



ISSN 2304-6295

Application of Low Strain Impact Testing to Spliced Driven Piles Quality Control

Churkin, Aleksei Andreevich^{1*} Ulybin, Aleksei Vladimirovich^{2**} Kapustin, Vladimir Viktorovich³

 ¹Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP), JSC Research Center "Stroitelstvo", Moscow, Russian Federation, <u>chaa92@mail.ru</u>
 ²OZIS-Venture LLC, Saint Petersburg, Russian Federation, <u>ulybin@mail.ru</u>
 ³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, <u>9704361@mail.ru</u>
 Correspondence:* email <u>chaa92@mail.ru</u>; contact phone <u>+79035592032</u>
 ** email ulybin@mail.ru ; contact phone +79217774516

Keywords:

Pile testing; Low strain Testing; Spliced driven piles; Guided waves; Elastic waves propagation; Length evaluation; Defectoscopy; Non-destructive testing

Abstract:

The object of research is an application of low strain impact testing methods to spliced driven piles quality control. The widespread opinion about the impossibility of using the method for examining composite driven piles is refuted by the results obtained in practice and requires clarification. **Method.** The techniques used to compensate for the limitations of the standard low strain testing methods when examining complex pile structures are enlisted. Information on the main design features of spliced driven piles is provided. **Results**. Models of the acoustic response behavior of different types of splices of composite piles are proposed. The features of using the low strain testing on structures of this type are highlighted. Examples of inspection of composite piles with splices of various types from the field practice of AIGEOS LLC (Moscow, Russia) and OZIS-Venture LLC (Saint-Petersburg, Russia) are given.

1 Introduction

Геофизические методы неразрушающего контроля качества свайных фундаментов различной технологии изготовления широко применяются в практике капитального строительства [1]–[4]. Наиболее развита практика применения методов, онованных на анализе направленных упругих волн в акустическом и ультразвуковом диапазонах частот [5].

Сейсмоакустический (low strain impact testing, SIT, Sonic) и межскважинный ультразвуковой (crosshole ultrasonic logging, CSL) методы рекомендованы к применению в отечественных нормативных документах, устанавливающих требования к способам контроля качества фундаментов [6]. К сожалению, в Российской Федерации отсутствуют нормативные документы, содержащие требования к практике применения методов, подобные существующим стандартам, вроде ASTM D5882 [7]. Разработки нормативно-технической документации по неразрушающему контролю качества свай ведутся на уровне отдельных организаций и групп организаций [8].

Возможность расширения области применения сейсмоакустического метода и его модификаций регулярно рассматривается в научной литературе. Исследования возможностей и ограничений метода с использованием численного моделирования [9], [10], натурных и модельных экспериментов [11], [12] представлены в профильной печати.

На практике часто возникает необходимость обследовать состояние железобетонных составных призматических свай. Сваи заводского изготовления применяются для организации фундаментов благодаря экономичности и скорости обустройства [1], [6], [13]. Необходимость в



возведении фундаментов повышенной несущей способности, имеющих значительную глубину заложения, вынуждает использовать составные сваи [14], [15].

Возможность использования сейсмоакустического метода для исследования стыкованных свай часто ставят под сомнение и относят к области ограничений метода [1], [3]–[4], [8], [16]. Однако результаты полевых работ демонстрируют возможность получения в ряде случаев данных, позволяющих определить глубину заложения фундамента, длины отдельных секций, дать оценку сплошности материала [17].

Объектом исследования настоящей статьи является анализ возможности применения сейсмоакустического метода для контроля качества составных забивных свай. Предметом исследования явилось изучение поведения акустического отклика зоны стыка секций и составной сваи в целом. Цель исследования состояла в описании особенностей интерпретации сигналов, полученных для забивных составных свай. Задачи исследования состояли в 1) выделении особенностей поведения зоны стыка при распространении через неё упругой волны; 2) демонстрации возможности использования сейсмоакустического метода для получения информации о длине составных свай; 3) рассмотрении различных способов интерпретации эхосигналов.

2 Materials and Methods

2.1 Сейсмоакустический метод контроля длины и сплошности свай

Неразрушающий контроль качества свай сейсмоакустическим методом основан на регистрации искусственно возбуждаемых в стволе сваи упругих волн с целью получения сведений о длине и сплошности бетона сваи [5], [7], [8], [16].

Анализ волнового поля основан на представлении о свае, как тонком линейно-упругом стержне, погруженном в однородное полупространство. Это позволяет рассматривать конструкцию в качестве акустического волновода и считать, что особенности регистрируемого с поверхности ее оголовка сигнала определяются в первую очередь изменениями акустического импеданса ее ствола [8], [9], вычисляемого по формуле

$$Z = \rho \cdot v \cdot S \tag{1}$$

где ρ – плотность материала сваи, v – стержневая скорость продольной волны в теле сваи, E – модуль Юнга, S – площадь поперечного сечения. Стержневая скорость вычисляется по формуле

$$v = \sqrt{E/\rho}$$
(2)

Коэффициент отражения R для плоской волны, распространяющейся по всей площади сечения сваи от границ участков с импедансами Z₁ и Z₂ определяется по формуле

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{\rho_2 \cdot v_2 \cdot S_2 - \rho_1 \cdot v_1 \cdot S_1}{\rho_1 \cdot v_1 \cdot S_1 + \rho_2 \cdot v_2 \cdot S_2}$$
(3)

Таким образом, на интенсивность регистрируемых отражений влияют заметные изменения геометрии сечения и свойств материала сваи.

Исследуемые сваи иногда не полностью удовлетворяют ограничениям «модели тонкого стержня» [11] и анализ регистрируемых сигналов оказывается затруднен по ряду причин:

- геометрические параметры сваи не позволяют считать ее «тонким стержнем»;

– акустическая жесткость вмещаших грунтов и наличие контрастных геологических границ не позволяет считать их «однородным полупространством»;

– свая не является отдельно стоящим элементом и включена в состав существующего ростверка.

Следствием этого являются ограничения метода, выделенные как в ходе анализа теоретических особенностей используемого приближения, так и определенные эмпирическим путем [4], [10], [16]. Погрешность определения длины сваи обычно оценивают в 5-10%.

Применение стандартной методики (рис. 1.а) для решения задачи обследования сложной свайной конструкции часто оказывается неэффективным, поэтому на практике используется ряд приемов, позволяющих обойти или компенсировать её ограничения [2], [8], [10]–[12], [18]–[23]:

Churkin, A.; Ulybin A.; Kapustin V.

Application of low strain impact testing to spliced driven piles quality control;



1. численный расчет волнового поля для модели, соответствующей параметрам исследуемой сваи и отражающей особенности вмещающих грунтов;

2. анализ сигналов не только во временной, но и в частотной области (с возможным использованием динамических атрибутов);

3. использование разночастотного возбуждения сигнала с молотками различного веса и материала бойка;

4. использование более сложных систем взаимного расположения источников и приемников:

– установка датчиков и выбор точки для нанесения удара относительно конструкции, в которую включена обследуемая свая (рис. 1.b);

– применение ультрасейсмического профилирования (ultraseismic method) в случае, если имеется доступ к боковой поверхности сваи на участке длиной около 2-3 м (рис. 1.с);

– бурение около исследуемого фундамента скважины и работа параллельным сейсмическим методом (parallel seismic method) (рис. 1.d).



Рис. 1 – Методики сейсмоакустического контроля свай: а – стандартная, b – обследование сваи в составе ростверка, с – ультрасейсмическое профилирование, d – параллельный сейсмический метод. Условные обозначения: 1 – приемник, 2 – источник, 3 – лучевые траектории распространения упругих волн, 4 – железобетон, 5 – заполенная водой скважина. Fig. 1 – Low strain impact testing methodics: a – standard, b – inspection of pile under the cap, c – ultraseismic profiling, d – parallel seismic testing.

Legend: 1 – reciever, 2 – source, 3 – ray paths of elastic wave propagation, 4 – reinforced concrete, 5 – water-filled borehole.

Применение перечисленных выше методик часто позволяет получить информацию о состоянии фундаментов, возможность обследования которых с применением стандартной методики представляется сомнительной с учетом его ограничений.

Несмотря на то, что использование метода для контроля качества составных забивных свай иногда позволяет получить искомую информацию о длине конструкций и их взаимодействии с вмещающим грунтом [17], в среде испытателей существует предубеждение против его использования. Данное мнение опирается на представление о том, что зона стыка отдельных секций сваи является источником непреодолимой помехи для дальнейшего прохождения волны или анализа зарегистрированного сигнала [16].



2.2 Составные железобетонные призматические сваи

Необходимость в использовании стыкованных свай возникает, когда помимо требований к скорости производства и стоимости работ появляются также специфические проектные требования к характеристикам фундамента: повышенной несущей способности, необходимости заглубления в залегающие на значительной глубине несущие грунты [14], [15]. В этой ситуации диапазон длин стандартно применяемых заводских свай (максимальные линейные размеры для односекционных свай сечением от 20х20 до 40х40 см составляют соответственно от 6,0 до 20,0 м) [13] оказывается недостаточным, и прибегают к использованию свай составной конструкции.



Рис. 2 – Распространенные в российской строительной практике конструкции стыка: а – сварной стык, b – болтовой стык, с – штифтовой стык, d – стаканный стык с закладным изделием, е – свободное опирание через кондуктор, f – шпоночный стык, g – клеевой стык, h – шарнирно стаканный стык.

Fig. 2 – Splice types common in Russian construction practice: a - welded splice, b – bolted splice, c – locking-finger splice, d – glass splice with embedded metal detail, e – free support through the jig, f – dowel splice, g – adhesive splice, h – hinged glass joint.

Выделим основные типы используемых конструктивных решений (рис. 2 дает обобщенные иллюстрации стыков различного типа и не претендует на полный охват модификаций и подвидов каждого из них):

1. Сварной стык (рис. 2.а) – осуществляется через соединение закладных деталей путем сварки непосредственно пластин закладных деталей, либо с использованием боковых накладок;

2. Болтовой стык (рис. 2.b) – соединение закладных деталей осуществляется за счет размещаемых в углах их поперечного сечения болтов;

3. Штифтовой стык (рис. 2.с) – соединение осуществляется за счет предусмотренных в конструкции металлического оголовника фиксирующих штифтов и гнезд для их заводки;

4. Стык стаканного типа с закладным изделием (рис. 2.d) – соединение производится за счет плотного сочленения оборудованной в верхней секции бетонной шпонки и оборудованного в нижней секции металлического стакана, в который часто устанавливают деревянный подбабок для предотвращения деформации стакана при забивке;

5. Свободное опирание (рис. 2.е) – секции соединяются с использованием инвентарного кондуктора;

6. Шпоночный стык (рис. 2.f) – соединение осуществляется за счет шпоночного выступа в верхней секции и шпоночного паза в нижней секции;

Application of low strain impact testing to spliced driven piles quality control;



7. Клеевой стык (рис. 2.g) – соединение осуществляется за счет заделки стержней верхней секции в подготовленные пазы в нижней секции, которая укрепляется эпоксидным или коллоидноцементным клеем;

8. Шарнирно-стаканный стык (рис. 2.h) – соединение производится за счет сочленения оборудованной в верхней секции бетонной шпонки и оборудованного в нижней секции гнезда, укрепляемого клеем.

3 Results and Discussion

3.1 Особенности акустического отклика составных свай

Наибольший интерес с точки зрения акустического отклика представляет зона стыка. Согласно [15], наиболее распространенные в российской практике типы соединения составных свай: сварное, стаканное, болтовое и штифтовое. Зона соединения секций, таким образом, чаще всего выполняется из закладных металлических деталей, плотность контакта между которыми достигается за счет различных технических решений. Менее распространенным является соединение «бетон-бетон», плотность контакта которого обеспечивается с применением повышающего адгезию клея. Можно предложить две модели поведения стыка при распространении по стволу сваи акустической волны.

В первом случае (стык через металлическую деталь) допустимо использовать подробно изученную в практике «большой» сейсморазведки модель высокоскоростного «тонкого слоя» («thin bed») – импеданс материала детали $Z_2 > Z_1$ материала сваи. Если распространяющаяся вдоль ствола сваи плоская продольная волна отражается от слоя, толщина которого h мала в сравнении с ее длиной волны λ , $h \le \lambda/8$ [24], то форма отраженного импульса (рис. 3.b) изменяется относительно формы падающего импульса (рис. 3.a), приобретая форму его производной в результате интерференции отражений от его верхней и нижней границы [25].



Рис. 3 – Тип зоны стыка и форма отраженного импульса: а – распространение волны по верхней секции, b – зона стыка с металлической закладной деталью, с – зона стыка «сваясвая».Условные обозначения: 1 – железобетон, 2 – метал, 3 – граница стыковки нижней и верхней секции, 4 – направление распространения волны, 5 – форма падающего и отраженного импульса.

Fig. 3 – Splice zone type and reflected pulse form: a – wave propagation through the upper section, b - splice zone with a metal embedded detail, c - "pile-pile" splice zone.Legend: 1 - reinforced concrete, 2 - metal, 3 - the border of splicing of the lower and upper sections of pile, 4 - direction of wave propagation, 5 - incident and reflected pulse shape.

Толщина зоны стыка при использовании металлических закладных деталей редко превышает первые см - десятки см, поэтому при возбуждении преобладающих длин волн λ в первые метры условие $h \le 0.2\lambda$ выполняется всегда и явление экранирования проходящей волны

Churkin, A.; Ulybin A.; Kapustin V.

Application of low strain impact testing to spliced driven piles quality control;



высокоскоростным слоем не наблюдается или оказывает пренебрежимо малое влияние на кинематику и динамику отраженной и проходящей волн [26].

В результате, при организации плотного стыка, не нарушенного в процессе погружения сваи и не подвергшегося коррозии при ее продолжительном взаимодействии с вмещающими грунтами, возбужденное в свае колебание проходит через зону стыка далее по её стволу, одновременно создавая отраженную волну с характерной формой импульса. Корректность данного предположения подтверждается как данными зарубежных испытателей (см. примеры сигналов, приведенные в [17] для составных свай с сварным стыком), так и представленными в тексте статьи результатами (см. разделы 3.2 и 3.3).

Согласно классической модели влияния тонкого высокоскоростного слоя на форму и амплитуду импульса, предложенной Widess'ом в [24], амплитуда отраженного импульса изменяется относительно амплитуды падающего с коэффициентом $\frac{4\pi h}{\lambda_h}$, где λ_h – преобладающая

длина волны в тонком слое. Таким образом, амплитуда волны, отраженной от зоны стыка, должна была бы отличатся от амплитуды проходящей волны на порядок, т.е. сливатся с акустическими шумами. Однако на регистрируемых на практике данных отражение от зоны стыка проявляется достаточно интенсивно. Следовательно, можно указать, что для рассматриваемого случая выводы, полученные при изучении распространения волн в геологической среде, применимы не полностью. Наблюдаемое явление может быть связано с тем, что в возбуждении отраженной волны участвуют все конструктивные элементы зоны стыка (в которую входят не только соприкасающиеся металические пластины и их крепление, но и усиленная арматура стыкуемых торцов). Поэтому реальная толщина вовлеченного в колебательное сечение слоя h меньше λ не на несколько порядков, а в несколько раз.

Во втором случае (контакт «бетон-бетон») плотное прилегание стыкуемых секций может никак не проявлятся на регистрируемых данных (отсутствует контраст импедансов, $Z_1 = Z_1$), либо создавать отраженную волну с сохранением формы исходного импульса, интенсивность которой будет обратно связана с плотностью контакта (рис. 3.с).

Для аналитического описания распространения плоской волны через зону стыка различной конструкции могут быть использованы решения, полученные для моделей волнового соударения стержней через различные типы «прокладок», применяемые в теории ударных машин [27].

Помимо отраженного импульса, появившегося при прохождении волны через стык секций, сигналы, полученные на забивных составных сваях, могут содержать характерные помехи, осложняющие их интерпретацию. В зависимости от соотношения длин секций на данных могут регистрироваться кратные отражения от зоны стыка; влияют контрастные по акустическим свойствам вмещающие грунты [18]; волны, распространяющиеся в конструкциях/ростверках, в которые включены обследуемые сваи. Некоторые из данных помех возможно обойти с использованием методических приемов, перечисленных в разделе 2.1.

3.2 Примеры полевых исследований ООО «ЭГЕОС» (AIGEOS LLC, Moscow, Russia)

Представленные результаты получены при обследовании составных забивных свай (тип стыка - сварной), расположенных в основании действующих заводских сооружений в Орловской области. Всего было испытано 342 сваи. Верхние и нижние секции свай имели различную длину (верхняя секция – 8 м, нижняя – 9-12 м). Для проведения испытаний использовался «Измеритель длины свай» (ИДС-1, производство ГК «ЛОГИС-ГЕОТЕХ» (LOGIS LLC, Moscow, Russia)). В качестве основного ударного источника использовался металический молоток (вес бойка – 100 г). При испытании первых десяти свай для определения оптимальной методики, помимо металического молотка использовались молоток из твердого пластика (вес бойка – 230 г) и резиновая киянка (вес бойка – 300 г).

Из-за необходимости проведения обследования в сжатые сроки использовалась следующая схема измерений: в боковом торце сваи вырубалась площадка, размеры которой позволяли установить в полученной полости регистрирующий датчик и свободно наносить рядом с ним удары молотком (рис. 4, слева). Площадка располагалась на удалении порядка 1,0 м от уровня «дневной поверхности» снизу и 1,0 метра от нижней грани плиты ростверка сверху (рис. 4, справа).



На полученных сигналах, несмотря на высокий уровень помех, удалось выделить однотипные по форме импульса отражения от зоны стыка (для некоторых свай – кратные отражения) и определить отражения от нижнего конца свай (рис. 5).



Рис. 4 – Испытания составных свай в составе существующего сооружения: фотография с полевых испытаний (слева) и схема проведения измерений (справа). Fig. 4 - Conducting test of composite piles in existing structure: field test photo (left) and a measurement scheme (right).



Рис. 5 – Пример результатов. Обозначения: 1 – момент удара, 2 – отражение/ кратное отражение от зоны стыка, 3 – положение стыка, 4 – нижний конец сваи. Типы ударных молотков: 01 – металический, 02 – из твердого пластика, 03 – резиновая киянка. Fig. 5 - Example of results. Legend: 1 - moment of impact, 2 - reflection / multiple reflection from the splice zone, 3 - splice location, 4 - lower end of the pile. Impact hammer types: 01 - metal, 02 - hard plastic, 03 - rubber mallet.

В качестве значения стержневой скорости было выбрано 3800 м/с (полученное при испытании недопогруженной нижней секции сваи в составе одного из фундаментов). Погрешность



определенных по результатам испытаний значений длины можно проанализировать с использованием предложенного в [28] параметра Extra Length Ratio

$$ELR = \frac{L_{measured} - L_{planned}}{L_{planned}},$$
(4)

где L_{measured} – длина сваи, определенная в ходе испытаний, L_{planned} – ожидаемая (проектная) длина сваи. На рис. 6 представлена диаграмма распределения испытанных свай (339 из 342 шт.) в зависимости от значения ELR. Как видно из приведенных данных, погрешность определения длины большей части свай располагается в пределах ±6%. Это говорит об удачном выборе значения стержневой скорости и о хорошем соответствии длины погруженных свай проектной.



Рис. 6 – Результат статистической обработки данных, полученных в ходе обследования. Fig. 6 - The result of statistical processing of the data obtained during the survey.

Для трех испытуемых свай из-за высокого уровня акустических шумов не удалось определить полную длину свай. Пример сигналов для одной из «аномальных» свай приведен на рис. 7. Выше точки установки датчиков визуально выделяется сквозная трещина, рассекающая поперечное сечение – с ее наличием связывается высокая интенсивность помех.



Рис. 7 – Пример результатов для сломанной около точки установки датчиков сваи. Слева – фотография с отмеченной трещиной, справа – данные для трех ударных источников (условные обозначения и нумерация молотков соответствуют Рис. 5). Fig. 7 - An example of the results for pile, broken near the sensor installation point. On the left - a photo with a marked crack, on the right - data for three impact sources (legend and hammer numbers corresponds to Fig. 5).

Churkin, A.; Ulybin A.; Kapustin V.

Application of low strain impact testing to spliced driven piles quality control;



3.3 Примеры полевых исследований ООО «ОЗИС-Венчур» (OZIS-Venture LLC, Saint-Petersburg, Russia)

Ниже представлен ряд результатов, полученных специалистами ООО «ОЗИС-Венчур» (OZIS-Venture LLC, Saint-Petersburg, Russia) на строительстве различных объектов промышленного и гражданского назначения в г. Санкт-Петербурге. Для проведения испытаний использовались прибор диагностики свай «Спектр-4» (производство НПП «ИНТЕРПРИБОР» (Interpribor LLC, Chelyabinsk, Russia) и ИДС-1.

Пример результатов для первого объекта испытаний (фундаменты жилого комплекса) представлен на рис. 8. Проектная длина испытуемых свай составляла 22 м (секции 10+12 м). Тип стыка между секциями сварной. Длина верхней части на момент проведения испытаний (после срубки) составляла ~8 м. Определенное экспериментально среднее значение стержневой скорости – 4100 м/с.

Представленные результаты испытаний для трех свай демонстрируют три варианта поведения отклика – ярко выраженные одно- и двукратное отражения от зоны стыка при отсутствии, крайне слабой выраженности или хорошей выраженности отражения от нижнего конца сваи. Можно предположить, что подобная разница в поведении регистрируемого отклика связана с плотностью контакта по зоне стыка, и, следовательно, количеством энергии колебаний, переданном в нижнюю секцию свай.



Рис. 8 – Результаты обследования составных свай (сечение 35х35 см, ожидаемая длина ~20 м). Слева – фотография с полевых испытаний, справа – данные для трех испытанных свай (условные обозначения соответствуют Рис. 5, описание дано в тексте). Fig. 8 - Inspection results of composite piles (section 35х35 cm, expected length ~ 20 m). Left - photograph from field tests, right - data for three tested piles (legend corresponds to Fig. 5, description is given in the text).

Примеры сигналов со второго (фундамент торгового центра) и третьего (фундамент жилого комплекса) объектов позволяют проиллюстрировать проявление на результатах измерения распространенных дефектов забивных свай (рис. 9). Тип стыка между секциями сварной. В первом случае (свая проектной длиной 19 м, длина верхней секции 7 м) на данных хорошо выделяется разрыв между верхней и нижней секциями по зоне стыка. Интенсивные многократные отражения не позволяют получить информацию о состоянии сваи ниже стыка.



Во втором случае (свая проектной длиной 20 м, длина верхней секции 8 м), несмотря на интенсивную помеху от предполагаемой трещины в верхней секции сваи, сохраняется возможность выделить на сигнале отражение, соответствующее нижнему концу сваи (значение стержневой скорости принято равным 3900 м/с).



Рис. 9 – Результаты обследования составных свай (сечением 40х40 см) с ярко выраженными дефектами: (сверху) разрыв зоны стыка; (снизу) трещина в верхней секции (условные обозначения соответствуют Рис. 5, описание дано в тексте). Fig. 9 - Inspection results of composite piles (section 40х40 cm) with pronounced defects: (top) rupture of the splice zone; (bottom) crack in the upper section (legend corresponds to Fig. 5, description is given in the text).

Результаты обследования для четвертого объекта (фундамент жилого комплекса; сваи проектной длиной 19 м, длина верхней секции 7 м) представлены на рис. 10. Значение стержневой скорости принималось равным 4000-4100 м/с. На сигналах уверенно выделяются как отражения от зоны стыка, так и нижний конец свай.

Интерес представляет ряд особенностей зарегистрированного отклика. Для двух свай из трех можно выделить кратное отражение от зоны стыка, однако оно отсутствует на сигнале для первой сваи. Это повторяет ситуацию, наблюдавшуюся на приведенных в разделе 3.2 данных – для свай одинаковых параметров, длина верхней секции у которых заметно меньше длины нижней, не всегда удается выделить двукратное отражение от зоны стыка, даже при успешном выделении однократного отражения. Кроме того, было зафиксировано различие в скоростях стержневой волны между отдельными секциями сваи, что дает определенную погрешность в определении длин при задании единой скорости волны для составной сваи.

Примеры результатов обследования составных свай, включенных в состав плитного ростверка, представлены на рис. 11 (фундамент в основании подземного паркинга жилого комплекса, сваи проектной длиной 18 метров, длина верхней секции 8 м). Значение стержневой скорости принималось равным 3900-4000 м/с. Толщина ростверка от 0,6 до 1,1 м. Расстояние между сваями в кусте около 1,0 м. Установка датчика и нанесение удара осуществлялись в точке расположения оси сваи (по данным исполнительной документации), выносимой на ростверк методами инженерной геодезии. Отражение от зоны стыка для представленных сигналов зашумлено помехой от ростверка, в который включены испытуемые сваи. Несмотря на наличие интенсивной помехи, на сигналах возможно выделить отражение от нижнего конца испытуемой



сваи, соответствующее ожидаемой длине. Что, в свою очередь, может служить косвенным критерием отсутствия нарушений сплошности ствола сваи.

Пикировка отражения от зоны стыка в приведенных выше примерах осуществлялась по первому регистрируемому пику прихода отраженной от стыка волны.



Рис. 10 – Результаты обследования составных свай (сечение 35х35 см): а – проведение испытаний; b, c, d – данные для трех испытанных свай (условные обозначения соответствуют Рис. 5, описание дано в тексте).

Fig. 10 - Inspection results of composite piles (section 35x35 cm): a - testing process; b, c, d - data for three tested piles (legend corresponds to Fig. 5, description is given in the text).



Рис. 11 – Результаты обследования составных свай (сечение 35х35 см), расположенных под ростверком: а – проведение работ; b, с – данные для двух испытанных свай (условные обозначения соответствуют Рис. 5, описание дано в тексте). Fig. 11 - Inspection results of composite piles (section 35х35 cm) located under the cap: a – testing process; b, c - data for two tested piles (legend corresponds to Fig. 5, description is given in the text).



4 Conclusions

С целью исследования возможности применения сейсмоакустического метода для контроля качества составных забивных свай были выделены характерные особенности их акустического отклика и представлены результаты полевых испытаний, подтверждающие выдвинутые предположения о применимости метода для обследования свайных фундаментов данного типа. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- Сейсмоакустический метод контроля длины и сплошности может быть применен для обследования состояния составных забивных свай. В случае обеспечения плотного стыка между секциями сваи возможно определение длины отдельных секций и контроль сплошности сваи.
- Характерные особенности акустического отклика зоны стыка могут позволить предположить тип контакта в зоне стыка (с применением металлических закладных деталей или без), и качественно оценить плотность контакта между верхней и нижней секциями (по интенсивности отражения от нижнего конца сваи), что представляет повышенный интерес при обследовании свай в составе давно изготовленных фундаментов.
- 3. Полученные на практике результаты продемонстрировали возможность определения длины составных свай, включенных в существующие сооружения и находящихся в составе ростверка.
- 4. Для надежного определения зоны стыка свай желательно иметь информацию о геологическом строении грунтового массива, вмещающего сваи.

5 Acknowledgements

Авторы статьи выражают благодарность генеральному директору ООО «ЭГЕОС» (AIGEOS LLC, Moscow, Russia) Мухину Александру Алексеевичу за предоставленную возможность использования рабочих материалов организации.

References

- 1. Fleming K., Weltman A, Randolph M, Elson K. Piling Engineering, Third Edition. CRC Press, Taylor and Francis Group. England, 2008. 408 P. DOI: 10.1201/b22272
- Klingmuller O. Sonic echo pile integrity testing and quality control. Ground Engineering. 1993. 26(10), Pp. 25–30. URL: https://cdn.ca.emap.com/wp-content/uploads/sites/13/1993/12/GE-December-1993-Sonic-echo-pile-integrity-testing-and-quality-control.pdf (date of application: 26.04.2021).
- 3. Turner, M.J. Integrity testing in piling practice. Construction Industry Research and Information Association, CIRIA Report 144. London, UK, 1997. 336 p.
- 4. Brettmann, T., Hertlein, B., Meyer, M., Whitmire, B. Guideline for interpretation of nondestructive integrity testing of augered cast-in-place and drilled displacement piles. Deep Foundations Institute. New Jersey, USA: DFI, 2012. 39 p. URL: http://www.dfi.org/publications.asp (date of application: 26.04.2021).
- Amir,J.M. Pile integrity testing: history, present situation and future agenda. Proceedings of 3rd Bolivian International Conference Deep Foundations. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, 2017. Pp. 17–32. URL:https://www.piletest.com/papers/Pile_integrity_testing_-_history_present_future.pdf (date of application: 26.04.2021).
- 6. Loseva, E., Osokin, A., Mironov, D., Dyakonov, I. Specific features of the construction and quality control of pile foundations in engineering and geological conditions of Saint Petersburg. Architecture and engineering. 2020. 5(2). Pp. 38–45. DOI: 10.23968/2500-0055-2020-5-2-38-45.
- 7. ASTM D5882 16 Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations. Developed by Subcommittee: D18.11. URL: https://www.astm.org/Standards/D5882.htm (date of application: 28.08.2020).
- 8. Mukhin, A.A., Lozovsky, I.N., Churkin A.A. AIGEOS LLC Technical Standards for the Nondestructive Pile Integrity Testing. Low Strain Impact Method. Geotechnics. 2020. No. 4. Pp.



68-78. URL: https://aigeos.ru/wp-content/uploads/2020/03/gt4-2019-muhin-aa-i-dr-tehnicheskie-standarty.pdf (date of application: 26.04.2021).

- 9. Churkin, A.A., Lozovsky, I.N., Zhostkov, R.A. Numerical modeling of seismoacoustic methods of pile quality control. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2020. 84(1). Pp. 124-127. DOI: 10.31857/S0367676520010093.
- 10. Wang, Z., Chen, L., Xiao, Z. Quantitative analysis of low-strain characteristics on defective piles with constriction or segregation. The Open Civil Engineering Journal. 2015. No. 9. Pp. 1–6. URL: https://benthamopen.com/contents/pdf/TOCIEJ/TOCIEJ-9-1.pdf (date of application: 26.04.2021).
- 11. Khmelnitsky, A.Yu., Vladov, M.L., Kapustin, V.V. Experimental research of host rock influence on acoustic wave propagation in pile structures. Engineering Survey. 2012. No. 6. Pp. 16-22. URL: http://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-inzhenernye-izyskaniya-62012/?attach=2225 (date of application: 26.04.2021).
- Churkin, A.A., Kapustin, V.V. The analysis of the dynamic properties of the acoustic signal for comparative assessment of the contact conditions of piles. Geotechnics. 2020. 12(3). Pp. 56–68, DOI: 10.25296/2221-5514-2020-12-3-56-68.
- 13. GOST 19804-2012. Svai Zhelezobetonnye Zavodskogo Izgotovleniya. Obshchie Tekhnicheskie Usloviya [Reinforced Manufactured Concrete Piles. General Specifications]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200101293 (date of application: 26.04.2021).
- 14. Bruce, R. N., Hebert, D. C. Splicing of precast prestressed concrete piles: part i-review and performance of splices. PCI Journal. 1974. 19(5). Pp. 70–97. DOI: 10.15554/pcij.09011974.70.97.
- Maier, V., Akhatuly, A., Alzhanova, R., Ptuhina, I.S. Optimal type of pile joint in consideration of main characteristics. Construction of Unique Buildings and Structures. 2015. 30(3). Pp. 143-151. DOI: 10.18720/CUBS.30.10
- 16. Mukhin, A. A., Churkin, A. A., Lozovskiy, I. N. Limitations of application area of low strain pile integrity testing. Transport Construction. 2018. No. 9. Pp. 20–24. URL: https://aigeos.ru/docs/2018_aigeos_ts_ogr_sonic.pdf (date of application: 26.04.2021).
- Bull, K., Castro, J.J., Nakada, K. Quality Control Acceptance Criteria Improvements for Pre-Stressed High Strength Concrete Pile Driving Operations in Japanese Building Construction. Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2018. 17(3). Pp. 519-524. DOI: 10.3130/jaabe.17.519
- Kapustin, V.V., Ushakov, A.L. Application of acoustics methods to investigate complex pile constructions. Geofizika. 2011. No 6. Pp. 65–70. URL: http://geofdb.com/en/articles/view?id=661 (date of application: 26.04.2021).
- Ulybin, A.V., Zubkov, S.V., Fedotov, S.D., Zakrevsky, A.Yu. Inspection of pile foundation before constructing additional storeys on existing buildings. Magazine of Civil Engineering. 2014. 48(4). Pp. 17–27. (rus). DOI: 10.5862/MCE.48.3.
- 20. Kharitonov, A.Yu.; Ulybin, A.V. Low Strain Integrity Testing of Piles. Application for Piles Located under Pile Cap. Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. Vol. 92, Article No 9201. DOI: 10.18720/CUBS.92.1.
- 21. Olson, L.D. Determination of Unknown Bridge Foundation Depths with NDE Methods. Proceedings of the Transportation Research Board Meeting. Washington, D.C, January, 2003. 18 p. URL: https://www.olsoninstruments.com/wp-content/uploads/Determination-of-Unknown-Bridge-Foundation-Depths-with-NDE-Methods.pdf (date of application: 26.04.2021).
- Wang, H., Hu, C.-H., Wang, C.-Y. Conditioning Inspection on Unknown Bridge Foundations. Proceedings of 11th European Conference on Non-Destructive Testing. ECNDT. Prague, Czech Republic, October 6-10, 2014. 8 p. URL: https://www.ndt.net/events/ECNDT2014/app/content/Paper/2_Wang_Rev1.pdf (date of application: 26.04.2021).
- Wang, H., Nguyen T. V., Wang C.-Y. Vertical Profiling Ultra-Seismic Inspection to Evaluate Model Pile Depths. Proceedings of NDE/NDT for Highways & Bridges. SMT, August, 2018. URL: https://ndtlibrary.asnt.org/2018/VerticalProfilingUltraSeismicInspectiontoEvaluateModelPile Depths# (date of application: 26.04.2021).
- 24. Widess, M. B. How thin is a thin bed? Geophysics. 1973. 38(6). Pp. 1176-1180. DOI: 10.1190/1.1440403.
- 25. Hilterman, F. J. Interpretation of amplitudes in seismic prospecting. Izdatelstvo Gers LLC, Tver, 2010. 256 p. URL: http://www.eage.ru/ru/publications/books.php?id=91 (date of application: 26.04.2021).

Churkin, A.; Ulybin A.; Kapustin V.

Application of low strain impact testing to spliced driven piles quality control;



- 26. Golikova, G.V., Kovtun, A.A., Lyskova, E.L., Sannikov, K.Yu. The effect of high-velocity layers on seismic wave field formation. Seismic Technologies. 2016. No. 4. Pp. 33-44. DOI: 10.18303/1813-4254-2016-4-33-44.
- 27. Manjosov, V. K. Longitudinal impact models. UISTU Press, Ulyanovsk, Russia, 2006. 160 p. URL: http://window.edu.ru/resource/281/26281/files/1367.pdf (date of application: 26.04.2021).
- Amir, E.I., Amir, J.M. Statistical analysis of a large number of PEM tests on piles. Proceedings of 8th International Conference on application of stress wave theory to piling. Lisbon, Portugal, 2008. Pp. 671–675. URL: https://www.piletest.com/papers/SW2008.Statistical_Analysis_of_a_Large_Number_of_PEM_Tes

ts_on_Piles.pdf (date of application: 26.04.2021).