

Глава 10. ИСПЫТАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Введение

Испытания проводятся с использованием двух или более взаимно расположенных относительно образца пьезокерамических элементов для генерирования или регистрации поперечной волны сдвига при очень низком уровне деформации сдвига ($\gamma < 10^{-5}$). В зарубежной практике данный вид испытаний классифицирован как «Bender element test», что можно перевести как «Испытания изгибным элементом», так как испытания включают высокочастотные колебания (изгиб) одного из пьезокерамических элементов, который является активным, и второго (пассивного), выполняющего роль приемника генерируемой упругой волны и также изгибаемого при ее прохождении. Далее в тексте будем сокращенно называть их «ВЕ».

Степень возмущения связана с колебательными движениями частиц исследуемого материала и достаточно мала, чтобы вызвать остаточные деформации. Поэтому предполагают, что материал ведет себя упруго, но уровень вибрации достаточно большой, чтобы его почувствовал пассивный датчик. В этом случае, измерив время прихода сигнала t и зная длину его пути L , легко найти скорость поперечной волны V_s и упругий модуль сдвига G_0 :

$$V_s = \frac{L}{t}; \quad (10.1)$$

$$G_0 = \rho V_s^2. \quad (10.2)$$

Как было отмечено в главе 7, в монографии С.Р. Месчан (2008) говорится о том, что «Для определения характеристик упругих свойств глинистых грунтов Р.З. Ляндрес (1950, 1959), помимо статического метода, воспользовался также динамическим методом – методом замера частоты собственных продольных колебаний призматических образцов (размерами 30×30×120 мм) на электродинамической установке. Колебания образцов, создаваемые электромагнитным ударником, передавались на пьезоэлемент и с него, через усилитель, на экран осциллографа». По всей видимости Ляндрес Р.З. был первым, кто предложил использовать ультразвук для исследования динамических свойств грунтов. За рубежом приводят ссылки на работы Lawrence (1963, 1965) и Shirley & Anderson (1975); Shirley & Hampton (1978); Shirley (1978), где были использованы пьезоэлементы для исследования грунтов путем из-

мерения скорости поперечных волн. Dyvik & Madshus (1985) использовали ВЕ для испытаний водонасыщенных грунтов. Они ввели применение эпоксидного покрытия пьезоэлементов для изоляции от проводимости грунта, что может отражаться на полученном сигнале.

Необходимым условием для разработки надежных методов измерения скорости поперечной волны стало существенное улучшение качества принимаемого сигнала (Jovičić et al., 1996). Это было достигнуто путем тщательного экранирования кабелей, соединяющих пьезоэлементы и усилители, чтобы избежать внешних помех, так что сигналы не требовалось усиливать, фильтровать или усреднять данные. Pennington et al. (2001) обнаружили, что могут быть получены наиболее стабильные сигналы, если приемник находится в электрическом соединении с образцом грунта, а контур заземления исключен для передатчика, чтобы предотвратить индукционные петли через образец до приемника. Jovičić et al. (1996) показали, что для обнаружения сигнала синусоидальный волновой импульс предпочтительнее квадратной волны. Однако квадратные волны оказались слишком сложными для анализа из-за широкого спектра присутствующих частот, которые могут привести к эффектам ближнего поля.

Обычно пьезоэлементы устанавливаются в приборы для испытаний грунтов, способные обеспечивать контроль и измерение напряжений и/или деформаций в образце грунта. В работе Ferreira (2008) обобщены типы испытаний с использованием пьезоэлементов в лабораторных исследовательских установках, таких как: одометры (Dyvik & Olsen, 1985; Zeng & Ni, 1999), приборы одноплоскостного среза (Dyvik & Olsen, 1985), приборы трехосного сжатия (Bates, 1989; Brignoli et al., 1996; Jovičić & Coop, 1998), циклические трехосные приборы (Wichtmann & Triantafyllidis, 2004; Sahaphol & Miura, 2005; Karg & Haegeman, 2005), камеры с реализацией различных траекторий напряжений (Kuwano & Jardine, 1998; Kuwano et al., 1999; Thomann & Hryciw, 1990), резонансная колонка, центрифуги (Ismail & Hourani, 2003; Fu, 2004), полые цилиндрические образцы (Chaudhary et al., 2004), калибровочные камеры (Bellotti et al., 1996; Brignoli et al., 1997), приборы истинного трехосного сжатия (Ismail et al., 2005; Wang et al., 2006).

Аналогичным образом можно систематизировать многочисленные приложения, а именно для: оценки упругих модулей деформации, оценки качества отбора монолитов грунта (Hight, 2000; Viana da Fonseca & Ferreira, 2002), идентификации разрушения структуры, эффекта микроструктуры (Diaz-Rodriguez et al., 2001), исследования анизотропии (Bellotti et al., 1996; Pennington et al., 1997; Jovičić & Coop, 1998; Fioravante & Capoferri, 2001; Kuwano & Jardine, 2002).

Несмотря на все большее применение в исследованиях динамических свойств грунтов изгибных элементов, до сих пор еще нет стандарта, в ос-

новном из-за изменчивости их результатов, по сравнению со стандартными испытаниями методом резонансной колонки ГОСТ 5653, ASTM D4015 (Camacho-Tauta et al., 2015).

Детальное описание ВЕ и их применение в измерении модуля сдвига можно найти в работах Dyvik & Madshus, 1985; Sukolrat, 2007; Mohamad, 2008; Camacho-Tauta, 2011.

10.1. Принцип работы измерительной системы

Изгибные элементы изготавливаются из пьезокерамики и монтируются в верхней и нижней частях образца и могут генерировать и измерять поперечные волны (рис. 10.1). Эти элементы способны преобразовывать электрические импульсы в механические импульсы и обратным образом, и отличаются от обычных пьезоэлементов тем, что они состоят из двух тонких пьезокерамических пластин, поляризованных поперек сечения и соединенных совместно. Ориентация поляризации может быть в одном и том же или в противоположном направлениях. Пара из двух соединенных элементов с ориентацией поляризации в одном направлении и подключенные к источнику напряжения таким образом, чтобы создавать и измерять напряжение для каждого слоя индивидуально, называются параллельными ВЕ. Эта конфигурация требует трех проводов, как показано на рис. 10.2а: один провод подключен к каждому внешнему контакту, а второй провод подключен к центральной клемме. Данный тип подключения более адекватен, если ВЕ работает как источник сигнала (передатчик). Источник определен как датчик, который трансформирует электрическую энергию в механическую энергию.

Для работы пары, состоящей из двух элементов с поляризацией, ориентированной в противоположном направлении, требуется два провода; работа ВЕ выполняется последовательно. Напряжение представляет собой сумму отдельных напряжений на каждом элементе (рис. 10.2б). Эта конфигурация подходит для целей генерации, преобразования механической энергии в электрическую, т. е. будет идеально работать как приемник волн вибрации.

Пара ВЕ (т. е. один является передатчиком, а другой – приемником) используется для измерения поперечной волны (S-волна). ВЕ действуют как генераторы колебаний, они изгибаются при изменении напряжения и генерируют напряжение, когда изгибаются. ВЕ монтируются в штампы, так чтобы они выступали из них как консольные балки для обеспечения надежной связи с образцом и возбуждения упругих волн (рис. 10.1). В течение возбуждения ВЕ генерируются два типа механических волн: сжатия Р и сдвига S (Santamarina et al., 2001).

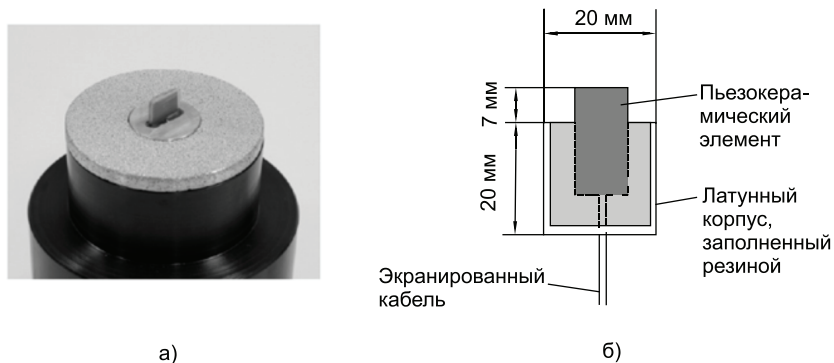


Рис. 10.1. Изгибный элемент в штампе прибора трехосного сжатия:
а – внешний вид штампа с ВЕ; б – конструкция

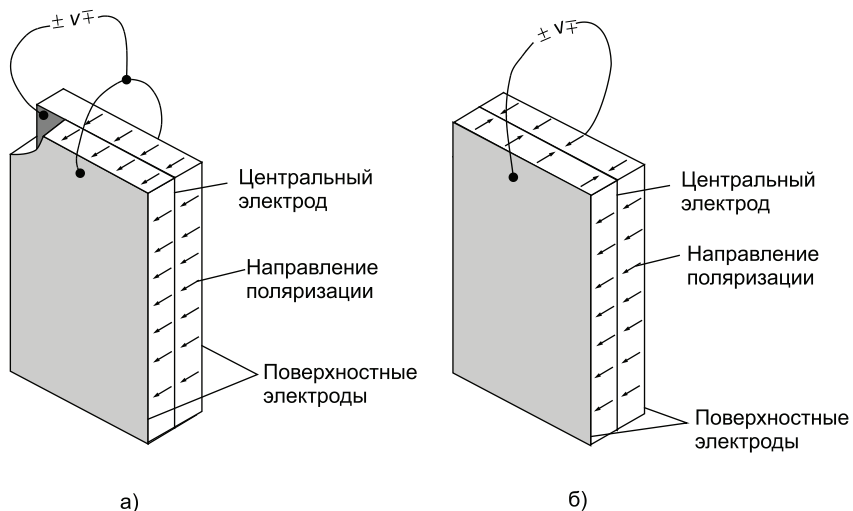


Рис. 10.2. Пьезокерамические ВЕ:
а – параллельное соединение; б – серийное соединение (Dyvik & Madshus, 1985)

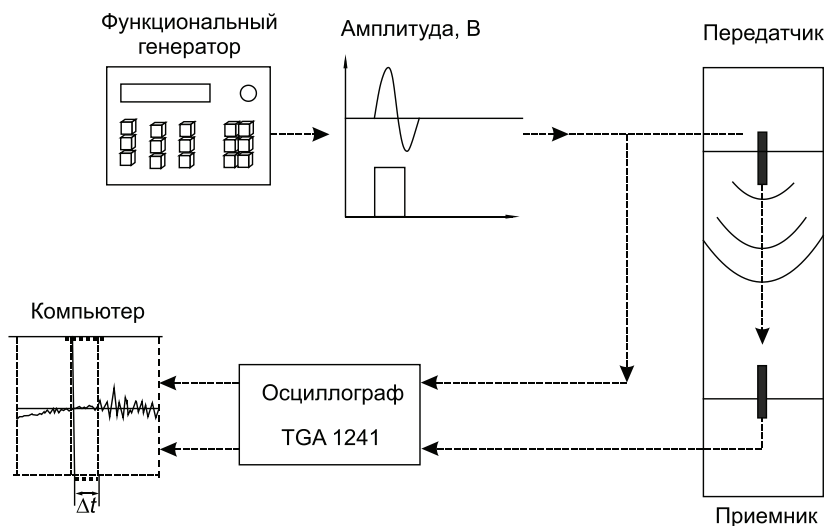


Рис. 10.3. Схема измерительной системы

ВЕ может быть сделан в соответствии с требованиями прибора для испытаний образцов грунта (Sawangsurinya et al., 2008b) и включен в состав измерительной системы (рис. 10.3). Рис. 10.4 иллюстрирует пример подключения серийного пьезоэлектрического керамического изгибного элемента с размерами 6,4 мм, 11,0 мм и толщиной 0,6 мм. Тонкие коаксиальные кабели припаиваются к проводящей поверхности элементов и открытая часть электрического провода полностью покрывается разбавленным полиуретаном для обеспечения электрической изоляции. Обычно после изоляции полиуретаном ВЕ могут быть покрыты проводящей серебряной краской, которая создает электрический экран. Экран должен быть заземлен, чтобы минимизировать электрический шум и исключения электрических перекрестных помех между источником и приемником. На рис. 10.4 показана также сделанная пользователем алюминиевая система зажимного крепления, которая может быть использована для создания жесткой консольной системы для установки ВЕ в штампы. Используя эту систему закрепления, одна треть длины ВЕ (~ 4 мм) закрепляется в штампе и жестко зажимается винтами. Система крепления анкерного элемента может быть непосредственно смонтирована на противоположных концах образца, так что

S-волна, распространяющаяся в продольном направлении, была отправлена и получена (Sawangsurinya, 2012).

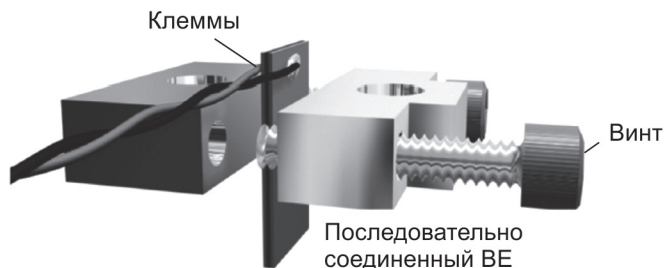


Рис. 10.4. Установка пьезокерамического элемента (Sawangsurinya, 2012)

Передающий изгибный элемент создает S-волну, которая распространяется через среду, когда он возбуждается приложенным сигналом напряжения. Эта S-волна падает на приемный пьезоэлемент, который изгибается, что, в свою очередь, вызывает очень малый сигнал напряжения. Рис. 10.5, 10.6 иллюстрируют типичные электрические входные и выходные сигналы от передающего и принимающего пьезоэлементов. На рис. 10.5 показана смоделированная выходная функция, созданная передающим ВЕ и отклик элемента-приемника. Истинный входной сигнал несколько отличается от сигнала, создаваемого генератором сигналов. Это из-за того, что отклик ВЕ-источника контролируется упругим свойством биморфа, длиной консоли, свойства закрепления (т.е. фиксированность) и упругими свойствами окружающей среды (Lee & Santamarina, 2005). Кроме того, отклик элемента приемника регулируется не только жесткостью, затуханием и дисперсионными свойствами среды, но также расстоянием между источником и приемником, длины волны, расстоянием до других границ и генерации отраженных волн (Sawangsurinya et al., 2006, Arroyo et al., 2006).

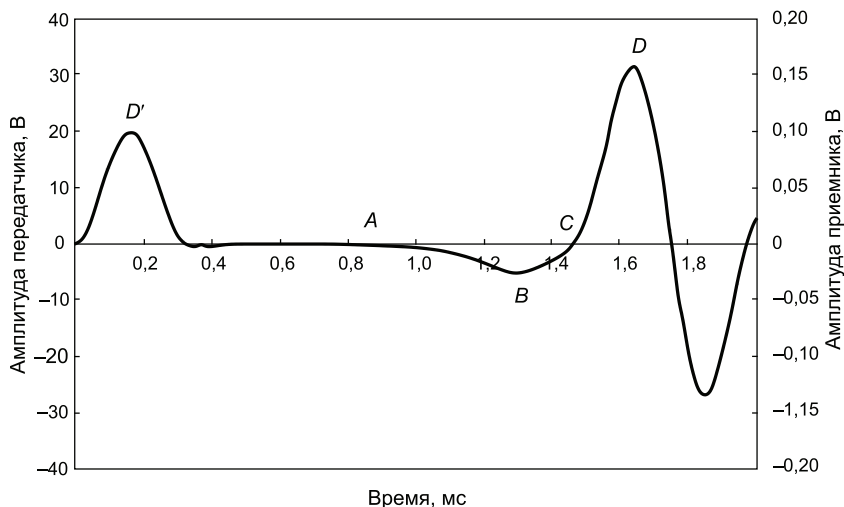


Рис. 10.5. Типичные входные и выходные сигналы от передающего и принимающего изгибных элементов (Sukolrat, 2007)

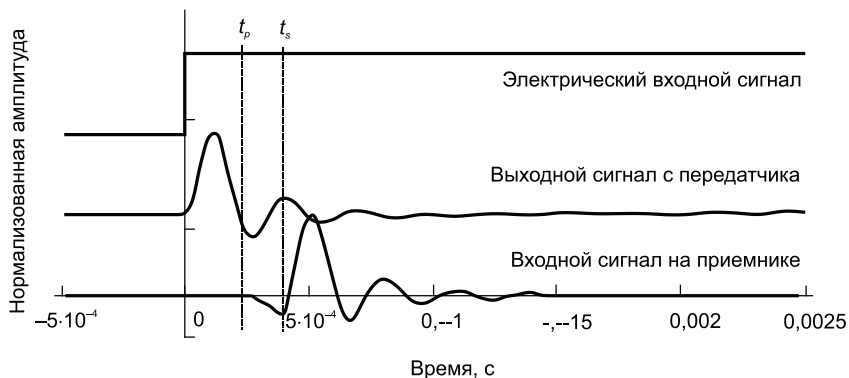


Рис. 10.6. Смоделированная входная электрическая ступенчатая функция, сигнал, сгенерированный источником ВЕ, и выходной сигнал от источника и приемника (Sawangsuriya et al., 2006)

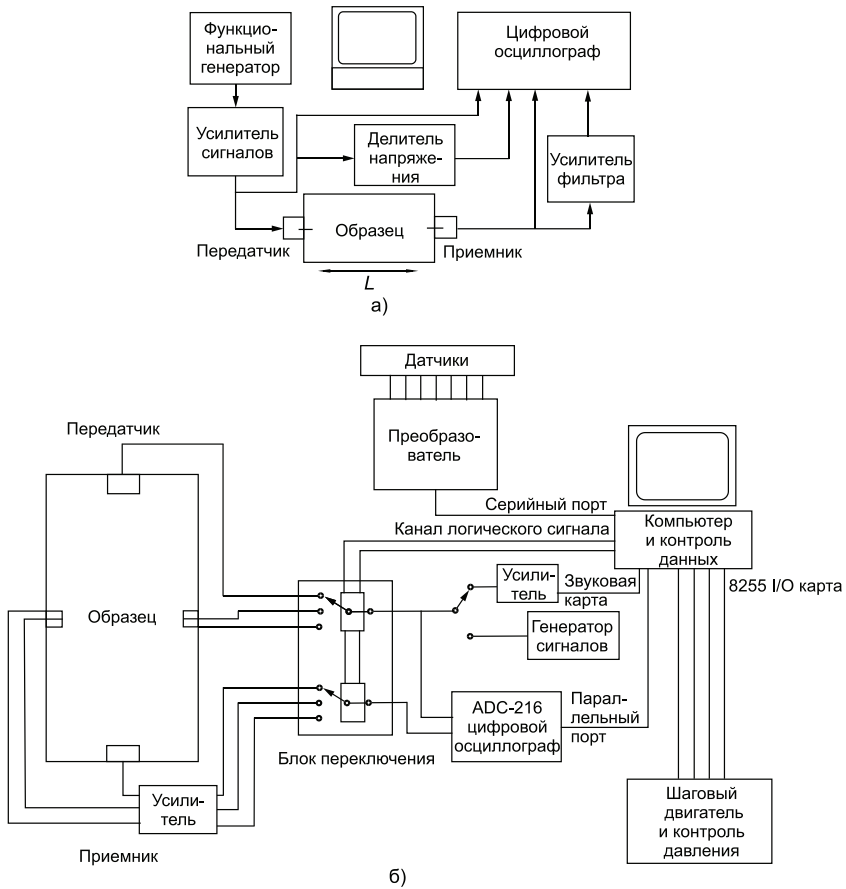


Рис. 10.7. Схема пьезоэлектрической измерительной системы:
 а – ручная система с одним направлением распространения волны; б – автоматическая многоканальная система для трехосных испытаний (Sukolrat, 2007)

После того как эти граничные и масштабные эффекты определены и их влияние рассмотрено, время движения между элементом источника и приемника может быть определено. Записанный электрический сигнал используется для измерения времени прохождения S-волны, вычисления скорости S-волны и определения упругого модуля сдвига (если известна плотность),

используя выражения (10.1), (10.2). Время прохождения волны находится путем измерения промежутка между моментом, когда волна начинает распространяться в образце до ее поступления в приемник ВЕ. Обычно процедура повторяется для разных частот, что помогает определить первое время прибытия.

Первоначально исследователи использовали ступенчатый сигнал (прямоугольная волна с очень низкой частотой), чтобы возбуждать передатчик ВЕ не только потому, что время начала может быть легко определено, но также потому, что внезапное изменение вызывает значительное возмущение. Недостатком такого типа возбуждения является то, что ступенчатый сигнал генерирует выход, составленный всеми частотами (Bray et al., 2003). За многие годы исследований пришли к выводу, что синусоидальный сигнал лучше, о чем свидетельствуют параллельные международные испытания на измерение G_{\max} с использованием изгибных элементов «Round Robin Test» (Yamashita et al., 2007; Yamashita et al., 2009). Существуют другие формы сигналов, предлагаемые с целью уменьшения неопределенностей, что рассмотрено в работе Samacho-Tauta (2011).

Измерительная система для пьезоэлектрических испытаний включает пару ВЕ, функциональный генератор, усилитель сигналов, делителя напряжений для входных сигналов и цифровой осциллограф. На рис. 10.7 показаны принципиальная схема системы измерительных приборов и системы автоматического управления с мультиплексной системой сбора данных, когда более трех пар изгибных элементов устанавливаются в образец. Генератор сигналов обычно используется для генерации входного сигнала на передающий ВЕ. Следует также отметить, что квадратная волна входного сигнала дает самый ясный ответ независимо от жесткости образца, поскольку он включает все частоты, что выгодно, когда резонансная частота системы изгибный элемент – среда известны (Kawaguchi et al., 2001; Lee & Santamarina, 2005).

10.2. Проверка и калибровка

Как правило, перед испытаниями следует проверить измерительную систему. Теоретически, если передатчик и приемник находятся в прямом контакте, то есть нет образца, расположенного между преобразователями, и передатчик возбуждается с заданной функцией, приемник должен записывать аналогичную форму сигнала. Однако генерируемый сигнал, который эффективно воздействует на подлежащий испытанию грунт, обычно отличается из-за ряда факторов: величина; временная задержка; полярность и форма.

Величина выходного сигнала зависит от различных факторов, в том числе:

– эффективности преобразования пьезоэлектрических усилителей (механическая на электрическую на ВЕ-передатчике и электрическая на механическую в ВЕ-приемнике);

– тип соединения между электродами, а именно последовательный или параллельный;

– качество контакта между ВЕ и цепью усилителя.

Величина выходного сигнала не влияет существенно на процедуру интерпретации. Поэтому единственным условием является наличие достаточного разрешения для дифференциации характерных точек формы волны.

Обычно время движения сигналов в электронном оборудовании, кабелях и соединениях считается нулевым. Этот временной лаг можно рассматривать как константу системы, которая должна быть вычтена из общего значения, полученного во время испытания. Точное определение этой константы является необходимым и важным.

Поскольку выход ВЕ-приемника является электрическим напряжением, его знак зависит от типа подключения приемника ВЕ. Этот эффект называется полярностью: если используется обратное подключение, то положительный сигнал, подаваемый на передатчик ВЕ, вызывает отрицательный сигнал на приемнике ВЕ. Сигнал не искажается, но пользователь должен учитывать это изменение полярности, особенно при использовании методов интерпретации во временной области, где инверсия сигнала может вызывать ошибочную идентификацию времени прибытия.

Форма выходного сигнала зависит от более сложного явления не только от приемника ВЕ, но и от передатчика ВЕ. Согласно лазерным измерениям фактические колебания ВЕ-передатчика отличаются от входного сигнала. Кроме того, качество контакта между образцом и ВЕ вызывает дополнительные искажения. Следовательно, форма функции времени-сила, передаваемая приемнику ВЕ, отличается от исходного сигнала. Специфические характеристики сигнала могут вносить дополнительные изменения в форму. Например, переходная функция, подобная импульсу, более сложна для наблюдения ВЕ из-за эффекта инерции. И наоборот, непрерывный сигнал, подобный синусоидальной функции, может быть более эффективно воспроизведен ВЕ.

10.3. Факторы, влияющие на точность ВЕ-испытаний

Распространение волн в ВЕ-испытании широко изучено как теоретически, так и экспериментально. Надежность этого метода зависит от ряда факторов, таких как эффект ближнего поля (Sanchez-Salinerо et al., 1986; Brignoli

et al., 1996; Arulnathan et al., 1998; Arroyo et al., 2003; Lee & Santamarina, 2005); направленность (Lee & Santamarina, 2005); дальность передачи волны (Brignoli et al., 1996); частота границ (Arulnathan et al., 1998); геометрия и размер образца (Rio et al., 2003; Arroyo et al., 2006); перекрестные помехи (Lee & Santamarina, 2005; Ferreira, 2008).

Отмеченные факторы могут быть сгруппированы в следующие категории: качество изготовления и установки ВЕ; сцепление и выравнивание ВЕ в образце; эффект ближнего поля, геометрические и граничные эффекты.

10.3.1. Эффект ближнего поля

Различить приход S-волн, распространяющихся на достаточно коротком расстоянии, достаточно сложно, так как момент прихода S-волны может быть затенен другими фронтами волн, которые распространяются с более высокими скоростями (например, Р-волна – Sanchez-Salinerо et al., 1986; Lee & Santamarina, 2005; Brignoli & Gotti, 1996; Viggiani & Atkinson, 1995; Jovicic et al., 1996). На рис. 10.8 показан типичный случай проявления эффекта ближнего поля из измерений скорости поперечной волны, который усложняет выбор точки прибытия поперечной волны.

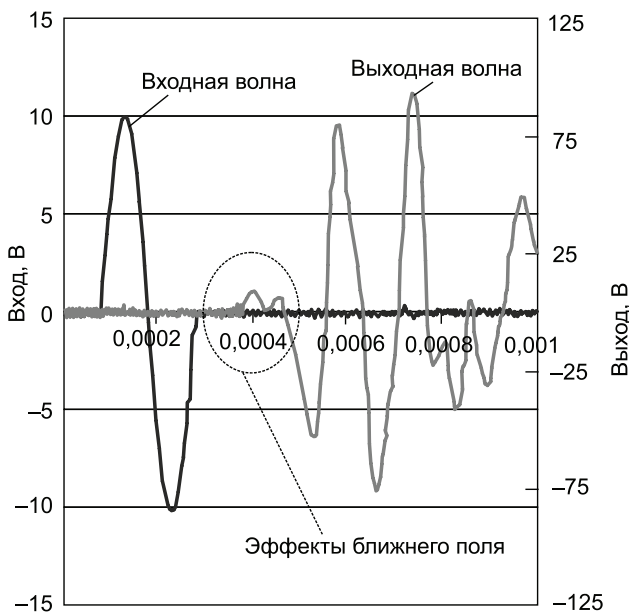
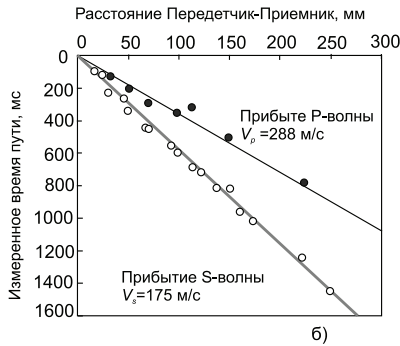
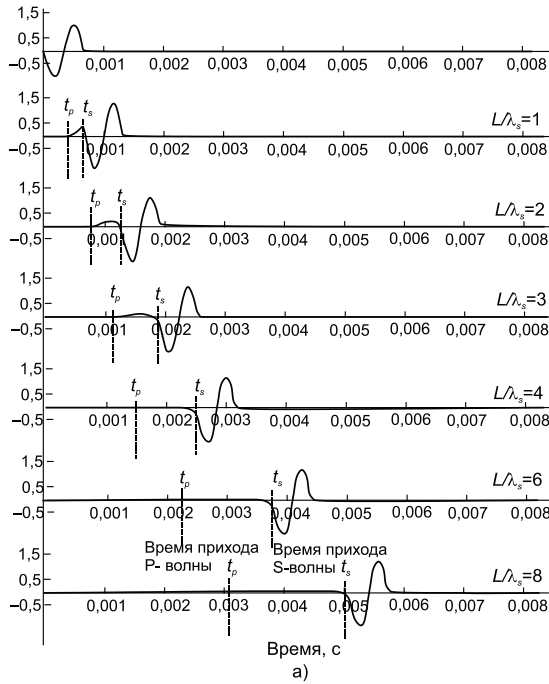


Рис. 10.8. Эффект ближнего поля (Анат, 2007)



Скорость P-волны

$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

Скорость S-волны

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{2(1+\nu)}}$$

Коэффициент Пуассона

$$\nu = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}$$

Рис. 10.9. Эффект ближнего поля:

а – нормализованный отклик приемника (поперечное движение частиц) с ростом расстояния между источником и приемником (параметры модели: $V_p = 288$ м/с, $V_s = 175$ м/с, демпфирование $D = 0,01$ – точное решение Sanchez-Salineso et al. 1986); б – измеренные времена движения P- и S-волн в образцах каолинита (Sawangsurijaya et al., 2006).

Примечание. M – модуль компрессионный, G – модуль сдвига, E – Модуль Юнга, ρ – массовая плотность (Sawangsurijaya, 2012)

Этот эффект становится значительным, особенно на более близких расстояниях между источниками и приемниками. Sanchez-Salinerо et al. (1986) разработали решение в замкнутой форме для продольных и поперечных колебаний в линейно-упругой и однородной среде. На рис. 10.9а показаны время прихода сигнала на различном расстоянии между источником и приемником L , равный 1, 2, 3, 4, 6 и 8 длинам поперечной волны λ_s . Видно, что для больших относительных расстояний между источником и приемником L/λ_s , разделение между P- и S-волнами возрастает, амплитуда поперечного смещения, вызванная P-волной, уменьшается и оценка S-волны улучшается. Для четкого разделения прибытия P- и S-волн, L/λ_s должно быть больше 4. Однако это соотношение также зависит от свойств демпфирования материала. Понимание эффектов ближнего поля может помочь интерпретировать время прибытия как P-, так и S-волн, которые также могут быть использованы для оценки модуля упругости и коэффициента Пуассона. Это следует из исследований по распространению волн, выполненных Sawangsurinya et al. (2006) с использованием длинных цилиндрических образцов каолинита (77,5 мм диаметр), которые были обрезаны до разных высот, и, следовательно, испытания были проведены при различном расстоянии от передатчика до приемника. Так как образцы были идентичны, то вычисление скоростей P- и S-волн ($V_s = L/t$) было выполнено из наклона зависимости «время пути – расстояние от передатчика до приемника» (рис. 10.9б). Вычисленный коэффициент Пуассона равен 0,17. По мере того, как расстояние от передатчика до приемника увеличивается, приход P-волны определить сложнее (рис. 10.9а), по этой причине меньше данных о времени поступления P-волны на больших расстояниях от источника до приемника приведено на рис. 10.9б. Поэтому рекомендуется, чтобы минимальное расстояние между источником и приемником L должно быть как минимум в три раза больше длины волны λ_s (больше для больших коэффициентов демпфирования), чтобы облегчить интерпретацию прихода S-волн.

10.3.2. Эффекты границы – отражение

В 2008 году Ferreira пришла к выводу, что неопределенность и субъективность не могут быть полностью связаны с эффектом ближнего поля. Отражения волн на границах могут быть основным фактором, создающим наблюдаемую сложность в интерпретации сигнала. Расстояния между источником, границами и приемником, а также расположение источника и приемника относительно границ имеют большое значение при регистрации сигнала.

В обычной практике исследований используются цилиндрические образцы в известных методах испытаний, так как для этой цели применяются

цилиндрические пробоотборники, необходимые для отбора образцов ненарушенной структуры. Образцы с восстановленной структурой (насыпи) также являются цилиндрическими из-за формы, используемой для уплотнения, восстановления и экструзии образца. По этой причине типично выражать размер и форму образца в зависимости от его диаметра и высоты или в виде отношения высоты к диаметру. Отсюда, большинство исследований о влиянии геометрии и граничных эффектов на ВЕ-испытания выполнены с цилиндрическими образцами.

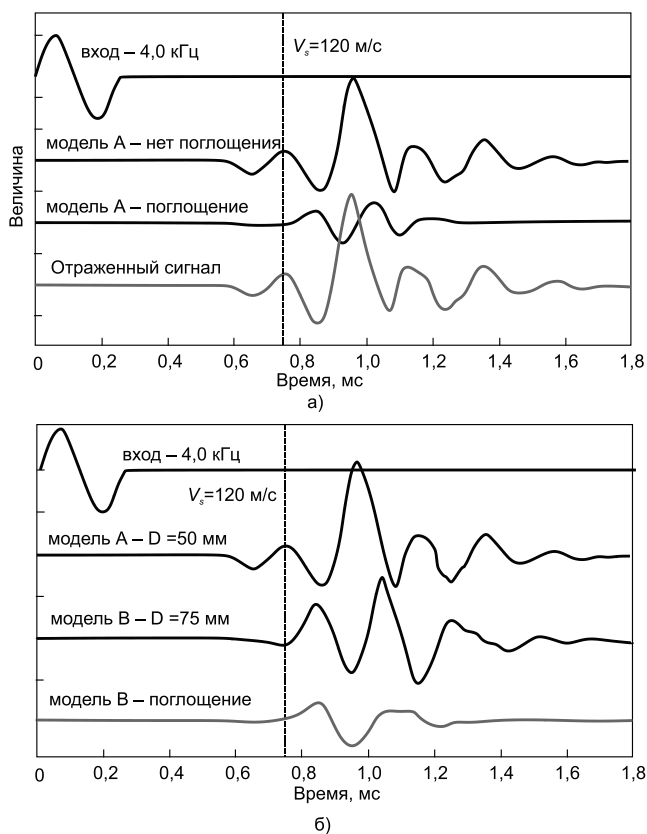


Рис. 10.10. Моделирование полученных сигналов для моделей А (100×50 мм) и В (100×5 мм):

а – модель А: отраженная волна, полученная из разницы между не поглощающими и поглощающими сигналами; б – эффект гибкости, учитывающей не поглощающие границы (Rio, 2006)

Что касается местоположения преобразователей, в большом количестве исследований по этому вопросу используются датчики, расположенные на торцах цилиндрического образца, обычно в центре или вблизи центра площади поперечного сечения. Эта компоновка создает квазиосевое симметричное распределение, где как передатчик, так и приемник размещаются на наибольшем расстоянии до боковых границ. Поддержка электрических соединений для пьезокерамических элементов обеспечивается через нагрузочные штампы. Исследования показывают, что другие места установки, например, на боковой поверхности, могут генерировать дополнительные осложнения в явлении распространения и интерпретации измеренных сигналов (Kuвано et al., 2000; Fioravante & Capoferri, 2001; Pennington et al., 2001; Rampello & Callisto, 2001; Kuвано & Jardine, 2002; Theron et al., 2003; Chaudhary et al., 2004).

Rio (2008), используя программу FLAC3D, исследовал два вида границ, как крайние случаи, которые могут присутствовать при фактических испытаниях, таких как поглощение (оно не отражает волны, контактирующие с ним) и не поглощающие границы (они полностью отражают волны). Из этого исследования вытекают два важных вывода. Отраженные волны, вызванные непоглощающими границами, искажают полученный сигнал и затушевывают приход поперечной волны (рис. 10.10а), а для более крупных образцов наблюдаются большие эффекты на сигнал (рис. 10.10б). Подобное влияние обнаружено также в исследованиях Argoyo et al. (2006), которые выполнили численное моделирование и обнаружили, что геометрия с меньшим диаметром больше зависит от отражений от боковых границ.

10.4. Идентификация времени пути волны

Как видно из рассмотренного, ВЕ-испытания достаточно просты, но интерпретировать время прихода волны довольно сложно. Было проведено много исследований и предложено множество методов оценки времени пути сигнала от передатчика до приемника. Первоначальная классификация таких методов представлена в работе Arulnathan et al. (1998). В 2009 году Viana da Fonseca et al. обновили эту классификацию, включив недавно разработанные методы, в том числе их комбинацию, использующую как интерпретации во временном домене/области, так и в частотной области. До сих пор в качестве стандарта не существует специализированного метода с адекватным уровнем точности и воспроизводимости.

Правильный выбор времени пути более сложный, чем кажется на первый взгляд из рис. 10.5, 10.6. Фактически, когда Shirley (1978) представил свой новый преобразователь поперечных волн, он предложил использовать несколько разных расстояний между преобразователями. Он оценил вре-

мя прохождения между двумя легко узнаваемыми признаками полученных сигналов, потому что искажение принятого импульса не позволяет точно определить начальную точку импульса. В работе Dyvik & Madshus (1985) не приведено подробностей о методе выбора времени в пути, который они приняли; они только указали, что время прибытия соответствует разнице во времени между ростом квадратной волны и первым значительным скачком в принимаемом сигнале.

Как правило, время в пути может быть определено либо во временной области, либо в частотной области, или обоими методами одновременно. В ряде работ рассмотрено сравнение различных методов определения времени пути, включая метод временного и частотного доменов (Chan, 2010; Hasan & Wheeler, 2015; Khan et al., 2017)

Метод временного домена

В методе временного домена время прохождения S-волны контролируется путем записи сигнала во времени. Затем скорость S-волны рассчитывается, если известно расстояние между передающими и принимающими ВЕ ($V_s = L/t$) (Dyvik & Madshus, 1985; Viggiani & Atkinson, 1995). В общем, сигналы могут отличаться от таковых, как показано на рис. 10.5 и 10.6, возможно, из-за жесткости образца, граничных условий, особенностей испытательного устройства, степени закрепления ВЕ в штампе, упругими свойствами биморфа, длиной консоли, и упругими свойствами окружающей среды. Как только эти граничные и масштабные эффекты оценены, и их эффекты учтены, то может быть определено время распространения волны от передатчика к приемнику. Прибытие S-волны соответствует точке С (рис. 10.5), как правило, выбирается для определения времени пути, чтобы избежать эффекта ближнего поля, вызванного прибытием энергии от Р-волны (точка А на рисунке 10.5) (Sanchez-Salinerо et al., 1986; Kawaguchi et al., 2001; Lee & Santamarina 2005).

Оценка времени пути волны сдвига путем идентификации первого явно выраженного сигнала была предложена на основании данных геофизических измерений и использована в исследованиях (Shirley, 1978; Shirley & Hampton, 1978; Dyvik & Madshus, 1985). Для иллюстрации данного способа на рис. 10.11а приведены данные испытаний, выполненные Viggiani & Atkinson (1995), где первая точка прямого прихода обозначена буквой «А» во входном сигнале и точкой «А» в выходном сигнале. Рис. 10.9б показывает отклик, возбужденный квадратным сигналом, который в этом случае является первым прибытием, отмеченный цифрой 0. Тем не менее, решение менее ясно, чем в предыдущем случае. Различные ис-

следователи предполагают использование синусоидального импульса в качестве входной волны (Lohani et al., 1999).

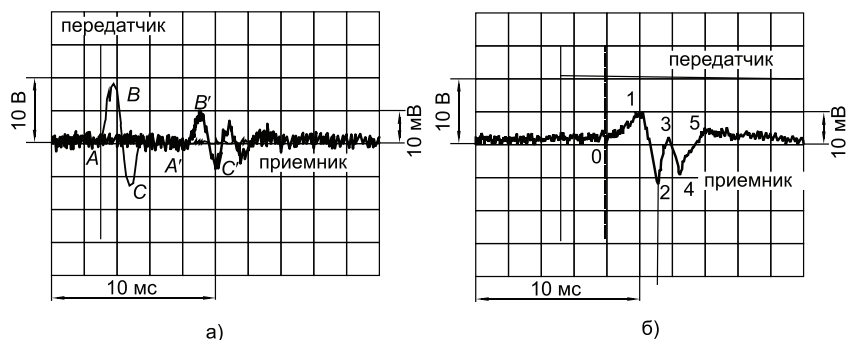


Рис. 10.11. Время пути, оцененное первым прибытием в выходном сигнале: а – отклик в выходе синусоидального возбуждения; б – отклик в выходе пульсирующего квадратного возбуждения (Viggiani & Atkinson, 1995)

Метод оставался неизменным почти десять лет, когда Viggiani & Atkinson (1995) предложили определение времени прохождения сигнала, основанное не на первом прогибе принятого сигнала, а на первой инверсии (точка 1 на рис. 10.11б).

Метод частотного домена

В методе частотного домена передатчик посылает непрерывную синусоидальную волну на одной частоте через образец к приемнику, и измеряется сдвиг фазы φ между двумя волнами. Изменяя частоту, можно найти задержку фазы переданного и полученного сигналов и далее найти частоты.

Разница между двумя частотами Δf позволяет вычислить скорость поперечной волны из выражения:

$$V_s = \frac{\Delta f}{\Delta N} L_u, \quad (10.3)$$

где ΔN – разница между двумя последовательными фазами; L_u – расстояние от передатчика до приемника.

Аналогичные результаты могут быть получены с использованием синуса вместо сплошной волны одной частоты. Greening & Nash (2004) разработали автоматизированную измерительную систему (ABETS) и, используя метод задержки фазы, определили скорость поперечной волны

из ВЕ-испытаний. Принцип АВЕТS заключается в том, чтобы посылать импульс синусоидальной волны с постоянной частотой, генерируемый звуковой картой в компьютере через образец. Сигналы от передатчика и приемника собираются и анализируются встроенным преобразованием Фурье. Выбирая диапазон частот, для которых когерентность близка к единице, что указывает на сигнал высокого качества, и что нет помех в этой передаваемой частоте, можно использовать линейную подгонку к развёрнутым фазовым данным для определения группы времени пути в выбранном частотном диапазоне. Время пути оценивается из наклона развернутой фазы ϕ передаточной функции:

$$t = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{df}. \quad (10.4)$$

В общем случае развернутая фазовая функция не имеет постоянного наклона (скорости волны) даже для областей, где когерентность близка к единице. Как альтернативу, Viana da Fonseca et al. (2009) предложили использовать различные движущиеся частотные окна (different moving frequency windows) для расчета наклона зависимости фазы от частоты, используя линейную регрессию. Время пути окончательно выбирается на основе линейной регрессии с наивысшим коэффициентом корреляции.

10.5. Типичные результаты испытаний

Рассмотрим типичные результаты испытаний на основе исследований Chan (2010). Он провел испытания уплотненных образцов каолинита, стабилизированного портландцементом, диаметром 114 мм и высотой 80 и 76 мм. Ниже приведены результаты определения времени прибытия поперечной волны различными методами: визуальный метод, метод двух наибольших пиков и метод кросс-корреляции.

Визуальный метод, наиболее часто используемый метод интерпретации, где первое сильное отклонение в принятом сигнале принимается за время прихода поперечной волны t_0 (Viggiani & Atkinson, 1995; Jovičić et al., 1996; Lings & Greening, 2001; Kawaguchi et al., 2001 и другие). Первое значительное отклонение в сигнале от нулевого значения может быть положительным или отрицательным, в зависимости от расположения и полярности ВЕ. Для более легкой идентификации Teachavorasinskun & Amornwithayalax (2002), Teachavorasinskun & Lukkanaprasit (2008) использовали пару противоположно поляризованных сигналов, полученных путем изменения поляризация передатчика. Это похоже на сейсмические испытания в скважине, где полученный сигнал поперечной волны измеряют дважды, ударяя молотком в противоположных направлениях. Однако следует предупредить, что

инверсия полярности элемента излучателя передатчика меняет направление всей формы сигнала, включая компоненты ближнего поля, которые могут маскировать фактическое время прибытия (Leong et al., 2009). Учитывая, что основным недостатком метода визуального сбора является неопределенность, когда принятый сигнал не отображает четкую и точную точку отклонения, подобный метод определения времени прибытия волны может быть неточным. В основном из-за того, что первый сигнал может быть перекрыт естественным фоном или отраженными волнами.

На рис. 10.12, 10.13 показаны выходной и входной сигналы генерируемой поперечной волны сдвига. Время пути определено визуально, по форме записи сигналов. Метод основан на определении первого явно выраженного отклонения принятого сигнала от нулевого значения, где время прибытия волны и скорость обозначены, соответственно, t_0 и V_0 . Нет проблем, если принимаемый сигнал остается плоским перед четким всплеском на графике (рис. 10.12), но из-за эффектов естественного шума этот признак может быть трудно идентифицировать. Как отмечено в отчете Yamashita et al. (2009), принятый сигнал с малым напряжением и грубым разрешением затрудняет определение времени прибытия.

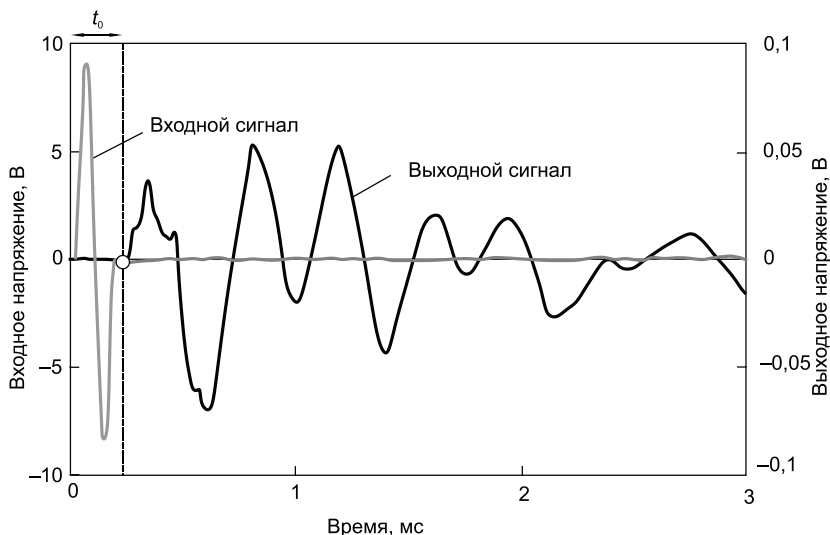


Рис. 10.12. Визуальное определение времени пути поперечной волны (Chan, 2010)



Рис. 10.13. Визуальное определение времени пути поперечной волны (Karg & Naegeman, 2005)

Метод от пика до пика (например, Viggiani & Atkinson, 1995, Chan, 2006) основан на предположении, что принятый сигнал имеет большое сходство с переданным. Расстояние между пиком передаваемого сигнала и первым основным пиком в принятом сигнале принимается за время прохождения поперечной волны. Из-за эффекта дисперсии, вызванного геометрией образца и способностью грунтов поглощать энергию, принимаемый сигнал обычно искажается и затухает с расстоянием. В этих условиях определение первого крупного пика становится более сложным, так как сигнал может иметь несколько последовательных пиков с очень незначительным отличием по величине. Как и в случае метода визуального анализа, этот метод также сильно зависит от качества принимаемых сигналов.

Время прохождения поперечной волны <<gl1014.wmf>> определяется как интервал времени между положительным пиком в передаваемом сигнале и первым основным пиком принятого сигнала. Пример приведен на рис. 10.14 с теми же сигналами, которые представлены на рис. 10.12. Этот метод может показаться лучшим, чем визуальный подбор первой точки отклонения, так как на него не влияют искажения принимаемого сигнала или эффекты ближнего поля, но опять же этот метод зависит от качества сигналов. Увеличение разности частот между переданным и полученным сигналами (знак дисперсии) непреднамеренно приводит к снижению достоверности определения времени прихода (Yamashita et al., 2009). Leong et al. (2009) показали, что обычно более низкая преобладающая частота принятого сигнала по сравнению с частотой входного сигнала или возбуждения объясняется различием в демпфирующих свойствах грунтов, так и взаимодействием датчика с грунтом. В результате измерений получается сигнал с небольшим искажением при заданной частоте с минимальной дисперсией, что делает определение первого крупного пика более надежным. Кроме того, на рис. 10.14 можно заметить, что первый главный пик в принятом сигнале не имеет наибольшей амплитуды, что указывает на влияние дисперсии.



Рис. 10.14. Метод от пика до пика (Chan, 2010)

Метод кросс-корреляции был предложен впервые Viggiani & Atkinson (1995) в связи с ВЕ-испытаниями грунтов. Метод кросс-корреляционного анализа измеряет уровень соответствия между двумя сигналами, передатчика $T(t)$ и приемника $R(t)$, выраженный коэффициентом кросс-корреляции CCTR:

$$CC_{TR}(t_s, 0) = \lim_{T_r \rightarrow \infty} \frac{1}{T_r} \int_{T_r} T(t + t_s) R(t) dt, \quad (10.5)$$

где T_r — время записи; t_s — сдвиг времени между двумя сигналами.

Чтобы применить этот метод, удобно преобразовать сигналы из временной области в частотную область, при которой разложение сигналов Фурье дает группы гармонических волн с известной амплитудой и частотой. Для этого используется общий алгоритм быстрого преобразования Фурье, которое преобразует сигналы в их линейные спектры, давая величину и сдвиг фазы каждой гармонической составляющей в сигнале, соответственно. Затем находится комплексно сопряженный линейный спектр передаваемого сигнала и вычисляется спектр мощности из двух установленных сигналов. Поскольку величина и фаза спектра мощности являются произведениями компонент величины и разности фаз в двух сигналах на заданной частоте, то диапазон общих частот может быть найден из величины спектра

мощности. Максимальный CC_{TR} – коэффициент обозначает соответствующий временной сдвиг между анализируемыми сигналами, который является временем прохождения поперечной волны. Метод кросс-корреляция может быть более последовательным методом по сравнению с предыдущими двумя, но это справедливо только в том случае, если переданные и полученные сигналы состоят из достаточно сходных частотных составляющих.

Кросс-корреляция измеряет уровень соответствия между переданным и полученным сигналом. Используя те же сигналы, что и раньше, пример данного метода показан на рис. 10.15, где функция взаимной корреляции показана вдоль переданного и принятого сигналов. В идеальном случае, в настоящей работе, максимальная функция взаимной корреляции должна была бы соответствовать первому основному положительному пику в принимаемом сигнале. Однако первый положительный пик редко имеет наивысшую величину и, следовательно, не обеспечивает максимальной кросс-корреляции. Это привело к ошибочной интерпретации времени пути, которое было определено через последующий пик в полученной записи сигналов. Такие ошибки согласуются с выводами (Yamashita et al., 2009), которые установили значительный разброс в компиляции данных времени прибытия, полученных из метода.

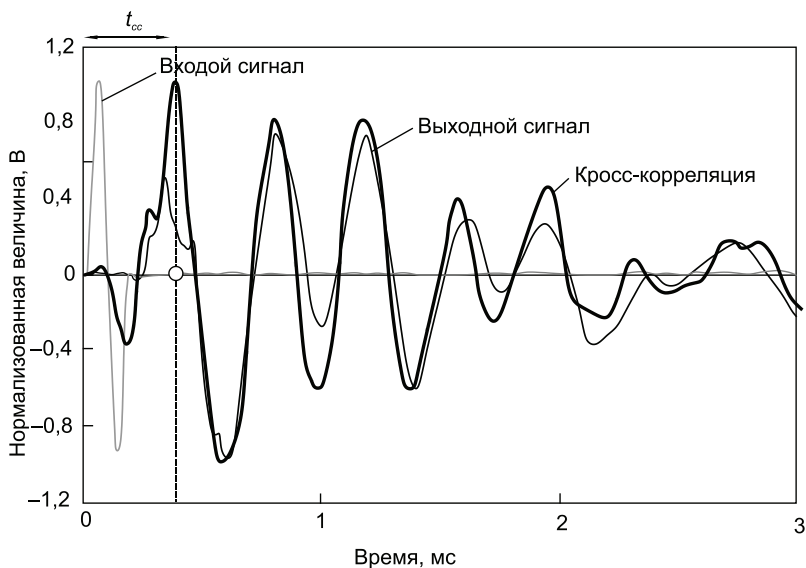


Рис. 10.15. Метод кросс-корреляции (Chan, 2010)

На рис. 10.16 приведено сравнение скорости поперечной волны с использованием различных методов определения времени ее пути. Наглядно видно, что визуальный метод дает результаты практически близкие к другим методам. Однако он является самым простым, прямым и с наименьшими трудозатратами методом определения времени пути скорости поперечных волн.

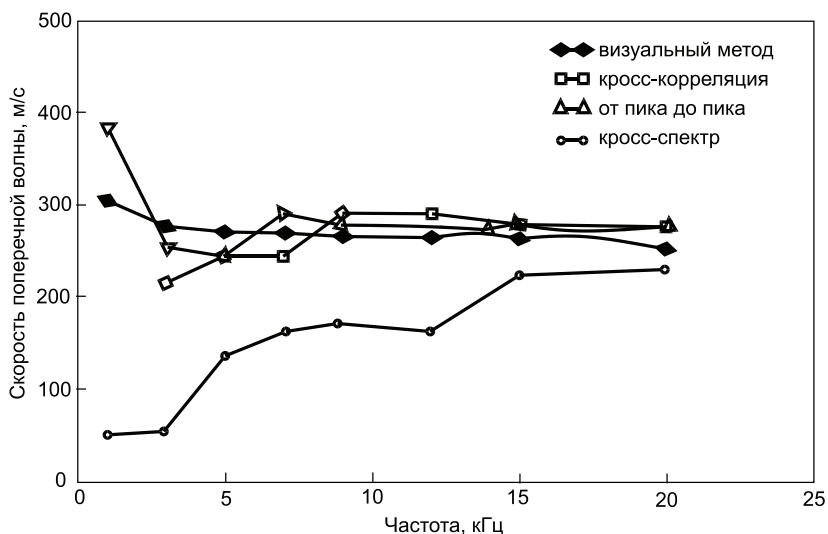


Рис. 10.16. Сравнение методов определения скорости поперечных волн (Chan, 2010)

Заключение

Применение пьезокерамических изгибных элементов дает альтернативную методам циклического трехосного сжатия и резонансной частоты возможность определения скорости поперечных волн в лабораторных условиях.

Дополнительным преимуществом является возможность включения пьезоэлектрических датчиков в конструкцию приборов трехосного сжатия, что позволяет проводить на одном образце грунта определение динамических свойств грунтов одновременно различными методами. Например, методом резонансной частоты и ультразвуковым методом.

Для определения времени прихода сдвига в ВЕ испытаниях используются различные методы, работающие либо во временном, либо в частотном доменах. Хотя некоторые исследователи утверждают, что методы в частотном домене более надежны, что не подтверждается другими исследованиями. Визуальный метод дает результаты практически близкие к другим методам являясь в то же время наиболее простым и менее трудозатратным.

Список литературы к главе 10

1. ГОСТ 56353. Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов. – М., 2015. – С. 39.
2. Ляндерс Р.Э. Лабораторные исследования упругих свойств грунтов. Вибрация оснований и фундаментов. – М.: Машстройиздат, 1950. – С. 43–60.
3. Ляндерс Р.З. Лабораторные исследования упругих свойств грунтов // Тр. НИИ оснований и фундаментов. – М.: Машстройиздат, 1959. – №16.
4. Месчан С.Р. Экспериментальные основы реологии глинистых грунтов. – Ереван: Изд-во «Гитутюн» НАН РА, 2008. – 807 с.
5. Amat A.S. Elastic stiffness moduli of Hostun sand: Report / Department of Civil Engineering University of Bristol, 2007. – 61 p.
6. Arroyo M., Wood D.M., Greening P.D., Medina L., Rio J. Effect of sample size on bender-based axial Go measurements // *Geotechnique*. – 2006. – Vol. 56, No.1. – pp. 39–52.
7. Arroyo M., Muir Wood D., Greening P.D. Source near-Field Effects and Pulse Tests in Soils Samples // *Géotechnique*. – 2003. – 53(3). – pp. 337–345.
8. Arulnathan R., Boulanger R.W., Riemer M.F. Analysis of Bender Element Tests // *Geotechnical Testing Journal, ASTM*. – 1998. – 21(2). – 120–131.
9. ASTM D 4015–07. Standard test methods for modulus and damping of soils by the resonant-column method. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.
10. Bates C.R. Dynamic Soil Property Measurements During Triaxial Testing // *Géotechnique*. – 1989. – 39(4). – 721–726.
11. Bellotti R., Jamiolkowski M., Lo Presti D.C.F., O’Neill D.A. Anisotropy of Small Strain Stiffness in Ticino Sand // *Géotechnique*. – 1996. – 46(1). – pp. 115–131.
12. Bray J.D., Riemer M.F., Gookin W.B. On the Dynamic Characterization of Soils // *Proceedings of the Second International Conference Earthquake Geotechnical Engineering, Lisbon, 2003*.
13. Brignoli E.G., Gotti M., Stokoe K.H. I. Measurement of Shear Waves in Laboratory Specimens by Means of Piezoelectric Transducers // *Geotechnical Testing Journal, ASTM*. – 1996. – 19(4). – pp. 384–397.
14. Brignoli E.G.M., Fretti C., Jamiolkowski M., Pedroni S., Stokoe II K.H. Stiffness of Gravelly Soils to Small Strains // *Proceedings of the 14th International*

Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering., Balkema, Rotterdam, Hamburg, 1997. – pp. 37–40.

15. Camacho-Tauta J.F. Evaluation of the small-strain stiffness of soil by non-conventional dynamic testing methods: PhD Thesis, Universidade Tecnica de Lisboa, Instituto Superior Tecnico, 2011. – 406 p.

16. Camacho-Tauta J.F., Cascante G., Viana da Fonseca A., Santos J.A. Time and frequency domain evaluation of bender element systems // *Géotechnique* 65. -2015. – No. 7. – pp. 548–562.

17. Chan C.-M. Bender Element Test in Soil Specimens: Identifying the Shear Wave Arrival Time. *EJGE*. – 2010. – Vol. 15, Bund. M. – pp. 1263–1276.

18. Chan, C-M. Relationship between shear wave velocity and undrained shear strength of stabilised natural clays // *Proceedings of the 2nd International Conference on Problematic Soils*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2006. – pp. 117–124.

19. Chaudhary S.K., Kuwano J., Hayano Y. Measurement of Quasi-Elastic Stiffness Parameters of Dense Toyoura Sand in Hollow Cylinder Apparatus and Triaxial Apparatus with Bender Elements // *Geotechnical Testing Journal*, ASTM. – 2004. – 27(1). –pp. 23–35.

20. Diaz-Rodriguez J.A., Moreno-Carrizales P., López-Flores L. A Study of Soil Microstructure Using Bender Elements // *Proceedings of the Fourth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, San Diego, California, 2001. – 1.39.

21. Dyvik R., Madshus Ch. Lab measurements of G_{max} using bender elements // *Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Conditions*; Proc. ASCE, Detroit, 24 October 1985: 186–196. New York: ASCE, 1985.

22. Dyvik R., Olsen T.S. G_{max} Measured in Oedometer and Dss Tests Using Bender Elements // *Proceedings of the Twelfth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, 1985. – pp. 39–42.

23. Ferreira C. The Use of Seismic Wave Velocities in the Measurement of Stiffness of a Residual Soil: PhD Thesis / University of Porto, Porto, 2008.

24. Fioravante V., Capoferri R. On the Use of Multi-Directional Piezoelectric Transducers in Triaxial Testing // *Geotechnical Testing Journal*, ASTM. – 2001. – 24(3). – pp. 243–255.

25. Fu L. Application of Piezoelectric Sensors in Soil Property Determination: PhD Thesis / Case Western Reserve University, 2004.

26. Greening P.D., Nash D.F.T. Frequency domain determination of G_0 using bender elements // *Geotechnical Testing Journal*. – 2004. – Vol. 27, No.3. – pp. 288–294.

27. Hasan A.M., Wheeler S.J. Measuring travel time in bender/extender element tests // *Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*, 2015. – pp. 3171–3176.

28. Hight D.W. Sampling Methods: Evaluation of Disturbance and New Practical Techniques for High Quality Sampling in Soils // *Proceedings of the*

VII Portuguese National Congress of Geotechnics, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Porto, 2000.

29. Ismail M., Hourani Y. An Innovative Facility to Measure Shear-Wave Velocity in Centrifuge and 1-G Models // Proceedings of Deformation Characteristics of Geomaterials, Balkema, Lyon, 2003. – pp. 21–29.

30. Ismail M., Sharma S.S., Fahey M. A Small True Triaxial Apparatus with Wave Velocity Measurement // Geotechnical Testing Journal, ASTM. – 2005. – 28(2). – pp. 113–122

31. Jovičić V., Coop M.R. The Measurement of Stiffness Anisotropy in Clays with Bender Element Tests in the Triaxial Apparatus // Geotechnical Testing Journal, ASTM. – 1998. – 21(1). – pp. 3–10.

32. Jovicic M., Coop R., Simic M. Objective criteria for determining G_{max} from bender element tests // Geotechnique. – 1996. – Vol. 46, No. 2. – pp. 357–362.

33. Karg C., Haegeman W. Advanced Cyclic Triaxial Testing and Bender Element Testing // Proceedings of ICSV12, J.L. Bento Coelho (ed.), Lisbon, Portugal, July 11–14, 2005.

34. Kawaguchi T., Mitachi T., Shibuya S. Evaluation of shear wave travel time in laboratory bender element test // Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul, Turkey, 2001. – pp. 155–158.

35. Khan Q., Subramanian S., Moon S.-W., Ku T. Determining Arrival Time of Shear Waves in Bender Element Test: Idealized Sine Wave Approach // Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, 2017. – pp. 411–414.

36. Kuwano R., Jardine R.J. On the Applicability of Cross-Anisotropic Elasticity to Granular Materials at Very Small Strains // Géotechnique. – 2002. – 52(10). – pp. 727–749.

37. Kuwano R., Connolly T.M., Jardine R.J. Anisotropic Stiffness Measurements in a Stress-Path Triaxial Cell // Geotechnical Testing Journal. – 2000. – 23(2). – pp. 141–157.

38. Kuwano R., Connolly T.M., Jardine R.J. Anisotropic Stiffness Measurements in a Stress-Path Triaxial Cell // Geotechnical Testing Journal, ASTM. – 1999. – 23(2). – pp. 141–157.

39. Kuwano R., Jardine R.J. Stiffness Measurements in a Stress-Path Cell // Pre-Failure Deformation Behaviour of Geomaterials / Ice, R.J. Jardine et al, eds., Thomas Telford Ltd, London, 1998. – pp. 391–394.

40. Lawrence F.V. Propagation of ultrasonic waves through sand: Research Report R63–8 / Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1963.

41. Lawrence F.V. Ultrasonic shear wave velocity in sand and clay. Research Report R65–05, Soil Publication No. 175, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1965.

42. Lee J.-S., Santamarina J.C. Bender elements: performance and signal interpretation // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. – 2005. – Vol. 131, No.9. – pp. 1063–1070.

43. Leong E.C., Cahyadi J., Rahardjo H. Measuring shear and compression wave velocities of soil using bender-extender elements // *Canadian Geotechnical Testing Journal*. – 2009. – 46: 792–812.

44. Lings, M.L. and Greening, P.D. (2001). A novel bender/extender for soil testing // *Géotechnique*: 51: 8: 713–717.

45. Lohani T.N., Imai G., Shibuya S. Determination of Shear Wave Velocity in Bender Element Test // *Earthquake Geotechnical Engineering*, Pinto e Sêco, ed., Balkema, Lisbon, 1999. – pp. 101–106.

46. Mohamad R. Dynamic properties of compacted soils using resonant column with self-contained bender element: PhD Thesis / University of Texas at Arlington, 2008. – 144 p.

47. Pennington D.S., Nash D.F.T., Lings M. Horizontally-Mounted Bender Elements for Measuring Anisotropic Shear Moduli in Triaxial Clay Specimens // *Geotechnical Testing Journal*, ASTM. – 2001. – 24(2). – pp. 133–144.

48. Pennington D.S., Nash D.F.T., Lings M.L. Anisotropy of G₀ Shear Stiffness in Gault Clay // *Géotechnique*. – 1997. – 47(3). – pp. 391–398.

49. Pennington D.S., Nash D.F.T., Lings M.L. Horizontally mounted bender elements for measuring anisotropic shear moduli in triaxial clay specimens. ASTM // *Geotechnical Testing Journal*. – 2001. – 24: 2. – pp. 133–144.

50. Rampello S., Callisto L. Stiffness Anisotropy of a Natural Clay at Small Strains // *Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Balkema, Lisse, Istanbul, 2001. – pp. 247–250.

51. Rio J. Advances in Laboratory Geophysics Using Bender Elements: PhD Thesis / University of London, London, 2006.

52. Sahaphol T., Miura S. Shear Moduli of Volcanic Soils // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2005. – 25(1). – pp. 157–165.

53. Sanchez-Salinero I., Roesset J.M., Stokoe K.H. I. Analytical Studies of Body Wave Propagation and Attenuation: Report GR 86–15 / University of Texas, Austin, 1986.

54. Santamarina J.C., Klein K.A., Fam M.A. *Soils and Waves* / John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2001.

55. Shirley D.J. An Improved Shear Wave Transducer // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1978. – 63(5). – pp. 1643–1645.

56. Shirley D.J., Hampton L.D. Shear-Wave Measurement in Laboratory Sediments // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1978. – 63(2). – pp. 607–613.

57. Sawangsuriya A. Wave Propagation Methods for Determining Stiffness of Geomaterials. Chapter 7, INTECH, 2012. – pp. 1–44.

58. Sawangsurriya A., Biringen E., Fratta D., Bosscher P.J., Edil T.B. Dimensionless limits for the collection and interpretation of wave propagation data in soils // GeoShanghai Conference, Site and Geomaterial Characterization, ASCE, // Geotechnical Special Publication, No.149, Shanghai, China, 2006. – pp.160–166.

59. Shirley D.J., Anderson A.L. Acoustical and engineering properties of sediments. Report No. ARL-TR-75-58, Applied Research Laboratories / University of Texas, Austin, 1975.

60. Shirley D.J. An Improved Shear Wave Transducer // Journal of the Acoustical Society of America. – 1978. – 63(5). – pp. 1643–1645.

61. Shirley D.J., Hampton L.D. Shear-Wave Measurement in Laboratory Sediments // Journal of the Acoustical Society of America. – 1978. – 63(2). – pp. 607–613.

62. Sukolrat, J. Destructuration of Bothkennar clay: Ph.D. Thesis / Department of Civil Engineering, University of Bristol, UK, 2007.

63. Teachavorasinskun S., Amornwithayalax T. Elastic shear modulus of Bangkok clay during undrained triaxial compression // Géotechnique. – 2002. – 52: 7: 537–540.

64. Teachavorasinskun S., Lukkanaprasit P. Stress induced inherent anisotropy on elastic stiffness of soft clays // Soil and Foundations. – 2008. – 48: 7: 127–132.

65. TC-29 ISSMGE. International Parallel Test on the Measurement of Gmax Using Bender Elements Organized by TC-29, 2007. – 76 p.

66. Theron M., Clayton C.R. I., Best A. I. Interpretation of Side-Mounted Bender Element Results Using Phase Shift and Group Velocity // Deformation Characteristics of Geomaterials, Di Benedetto, ed., Swets & Zeitlinger, Lyon, 2003. – pp. 127–132.

67. Thomann J.G., Hryciw R.D. Laboratory measurement of small strain shear modulus under K0 conditions, ASTM // Geotechnical Testing Journal. – 1990. – Vol. 13, No. 2. – pp. 97–105.

68. Viana da Fonseca, A. and Ferreira, C. Application of the Bender Element Technique to Assessment of Sampling Quality in Residual Soils // Proceedings of the 7th COBRAMSEG, São Paulo, Brasil (in Portuguese), 2002.

69. Viana da Fonseca A., Ferreira C., Fahey M. A Framework Interpreting Bender Element Tests, Combining Time-Domain and Frequency-Domain Methods // Geotechnical Testing Journal, ASTM. – 2009. – 32(2). –pp. 1–17.

70. Viggiani G., Atkinson J.H. Interpretation of bender element tests // Geotechnique. – 1995. – 45(1). – pp. 149–154.

71. Wang Y., Yang W.M., Lo K.F. Damping-Ratio Measurements by the Spectral-Ratio Method» Canadian // Geotechnical Journal. – 2006. – 43. – pp. 1180–1194.

72. Wichtmann T., Triantafyllidis T. Influence of a Cyclic and Dynamic Loading History on Dynamic Properties of Dry Sand, Part II: Cyclic Axial Preloading // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2004. – 24(1). – pp. 789–803.

73. Yamashita S., Fujiwara T., Kawaguchi T., Mikami T., Nakata Y., Shibuya S. International Parallel Test on the Measurement of Gmax Using Bender Elements Organized by Technical Committee 29 of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering // *The Japanese Geotechnical Society* (http://www.jiban.or.jp/e/tc29/BE_Inter_PP_Test_en.pdf, last accessed at 11 May 2008), 2007.

74. Yamashita S., Kawaguchi T., Nakata Y., Mikami T., Fujiwara T., Shibuya S. Interpretation of International Parallel Test on Measurement of Gmax Using Bender Elements // *Soils and Foundations*. – 2009. – 49(4). – pp. 631–650.

75. Zeng X., Ni B. Stress-Induced Anisotropic Gmax of Sands and Its Measurement // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE. – 1999. – 125(9). – pp. 741–749.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Программы для оценки динамического поведения грунтов

DESRA – (Lee & Finn 1978), DESRAMOD (Vucetic 1986) – гиперболическое определяющее уравнение совместно с правилом Мазинга. Использует модель генерации порового давления Martin et al. (1975, 1978).

DMOD – (Matasovic, 2011), D-MOD2000 (GeoMotions, 2011). Имеет большую базу кривых деградации нормализованного модуля сдвига и коэффициента демпфирования грунтов.

DEEPSOIL – (Hashash, 2016). Подробное описание в главе 4.

Эти три программы используют различные гиперболические модели для представления опорной кривой грунта совместно с расширенным законом разгрузки-повторного нагружения Мазинга (Masing 1926) для описания гистерезисного поведения (Finn et al., 1986; Hashash & Park, 2001; Kondner & Zelasko, 1963; Matasovic & Vucetic, 1993a,b).

DYNAFLOW – полностью связанная процедура нелинейно динамического анализа. Определяющая модель в DYNAFLOW основана на концепции много-поверхностной пластичности (Prevost, 1981, 1989), Зависимость между напряжениями и деформациями определяется путем циклических лабораторных испытаний и аппроксимирована линейными сегментами, а зависимости для нагружения, разгрузки и повторного нагружения определяются критерием Мазинга (Masing, 1926). Процедура может включать анизотропию грунта. Программа описывает диссипацию и перераспределение порового давления в процессе динамического нагружения. Проверка программы проводилась по данным испытаний на центрифуге и истории реальных землетрясений. Результаты верификации показали реальный характер разрушения плотин с генерацией порового давления и деформаций.

DSAGE является одним из основных вариантов модели в программа FLAC, основанная на явной схеме решения методом конечных разностей нелинейных статических и динамические задач. Программа использует обновленную процедура Лагранжа для решения задач с большими деформациями.

DYNAID – основана на определяющих уравнениях Prevost (1989), которые основаны на теории пластичности и позволяют выполнять анализ дренированного и недренированного поведения, анизотропию, зависимость свойств от траектории напряжений водонасыщенных грунтов.

DYNARD использует явную схему решения нелинейных задач методом конечных разностей в постановке Лагранжа, что позволяет решать задачи с большими деформациями и перемещениями. Она анализирует деформацию и реакцию земляных конструкций при одновременном действии силы тяжести и сейсмической нагрузке с использованием недренированной прочности и деградацией недренированного модуля деформации грунта. Циклическое и нелинейное поведение грунтов выполняется с использованием модели двумерной граничной поверхности, аналогично модели Cundall (1979) и Dafalias & Hermann (1982).

DYSAC2 – процедура полностью связанного нелинейного динамического анализ. Определяющая модель также основана на граничной поверхности пластичности. Программа была предварительно подтвержденный с использованием результатов испытаний моделей на центрифуге (Muraleetharan et al., 1993).

LiquefyPro – определяет потенциал грунтов к разжижению и вычисляет осадку отложений грунтов при сейсмическом нагружении. Программа основана на NCEER семинаре (1997) и рекомендациях SP117 (1999). Включена возможность оценки потенциала разжижения различными методами: *SPT* (динамическое зондирование пробоотборником) и *BPT* (пенетрометр Беккера) и четыре метода для *CPT* данных. Расчет осадки выполняется двумя методами Tokimatsu & Seed (1984) и Ishihara & Yosemine (1992).

NL-DYAS – разработана для оценки нелинейного поведения мягких морских нормально-уплотненных глин. Включает определяющее уравнение для одномерного нелинейного анализа слоистых массивов грунтов.

OpenSEES – источник открытых кодов, что позволяет создавать программы различного назначения. McKenna & Fenves (2001) используя отмеченную платформу разработали процедуру одномерного анализа распространения волн с определяющим уравнением предложенное Yang (2000). Модель грунта способна учесть развитие и диссипацию порового давления и поведение при циклическом сопротивлении.

PLAXIS – реализована модель UBC3D, которая представляет собой трехмерную обобщенную формулировку, первоначальной 2-D модели UBCSAND, введенной Puebla et al. (1997). Первоначальная трехмерная реализация PLAXIS была представлена Tsegaye (2010). Позднее она была модернизирована Petalas & Galavi (2013). В связи с тем, что в России широко используется программа Plaxis, ниже мы представим подробно описание данной модели.

SHAKE91 – развитие программы SHAKE, которая была написана Schnabel et al. (1972) и подвергалась последующим обновлениям (Idriss & Sun, 1993). Schnabel et al. применили эквивалентно линейный анализ в полных напряжениях для оценки поведения горизонтально слоистой

вязко-упругой системы подверженная вертикально распространяющейся поперечной волне. Эквивалентно линейная модель была использована для моделирования деградации модуля сдвига и коэффициента демпфирования как функция деформации сдвига. Гистерезисное напряженно-деформированное поведение при гармоническом циклическом нагружении представлено эквивалентным модулем сдвига, соответствующий секущему модулю, определяемый через конечные точки петли гистерезиса и эквивалентный коэффициент демпфирования.

Выполняется итерационная процедура, чтобы найти модуль сдвига и коэффициент демпфирования совместимые с вычисленными деформациями сдвига. Начальные оценки деформаций сдвига и совместимые оценки динамических модулей и коэффициентов демпфирования используются для первой итерации. Деформация зависит от модуля сдвига и демпфирования в слоях грунта или подслоев учитывается эквивалентным однородным («эффективным») деформацией вычисленная из максимальной деформации в том же слое или подслое. Отношение эквивалентной равномерной деформации сдвига к рассчитанной максимальной деформации задается как входной параметр, а значение этого отношения принимается равным $n = 0,65$. В этих исследованиях n принималось как функция магнитуды $n = (M_w - 1)/10$. Итерация останавливается, когда начальная оценка сходится с результатами вычисленных амплитуд деформаций.

На основе SHAKE91 написаны программа SHAKEVT, в которую добавлен выбор вывода диссипации энергии для каждого слоя и увеличение максимума длины ввода колебаний и другие изменения. В SHAKE2000 введен пред и пост-процессор для SHAKE91. Программа WESHAKЕ является модификацией и расширением программы SHAKE.

SUMDES – использует гиперболическую модель граничной поверхности Li et al. (1997) и многонаправленную формулировку с целью более точного моделирования одновременного распространения поперечной и продольной волн; процедура способна воспроизводить комплексное поведение в виде прогрессирующего разупрочнения из-за генерирования порового давления.

STRATA – разработана Kottke & Rathje (2008). Имеет графический интерфейс пользователя, большой каталог кривых деградации модуля сдвига и коэффициента демпфирования; возможность выбора теории случайной вибрации и выбор случайных свойств профиля грунтов. Он также имеет обширный набор вариантов вывода (в том числе рассеиваемая энергия), выходы для универсального формата с разделителями-запятыми (.csv) и с несколькими входами поддержки пакетной загрузки. Исходный код Strata полностью открыт и может быть скомпилирован в виртуальную в операционную систему. (Двоичные файлы Windows доступны предварительно скомпилированными.) В отличие от других

реализаций эквивалентно-линейного алгоритма, Strata имеет возможность автодискретизации слоев профиля грунта, разбивая каждый тип грунта на более мелкие подслои для анализа. Программа видоизменяется, но самая последняя версия (399) достаточно стабильна для большинства анализов.

SWANDYNE 4 – универсальная упруго-пластичная программа, которая позволяет решать как статические, так и динамические нелинейные задачи при дренированном и недренированном поведении водонасыщенных и маловлажных грунтов при сейсмическом нагружении. Формулировка и процедура решения основаны на работе Zienkiewicz et al. (1990).

TARA-3 – процедура основана на прямом моделировании нелинейного гистерезиса при циклическом нагружении и разгрузке. Основана на работе Finn et al. (1986). Целью прямого анализа является непрерывный контроль зависимости напряжение-деформация при сдвиге во время нагрузки и разгрузки. Проверки встроены в программу TARA-3 для контроля, является ли рассчитанная точка напряжения на кривой напряжений и деформаций и если нет, то применяют корректировку для возвращения напряжений на кривую деформирования. С целью упрощения вычислений, зависимость «напряжения–деформация» предполагается гладкой и гиперболической. Эта зависимость определяется двумя параметрами: прочностью на сдвиг и начальным модулем сдвига. Реакция грунта на всестороннее равномерное давление предполагается нелинейно упругой и зависящей от среднего нормального напряжения.

TESS (Pyke 2000),

LASS-IV (Ghaboussi and Dikmen 1984),

NAPS (Nishi et al. 1985),

CADFLEA –

Список авторов компьютерных программ для динамического анализа

Bardet J.P., Ichii K., Lin C.H. (2000). EERA: A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits. Dept. of Civil Engineering, Univ. of Southern California, 40 p.

Bardet J.P., Tobita T. (2001). NERA: A Computer Program for Nonlinear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits. Dept. of Civil Engineering, Univ. of Southern California, 46 p.

Booker J.R., Rahman M.S., Seed H.B. (1976). GADFLFA-A computer program for the analysis of pore pressure generation and dissipation during cycle or earthquake loading: Report No UCB/EERC-76/24., Berkley University of California, Berkley, California.

Cundall P.A., Board M. (1988). A Micro-Computer Program for Modeling Large-Strain Plasticity Problems // Proceedings, 6th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck Austria, pp. 2101–2108, April.

Dafalias Y.F., Hermann L.R. (1982). Bounding Surface Formulation of Soil Plasticity // Soil Mechanics, Transient and Cyclic Loads, G. Pande and O. C. Zienkiewicz, Eds., Wiley, London, U.K., pp. 253–282.

Finn W.D.L., Yogendrakumar M., Yoshida N., Yoshida H. (1986). TARA-3: A Program to Compute the Response of 2–D Embankments and Soil-Structure Interaction Systems to Seismic Loadings / Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

GeoMotions L. (2000). D-MOD2000. A Nonlinear Computer Program for Seismic Response Analysis of Horizontally Layered Soil Deposits, Earthfill Dams, and Solid Waste Landfills.

Hashash Y.M.A. and D. Park (2001). Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment // Eng. Geology, Amsterdam, 62(1–3), 185–206.

Hashash Y.M.A. (2009). DEEPSOIL V 3.7: Tutorial and User Manual. 2002–2009 / University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois.

Hashash, Y., Park, D., and Tsai C.C., Philips C., Groholski D.R. (2016), DEEPSOIL – 1–D Wave Propagation Analysis Program for Geotechnical Site Response Analysis of Deep Soil Deposits, Version 6.1: Tutorial and User Manual, University of Illinois at Urbana-Campaign.

Hudson M., Idriss I.M., Beikae M. (1994). QUAD4M – A computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base / Center for Geotechnical Modeling, Dept. Civil and Envir. Eng., Univ. of Calif., Davis, CA.

Hudson M., Idriss I.M., and Beikae M. (2003). QUAD4M: a computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base. rev. 2003, Center for Geotechnical Modeling Dept. of Civil and Environmental Engineering University of California Davis.

Idriss I.M. and Sun J.I. (1992). SHAKE91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits / Center for Geotech. Modeling, Univ. of Calif., Davis.

Ishihara K., Yoshimine M. (1992), Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes // Soils and Foundations, 32(1), 173 – 188.

Joyner W.B. NONLI3: A Fortran Program for Calculating Nonlinear Ground Response: Open File Report 77–761 / U.S. Geological Survey, Menlo Park, California, 1977.

Kondner R.L., and Zelasko J.S. (1963). A hyperbolic stress-strain formulation of sands // Proc. of 2nd Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Sao Paulo, Brasil, 289–324.

Kottke A.R., Rathje E.M. Technical Manual for Strata. PEER Report 2008/10 / University of California, Berkeley, California.

Lee M.K.W., Finn W.D.L. (1975). DESRA-1, Program for the dynamic effective stress response analysis of soil deposits including liquefaction evaluation // Soil Mechanics Series No.36, Department of Civil Eng., University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Lee M.K.W., Finn W.D.L. (1978). DESRA-2: Dynamic effective stress response analysis of soil deposits with energy transmitting boundary including assessment of liquefaction potential / Soil Mechanics Series 36, Dept. of Civil Eng., Univ. of British Columbia, Vancouver, Canada, 60 p

Li X.S., Wangand Z.L., Shen C.K. (1992). SUMDES: A nonlinear procedure for response analysis of horizontally-layered sites subjected to multi-directional earthquake loading / Dept. of Civil Eng., Univ. of Calif., Davis.

Lo Presti D.C.F., Lai C.G., Puci I. (2006). ONDA: Computer code for nonlinear seismic response analyses of soil deposits // J. of Geotech. and Geoenviron. Eng., ASCE, 132(2), 223–236.

McKenna F., Fenves G.L. (2001). The OpenSees command language manual, version 1.2 / Pacific Earthquake Engrg. Research Center, Univ. of Calif., Berkeley. – <http://opensees.berkeley.edu>.

Martin P.P. (1975). Non-linear methods for dynamic analysis of ground response: Ph. D. Thesis / Univ. of California, Berkeley.

Martin P.P., Seed H.B. (1978). APOLLO, a computer program for the non-linear analysis of pore pressure generation and dissipation in horizontal sand layers during cyclic earthquake loading: Report No. EERC 78–21 / Earthquake Eng. Research Center, Univ. of Calif., Berkeley, California.

Masing G. (1926). Eigenspannungen und Verfestigung beim Messing // Proceedings, 2nd International Congress of Applied Mechanics, Zurich, Switzerland.

Matasovic N. (2011). D-MOD 2 – A Computer Program for Seismic Response Analysis of Horizontally Layered Soil Deposits, Earthfill Dams, and Solid Waste Landfills: User’s Manual, GeoMotions, LLC, Lacey, Washington, 182 p.

Matasovic N., Vucetic M.(1993a). Cyclic Characterization of Liquefiable Sands // J. of Geotech. Eng., ASCE, 119(11), 1805–1822

Matasovic N., Vucetic M. (1993b). Seismic response of horizontally layered soil deposits: Report No. ENG 93–182, School of Engineering and Applied Science, University of California, Los Angeles.

Muraleetharan K.K., Mish K.D., Aralanandan K. (1993). A Fully Coupled Nonlinear Dynamic Analysis Procedure and its Verification Using Centrifuge

Test Results // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.

Ordóñez G.A. SHAKE2000: A Computer Program for the 1–D Analysis of Geotechnical Earthquake Engineering Problems: User's Manual. July 2011 Revision.

Petalas A., Galavi V. (2013). Plaxis Liquefaction Model UBC3DPLM: PLAXIS Report.

Prevost J.H. (1981). DYNAFLOW: A Nonlinear Transient Finite Element Analysis Program / Princeton University, Department of Civil Engineering, Princeton, NJ.

Prevost J.H. (1989). DYNA1D – A computer program for nonlinear seismic site response analysis: Technical documentation: Rpt. No. NCEER-89–0025, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, N.Y.

ProShake: Ground Response Analysis Program: User's Manual. Version 1.1 / EduPro Civil Systems, Inc. Redmond, Washington.

Puebla H., Byrne M., Phillips P. (1997). Analysis of canlex liquefaction embankments prototype and centrifuge models // Canadian Geotechnical Journal, 34:641–657.

Pyke R.M. (2000). TESS: A computer program for nonlinear ground response analyses / TAGA Engineering Systems & Software, Lafayette, Calif.

Schnabel P.B., Lysmer J., Seed H.B. (1972). SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered site: Report no. UCB/EERC-72/12, Earthquake Engrg. Research Center, Univ. of Calif., Berkeley, California, 102 p.

Seed H.B., Idriss I.M. (1969). Influence of soil conditions on ground motions during earthquakes: ASCE J Soil. Mech. Found. Div., 95, 99–137.

Silva W.J., Lee K. (1987). WES RASCAL code for synthesizing earthquake ground motions / State of the Art for Assessing Earthquake Hazards in the United States, Report 24, U.S. Army Engineers Waterway Experiment Station, Misc. Paper S-73–1.

Tokimatsu K., Seed H.B. (1984). Simplified procedures for the evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking: Report No. UCB/EERC-84/16, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.

Vucetic M. (1986). Pore pressure buildup and liquefaction at level sand sites during earthquakes / Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, N. Y.

Wilson E.L. (1968). A computer program for the dynamic stress analysis of underground structures: EERC Rpt 76–29, Earthquake Eng. Research Center, Univ. of California, Berkeley.

Yang Z. (2000). Numerical modeling of earthquake site response including dilation and liquefaction: PhD Thesis / Dept. of Civil Eng. and Eng. Mech., Columbia University, NY, New York.

Youngs R.R. (2004). Software validation report for SHAKE04, Geomatrix Consultants.

Yule D.E., Wahl R.E., Wallace D.C. WESHAKE6: Manual. – <http://www.itk.ilstu.edu/faculty/dewalla/manual6.htm> (Accessed November 13, 2013).

Zienkiewicz O.C., Chan A.H.C., Pastor M., Paul D.K., Shiomi T. (1990). Static and Dynamic Behavior of Soils: A Rational Approach to Quantitative Solutions, Part I: Fully Saturated Problems // Proceedings, The Royal Society, London, U.K. pp. A429, 285–309.

Приложение 2

Руководства к программам

Boulanger R.W., Ziotopoulou K. (2017). PM4Sand (version 3.1): A sand plasticity model for earthquake engineering applications: Report No. UCD/CGM-17/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, March, 112 pp. (Boulanger_Ziotopoulou_PM4Sand_v31_CGM-17-01_2017.pdf)

Boulanger R.W., Ziotopoulou K. (2015). PM4Sand (version 3): A sand plasticity model for earthquake engineering applications: Report No. UCD/CGM-15/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, March, 112 pp. (Boulanger_Ziotopoulou_PM4Sand_Model_CGM-15-01_2015)

Boulanger R.W., Ziotopoulou K. (2012). PM4Sand (version 2): A sand plasticity model for earthquake engineering applications: Report No. UCD/CGM-12/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, May, 100 pp. (Revision 1 posted July 2012 – Boulanger_Ziotopoulou_Sand_Model_CGM-12-01_2012_rev1).

Boulanger R.W. (2010). A sand plasticity model for earthquake engineering applications: Report No. UCD/CGM-10/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 77 pp.

Теория и методология

Boulanger R.W., Ziotopoulou K. (2013). Formulation of a sand plasticity plane-strain model for earthquake engineering applications // Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier, 53, 254–267, 10.1016/j.soildyn.2013.07.006.

Ziotopoulou K., Boulanger R.W. (2016). Plasticity modeling of liquefaction effects under sloping ground and irregular cyclic loading conditions // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 84 (2016), 269–283, 10.1016/j.soildyn.2016.02.013.

Ziotopoulou K., Boulanger R.W. (2013). Calibration and implementation of a sand plasticity plane-strain model for earthquake engineering applications // *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 53, 268–280, 10.1016/j.soildyn.2013.07.009.

Процедуры калибровки

Boulanger R.W., Beaty M.H. (2016). Seismic deformation analyses of embankment dams: A reviewer's checklist // *Proceedings, Celebrating the Value of Dams and Levees – Yesterday, Today and Tomorrow, 36th USSD Annual Meeting and Conference, United States Society on Dams, Denver, CO, 535–546.*

Ziotopoulou K., Boulanger R.W. (2015). Validation protocols for constitutive modeling of liquefaction // *6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, November 1–4, Christchurch, New Zealand.*

Ziotopoulou K., Maharjan M., Boulanger R.W., Beaty M.H., Armstrong R.J., Takahashi A. (2014). Constitutive modeling of liquefaction effects in sloping ground // *Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Frontiers of Earthquake Engineering, July 21–25, Anchorage Alaska.*

Ziotopoulou K., Boulanger R.W. (2013). Numerical modeling issues in predicting post-liquefaction reconsolidation strains and settlements // *10th International Conference on Urban Earthquake Engineering, March 1–2, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 469–475.*

Ziotopoulou K., Boulanger R.W. (2012). Constitutive modeling of duration and overburden effects in liquefaction evaluations // *2nd International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, ISSMGE, Taormina, Italy, May 28–30, paper no. 03.10, 467–482.*

Анализ исторических случаев

Bray J.D., Luque R. (2017). Seismic performance of a building affected by moderate liquefaction during the Christchurch earthquake // *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier, 102, 99–111, 10.1016/j.soildyn.2017.08.011.*

Boulanger R.W., Khosravi M., Khosravi A., Wilson D.W. (2017). Remediation of liquefaction effects for an embankment using soil-cement walls: Centrifuge and numerical modeling // *Proc., Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, PBD-III Vancouver, M. Taiebat et al., eds., ISSMGE Technical Committee TC203, paper 537.*

Montgomery J., Boulanger R.W., Ziotopoulou K. (2017). Effects of spatial variability on the seismic response of the Wildlife Liquefaction Array // Proc., Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering, PBD-III Vancouver, M. Taiebat et al., eds., ISSMGE Technical Committee TC203, paper 533.

Ziotopoulou K. (2017). Seismic response of liquefiable sloping ground: Class A and C numerical predictions of centrifuge model responses // Special issue of Soil Dynamics and Earthquake Engineering dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.01.038.

Luque R., Bray J.D. (2017). Dynamic analyses of two buildings founded on liquefiable soils during the Canterbury Earthquake Sequence // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2017, 143(9): 04017067.

Armstrong R.J., Boulanger R.W. (2015). Numerical simulations of liquefaction effects on piled bridge abutments // 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, November 1-4, Christchurch, New Zealand.

Boulanger R.W., Kamai R., Ziotopoulou K. (2013). Simulation of liquefaction-induced void redistribution in a centrifuge test // 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering, March 1-2, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 301-305.

Kamai R., Boulanger R.W. (2013). Simulations of a centrifuge test with lateral spreading and void redistribution effects // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 139(8), 1250-1261.

Ziotopoulou K., Boulanger R.W., Kramer S.L. (2012). Site response analyses of liquefying sites // Geo-Congress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering / R.D. Hyrciw, A. Athanasopoulos-Zekkos, and N. Yesiller, eds.; Geotechnical Special Publication No. 225, ASCE Geo-Institute, 1799-1808.

Другие применения

Boulanger R. W., Montgomery J. (2016). Nonlinear deformation analyses of an embankment dam on a spatially variable liquefiable deposit // Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 91(2016), 222-233, 10.1016/j.soildyn.2016.07.027.

Boulanger R.W., Montgomery J., Ziotopoulou K. (2015). Nonlinear deformation analyses of liquefaction effects on embankment dams // Perspectives on Earthquake Geotechnical Engineering, A. Ansal and M. Sakr, eds., Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering 37, 247-283, Springer, DOI 10.1007/978-3-319-10786-8_10.

Boulanger R.W., Kamai R., Ziotopoulou K. (2014). Liquefaction induced strength loss and deformation: Simulation and design // Bulletin of Earthquake Engineering, Springer, 12: 1107-1128, 10.1007/s10518-013-9549-x.

Boulanger R.W., Kamai R., and Ziotopoulou, K. (2011). Numerical modeling of liquefaction effects // Proc., Effects of Surface Geology on Seismic Motion, 4th IASPEI / IAEE International Symposium, August 23–26, University of California, Santa Barbara, CA.

Montgomery J., Boulanger R.W. (2016). Effects of spatial variability on liquefaction-induced settlement and lateral spreading // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 143(1), 04016086, 10.1061/(ASCE)GT.1943–5606.0001584.