

Сейсмоакустический
метод исследований
свай





Теоретические основы сейсмоакустического метода измерения длины и контроля сплошности свай

Устройство свайных фундаментов является одним из основных и важных видов работ в строительстве, от качества которой зависит будущее состояние строящегося здания или сооружения. Как правило, определенный процент свай после их устройства имеет некоторые дефекты, полученные в процессе изготовления или транспортировке. К нарушению сплошности ствола буронабивных (буроинъекционных) свай могут приводить многие причины, в частности: недостаточный объем бетона на площадке строительства в момент бетонирования свай, перерыв в работах по бетонированию ствола, негерметичность соединения обсадных труб в водонасыщенных грунтах, расслоение бетонной смеси и т.д.

В случаях забивных свай причиной может служить нарушение техники производства работ при транспортировке, складировании и монтаже на стрелу сваебойных агрегатов, некачественное выполнение стыка составных свай, а также скрытые дефекты изготовления ствола свай (заводской брак), который невозможно определить визуально (микротрещины в стволе свай и неоднородность бетона). В результате динамического воздействия свай с подобными заводскими дефектами сплошность свай нарушается. Причиной развития трещин также может служить человеческий фактор, когда оператор корректирует вертикальность свай в процессе забивке.

Нарушение сплошности ствола свай может привести к значительному снижению несущей способности свай, как по грунту, так и по материалу свай.

В ряде случаев к контролю качества устройства свайных фундаментов относятся формально, и ограничиваются ведением журналов, актов, а также отбором образцов бетона при подаче. Последнее может служить лишь для косвенной оценки т.к. набор прочности бетона в кубиках и бетона в скважине различны. В связи с этим при устройстве свай необходима другая система контроля их качества.



Чтобы избежать серьезных погрешностей при строительных работах, связанных с нарушением сплошности ствола свай, необходимо производить оценку сплошности сваи неразрушающим методом сразу после их устройства с целью выявления дефектов на ранней стадии строительства. Для забивных свай перед началом использования также рекомендуется их проверить на наличие скрытых дефектов непосредственно на строительной площадке тем же неразрушающим сейсмоакустическим методом. При необходимости испытания сплошности свай можно проводить для существующих зданий и сооружений с целью оценки текущего состояния свай и выявления нарушения их сплошности.

Основными преимуществами неразрушающего сейсмоакустического метода можно считать: очень быстрое получение данных по любой свае на стройплощадке и возможность проверки большого количества свай в день; определение длины сваи в пределах 30 м; выявление дефектов разного характера в стволе железобетонной сваи; возможность диагностики любой сваи одним оператором самостоятельно.



A1. Одноосная волновая теория

Во время удара в теле сваи возникает волна. При наличии пустот, трещин и других повреждений, а также при взаимодействии сваи с окружающими грунтами возникает отраженная волна, которая распространяется в обратном к прямой волне направлении. Прямая и отраженная волны сталкиваются при прохождении по длине сваи. Этот процесс описывает одноосная волновая теория.

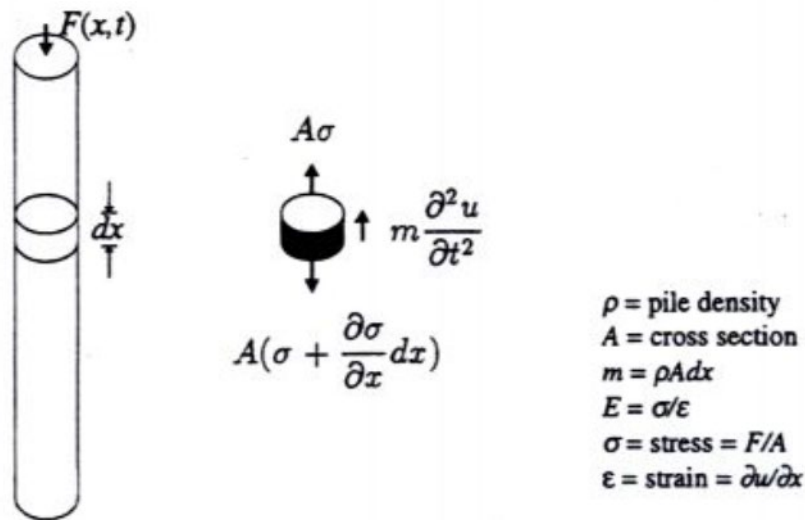


Рис. 1. Одноосный цилиндрический элемент.

В качестве введения в волновую теорию, рассмотрим цилиндрический элемент, не подверженный внешнему демпфированию или взаимодействию с грунтом (рис 1.). Элемент имеет плотность ρ , площадь поперечного сечения A , модуль упругости E . Этот элемент нагружен силой, зависящий от времени $F(t)$. Из 2-го закона Ньютона ($F = m A$) уравнение движения для малого элемента dx может быть представлено в виде:



может быть представлено в виде:

$$-\frac{\partial F}{\partial x} dx = (\rho A dx) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (\text{A.1})$$

где:

F - осевая сила в элементе;

x - координата Лагранжа;

u - смещение;

t - время.

По закону Гука сила F связана с относительными деформациями ϵ уравнением:

$$F = -EA\epsilon = -EA \frac{\partial u}{\partial x} \quad (\text{A.2})$$

Из уравнений (1) и (2) имеем:

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (\text{A.3})$$

Или

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{A.4})$$



где c есть характеристика скорости распространения волны.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{A.5})$$

Общее решение дифференциального уравнения (4) для перемещения и времени:

$$u = u^\downarrow(x - ct) + u^\uparrow(x + ct) \quad (\text{A.6})$$

Как видно, общее решение дифференциального уравнения содержит два слагаемых, которые описывают движение двух волн с равными скоростями, но в противоположных направлениях. Вдоль линий $(x + ct)$, называемых характерными, значения u^\uparrow и u^\downarrow постоянны и зависят от граничных условий

Для скорости v и для осевой силы F могут быть получены следующие уравнения:

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u^\downarrow}{\partial(x - ct)}(-c) + \frac{\partial u^\uparrow}{\partial(x + ct)}(+c) = v^\downarrow + v^\uparrow \quad (\text{A.7})$$

$$F = -EA \frac{\partial u}{\partial x} = -EA \left(\frac{\partial u^\downarrow}{\partial(x - ct)} + \frac{\partial u^\uparrow}{\partial(x + ct)} \right) = F^\downarrow + F^\uparrow \quad (\text{A.8})$$

Итак, пока v^\downarrow и F^\downarrow являются только функциями $(x - ct)$, а v^\uparrow и F^\uparrow являются только функциями $(x + ct)$, скорость и сила могут быть интерпретированы как сумма спускающейся и поднимающейся волн.

Из уравнений (7) и (8) получаем

$$F^\downarrow = Z v^\downarrow \quad F^\uparrow = -Z v^\uparrow \quad (\text{A.9})$$



где Z - импеданс элемента, определяемый как отношение движущейся силы к соответствующей скорости.

$$Z = \frac{EA}{c} = A\sqrt{E\rho} \quad (\text{A.10})$$

A2. Граничные условия для оголовка и пяты

Рассмотрим сваю конечной длины L , нагруженную половинной синусоидальной пульсирующей нагрузкой. Волна сжатия начинает движение вниз. Заметим, что только часть сваи между двумя характерными точками находится в движении со скоростью $v = F/Z$. Когда фронт волны достигает пяты сваи в момент времени $t=L/c$, возникает отражение, т. е. рефлексия.

Тип рефлексии зависит от характера закрепления конца сваи – свободного или заземленного (фиксированного).

A2.1. Свободный конец сваи

Для свободного конца граничным условием является то, что сила на конце равна нулю в любое время t , так как на свободном конце нет сопротивления. Итак, $F(x = L, t) = 0$.

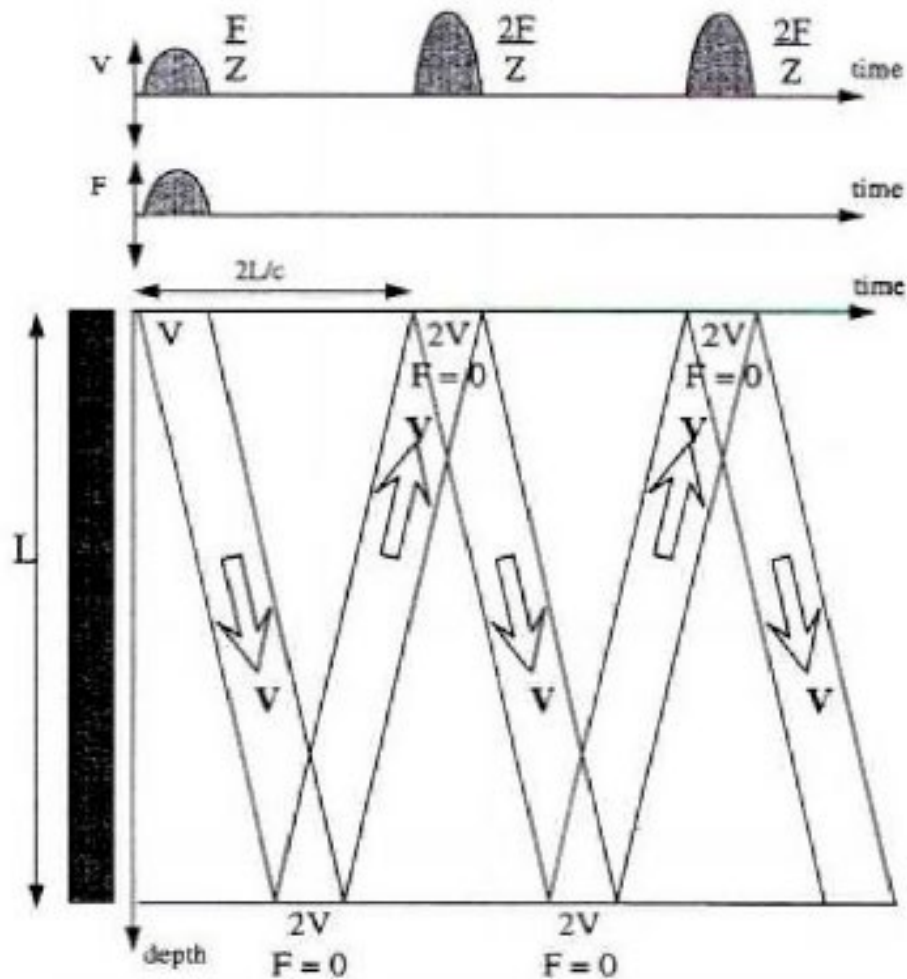
Или
$$F(L, t) = F^\downarrow(L, t) + F^\uparrow(L, t) = 0 \quad (\text{A.11})$$

$$F^\uparrow(L, t) = -F^\downarrow(L, t) \quad (\text{A.12})$$

Следовательно, в момент времени $t=L/c$ отраженная волна равна, но противоположна по закону входной волне на пяте. Отраженная волна – волна растяжения.



Рис. 2. Ответные волны на пульсационную нагрузку в свае со свободным концом



В пяте сваи, как показано на рис. 2, обе волны накладываются и результирующая сила равна нулю.



Скорости прямой и обратной волн определяются уравнениями:

$$v^{\downarrow} = \frac{F^{\downarrow}}{Z} = \frac{F}{Z} \quad v^{\uparrow} = \frac{F^{\uparrow}}{Z} = \frac{F}{Z} \quad (\text{A.13})$$
$$v(L,t) = v^{\downarrow}(L,t) + v^{\uparrow}(L,t) = \frac{2F}{Z}$$

Итак, скорости прямой и обратной волн имеют одинаковый знак и величину. В момент совпадения значение скорости удваивается.

В момент времени $t=2L/c$ обратная волна достигает свободного конца сваи и возникает другая рефлексия, возникает волна сжатия, которая опускается вниз

A2.2. Фиксированный конец сваи

Для фиксированного конца граничные условия состоят в том, что перемещение и скорость на конце равны нулю, так как фиксированный конец не смещается. Итак, $v(x=L,t) = 0$. Граничные условия определяются уравнениями:

$$v(L,t) = v^{\downarrow}(L,t) + v^{\uparrow}(L,t) = 0 \quad (\text{A.14})$$
$$v^{\uparrow}(L,t) = -v^{\downarrow}(L,t) = -\frac{F^{\downarrow}}{Z} = -\frac{F}{Z}$$
$$F^{\uparrow}(L,t) = -Zv^{\uparrow} = F^{\downarrow}(L,t) = F$$



Следовательно, для фиксированного конца обратная волна имеет такое же значение и знак, как и прямая. В этом случае обратная волна – волна сжатия.

В месте наложения волн скорость равна 0, а сила удваивается.

В момент времени $t=2L/c$ обратная волна достигает свободного конца сваи и возникает другая рефлексия, возникает волна растяжения, которая опускается вниз:

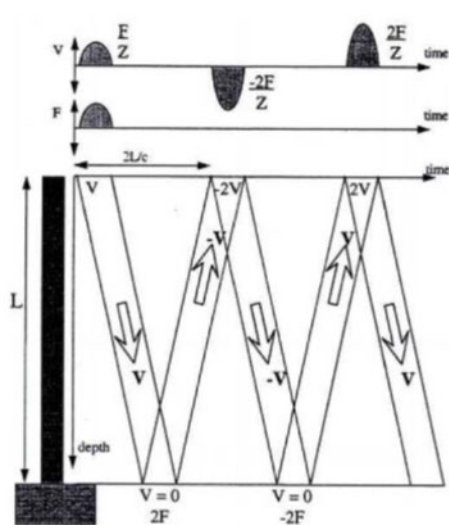


Рис. 3. Ответные волны на пульсационную нагрузку в свае с фиксированным концом

Из перемещения и скорости на голове сваи, мы можем заключить, что свая колеблется с начальной частотой f , а период T получается равным:

$$T = \frac{2\pi}{f} = \frac{4L}{c} = 4L\sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (\text{A.16})$$



А2.3. Влияние изменения площади бетона поперечного сечения сваи

Свободный и фиксированный концы свай – особые случаи наличия изменения площади поперечного сечения сваи в ее импедансе Z . Влияние изменения площади поперечного сечения сваи показано на рис. 4.

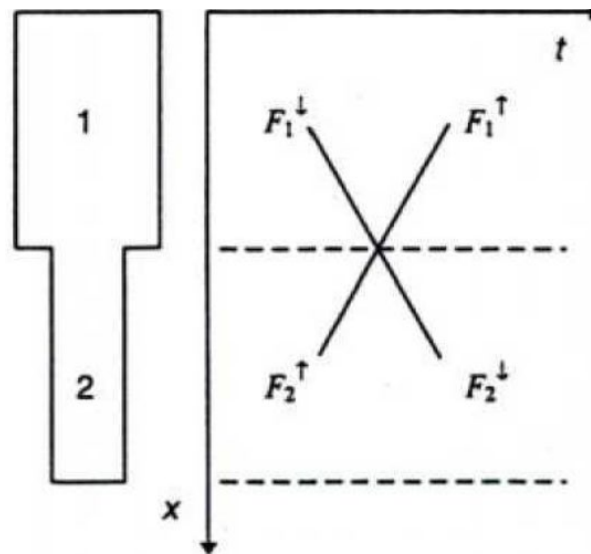


Рис. 4. Влияние изменения площади поперечного сечения сваи

В месте изменения сечения силы F и скорости v с разных сторон равны между собой.

$$F_1^\downarrow + F_1^\uparrow = F_2^\downarrow + F_2^\uparrow \quad (\text{A.17})$$

$$v_1^\downarrow + v_1^\uparrow = v_2^\downarrow + v_2^\uparrow \quad (\text{A.18})$$

Если мы рассматриваем какую-либо специфическую точку в определенный момент времени, то прямая волна в части 1 и отраженная волна в части 2 известны. Уравнения (17) и (19) дают возможность нам рассчитать движущуюся отраженную волну в части 2 и прямую волну в части 1.



$$F_2^\downarrow = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} F_1^\downarrow + \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} F_2^\uparrow \quad (\text{A.20})$$

$$F_1^\uparrow = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} F_1^\downarrow + \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} F_2^\uparrow \quad (\text{A.21})$$

Например, если площадь поперечного сечения сваи уменьшается в 2 раза ($Z_1 = 2Z_2$), то уравнения (20) и (21) можно записать в виде

$$F_2^\downarrow = \frac{2}{3} F_1^\downarrow + \frac{1}{3} F_2^\uparrow \quad (\text{A.22})$$

$$F_1^\uparrow = -\frac{1}{3} F_1^\downarrow + \frac{4}{3} F_2^\uparrow \quad (\text{A.23})$$

На рисунке 5 показаны рефлексии для сваи с изменением поперечного сечения

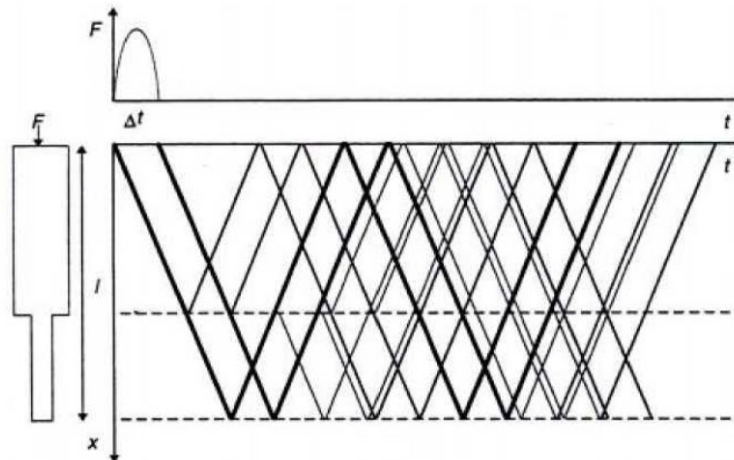


Рис. 5. Рефлексии в свае с изменением поперечного сечения.



Принципы контроля могут быть продемонстрированы ударом одиночного шара по ряду таких же шаров. Есть два варианта в зависимости от граничных условий: последний шар после удара движется свободно (свободный конец) или остается на месте (фиксированный конец). В каждом случае энергия удара передается от первого шара к следующему и так далее по линии (рис. 6а).

В случае свободного конца последний шар не передает энергию, а движется дальше. После этого ударный шар остается в покое. В случае фиксированного конца, последний шар не может передать свою энергию, и энергия отражается в обратном направлении. Энергия передается от шара к шару и, в конце, ударный шар отскакивает. Следовательно, по отскоку ударного шара можно судить о состоянии конца сваи (фиксированный или свободный конец). Даже в случае упругой фиксации конца сваи.

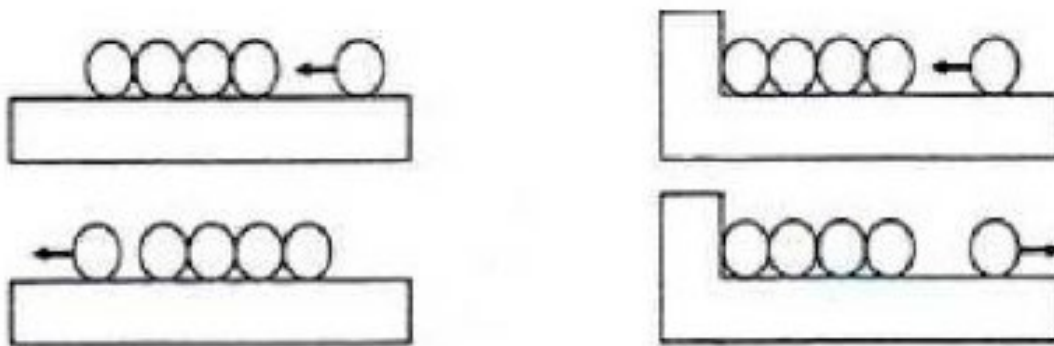


Рис. 6а. Удар шаров: свободный и фиксированный концы

Когда свая расположена в грунте, очень легко определяется состояние конца: свободный или фиксированный. Удар молотка по верхнему шару приводит его в движение.

Однако, реальная свая имеет на обоих концах упругое закрепление, что хорошо моделируется рядом шаров, соединенных между собой пружинами (рис. 6б). Итак, во время удара пружина под верхним шаром сжимается, передавая энергию к следующему шару. Верхний шар теперь имеет нулевую скорость. После удара энергия передается вниз по свае.

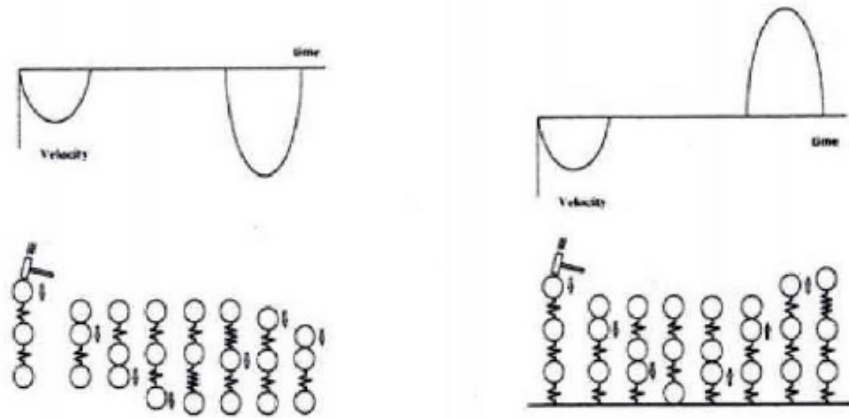


Рис. 66. Массы, соединенные пружинами: свободный и фиксированный концы.

В случае свободного конца, последний, неуспокоенный шар растягивает пружину, которая тянет предыдущий шар, и так по всей свае. Верхний шар снова движется вниз. Последовательность движения верхнего шара: в момент удара – вниз, затем покой, и опять вниз. Для фиксированного конца, последний шар сжимает нижнюю пружину, которая отталкивает этот шар вверх и так далее вверх по свае, верхний шар движется вверх. Последовательность движения верхнего шара: при ударе – вниз, момент покоя, движение вверх.

Скорость движения шаров «туда – сюда», т. е. скорость сжатия или растяжения пружин, это скорость волны сжатия c . Для более тяжелых шаров скорость волны сжатия ниже, а для более жестких пружин – выше. При свободном конце пружины сжаты, пока удар движется вниз (волна сжатия), и растянуты, когда вверх (волна растяжения). При фиксированном конце, пружины сжаты и при движении вверх, и при движении вниз.

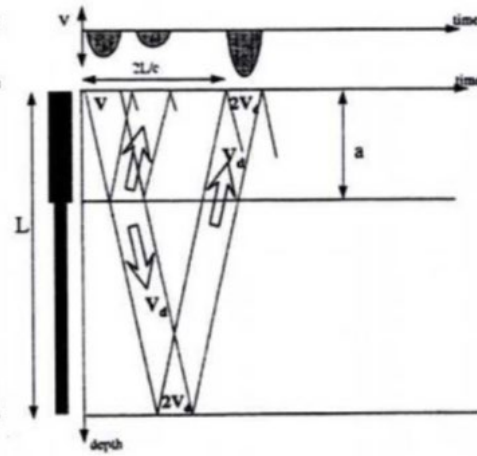
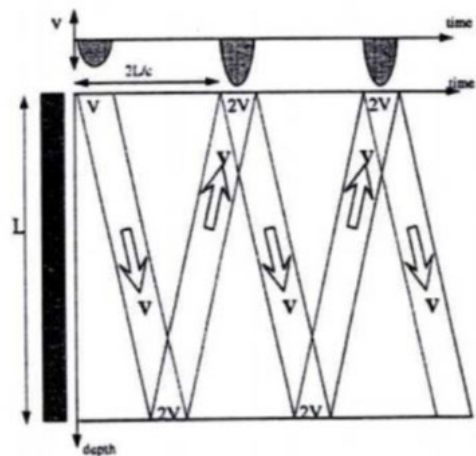
На рис. 7 показаны рефлексии для 6 основных случаев изменения поперечного сечения сваи со свободным концом (висячая свая) и фиксированным концом (свая – стойка).



Свободный конец

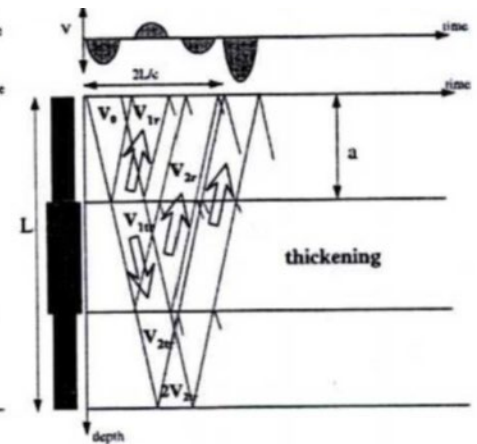
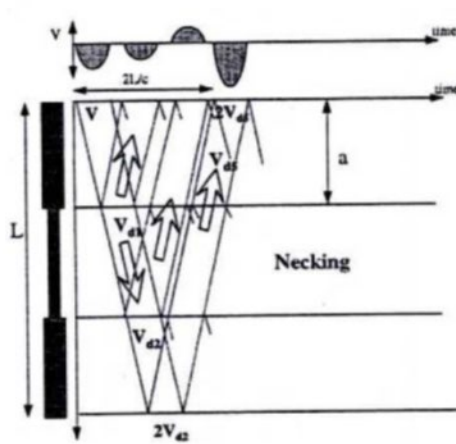


Свободный конец, утоньшение



Свободный конец, локальное утоньшение

Свободный конец, утолщение





Фиксированный конец



Фиксированный конец, утолщение

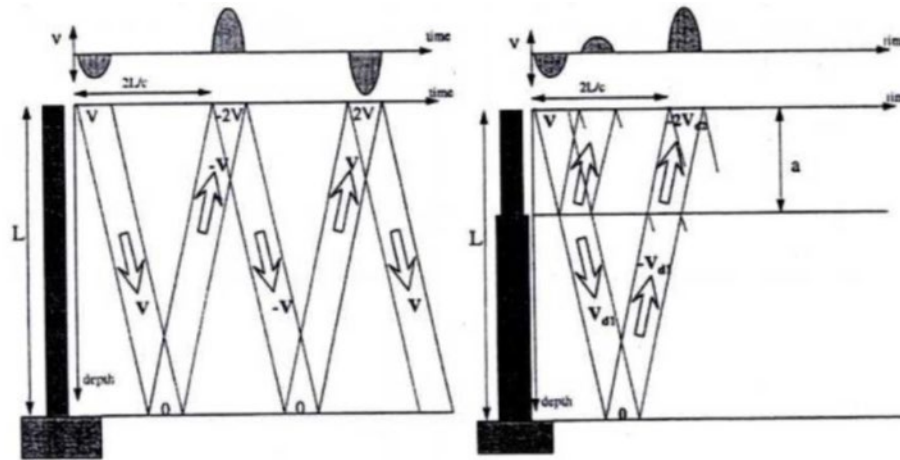


Рис. 7. Рефлексии для 6-и основных случаев изменения поперечного сечения сваи со свободным и фиксированным концами

А3. Взаимодействие сваи с грунтом

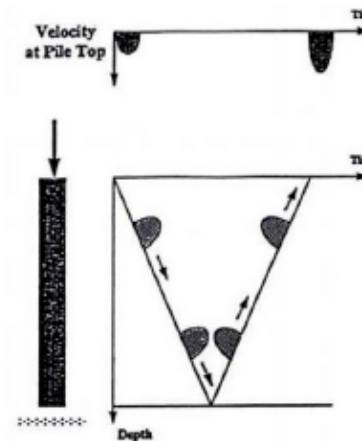


Рис. 8. Свободная волна в свае.



Для свободного конца сваи скорость показана как однозначное отражение.

Под воздействием бокового трения скорость прохождения волны снижается. Изменение слоев грунта от твердых к более мягким создает эффект некоторого уменьшения поперечного сечения сваи. Изменение слоев от мягких к более твердым создает эффект некоторого увеличения поперечного сечения сваи