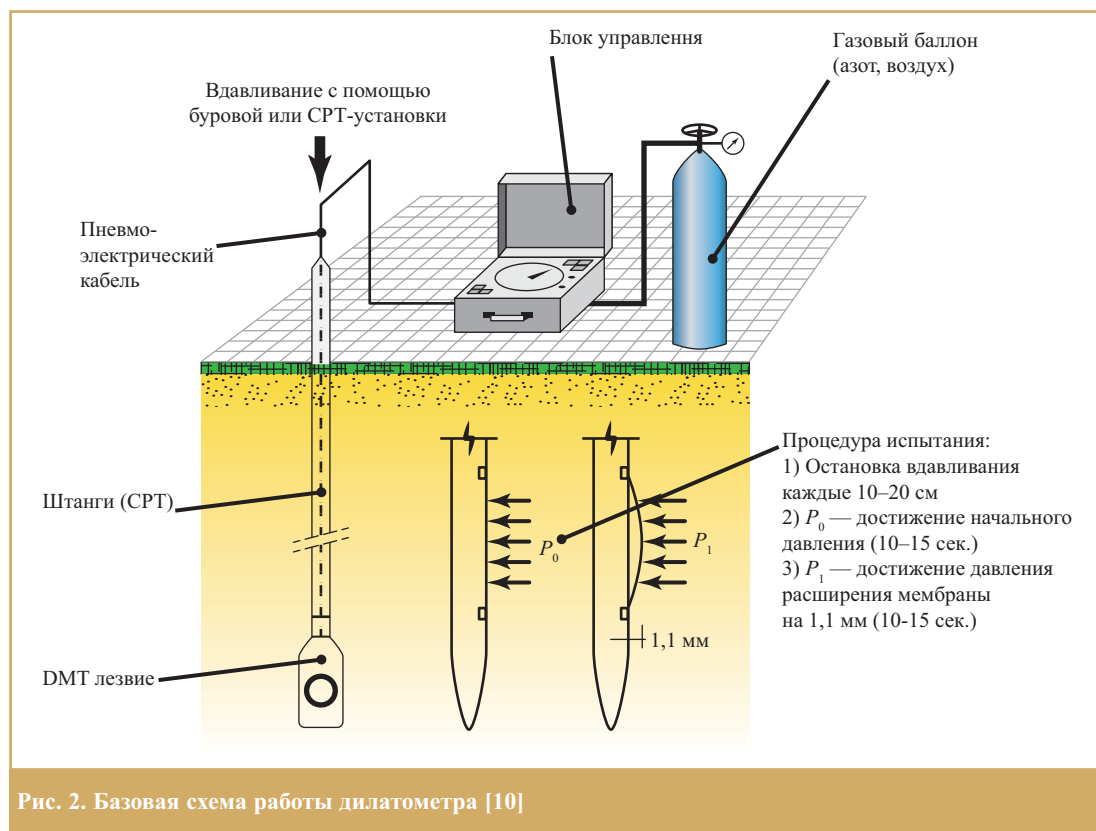


Рис. 2. Базовая схема работы дилатометра [10]

Таблица 1

Основные получаемые параметры и формулы расчета [6]			
Символ	Описание	Основные формулы DMT с объяснением	
P_0	Начальное давление	$P_0 = 1,05 \times (A - Z_M + \Delta A) - 0,05 \times (B - Z_M + \Delta B)$	Z_M — нулевое давление. Если ΔA и ΔB измерены при одном нулевом давлении, то для расчета A и B использовать $Z_M = 0$ (Z_M компенсировано). A и B — начальное и конечное давления без учета калибровочных значений ΔA и ΔB
P_1	Конечное давление	$P_1 = B - Z_M - \Delta B$	
I_D	Индекс грунта	$I_D = (P_1 - P_0)/(P_0 - u_0)$	u_0 — поровое давление
K_D	Дилатометрический индекс бокового давления	$K_D = (P_0 - u_0)/\sigma'_{v0}$	σ'_{v0} — геостатическое давление перед внедрением
E_D	Дилатометрический модуль деформации	$E_D = 34,7 \times (P_1 - P_0)$	
K_0	Коэффициент бокового давления в состоянии покоя	$K_0 = (K_D/1,5)0,47 - 0,6$	для $I_D < 1,2$
OCR	Коэффициент переуплотнения	$OCR = (0,5 \times K_D)1,56$	для $I_D < 1,2$
C_u	Недренированное сопротивление сдвигу	$C_u = 0,22 \times \sigma'_{v0} \times (0,5 \times K_D)1,25$	для $I_D < 1,2$
φ	Угол внутреннего трения	$\varphi = 28^\circ + 14,6^\circ \times \log K_D - 2,1^\circ \times \log 2K_D$	для $I_D < 1,8$
c_h	Коэффициент консолидации	$c_h \approx 7 \text{ см}^2/t_{flex}$	t_{flex} определяется из графика рассеивания порового давления как среднее время участка стабилизации порового давления
k_h	Коэффициент фильтрации	$k_h = c_h \times \gamma_w/M_h$	$M_h \approx K_0 \times M_{DMT}$ γ_w — объемный вес воды
γ	Объемный вес грунта	(по диаграмме из ISSMGE TC16)	
M_{DMT}	Вертикальный одометрический модуль деформации	$M_{DMT} = R_M \times E_D$	
		Если $I_D \leq 0,6$	$R_M = 0,14 + 2,36 \times \log K_D$
		Если $I_D \leq 3$	$R_M = 0,5 + 2 \times \log K_D$
		Если $0,6 < I_D < 3$	$R_M = R_{M,0} + (2,5 \times - R_{M,0}) \times \log K_D$
		$R_M = 0,14 + 0,15 \times (I_D - 0,6)$	
		Если $K_D > 10$	$R_M = 0,32 + 2/18 \times \log K_D$
		Если $R_M < 0,85$	$R_M = 0,85$
u_0	Стабилизированное поровое давление	$u_0 = P_2 - C - Z_M + \Delta A$	B свободно дренируемых грунтах

В табл. 1 приведены основные параметры грунта, рассчитываемые при помощи дилатометра Маркетти, а также используемые корреляционные формулы. Помимо вышеперечисленного в процессе испытаний может проводиться испытание на рассеивание порового давления в глинистых грунтах, а также измерения порового давления в песке.

Диапазон исследуемых данным методом грунтов весьма широк. Исследуются песчано-глинистые разности (диаметр частиц исследуемых грунтов не должен превышать диаметр мембраны дилатометра, который составляет 60 мм). Лезвие дилатометра является очень прочным и может выдержать до 25 т вертикальной нагрузки. Модуль деформации может быть измерен в интервале от 0,5 до 400 МПа, а сопротивление недренированному сдвигу от 2 кПа до

1 МПа, что соответствует консистенции глинистых грунтов от текучей до твердой.

Необходимо понимать, что характеристики в основном определяются в коридоре значений, для некоторых — в довольно узком (как для модуля деформации), для некоторых характеристик может быть проведена только оценка (например, для объемного веса или коэффициентов консолидации и фильтрации).

НОРМАТИВНАЯ БАЗА

Методика испытаний и расчет параметров грунта подробно описаны в международных нормативных документах, таких как Еврокод 7 и ASTM [3–5]. Что касается отечественных нормативов, то в ГОСТ 20276-2012 «Грунты. Методы полевого определения

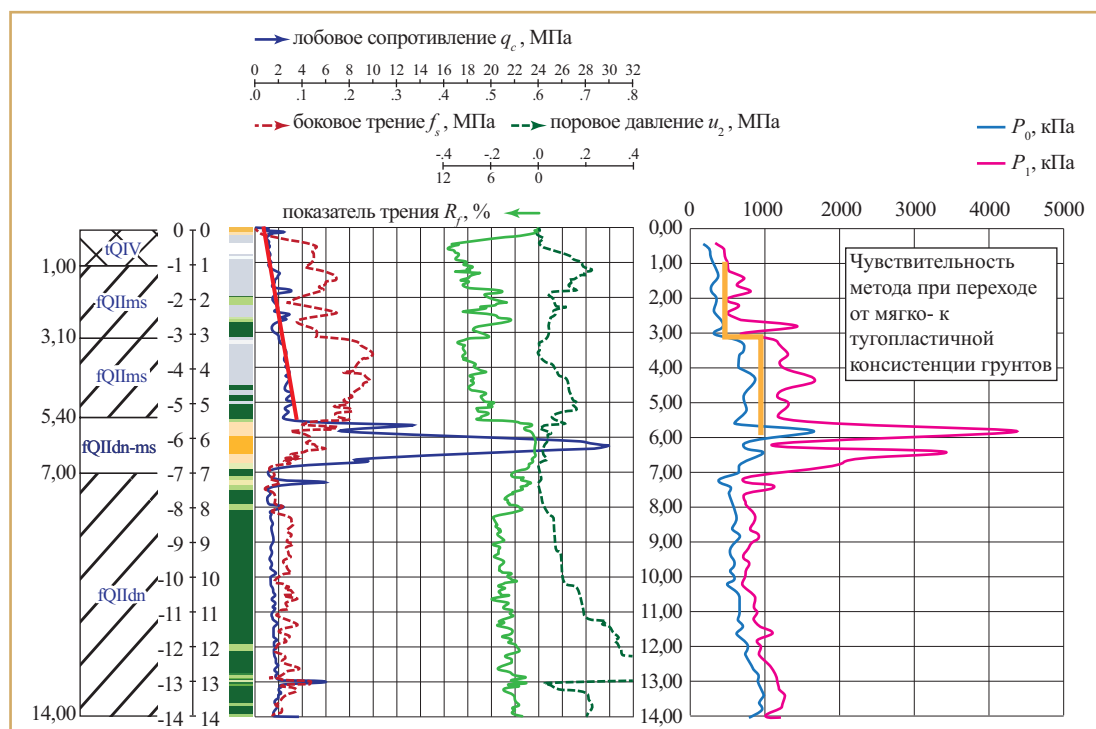


Рис. 3. Сравнение исходных данных статического зондирования (СЗТ) и испытаний дилатометром Маркетти (ДМТ). Вертикальный масштаб один для всех графиков и стратиграфической колонки. Здесь и далее: tQIV — техногенные отложения, представленные в основном суглинком и песком; fQIIms — среднеплейстоценовые (московский горизонт) флювиогляциальные суглинки туго- (в нижней части) и мягкопластичной (в верхней части) консистенции; fQII dn-ms — среднеплейстоценовые (донской и московский горизонты) флювиогляциальные пески мелкие, водонасыщенные; gQII dn — среднеплейстоценовые (донской горизонт) моренные суглинки тугопластичной консистенции

характеристик прочности и деформируемости», приложение В «Метод испытания плоским dilatометром» описываемая методика и используемое оборудование несколько отличается от разработанных Маркетти, однако суть испытаний при этом не меняется [1].

СОПОСТАВЛЕНИЕ С ДРУГИМИ МЕТОДАМИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Корреляционные взаимосвязи между исходными и итоговыми параметрами были получены разработчиками данного оборудования при исследовании некоторой весьма широкой, но при этом ограниченной выборки грунтов. Таким образом, одной из целей исследований является подтверждение возможности использования корреляционных связей, полученных за рубежом, для испытаний грунтов на территории России. Для этого компанией ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС» была проведена серия испытаний грунтов Московского региона различными методами.

На рис. 3 представлено сравнение исходных данных сопоставляемых методов (сопротивление под конусом зонда и трение по боковой поверхности в случае статического зондирования и начальное и конечное давления P_0 и P_1 — в случае испытаний dilatометром). На графиках хорошо видно, что dilatометр является инструментом более чувствительным к изменению грунтовых условий. Так, для верхнего участка разреза, где мягкопластичные суглинки переходят в тугопластичные, изменение сопротивления под конусом на графике статического зондирования аппроксимируется прямой, в то время как

данные испытаний dilatометром изменяются скачкообразно (прямая и ломаная красные линии на графиках), что позволяет более качественно и точно определить, во-первых, тип грунта и, во-вторых, его характеристики.

ИНДЕКС ГРУНТА

Далее хотелось бы внести некоторую ясность в такой dilatометрический параметр, как индекс грунта (I_D). В зарубежной практике на основе этого параметра производят разделение грунтов на глинистые и песчаные. Индекс грунта оценивается по разнице между начальным и конечным давлениями P_0 и P_1 . При этом для глинистых грунтов характерны близкие значения этих параметров, для песчаных — разница между ними существенно больше.

Сопоставление результатов dilatометрии и лабораторных испытаний не позволило определить единую зависимость между индексом грунта и преобладанием той или иной фракции в гранулометрическом составе грунта. Однако при более глубоком анализе лабораторных данных была найдена достаточно четкая обратная зависимость индекса грунта от показателя пластичности (рис. 4, а). Индекс грунта практически линейно уменьшается при переходе от полутвердой консистенции глинистых грунтов к мягкопластичной. Что касается песчаных грунтов (индекс грунта для которых варьирует от 1,8 до 10), была определена его взаимосвязь с содержанием в грунте частиц диаметром более 0,1 мм (такой диаметр был выбран ввиду того, что испытаниям подверглись в основном мелкие пески). Рис. 4, б пока-

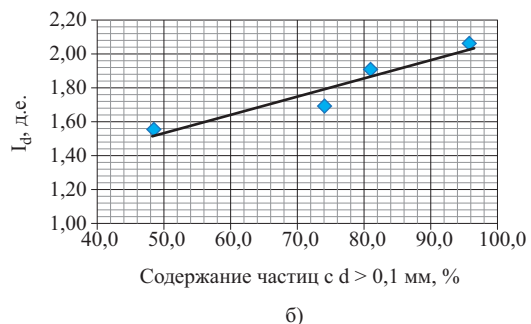
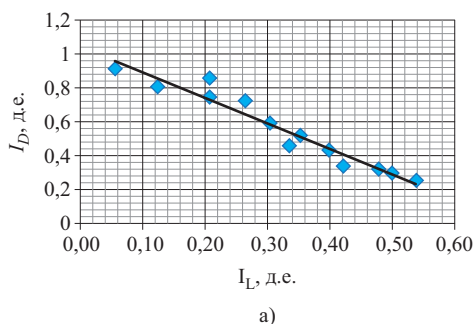


Рис. 4. Взаимосвязь индекса грунта с результатами лабораторных исследований: а — с показателем пластичности для глинистых грунтов; б — с содержанием частиц грунта диаметром более 0,1 мм для песчаных грунтов

зывает, что зависимость существует и она практически линейная.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что dilatometer Маркетти является надежным инструментом для определения типа грунта и его состояния. К сожалению, методика применения и расчета характеристик по данным dilatометрических испытаний отсутствует в отечественных нормативных документах, что является существенным недостатком и нуждается в проработке.

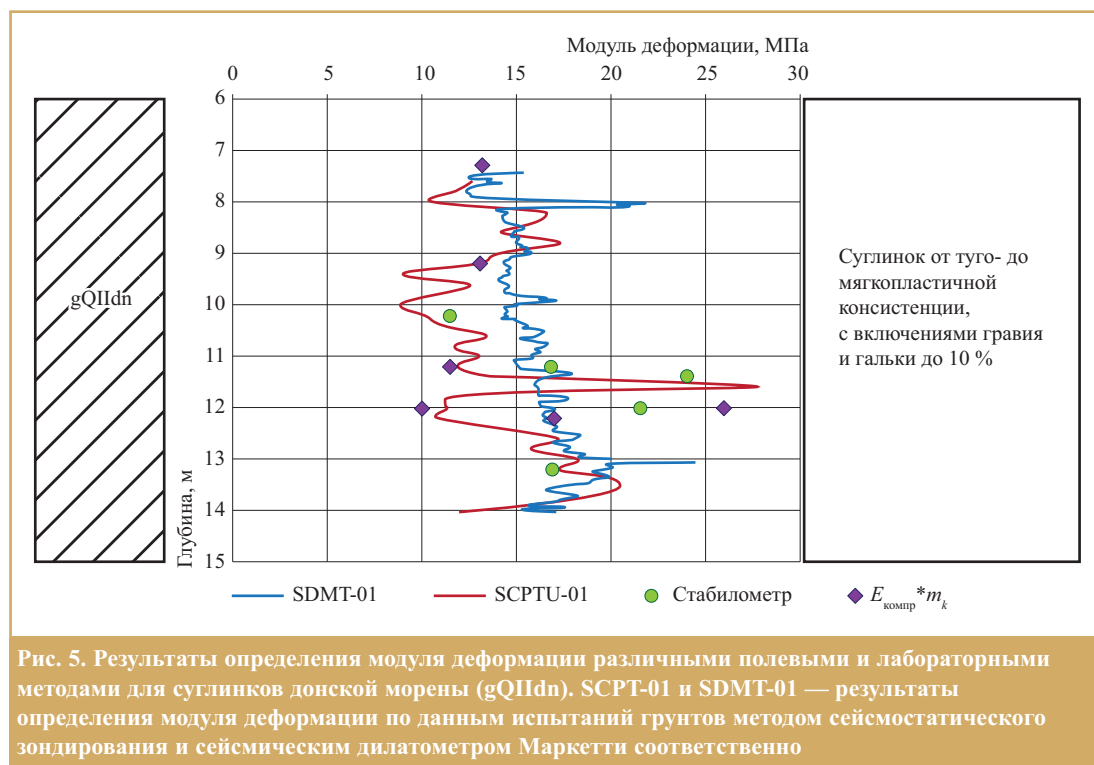
МОДУЛЬ ДЕФОРМАЦИИ

Что касается определения непосредственно модуля деформации грунтов, то на исследовательской площадке в Москве был проведен комплекс испытаний с последующим сопоставлением полученных результатов. На рис. 5 показано сравнение модулей деформации для нижней, достаточно однородной, части разреза (моренных суглинков), полученных с помощью разных методов: собственно испытаний dilatометром, статического зондирования, компрессионных (умноженных на коэффициент m_k из табл. 5.1 СП 22.13330 [2]) и испытаний в приборе трех-

осного сжатия. На графике видно, что результаты dilatометрических испытаний хорошо сходятся с лабораторными исследованиями. Что касается модуля деформации, определенного по данным статического зондирования, то он хорошо характеризует только толщу в целом, не так сильно реагируя на неоднородности. Сравнение с результатами статического зондирования еще раз показывает, что dilatометр является инструментом более чувствительным к изменению свойств грунта.

На рис. 6 показано сравнение модуля деформации, полученного из данных dilatометрических испытаний, с результатами испытаний плоским штампом 600-го диаметра в скважине. Испытания проводились в флювиогляциальных и моренных суглинках. Высокая сходимость результатов и анализ данных, приведенных на рис. 5, позволяют сделать вывод (во всяком случае, для исследованных грунтов) о том, что модуль деформации, полученный по результатам испытаний dilatометром:

- по уровню значений соответствует модулям деформации, полученным из штамповых испытаний и при лабораторных исследованиях в стабилометре:



- является высокочувствительным инструментом к изменениям грунтовых условий, а значит, может и должен быть рекомендован для использования при оценке деформационных свойств грунтов, расчета осадки и выбора типа фундамента.

КОЭФФИЦИЕНТЫ БОКОВОГО ДАВЛЕНИЯ И ПЕРЕУПЛОТНЕНИЯ

Отдельное внимание также хотелось бы уделить таким параметрам грунта, как коэффициент бокового давления K_0 и коэффициент переуплотнения OCR . Испытания дилатометром наиболее точно позволяют оценить эти характеристики, ввиду того что в процессе исследований непосредственно измеряется горизонтальное давление, оказываемое грунтом на мембрану дилатометра, а значит, становится возможным переход к горизонтальным напряжениям в массиве грунта. Из этого предположения и ряда экспериментов разработчиками метода были выведены зависимости K_0 и OCR от ди-

латометрического индекса бокового давления, которые позднее были подтверждены различными исследователями на многих экспериментальных площадках (рис. 7). Помимо этого, становится возможной комплексная оценка напряженного состояния в массиве грунта.

СЕЙСМИЧЕСКИЙ ДИЛАТОМЕТР МАРКЕТТИ (SDMT)

Помимо стандартных дилатометрических испытаний могут также проводиться испытания сейсмическим дилатометром, который представляет собой комбинацию дилатометра с сейсмическим модулем. Модуль технически располагается непосредственно за лезвием и включает в себя 4 датчика: 2 — для регистрации поперечных волн и 2 — для регистрации продольных.

На рис. 8 изображена базовая схема работы SDMT. Для определения скорости поперечных волн испытания проводятся каждые 0,5 м. Возбуждение

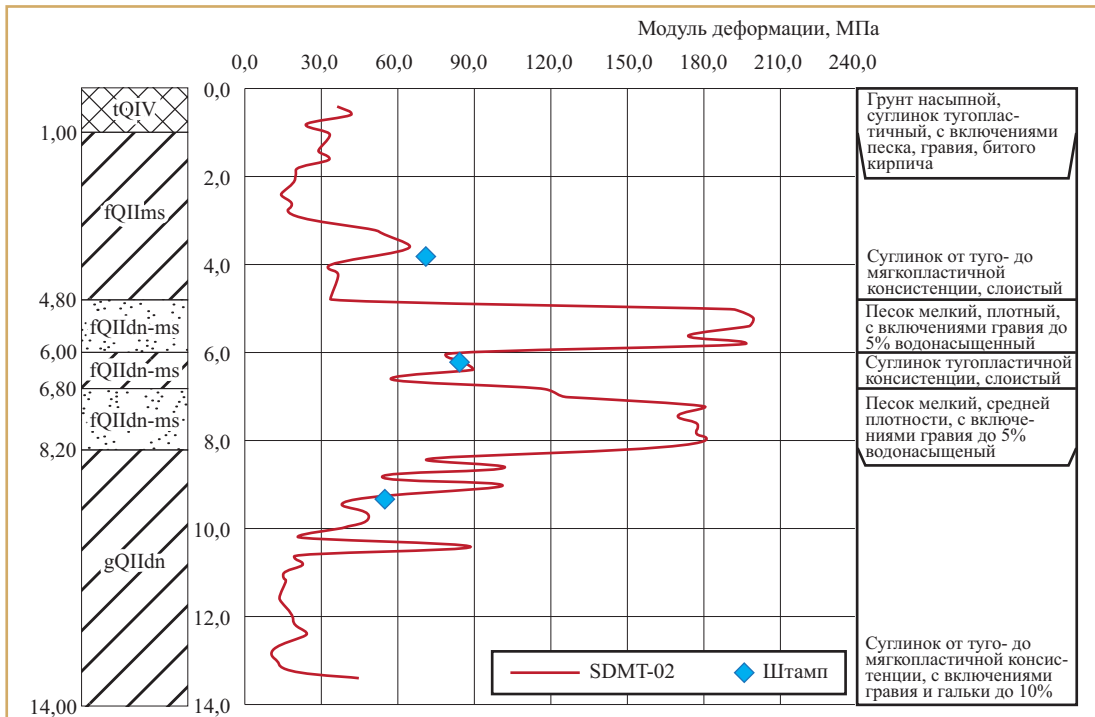


Рис. 6. Результаты определения модуля деформации с помощью дилатометрических и штамповых испытаний. В левой части рисунка представлена стратиграфическая колонка, составленная по данным бурения, проведенного в непосредственной близости от точки испытаний сейсмическим дилатометром

сейсмической волны происходит на поверхности грунта при помощи удара молота по плите в горизонтальном направлении. Сейсмограммы, записанные приемниками, усиливаются и оцифровываются на глубине и передаются на поверхность к ПК, который определяет задержку между вступлениями сейсмических волн. Скорость сейсмических волн рассчитывается как отношение расстояния между приемниками к задержке прихода волны на приемнике. Конфигурация «истинного интервала» с двумя приемниками позволяет избежать возможной ошибки в определении «нулевого времени» удара молота, которая иногда наблюдается при конфигурации «псевдоинтервала» с одним приемником. Более того, обе сейсмограммы, записанные двумя приемниками на определенной глубине, соответствуют одному удару молота. Примечательна сходимость измерений — менее 1%, то есть всего несколько м/с [9].

Определение скорости продольных волн (рис. 8в) производится схожим образом, только удар производится вертикально (перпендикулярно земной поверхности).

Кроме того, существует методика определения скоростей волн сдвига в скальных грунтах (см рис. 8г). Для проведения подобных испытаний производится бурение скважины необходимой глубины, которая в дальнейшем засыпается, чаще всего песчаным однородным материалом. В подготовленную скважину выполняется вдавливание сейсмического дилатометра. Далее процедура сейсмического испытания аналогична вышеописанной. Расчет поперечных волн сдвига для скальных грунтов становится возможным ввиду одинакового расстояния прохождения сейсмической волны в искусственном песчаном грунте к каждому из датчиков, а значит, измеряется разница времени прохода сейсмических волн именно в скальном грунте от источника до стенки пробуренной скважины. Методика проведения испытаний фактически совпадает с еще одним зарубежным методом Downhole Seismic Testing, однако стоимость значительно ниже, а скорость выше, ввиду отсутствия необходимости цементирования и дополнительного обустройства скважины.

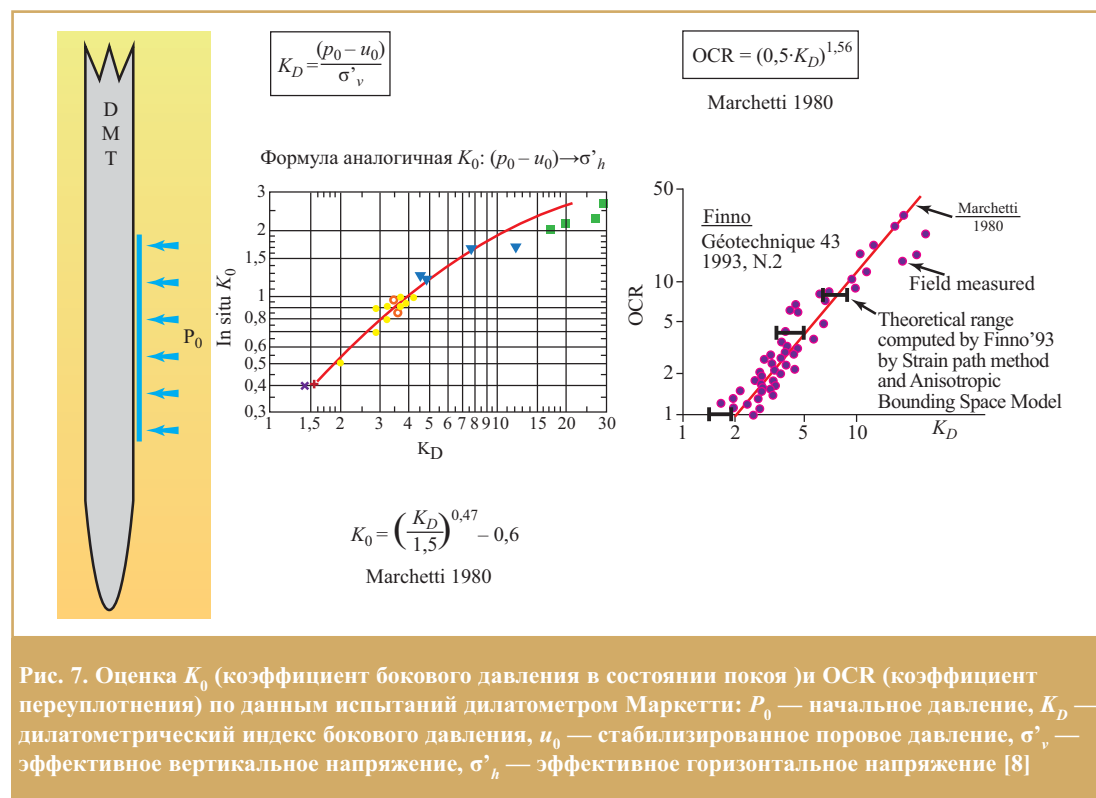


Рис. 7. Оценка K_0 (коэффициент бокового давления в состоянии покоя) и OCR (коэффициент переуплотнения) по данным испытаний дилатометром Маркетти: P_0 — начальное давление, K_D — дилатометрический индекс бокового давления, u_0 — стабилизированное поровое давление, σ'_v — эффективное вертикальное напряжение, σ'_h — эффективное горизонтальное напряжение [8]

В рамках исследовательской программы компании ООО «ГЕОИНЖСЕРВИС» для определения точности проводимых измерений были подвергнуты сравнению данные о скорости поперечных волн сдвига, определенных тремя сейсмическими системами (с помощью SDMT, а также цифровой и аналоговой системы сейсмостатического зондирования). Как видно на рис. 9, профили скоростей сейсмических волн на всех глубинах исследования обладают хорошей сходимостью.

Благодаря измерению как скоростей поперечных волн сдвига в грунте, так и продольных волн сжатия — расширения, становится возможным расчет не только максимального модуля сдвига G_{\max} , но и такого показателя, как коэффициент Пуассона, с помощью которого, в свою очередь, можно перейти к максимальному модулю Юнга E_{\max} . Ценность подобных комбинированных методов заключается в возможности определения максимального количества характеристик грунта в рамках одного испытания.

ВЫВОДЫ

Выполненные исследования показали, что с помощью сейсмического дилатометра может быть оценен целый ряд характеристик, обладающих высокой сходимостью с результатами других полевых и лабораторных методов исследования грунтов. А именно, может быть определен тип грунта, оценены его модуль деформации, коэффициент бокового давления, коэффициент переуплотнения, плотность, угол внутреннего трения, сопротивление недренированному сдвигу и некоторые другие характеристики. С помощью сейсмической модификации метода могут быть получены скорости продольных и поперечных волн в грунте, а также рассчитаны максимальные модули сдвига и Юнга, оценен коэффициент Пуассона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ближайшее будущее применения дилатометра Маркетти видится следующим образом:

- во-первых, это накопление большей базы данных на основании исследований различных грунтовых условий нашей необъятной страны, применение еще не изученных возможностей метода;

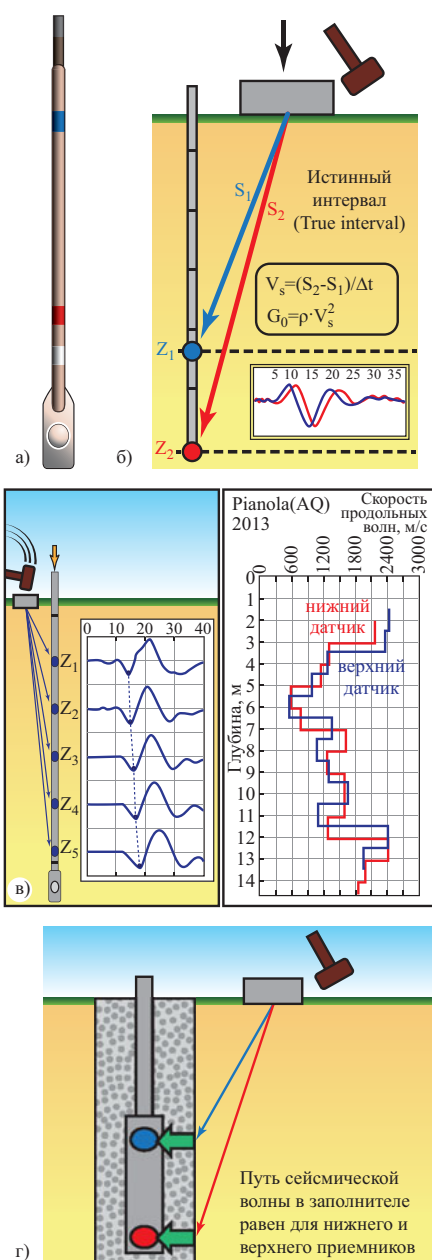


Рис. 8. Базовая схема SDMT: а — DMT лезвие и сейсмический модуль; б — общая схема испытания для определения скорости поперечных волн (V_s) с формулами расчета V_s и G_0 (максимальный модуль сдвига, МПа); в — общая схема теста определения скорости продольных волн (V_p); г — определение V_s для скальных грунтов [9]

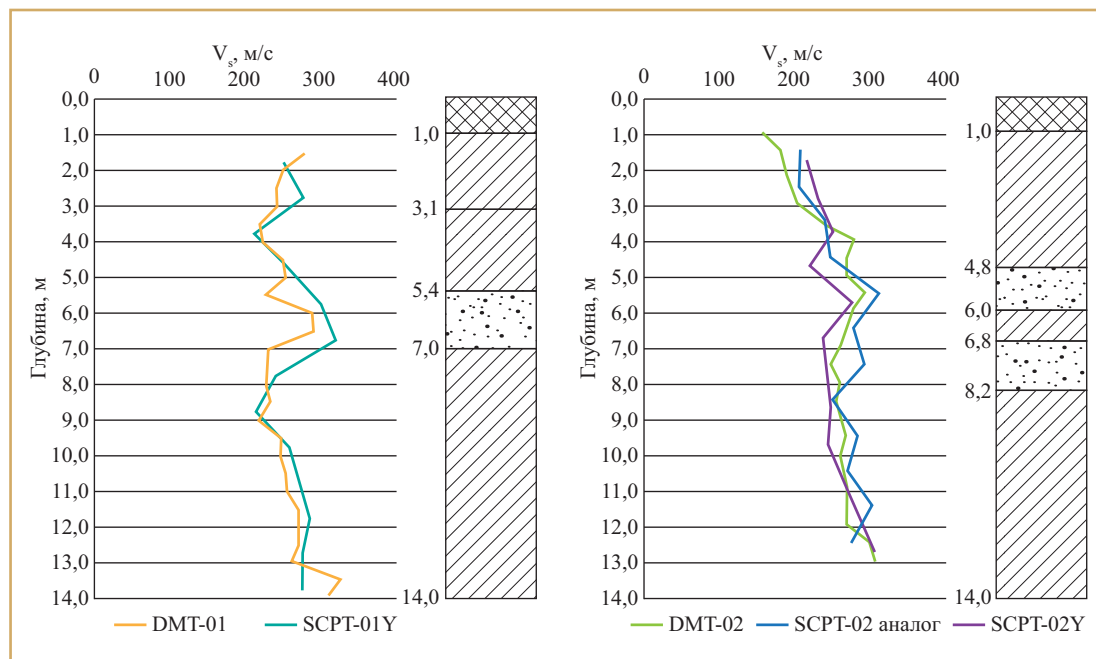


Рис. 9. Сравнение результатов испытаний трех сейсмических систем: а — результаты определения скорости поперечных волн при использовании цифровой системы сейсмостатического зондирования (SCPT-01digital) и сейсмического дилатометра (SDMT-01); б — результаты испытаний цифровой и аналоговой систем сейсмостатического зондирования (SCPT-02digital и SCPT-02analog), а также сейсмического дилатометра Маркетти (SDMT-02).

- во-вторых, продолжение сравнительного анализа дилатометрических данных с результатами других испытаний (как полевых, так и лабораторных);
- в-третьих, это разработка и/или уточнение корреляционных связей для отечественных грунтовых

условий, с учетом параметров и классификаций, применяемых в России;

- и наконец, использование дилатометра непосредственно для инженерных изысканий в комплексе с другими методами исследования для получения максимального представления о грунтовых условиях.

Список литературы

1. ГОСТ 20276-2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. М.: Стандартиформ, 2013. 50 с.
2. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. М.: Изд-во стандартов, 2011. 161 с.
3. ASTM D 6635-01 (2001 & 2007). Standard Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer. Book of Standards. 14 p.
4. ASTM D 7400 — 08. Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing. West Conshohocken, PA, Book of standards. 2008. 11 p.
5. Eurocode 7 (1997 & 2007). // Geotechnical Design — Pt. 2: Ground Investigation and Testing. EN 1997-2:2007
6. ISSMGE TC16 (2001). The Flat Dilatometer Test (DMT) in Soil Investigations // A Report by the ISSMGE Committee TC16. May 2001. 41 p. Reprinted in Proc. 2nd Int. Conf. on the Flat Dilatometer, Washington D.C. 2006: 7–48.
7. Marchetti S. Flat Dilatometer (DMT) downloadable papers // www.marchetti-dmt.it.
8. Marchetti S. In Situ Tests by Flat Dilatometer // Jnl GED, ASCE, 106. GT3. 1980. P. 299–321.
9. Marchetti S. The Seismic Dilatometer Test for in situ soil investigations // Indian Geotechnical Conference. December. 2012. P. 312–315.
10. Marchetti S., Monaco P., Totani G., Marchetti D. In Situ Tests by Seismic Dilatometer (SDMT) // Proc. From Research to Practice in Geotechnical Engineering, ASCE Geotech. Spec. Publ. No. 180 (honoring J.H. Schmertmann). 2008. P. 292–311.