

ПЛОСКИЙ И СЕЙСМИЧЕСКИЙ ДИЛАТОМЕТРЫ МАРКЕТТИ ДЛЯ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГРУНТОВ

Маркетти С.

Профессор Университета Л'Аквили, Италия, silvano@marchetti-dmt.it

Ключевые слова: *полевые испытания грунтов; испытания dilatометром Маркетти (DMT); испытания сейсмическим dilatометром Маркетти (SDMT).*

АННОТАЦИЯ: Статья написана на основе доклада на Индийской геотехнической конференции (IGC-2014), проходившей 18–20 декабря 2014 г. в Какинаде (Индия). В последние десятилетия наблюдается массовый переход от лабораторных испытаний грунтов к полевым. Полевые испытания в настоящее время часто составляют основную часть геотехнических исследований. Они являются быстрыми, экономичными, воспроизводимыми, информативными, дают большие объемы данных, обеспечивают их сниженный разброс, стоят намного меньше, чем отбор образцов и их последующие лабораторные испытания. В особенной степени это касается песков, для которых трудно получать образцы природного сложения. Поэтому сегодня полевые испытания являются наиболее используемыми в каждодневной практике изысканий для строительства. При этом лабораторные испытания остаются базовыми при научных исследованиях и выполнении крупных проектов. Цель данной работы – описать плоский dilatометр Маркетти, получаемые с его помощью данные и их использование. В статье также описывается недавно разработанный сейсмический dilatометр Маркетти, который имеет дополнительный модуль для измерения скорости поперечных волн V_s . Испытания этими приборами оказались полезными в тех случаях, когда жесткость грунта и его прогнозные осадки являются критичными для проектирования. В последние годы dilatометр Маркетти все больше используется для оценивания сопротивления грунта разжижению.

The flat and seismic Marchetti's dilatometers for in situ soil investigations

Marchetti S.

Professor of L'Aquila University, Italy, silvano@marchetti-dmt.it

Key words: in situ soil testing; Marchetti's dilatometer testing (DMT); seismic Marchetti's dilatometer testing (SDMT).

Abstract

The article was written on the basis of the report for the Indian Geotechnical Conference (IGC-2014) held on the 18–20 of December in 2014 in Kakinada (India). The last decades have seen a massive migration from laboratory testing to in situ testing. Often today in situ testing is the major part of a geotechnical investigation. In situ tests are fast, economical, reproducible, informative, provide many data, involve reduced scatter, cost much less than sampling and testing. This is particularly true in sand, where recovering samples is difficult. Field tests are therefore today the state-of-practice for everyday design. Laboratory tests remain fundamental for research and in big jobs. Scope of this paper is to describe Marchetti's dilatometer, the obtained information and the engineering applications. The paper also describes the recently developed seismic Marchetti's dilatometer which includes an add-on seismic module for measuring also the shear wave velocity V_s . Marchetti's dilatometer and seismic dilatometer have been found helpful in projects where soil stiffness and settlements predictions are critical to the design. In the recent years Marchetti's dilatometer has been increasingly used for liquefaction resistance estimates.

ВВЕДЕНИЕ

Плоский dilatометр Маркетти является инструментом для полевых исследований, разработанным около 40 лет назад [9]. В настоящее время он используется практически во всех промышленно развитых странах. Методики испытаний этим прибором включены в стандарты Американского

общества по материалам и их испытаниям (ASTM) [1] и в Еврокоды [3]. Dilatометр Маркетти был объектом подробной монографии технического комитета TC16 Международного общества по механике грунтов и геотехнике (ISSMGE) [20]. В настоящее время над стандартом по испытаниям данным прибором работают Международная организация по

стандартизации (ISO) и Европейский комитет по стандартизации (CEN).

Перечислим некоторые основные характеристики испытаний дилатометром Маркетти (DMT – Dilatometer Marchetti Testing).

- DMT – это испытания на пенетрацию (вдавливание), поэтому их преимуществом является то, что они не требуют бурения лидерной скважины.
- Поскольку DMT являются испытаниями на сдвиг под нагрузкой, они дают информацию о жесткости грунта, которую нельзя получить при помощи других пенетрационных тестов, которые измеряют в основном характеристики «разрушения», т.е. прочности. Более того, деформирование грунта вокруг лопатки плоского дилатометра при ее внедрении существенно меньше, чем для конического зонда.
- Оборудование для DMT – прочное, надежное, легкое в использовании. Получаемые с его помощью данные практически не зависят от оператора и являются хорошо воспроизводимыми.
- Испытания DMT дают информацию об истории нагружения, которая оказывает основное влияние на поведение грунта. В частности, информация об истории нагружения позволяет лучше оценивать осадки и сопротивление разжижению грунта.

Что касается испытаний сейсмическим дилатометром Маркетти (SDMT – Seismic Dilatometer Marchetti Testing), в их процессе помимо параметров, определяемых при DMT, дополнительно измеряется скорость поперечных сейсмических волн V_s . в настоящее время ее измеряют всё чаще по следующим причинам.

- Теперь чаще требуется сейсмический анализ, для которого V_s является основным входным параметром.
- Недавно введенный европейский стандарт по сейсмостойкому проектированию – Еврокод 8 – предписывает определение V_s в верхних 30 м разреза на всех строительных площадках, расположенных в сейсмических зонах.
- Испытания SDMT обеспечивают получение как модуля сдвига при малых деформациях $G_0 = \rho V_s^2$ (где ρ – плотность грунта. – Ред.), так и жесткости при эксплуатационных нагрузках, выражаемой через компрессионный модуль деформации M . Эти два модуля могут помочь при выборе кривых, отражающих уменьшение модуля сдвига при увеличении деформации сдвига (угла сдвига).

ИСПЫТАНИЯ ДИЛАТОМЕТРОМ МАРКЕТТИ (DMT)

Плоский дилатометр состоит из стальной лопатки, имеющей на одной из сторон тонкую гибкую круглую стальную мембрану. В состоянии покоя поверхность этой мембраны находится в одной плоскости с окружающей плоской поверхностью лопатки. Лопатка соединена электропневматическим кабелем, проходящим через рабочие штанги, с устройством управления на поверхности (рис. 1).

Блок управления оборудован манометрами, устройством для подачи аудиовизуальных сигналов, вентилем для регулирования давления газа (подаваемого из баллона) и газовыпускными клапанами. Лопатка внедряется в грунт с использованием обычного полевого оборудования, т.е. пенетровметров, обычно используемых для статических испытаний на вдавливание конуса (CPT), или буровых установок. Дилатометр Маркетти может также вбиваться, например, с использованием молота и штанг для стандартных пенетрационных испытаний (SPT), но статическое вдавливание гораздо предпочтительнее. Наиболее эффективным является вдавливание лопатки 20-тонной установкой статического зондирования (с продуктивностью до 80 м в день). Испытание начинается с внедрения дилатометра в грунт. Когда лопатка достигает требуемой глубины, вдавливание прекращается. Без промедления оператор накачивает под мембрану газ и примерно через 30 секунд снимает два показания – давление А, требуемое для того, чтобы мембрана начала двигаться (давление начала расширения мембраны) и давление В, требуемое для смещения центра мембраны на 1,1 мм в сторону грунта. По желанию может также сниматься третье показание – С (давление закрытия вентилея) – путем медленного выпуска газа из-под мембраны вскоре после достижения давления В. Затем лопатка внедряется на следующую глубину испытания. Приращение глубины обычно составляет 20 см.

Интерпретация данных осуществляется следующим образом. Сначала результаты полевых измерений преобразуются в промежуточные параметры DMT – I_D , K_D , E_D (коэффициент материала, дилатометрический коэффициент бокового давления в грунте и дилатометрический модуль деформации соответственно). Затем I_D , K_D , E_D с помощью обычно используемых корреляционных зависимостей [20] преобразуются в следующие характеристики: компрессионный модуль деформации M_{DMT} ; недренированную прочность на сдвиг (сопротивление недренированному сдвигу) c_u ; коэффициент бокового давления в состоянии покоя K_0 (для глин);

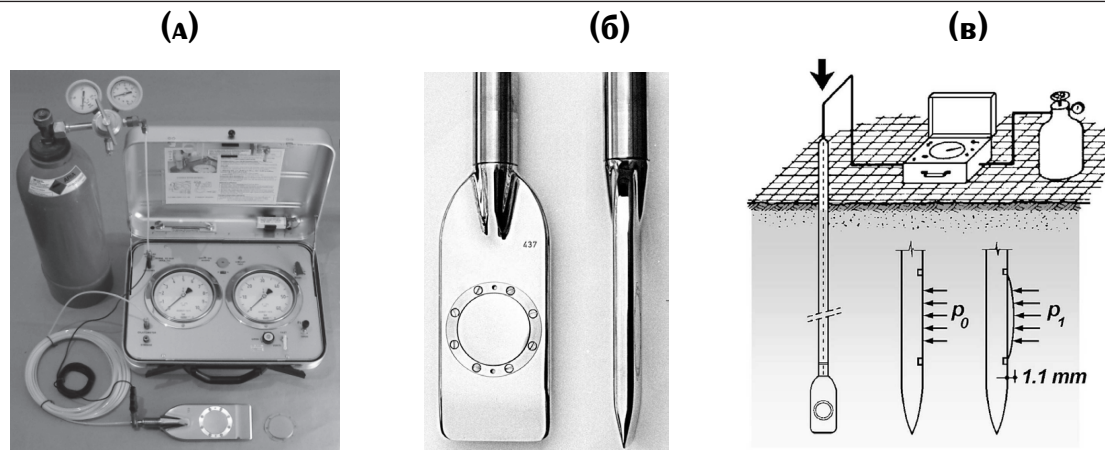


Рис. 1. Плоский дилатометр Маркетти: а – фотография оборудования; б – лопатка дилатометра; в – схема проведения испытания

коэффициент переуплотнения OCR (для глин); эффективный угол внутреннего трения ϕ' (для песков); плотность (объемную массу) грунта ρ . При измерении порового давления можно оценить коэффициенты консолидации и фильтрации [20]. Отсчет C (давление закрытия вентиля) в песке приблизительно равен равновесному поровому давлению. Примеры изменения по глубине параметров, полученных при помощи DMT или SDMT (с дополнительным профилем V_s . – Ред.), показаны на рисунке 2, где:

- I_D – коэффициент материала, который дает информацию о типе грунта (песчаный, пылеватый, глинистый);
- M – вертикальный дренированный компрессионный модуль деформации (при геостатическом напряжении);
- c_u – недренированная прочность на сдвиг;
- K_D – дилатометрический коэффициент бокового давления в грунте (его профиль похож по форме на профиль коэффициента переуплотнения OCR; для глин $K_D \approx 2$ указывает

на OCR=1; $K_D > 2$ говорит о переуплотнении; профиль K_D часто дает первое представление об истории нагружения отложений).

Более подробную информацию об оборудовании для испытаний DMT, их процедуре и формулах для интерпретации результатов измерений можно найти в исчерпывающем докладе технического комитета TC16 Международного общества по механике грунтов и геотехнике (ISSMGE) [20].

ИСПЫТАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИМ ДИЛАТОМЕТРОМ МАРКЕТТИ (SDMT)

Сейсмический дилатометр Маркетти – это комбинация плоского дилатометра Маркетти с дополнительным сейсмическим модулем для измерения скорости поперечных волн [11, 13–15]. Этот модуль (рис. 3, а) представляет собой цилиндрический элемент, помещенный над лопаткой дилатометра и оборудованный двумя датчиками для регистрации сдвиговых волн, разнесенными на 0,5 м. Когда на поверхности генерируется поперечная волна, она сначала достигает верхнего приемника, затем, после некоторой задержки, – нижнего. Сейсмограммы, полученные при регистрации двумя приемниками, в увеличенном и оцифрованном виде передаются в компьютер на поверхности, где и определяется задержка. Скорость поперечных волн V_s (рис. 3, б) получается через соотношение между разницей в расстояниях между источником и датчиками ($S_2 - S_1$) и разницей во времени получения сигнала Δt первым и вторым датчиком. Конфигурация, использующая два датчика с фиксированным расстоянием между ними, позволяет избежать возможной неточности при фиксации нулевого момента времени при ударе молотком, которая иногда наблюдается при

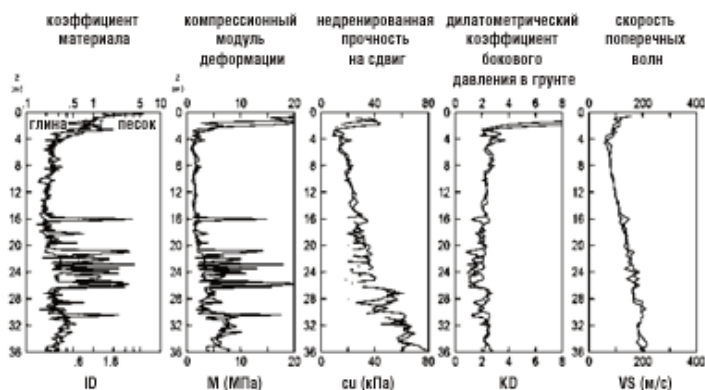


Рис. 2. Пример результатов испытаний SDMT (двумя рядом расположенными сейсмическими дилатометрами)

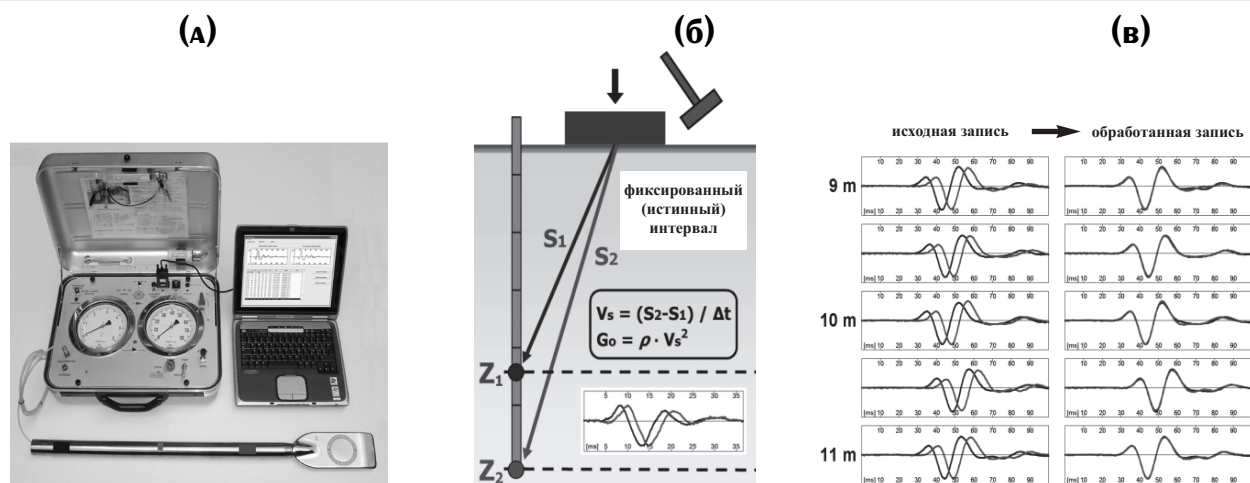


Рис. 3. Сейсмический дилатометр Марчетти: а – лопатка дилатометра и сейсмический модуль; б – схематическое изображение испытания сейсмическим дилатометром; в – примеры сейсмограмм, полученных при записи и после восстановления по фазе

использовании только одного приемника.

Более того, пара сейсмограмм, записанных двумя датчиками на данной глубине испытания, соответствует одному и тому же удару молотком. Воспроизводимость получаемых величин V_s является очень высокой (наблюдаются отклонения в пределах примерно 1%, т.е. нескольких метров в секунду).

На рисунке 3, в показаны примеры сейсмограмм, полученных методом SDMT на разных глубинах испытаний на площадке Фучино. На рисунке 2 представлены примеры результатов испытаний SDMT. Пятая диаграмма представляет собой профиль V_s , полученный с помощью сейсмического модуля. Можно увидеть, что воспроизводимость V_s сходна с таковой для других четырех параметров DMT.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА БОКОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ГРУНТЕ K_D К ИСТОРИИ НАГРУЖЕНИЯ

На основе большого количества экспериментальных материалов хорошо установилось мнение о том, что дилатометрический коэффициент бокового давления в грунте K_D значительно более чувствителен к истории нагружения, чем сопротивление пенетрации. Это наблюдалось многочисленными исследователями в лабораторных (в большой калибровочной камере, например [5]) и полевых (например, [6, 19]) условиях.

В качестве примера на рисунке 4 показаны данные

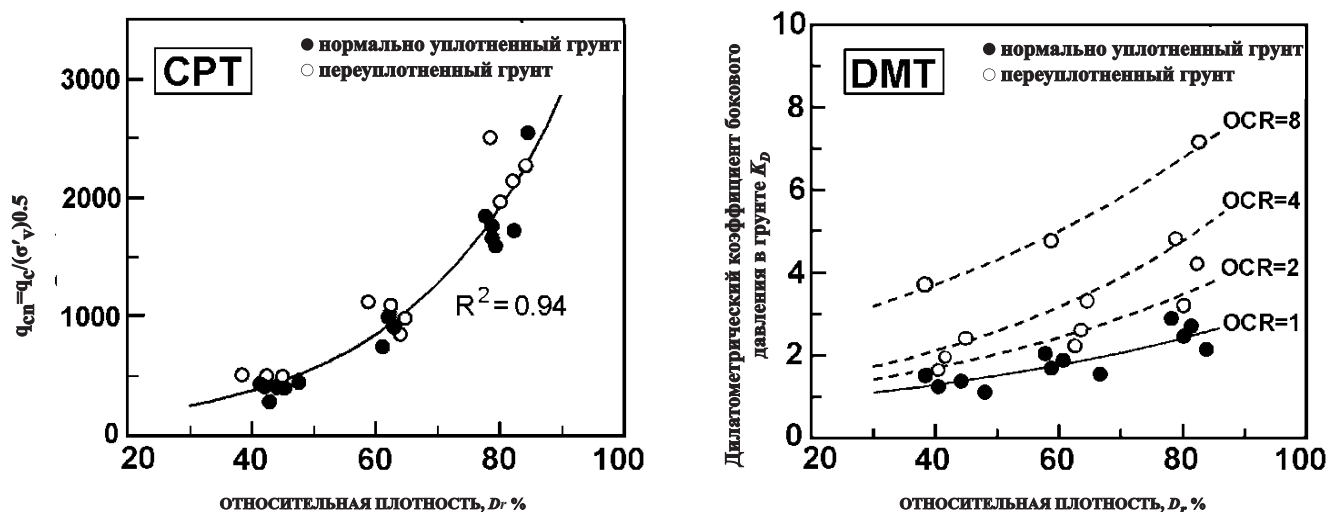


Рис. 4. Чувствительность результатов испытаний методами CPT и DMT к истории нагружения [7] (q_c – лобовое сопротивление внедрению конуса, кПа; $q_{cn} = q_c / (\sigma'_v)^{0.5}$ – нормализованное сопротивление внедрению конуса; σ'_v – эффективное вертикальное давление в грунте до начала зондирования (вертикальное напряжение от собственного веса грунта), кПа; R^2 – коэффициент детерминации. – Ред.)

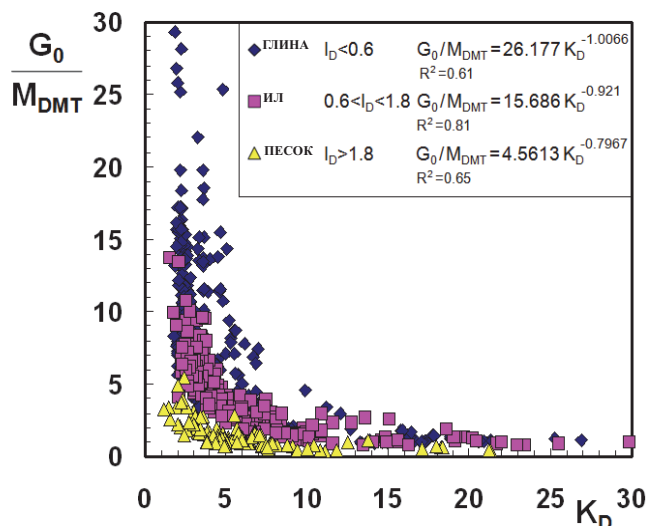


Рис. 5. Зависимость отношения G_0/M_{DMT} от K_D (OCR) для различных типов грунта [15], с помощью которой можно получить оценки G_0 (и V_s) по результатам испытания механическим (не сейсмическим) делатометром Марчетти

недавних исследований в калибровочной камере [7], проведенных в Корее, по сопоставлению чувствительности результатов испытаний методами СРТ и DMT к истории нагружения. Сорок больших образцов кварцевого песка из Пусана (Южная Корея) были предварительно уплотнены до коэффициента переуплотнения OCR в диапазоне от 1 до 8. Затем половина образцов была испытана методом СРТ, а другая половина – методом DMT. Как можно увидеть на *рисунке 4*, переуплотнение приводит к существенному увеличению дилатометрического коэффициента бокового давления в грунте K_D , но к практически незаметному увеличению сопротивления внедрению конуса q_c . Две диаграммы

на *рисунке 4* подтверждают, что K_D является значительно более чувствительным к величине OCR, чем q_c . Одному и тому же нормализованному сопротивлению под острием конуса q_{cn} соответствуют многие значения K_D . Таким образом, K_D позволяет различать пески с разной историей нагружения гораздо лучше, чем это возможно по результатам пенетрационных испытаний.

С другой стороны, история нагружения грунта, влияя на его прочность, является основополагающей для реалистичных оценок осадок и сопротивления разжижению. Если она при изысканиях не выявляется и, соответственно, игнорируется, то даваемые ей преимущества идут насмарку. Знание истории нагружения несет в себе значительный экономический ресурс, позволяя выполнять более экономичное проектирование.

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН V_s ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИМ (НЕ СЕЙСМИЧЕСКИМ) ДИЛАТОМЕТРОМ МАРКЕТТИ (DMT)

Если скорость поперечных волн не была измерена напрямую, то можно приблизительно оценить V_s и модуль сдвига при малых деформациях G_0 на основе трех параметров DMT – I_D , K_D и M_{DMT} , полученных при помощи механического (т.е. не сейсмического) делатометра Марчетти. Рисунок 5 показывает эмпирические зависимости (полученные с привлечением данных SDMT – Ред.), по которым можно выполнять оценки G_0 и затем V_s после определения K_D и M_{DMT} методом DMT. Следует обратить внимание, что G_0/M_{DMT} на вертикальной оси – это соотношение

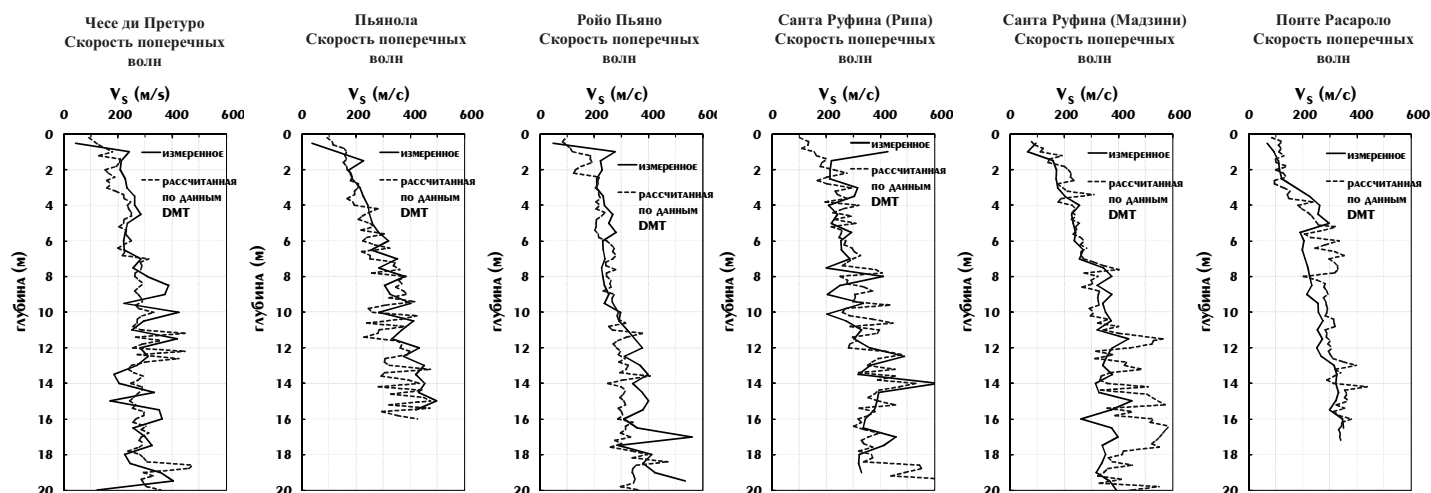


Рис. 6. Сопоставление скоростных разрезов V_s , полученных при испытаниях SDMT и рассчитанных по данным испытаний DMT с использованием корреляционных соотношений, представленных на *рис. 5*, для шести площадок в районе Л'Акуилы (Италия) [16]

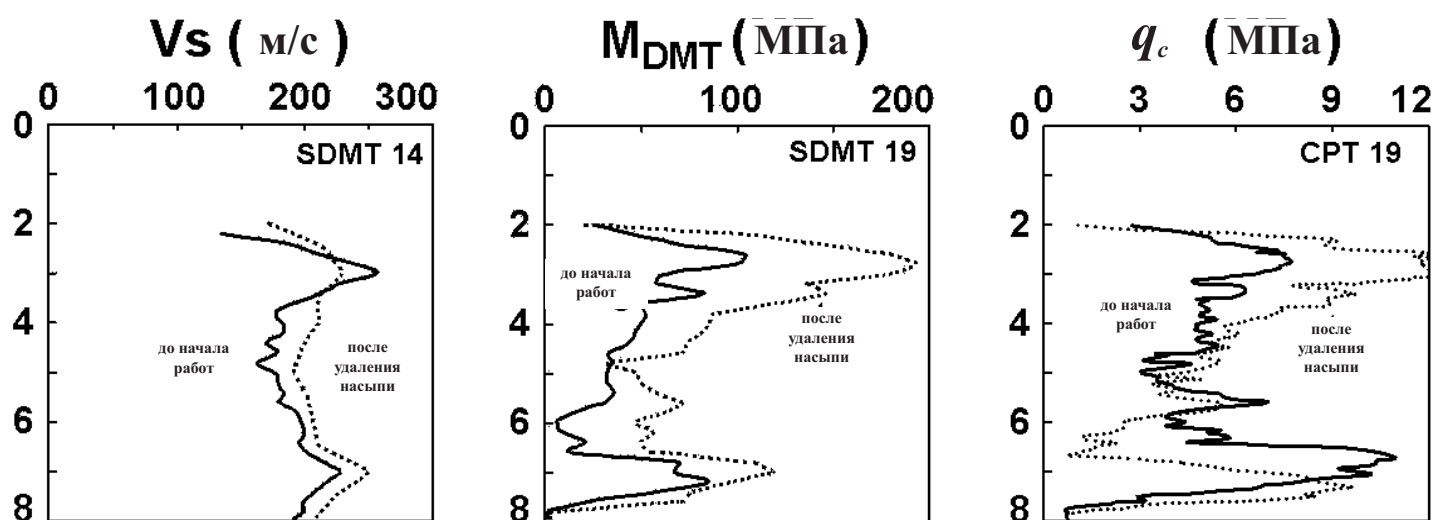


Рис. 7. Разрезы V_s , M_{DMT} и q_c для площадки с приблизительно нормально уплотненным грунтом в Тре-порти-Венеции до начала строительных работ и после удаления цилиндрической насыпи диаметром 40 м, оказывавшей давление 100 кПа [10]

между модулем сдвига при малых деформациях и модулем деформации при эксплуатационных нагрузках. Можно увидеть, что это отношение изменяется в довольно широком диапазоне – скажем, от 0,5 до 25. Рисунок 5 опровергает предлагаемую иногда возможность оценки модуля деформации при эксплуатационных нагрузках путем деления G_0 на некую константу.

Эмпирические формулы, приведенные на рисунке 5, достаточно стабильны. Они были получены по результатам испытаний SDMT на 34 разных площадках по всему миру, сложенных разными типами грунта [15]. Экспериментальные точки, показанные на рисунке 5, не требуют специального исследования. Они получаются такими при каждом испытании SDMT, потому что этот метод всегда дает величины и K_D , I_D , M_{DMT} , и G_0 для каждой глубины тестирования в рутинном порядке.

Сопоставление скоростных разрезов, представленное на рисунке 6, указывает на явное соответствие между значениями V_s , определенными методом SDMT (сплошные линии на рис. 6) и рассчитанными через K_D , I_D , M_{DMT} (пунктирные линии на рис. 6). Относительная погрешность $[(V_{s, \text{измеренная}} - V_{s, \text{расчитанная}}) / V_{s, \text{измеренная}}] \times 100\%$ в среднем составляет около 20%.

Рисунок 5 подчеркивает преобладающее влияние величины K_D (которая отражает историю нагружения) на отношение G_0 / M_{DMT} . Если нет возможности получить K_D , то все экспериментальные точки соберутся на вертикальной оси. С другой стороны, вполне вероятно слабая прямая корреляция между M_{DMT} и G_0 при отсутствии K_D . M_{DMT} и G_0

по своей сути разные параметры, поскольку при небольших напряжениях тенденция к расширению или сжатию грунта еще не является активной. Эта тенденция существенно влияет на компрессионный модуль деформации M_{DMT} , но не влияет на G_0 . Модули M увеличиваются в процессе истории нагружения весьма существенно, а V_s (или G_0) – в значительно меньшей степени (например, рис. 7). В итоге корреляционные соотношения для расчета V_s , которые не включают K_D или историю нагружения, скорее всего, будут очень неточными.

ГРУНТЫ, КОТОРЫЕ МОЖНО ИСПЫТЫВАТЬ ДИЛАТОМЕТРОМ МАРКЕТТИ

Дилатометром Маркетти могут исследоваться дисперсные грунты от самых слабых до твердых, а также мягкие скальные породы. Результаты измерений DMT являются точными даже в почти жидких грунтах. С другой стороны, лопатка дилатометра очень прочная и может проникать даже в мягкую скальную породу. Глинистые породы могут испытываться при их недренированной прочности на сдвиг c_u от 2–4 до 1000 кПа (мергели). Диапазон измеряемых компрессионных модулей деформации M – от 0,4 до 400 МПа.

Вдавливание лопатки дилатометра может производиться при помощи различных зондировочных или буровых установок. Установки для статического зондирования, смонтированные на грузовых автомобилях, обеспечивают самую быструю работу. Бу-

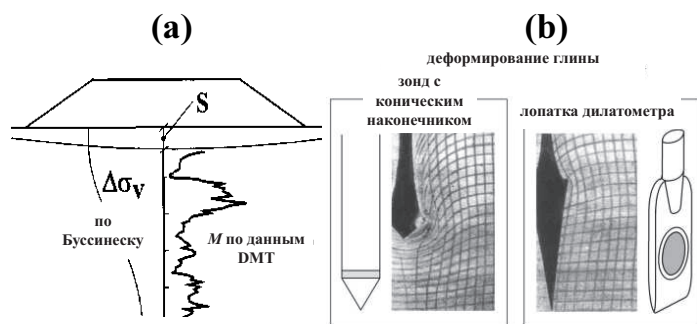


Рис. 8. а – Прогноз осадок S по данным испытаний DMT; б – схемы деформирования грунта при внедрении зондов с наконечниками разной формы [2]

ровая установка, например конфигурации Torpedo [20], также пригодна для использования, хотя и с меньшей производительностью. Вбивание под действием ударов, например с использованием молота для стандартных пенетрационных испытаний (SPT), также возможно, хотя и не рекомендуется.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИЛАТОМЕТРА МАРЧЕТТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Расчет по параметрам

В большинстве случаев параметры, полученные по результатам испытаний DMT, в частности недренированная прочность на сдвиг c_u и компрессионный модуль деформации M , используются при обычных инженерно-геологических расчетах для оценки несущей способности, осадок и т.д. Однако для решения ряда задач могут быть полезны особые рекомендации.

Осадки фундаментов неглубокого заложения

Прогнозирование осадок фундаментов неглубокого заложения, возможно, является основной задачей тестирования методом DMT, особенно для песков, для которых невозможно взять образцы с ненарушенной структурой. Осадки обычно рассчитываются с помощью линейной зависимости (рис. 8, а):

$$S_{1-DMT} = \sum \frac{\Delta \sigma_v}{M_{DMT}} \Delta z, \quad (1)$$

где $\Delta \sigma_v$ рассчитывается по Буссинеску (Boussinesq), а компрессионный модуль деформации M_{DMT} оценивается по результатам испытаний DMT. Пригодность этого метода подтверждена большим числом соответствий между измеренными и рассчитанными по данным DMT осадками. На рисунке 8, б сопоставлены схемы деформирования грунта при внедрении зондов с наконечниками разной формы.

Сваи с боковой нагрузкой

Были разработаны методы для получения кривых « P – y » по результатам DMT [12, 18]. Ряд независимых проверок на достоверность (в компаниях NGI, Georgia Tech, при испытаниях в осадочных отложениях Вирджинии) показал, что два метода обеспечивают сходные оценки и что эти оценки достаточно хорошо соответствуют наблюдаемому поведению грунта (измеренным характеристикам). Следует обратить внимание, что эти методы предназначены для случая первоначального равномерного (монотонного) нагружения.

Определение поверхностей скольжения в переуплотненной глине

Определять активные или старые поверхности скольжения в переуплотненных глинах, слагающих склоны, на основе изучения профилей K_D позволяет метод « $K_D \approx 2$ » [20]. По сути, он заключается в определении зон нормально уплотненной (НУ) глины на склоне, имеющем «переуплотненный» (ПУ) профиль. Нормально уплотненные прослои глины, изменившие форму при скольжении и затем повторно уплотненные под весом вышележащего грунта, распознаются путем использования критерия $K_D \approx 2$ в качестве идентификатора НУ зон. Следует обратить внимание, что этот метод включает скорее поиск конкретного числового значения ($K_D = 2$), а не слабых зон, которые могли бы быть так же легко выявлены и при других полевых испытаниях. Метод « $K_D \approx 2$ » позволяет обнаружить даже неактивные поверхности, которые могут снова активизироваться, например, при выемке грунта.

Мониторинг увеличения уплотнения/напряжения

Испытания DMT часто используются для мониторинга результатов искусственного закрепления грунта. Уплотнение обычно дает быстрое увеличение как K_D , так и M_{DMT} . Результаты, полученные разными авторами (например, [19]) показывают, что процентное увеличение M_{DMT} приблизительно в два раза превышает увеличение q_c . Другими словами, уплотнение увеличивает q_c , и M_{DMT} , но M_{DMT} увеличивается с большей скоростью. Таким образом, оказывается, что испытания DMT хорошо подходят для определения качества технической мелиорации грунтов.

Можно также отметить следующее. Поскольку уплотнение часто нацелено на уменьшение осадок, представляется более правильным получать технические характеристики с использованием компрес-

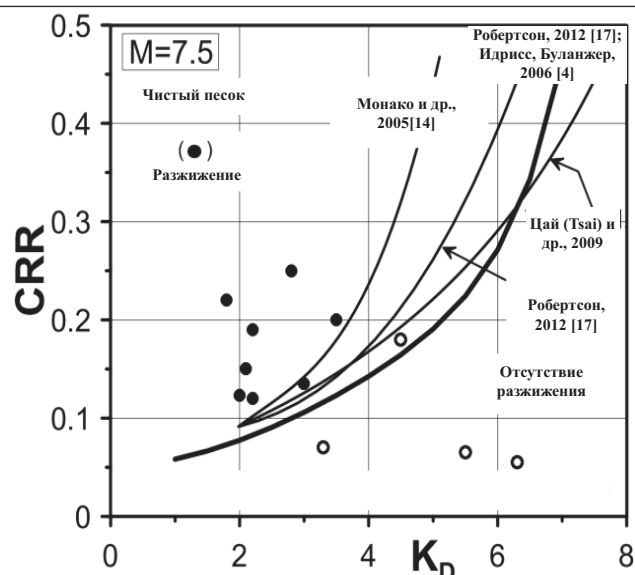


Рис. 9. Корреляционные зависимости « K_D –CRR», полученные в последние годы для чистого песка

сионного модуля деформации M , а не относительной плотности D_r , которая не является точно измеряемым параметром.

DMT подходит для обнаружения небольших изменений горизонтального напряжения – например, в ненагруженном грунте за подпорной «стенкой в грунте» во время котлованных работ.

Контроль качества уплотнения основания дорожной одежды

Дилатометр Маркетти использовался в качестве эффективного инструмента для проверки качества уплотнения естественной поверхности грунта в качестве основания дорожной одежды [8], иногда с подтверждением достоверности результатов другими методами.

Оценка циклического сопротивления разжижению CRR^1 по параметру K_D , полученному по данным испытаний DMT

В последние десятилетия были получены разнообразные корреляционные зависимости «CRR– K_D ». Похоже, что они сходятся в направлении узкой центральной полосы. Большой интерес к корреляции «CRR– K_D » объясняется тем, что история нагружения значительно увеличивает CRR и K_D , но при этом совсем мало увеличивает q_{cp} (см. рис. 4). Следовательно, возможно, что корреляция « K_D –CRR» будет лучше, чем « q_{cp} –CRR». Подборка корреляционных зависимостей, полученных в последнее время, представлена на рисунке 9. На сегодня (конец 2014 года)

рекомендуется использовать корреляционную зависимость «CRR– K_D », полученную при комбинации двух уравнений:

$$CRR = \exp[(q_{cp}/540) + (q_{cp}/67)^2 - (q_{cp}/80)^3 + (q_{cp}/114)^4 - 3] \quad (2a)$$

$$\text{при } q_{cp} = 25K_D \quad (2б)$$

Уравнение (2a) – это корреляционная зависимость, полученная Идрисом (Idriss) и Буланжером (Boulanger) [4] для оценки связи CRR и q_{cp} .

Уравнение (2б) представляет собой корреляционную зависимость, полученную Робертсоном в 2012 г. [17] для оценки связи q_{cp} и K_D . Кривая, полученная при комбинации уравнений 2a и 2б, представлена на рисунке 9 (Робертсон, 2012 [17]; Идрис, Буланжер, 2006 [4]).

Если доступны данные и DMT, и CPT, то можно получить две независимые оценки CRR: одну – по результатам испытаний CPT с использованием уравнения (2a), другую – по данным DMT с помощью комбинации уравнений (2a) и (2б) (возможна также третья независимая оценка CRR, если также была измерена скорость поперечных волн V_s при испытаниях SDMT или SCPT). Однако две упомянутые выше оценки CRR получают через взаимно однозначные корреляционные зависимости: одна дает CRR только по данным DMT, другая – только по результатам CPT. Недавнее исследование вместо оценок CRR по двум отдельным взаимно однозначным корреляциям позволило получить корреляционную зависимость, дающую только одну оценку CRR на основе связи и с q_{cp} , и с K_D одновременно в следующей форме: $CRR = f(q_{cp}, K_D)$. На качественном уровне это показано на рисунке 10.

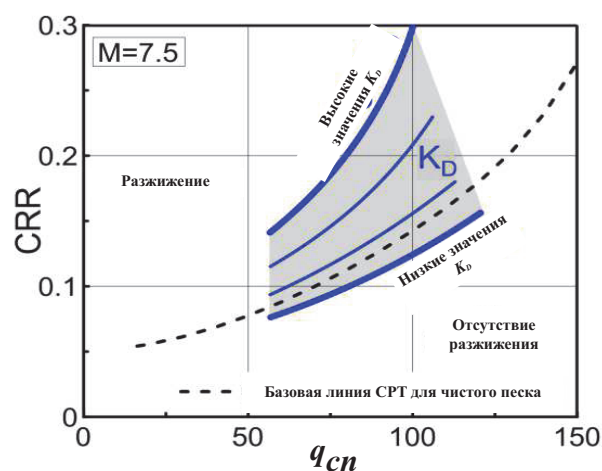


Рис. 10. Корреляционные зависимости для оценки CRR на основе связи этого коэффициента одновременно и с q_{cp} , и с K_D (показанные на качественном уровне)

¹CRR – cyclic resistance ratio – предельное сдвигающее напряжение при циклической динамической



Рис. 11. Дилатометр для выполнения испытаний DMT или SDMT с дна моря

Морской донный дилатометр

Донный дилатометр (рис. 11) был разработан для проведения испытаний DMT с дна моря. Он состоит из легко транспортируемой верхней части массой 60–80 кг для вдавливания зонда и нижней тяжелой части, которую легко собрать на месте и можно загрузить балластом от 3 до 7 т. Эти две секции могут быть быстро соединены с использованием четырех болтов. Донный дилатометр может работать на глубине (воды) 100 м. Максимальная глубина испытания (проникновения ниже поверхности дна при максимальной нагрузке 7 т) зависит от консистенции грунта. Перед опусканием установки сверху заранее вертикально устанавливают шесть или семь штанг для вдавливания. Можно добавить и дополнительные штанги, удерживая их колонну в вертикальном положении с помощью буя или рамы на сваях платформой, прикрепленной к верхней части балласта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

DMT и SDMT – это относительно молодые методы полевых испытаний грунтов. Они дают данные для расчета множества проектных параметров, их быстро и просто использовать, а результаты измерений получаются воспроизводимыми и не зависят от оператора. Чаще всего DMT применяется для прогноза осадок. Другие варианты использования плоского и сейсмического дилатометров Марчетти были кратко рассмотрены в данной статье. Метод DMT включен в стандарты Американского общества по материалам и их испытаниям (ASTM) [1] и в Еврокоды [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ³

1. ASTM D6635-01. Standard test method for performing the flat plate dilatometer / Book of Standards. ASTM, 2007. 14 p.

2. Baligh M.M., Scott R.F. Quasi static deep penetration in clays // Journal of Geotechnical Engineering (GE). ASCE, 1975. V. 101. № GT11. P. 1119–1133.
3. EN 1997-2:2007. Eurocode 7. Geotechnical design. Part 2. Ground investigation and testing. 2007.
4. Idriss I.M., Boulanger R.W. Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2006. V. 26. P. 115–130.
5. Jamiolkowski M., Lo Presti D.C.F. DMT research in sand. What can be learned from calibration chamber tests: oral presentation / Proceedings of the 1-t International Conference on Site Characterization (ISC'98). Atlanta, 1998.
6. Jendebly L. Deep compaction by vibrowing / Proceedings of the Nordic Geotechnical Meeting (NGM-92). 1992. V. 1. P. 19–24.
7. Lee M., Choi S., Kim M., Lee W. Effect of stress history on CPT and DMT results in sand // Engineering Geology. Elsevier, 2011. V. 117. P. 259–265.
8. Marchetti S. An example of use of DMT as an help for evaluating compaction of subgrade and underlying embankment: internal technical note, draft. 1994. 4 p.
9. Marchetti S. In situ tests by flat dilatometer // Journal of the Geotechnical Engineering Division (GED). ASCE, 1980. V. 106. № GT3. P. 299–321.
10. Marchetti S. Sensitivity of CPT and DMT to stress history and aging in sands for liquefaction assessment / Proceedings of the «CPT-2010» International Symposium. Huntington Beach, California, 2010.
11. Marchetti S., Monaco P., Totani G., Marchetti D. In situ tests by seismic dilatometer (SDMT) / Proceedings of the Congress «From Research to Practice in Geotechnical Engineering». Special Publication № 180

² SCPT – Seismic Cone Penetration Testing – модификация статического зондирования с измерением скоростей волн сдвига (сейсмостатическое зондирование). – Ред.

³ Многие из этих источников можно найти на сайте <http://www.marchetti-dmt.it/>.

- (honoring J.H. Schmertmann). ASCE, 2008. P. 292–311.
12. *Marchetti S., Totani G., Calabrese M., Monaco P.* P-y curves from DMT data for piles driven in clay / Proceedings of the 4-th International Conference on Piling and Deep Foundations (DFI). Stresa, 1991. V. 1. P. 263–272.
13. *Monaco P., Marchetti S.* Evaluating liquefaction potential by seismic dilatometer (SDMT) accounting for aging/stress history / Proceedings of the 4-th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (ICEGE). Thessaloniki, 2007. 12 p.
14. *Monaco P., Marchetti S., Totani G., Calabrese M.* Sand liquefiability assessment by flat dilatometer test (DMT) / Proceedings of the 16-th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE). Osaka, 2005. V. 4. P. 2693–2697.
15. *Monaco P., Marchetti S., Totani G., Marchetti D.* Interrelationship between small strain modulus G_0 and operative modulus / Proceedings of the International Symposium «IS-Tokyo 2009» on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering. 2009. 8 p.
16. *Monaco P., Totani G., Amoroso S., Totani F., Marchetti D.* Site characterization by seismic dilatometer (SDMT) in the city of L'Aquila // Rivista Italiana di Geotecnica. 2013. V. 47. № 3. P. 8–22.
17. *Robertson P.K.* Mitchell lecture. Interpretation of in-situ tests – some insight / Proceedings of the 4-th International Conference on Site Characterization (ISC-4). Porto de Galinhas, Brazil, 2012. V. 1. P. 3–24.
18. *Robertson P.K., Davies M.P., Campanella R.G.* Design of laterally loaded driven piles using the flat dilatometer // Geotechnical Testing Journal. 1987. V. 12. № 1. P. 30–38.
19. *Schmertmann J.H., Baker W., Gupta R., Kessler K.* CPT/DMT quality control of ground modification at a power plant / Proceedings of the ASCE Special Conference on use of in situ tests in geotechnical engineering (In Situ '86). ASCE Geotechnical Special Publication. Virginia Tech, Blacksburg, 1986. № 6. P. 985–1001.
20. TC16. The flat dilatometer test (DMT) in soil investigations: a report by the ISSMGE Committee TC16, May 2001, 41 p. / Proceedings of the 2-d International Conference on the Flat Dilatometer. Washington D.C., 2006. P. 7–48.