



Low Strain Integrity Testing of Piles. Application for Piles Located under Pile Cap

KHaritonov, A.Yu.¹; Ulybin, A.V.^{2*}

¹ Technotest LLC, Moscow, Russian Federation

² OZIS-Venture LLC, Saint Petersburg, Russian Federation

* ulybin@mail.ru

Keywords:

Pile control; Pile length; Pile integrity; Pile cap; Grillage; Raft; Pulse echo method; Low strain test; Pile integrity test; Foundation survey

Abstract:

Pile diagnostics, namely the control of integrity and length, is a very urgent task both during the construction of buildings and structures and during their inspection. Regular conditions for control are the availability of free access to the pile head. However, in many cases, the task is complicated by the presence of a cap on piles. This significantly complicates not only the technology for measuring by Pulse Echo Method and the Transient Response Method, but also the process of received signal processing. The data obtained by numerical modeling and field tests in the “pile cap, pile, ground” system are presented in the article. It is shown that the waves transmitted across the boundary between a pile cap and pile are sequential and not in the form of a single pulse. If there are two or more piles in the “pile cap–pile–ground” system the signal response above the test pile will be “noisy” by reflections from neighboring piles. The possible options for performing measurements in case of lack of access to the pile head (the presence of a pile cap) are described in detail. Information about the location of the sensor and striking to wave generation is given. The construction of the new sensor which allows to measure on the side surface of the pile without creating a horizontal platform on the pile is briefly described. Examples of various objects with studied piles united by a cap are given. The investigated objects have a pile caps of various designs: continuous footing, pad, and slab foundation. On the graphics obtained as a result of measurement reflections from the pile toe are clearly identified. It has been practically shown that by using the method of filtering and comparing signals response on the test pile it is possible to control the length of piles located under the pile cap of various types and construction.

1 Introduction

Свайные фундаменты с использованием различных типов свай широко применяются в различных зданиях и сооружениях промышленного и гражданского назначения [1], [2], [3], [4]. Поэтому задача контроля параметров свай возникает довольно часто как на этапе исследования качества свайного поля в период его устройства, так и в процессе обследования для определения фактического технического состояния, выявления причин деформаций фундаментов, а также реконструкции зданий и сооружений [5], [6], [7]. Наиболее важным и в тоже время сложным для определения параметром является длина свай. В настоящее время в мировой практике [8], [9] и, в частности, в России [10], [11], [12], [13] широко применяется сейсмоакустический метод контроля железобетонных свай в различных его реализациях. Для стальных и деревянных свай метод используется редко. Возможности применения метода для контроля свай, изготовленных по относительно новым технологиям, например, для композитных свай [17], изучено слабо. Наиболее доступным и производительным является сейсмоакустический метод (эхо-метод, Sonic Integrity Testing (SIT) [14], Low Strain Impact Integrity Testing [15], Pile Echo Test [16]). В тоже время, несмотря на наличие большого количества приборов и значительного опыта применения метода, до сих пор нет единого представления о всех реальных возможностях и ограничениях метода.

Наиболее широкое внедрение метод получил для контроля железобетонных свай в свайном поле при его возведении (не зависимо от типа изготовления свай). В условиях свободного доступа к оголовку сваи и отсутствия объединяющей сваи конструкции (ростверка), и тем более здания, реализация метода является довольно простой и понятной. На горизонтальную поверхность оголовка (поверхность, перпендикулярную оси сваи) устанавливается датчик акселерометр (велосиметр). При помощи ручного молотка возбуждается колебание, часть которого распространяется вдоль сваи с т.н. стержневой скоростью. Отражения волны от конца сваи или дефектов (прочих акустических аномалий) регистрируются датчиком. Опытный специалист расшифровывает полученные рефлектограммы, применяя различные методы обработки сигнала (усиление, фильтрация, наложение, усреднение и пр.).

Однако существует большое количество объектов, на которых задача контроля свай появляется на стадии строительства, когда ростверк того или иного типа (столбчатый, ленточный, балочный, плитный) уже устроен над сваями. Еще больше сложностей возникает, при обследовании эксплуатируемых зданий (сооружений) на свайном фундаменте. По наблюдениям авторов данной статьи многие специализированные организации отказываются от выполнения работы по диагностике свай в таких условиях, считая их сложными, а метод неприменимым.

Испытание целостности свай в системах «ростверк, свая, грунт» с помощью ударного импульса является более сложным, чем отдельно стоящей сваи. Генерируемые источником исходящие волны, такие как продольные (P), поперечные (S) и волны Рэлея (R), многократно отражаются в ростверке. При этом реакция поверхности ростверка на отражения от пяты сваи скрыта множеством других отражений [18]. Если расстояние распространения вдоль поверхности значительно меньше по отношению к ширине импульса, которая определяется как произведение времени прохождения и линейной скорости, то прямые продольные, поперечные и релеевские волны складываются. Эти волны многократно отражаются от границ ростверка, частично передаваясь в нижележащие сваи. Энергия отраженных и передаваемых волн связана с толщиной фундаментной плиты и соотношением параметров бетона фундамента и сваи (плотность, модуль упругости). Распространение сжимающей волны по телу сваи зависит от однородности ствола сваи, и, при изменении импеданса, передаваемые волны отражаются от аномальных зон (поперечные трещины, сужение, расширение ствола, другие значительные дефекты). Фаза первого отражения находится в фазе или в противофазе с проходящими волнами в соответствии с уменьшением или увеличением импеданса сваи [19]. Пути распространения волн в фундаменте и свае показаны на рис. 1.

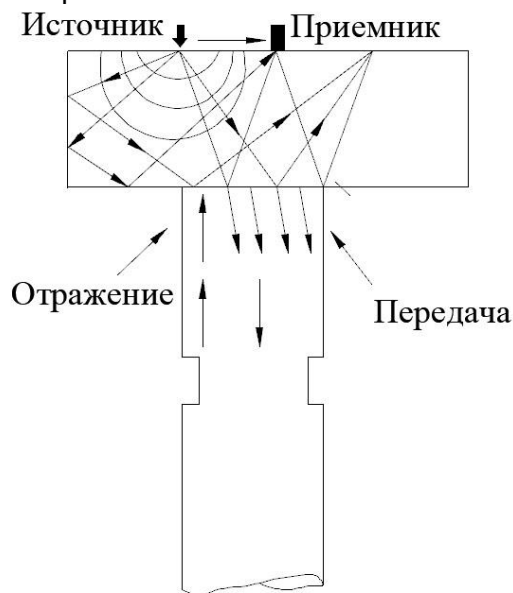


Рисунок 1 - Распространение волн в системе «ростверк-свая-грунт» при ударном воздействии
Figure 1 - Waves propagation in the “pile cap–pile–ground” system after impact

Несмотря на затруднения в обработке сигнала из-за наличия дополнительных источников отраженных колебаний, методика обработки полученного сигнала не является чрезмерно сложной.

Во-первых, при возбуждении колебаний в низкочастотном диапазоне, длины упругих волн (λ) составляют несколько метров и более. Исходя из известного правила отражения волн [9] при расстоянии до объекта (например, подошвы ростверка) менее $0,5 \cdot \lambda$ от точки установки датчика, отраженные колебания затухнут и не будут зафиксированы датчиком.

Во-вторых, если толщина конструкции ростверка значительна (более $0,5 \cdot \lambda$) или колебания возбуждены в высокочастотном диапазоне, что уменьшает длину волн, полученный график будет «зашумлен» высокочастотным эхом. Данные высокочастотные колебания, принятые датчиком, могут быть легко отфильтрованы в программных комплексах и полученный сигнал получит вид как со сваи без ростверка. Аналогичный прием является общепринятым для обработки рефлектограмм, полученных со свай с дефектом в верхней части.

Изложенные в имеющихся публикациях соображения не описывают возможность акустического контроля свай при наличии свайного ростверка. Такая возможность требует дополнительного исследования.

Объектами исследования являются акустический метод контроля свай и железобетонный свайный фундамент с ростверком.

Предметом исследования являются акустические сигналы при различных геометрических размерах ростверка.

2 Methods

В данном исследовании представлены результаты, полученные двумя методами: математическим моделированием системы «ростверк, свая, грунт», а также результаты натурных исследований свай, расположенных под различными зданиями и сооружениями.

Для имитации ответных реакций в системе «ростверк, свая, грунт» в программе ANSYS была создана модель железобетонного плитного ростверка на четырех сваях. Ростверк плановыми размерами $2,0 \times 2,0$ м и толщиной от 0,2 до 0,5 м. Свая железобетонная, призматическая, $0,4 \times 0,4$ м в поперечном сечении, длиной 5,0. Низ плитного ростверка и верх сваи полностью соприкасаются, а все сваи расположены симметрично относительно центра плиты ростверка. Для материалов ростверка и сваи принят коэффициент Пуассона равным 0,25, модуль Юнга 40 ГПа и плотность 2400 кг/м^3 . Модель дискретизирована минимум десятью элементами на длину волны. Возможное влияние арматурных каркасов и окружающего грунта на распространение волн в этом исследовании не рассматривается.

В ходе натурных исследований сейсмоакустическим методом использован прибор Спектр-4.3 (ООО «НПП Интерприбор», Челябинск, Российская Федерация). Исследования выполнены по методике ASTM D5882-16 [20], обработка полученных сигналов произведена в специализированном программном обеспечении к прибору.

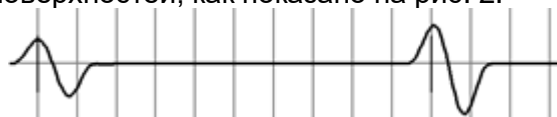
3 Results and Discussion

3.1 Результаты исследования модели

В результате исследования построенной модели были установлены следующие зависимости:

1. Влияние толщины плиты.

В данном случае влияние соседних свай не учитывается, т.е. рассматривается одна свая под плитой ростверка. Из-за наличия распределяющей конструкции (ростверка) энергия волн затухает. Чем меньше толщина плиты, тем меньше затухание волн и тем больше интенсивность волн, попадающих на границу пяты сваи и грунта. Таким образом, интенсивность отражений от основания сваи увеличивается. При уменьшении геометрических размеров боковых поверхностей, энергия отражений от них тоже уменьшается. Если толщина уменьшается с 0,5 м до 0,2 м, отражения от пяты сваи становятся более отчетливыми, как в ответных реакциях пяты, так и боковых поверхностей, как показано на рис. 2.



Свободностоящая свая

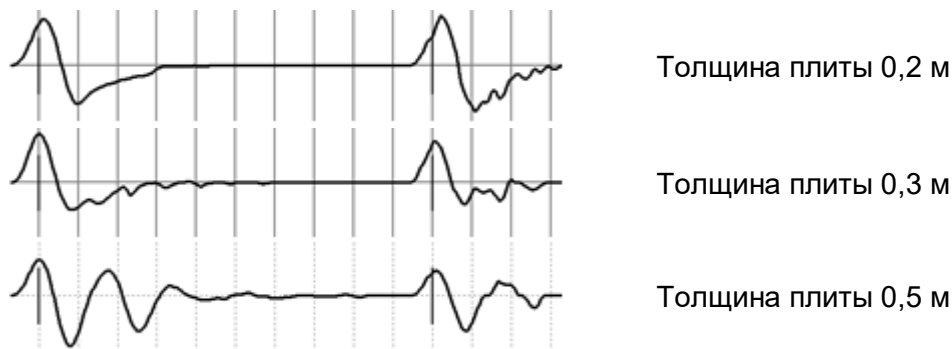


Рисунок 2 - Графики сигналов при различной толщине плиты ростверка
Figure 2 - Graphs of signals at different thickness of the pile cap

2. Влияние соседних свай.

Если в системе «ростверк, свая, грунт» имеется две или более свай, исходящие волны от источника по испытываемой свае могут передаваться в соседние сваи через плиту. В реальных условиях могут быть наличие в соседних сваях дефектов (непроектная длина сваи, местное сужение сваи и пр.). При этом передаваемые волны могут отражаться от дефектов, а отраженные волны распространяться в обратном направлении через плиту. В этом случае ответный сигнал на испытываемой свае может быть неопределенно «загрязнен» отражениями от соседних свай. Для изучения эффектов отражений от соседних свай в построенной модели рассмотрено несколько случаев:

- все четыре сваи не имеют отклонений,
- одна свая короче остальных на 20%,
- одна свая имеет сужение ствола на глубине 3 м (рис. 3).

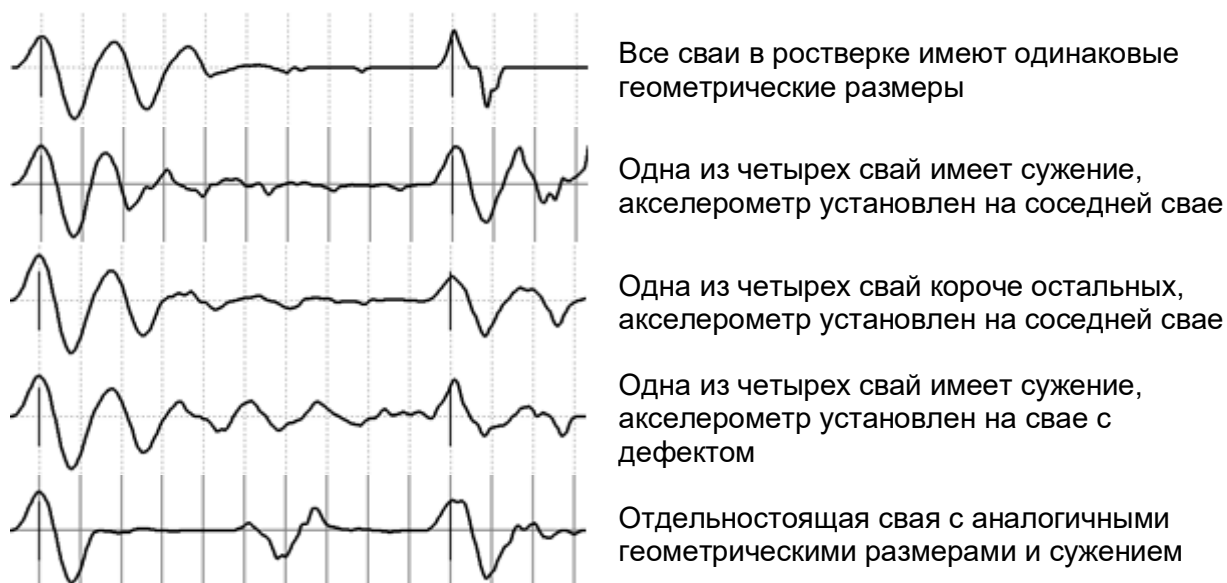


Рисунок 3 - Графики сигналов при наличии различных дефектов в свае, объединенных ростверком
Figure 3 - Graphs of signals in the presence of various defects in the piles, joined by a pile cap

На рис. 3 видно, что пик, соответствующий каждому отражению от границы свая-грунт, постепенно уменьшается с увеличением количества отражений. При наличии отражений от сужения сваи, пик отражений от пяты может увеличиваться из-за интерференции волн и становится более пологим. Так же хорошо видно, что если на отдельно стоящей свае отражения от места сужения и пяты сваи отчетливо можно определить, то в ответной реакции на свае, находящейся под ростверком, сужение скрыто многочисленными переотражениями. При этом пик отражений в районе сужения уменьшается в результате ослабления многократных отражений. Очевидно, что довольно сложно визуально, не имея сигнала от аналогичной отдельно стоящей сваи, оценить положение сужения на свае под ростверком. В этом случае при практическом применении данного метода необходимо снизить влияние дополнительных отражений с помощью

различных методов обработки сигналов или попробовать идентифицировать отражения от дефектов сваи путем сравнения ответных сигналов с разных свай.

Далее рассматриваются технологические нюансы проведения измерений, приводятся примеры диагностики свай и интерпретации результатов на реальных объектах.

3.2 Технологические аспекты

Одной из первых проблем, с которой сталкивается специалист при работе под ростверком, является отсутствие площадки для установки датчика непосредственно на свае. Для решения данной проблемы можно реализовать различные варианты, схематично представленные на рис. 4.

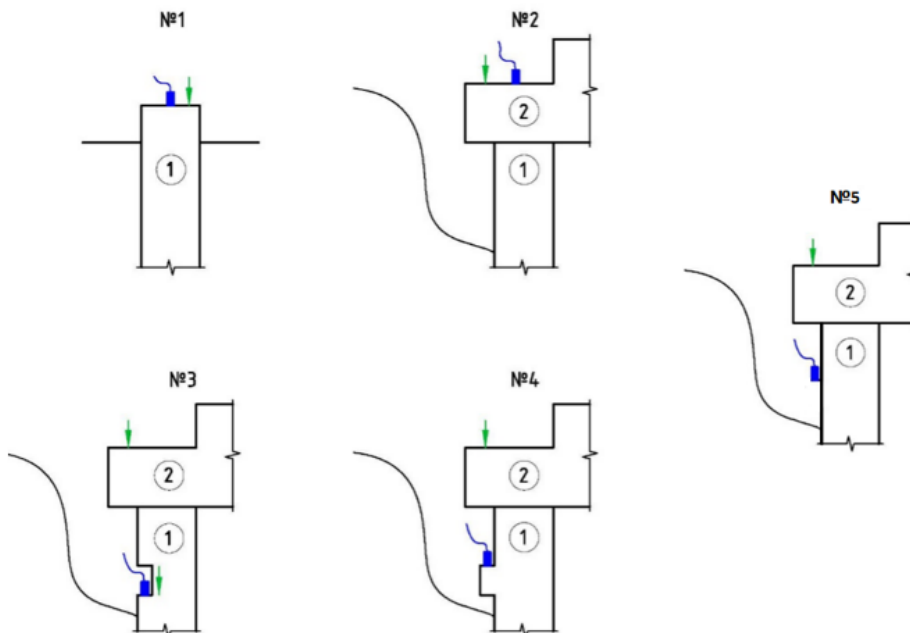


Рисунок 4 - Различные варианты установки датчика на сваю под ростверком
Figure 4 - Different variants of sensor installation on the pile under the pile cap

Вариант № 1 в данной статье подробно не рассматривается, однако может быть реализован и в случае наличия ростверка. Имеется ввиду отсечение сваи от ростверка путем среза всей площади сечения и демонтажа ее части. Несмотря на практическую возможность реализации такой подход характеризуется высокой трудоемкостью и является разрушающим.

Зеленой стрелкой на рисунках условно показано место возбуждения колебаний. С учетом наличия распределяющей конструкции (ростверка) соосность удара и оси сваи не обязательны. Упругая волна даже при небольшом смещении расположении точки возбуждения колебаний (или расположения датчика в варианте № 2) за пределы сечения сваи (его проекции на ростверк) будет передано в сваю, а отраженная достигнет датчика (см. рис. 1).

Вариант № 2 является самым простым с технологической точки зрения, но предполагает наличие точных данных о месте расположении сваи под ростверком, а также наличия свободного участка для измерения над сваей. Подход предполагает установку датчика над сваей непосредственно на ростверк. Нанесение удара в данном случае происходит также над сваей по ростверку. Тип ростверка (столбчатый, ленточный, плитный) в данном случае не накладывает существенных ограничений на реализацию метода. Больше значение играют рассмотренные выше факторы: толщина ростверка, шаг свай, а также отношение шага к толщине. С уменьшением величины последнего фактора реализация метода затрудняется. Значительным ограничением при работе через ростверк являются и условия заделки сваи в ростверк. В случае наличия дефекта в зоне стыка свай с ростверком или применения конструкции, не предполагающей передачу растягивающих усилий на сваю (изолированный оголовок на закарстованных территориях, уплотнение грунта сваями без соединения последних с ростверком) эффективность метода снижается вплоть до нуля. Возможность применения метода будет полностью зависеть от наличия акустического контакта между ростверком и сваей.

Варианты №№ 3 и 4 могут быть использованы, если на ростверке над сваей нет свободного участка, например, в случае расположения конструкций уже возведенного здания. Выполнение измерений осложняется тем, что для установки датчика необходимо подготовить горизонтальную

площадку (в общем случае: перпендикулярную к оси сваи). Для этого можно использовать два подхода. Первый из них предполагает устройство штрабы при помощи алмазного инструмента, размер которой напрямую зависит от габаритов применяемого датчика. В данном случае удар для возбуждения колебаний может быть нанесен как в уровне установки датчика (по штрабе), так и по ростверку сверху.

Второй вариант основан на установке на боковую поверхность сваи специальной консоли, на которую в последующем монтируется датчик. Обычно используется стальная консоль призматической формы, что, во-первых, придает ей достаточную жесткость, а во-вторых позволяет упростить монтаж датчика при наличии магнитной насадки. Крепление самой консоли к свае может быть, как механическим, так и магнитным при работе на стальных сваях.

Основным отличием между вариантами № 3 и № 4 является наличие площадки на ростверке для нанесения удара. В случае наличия последней могут быть использованы оба варианта установки датчика. При отсутствии свободной горизонтальной поверхности ростверка над сваем можно применить только вариант № 3, так как возбуждать колебание, нанося удар по консоли нельзя.

Вариант № 5 является наиболее удобным с технологической точки зрения, так как реализуется без устройства дополнительных площадок для установки датчика. В данном случае акселерометр устанавливается непосредственно на боковую поверхность сваи через специальный адгезив. При этом для реализации метода необходим датчик соответствующей формы и размеров. Датчики акселерометры данного типа имеются в комплектах таких приборов как NDE-360 (США) и PDA (США). В недавнее время датчик такого типа разработан для прибора «Спектр-4» (Россия). Отечественный датчик уже успешно прошел испытания на различных объектах (рис. 5).



Рисунок 5 - Два датчика, установленные на свае под ростверком: на консоль (справа) и непосредственно на боковую поверхность сваи (слева).

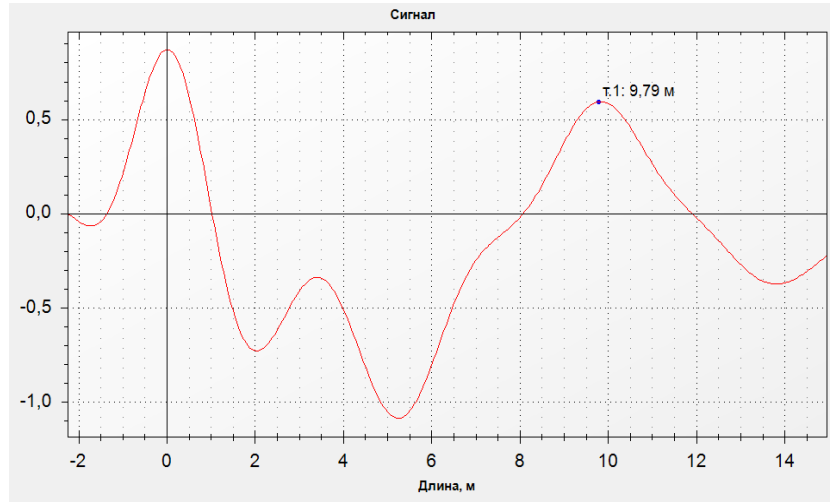
Figure 5 - Two sensors installed on the pile under the pile cap: using the console (right view) and on the side surface (left view)

3.3 Примеры реализации

Несмотря на ряд ограничений и трудности в обработке сигнала, метод хорошо реализуется в описываемых условиях. Далее представлены некоторые примеры успешных измерений, включая краткое описание объектов, условия установки датчика, общий вид процесса измерения и характерные рефлектограммы (рис. 6-9, a-b).



a



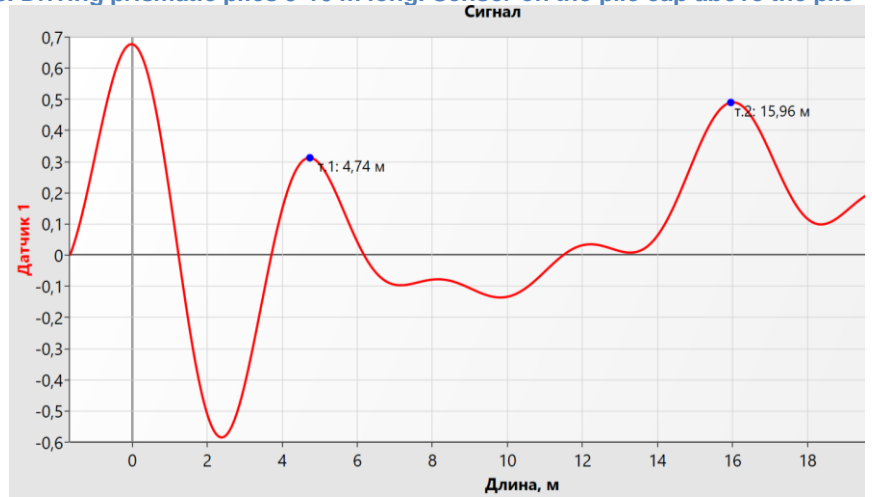
b

Рисунок 6 - Балочный (высокий) ростверк эксплуатируемого автодорожного моста. Забивные призматические сваи длиной 9-10 м. Датчик на ростверке над свай

Figure 6 - Crib of an operated road bridge. Driving prismatic piles 9-10 m long. Sensor on the pile cap above the pile



a



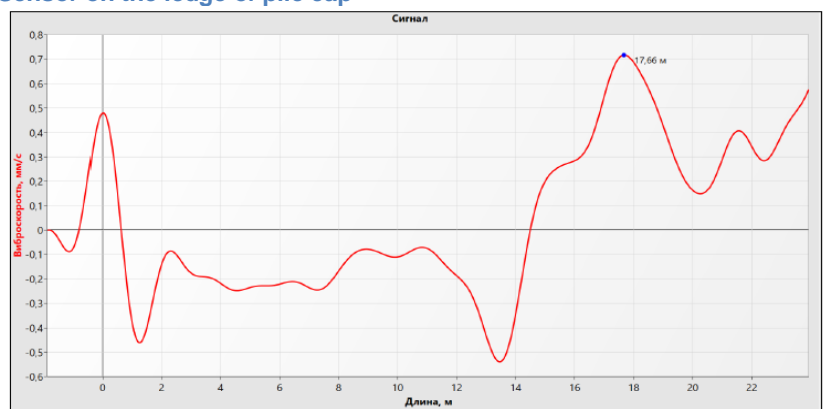
b

Рисунок 7 - Столбчатый ростверк неэксплуатируемого производственного каркасного здания. Забивные призматические сваи длиной 16 м. Датчик на уступе ростверка

Figure 7 - Columnar pile cap of an out-of-operation industrial frame building. Driving prismatic piles 16 m long. Sensor on the ledge of pile cap



a



b

Рисунок 8 - Плитный ростверк строящегося жилого здания. Бурунабивные сваи длиной 18 м

Figure 8 - Raft grillage of a residential building under construction. Auger piles 18 m long

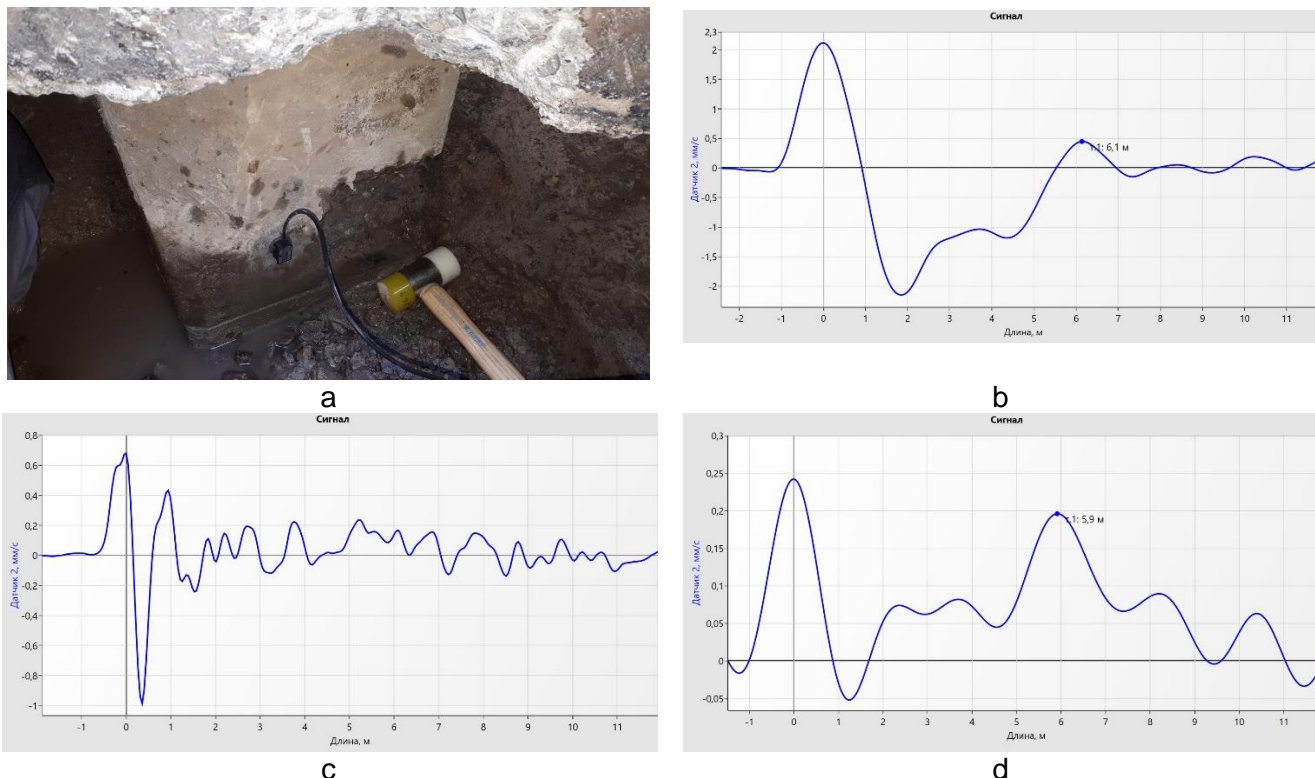


Рисунок 9 - Ленточный ростверк жилого здания. Забивные сваи длиной 6 м: а - боковой датчик, установленный на сваю, удар наносится по штрабе; б - сигнал, полученный при низкочастотном воздействии; с - сигнал, полученный при высокочастотном воздействии; д - высокочастотный сигнал после фильтрации 1,2 кГц

Figure 9 - Tape pile cap under the wall of an operated residential building. Driving prismatic piles 6 m long: a – side sensor on the pile, the impact produced by means of the raggle; b – low frequency exposure graph; c - high frequency exposure graph; d - low frequency exposure graph after 1,2 kHz filtering

4 Conclusions

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Существенное влияние на качество результатов испытаний в системе «ростверк, свая, грунт» оказывают геометрические размеры плиты ростверка над сваями. При ростверке большой толщины ударное воздействие, создаваемое ручным молотком, затухает и рассеивается. Также при большой длине свай эффективность метода может снизиться вплоть до нуля. Отражение возбуждаемого колебания от подошвы ростверка, а также других его граней, как правило, может быть отфильтровано при обработке сигнала.

2. Влияние шага свай и приближение его к толщине ростверка не оказывает столь существенного влияния на качество получаемых сигналов, как геометрические размеры ростверка, но обработка полученных результатов осложняется тем, что колебания от удара, нанесенного над исследуемой сваем распространяются через ростверк и по соседним сваям, находящимся в кусте. Отражения волн от соседних свай либо затрудняют интерпретацию, либо делают ее качественно невозможной. Это касается тех случаев, в которых одна из соседних свай имеет неопределенные аномалии и нет возможности провести сравнительный анализ путем сравнения ответных сигналов.

3. Для дальнейшего совершенствования возможности применения данного метода для системы «ростверк, свая, грунт» необходимо продолжить, как теоретические изыскания путем построения большего количества моделей, в том числе 3D моделей [21], учитывающих различные грунтовые условия и различные варианты расположения дефектов, так и практические опыты. В том числе с применением различных измерительных систем (с использованием двух разнесенных датчиков [22], с различным пятном и временем контакта ударного молотка и т.д.) [23].

References

1. Guades, E., Aravinthan, T., Islam, M., Manalo, A. A review on the driving performance of FRP

KHaritonov, A.Yu.; Ulybin, A.V.

Low Strain Integrity Testing of Piles. Application for Piles Located under Pile Cap;

2020; Construction of Unique Buildings and Structures; Volume 92 Article No 9201. doi:10.18720/CUBS.92.1

- composite piles. *Composite Structures*. 2012. 94(6). Pp. 1932–1942. DOI:10.1016/j.compstruct.2012.02.004.
2. Russo, G. Analysis and design of pile foundations under vertical load: An overview. *Rivista Italiana di Geotecnica*. 2018. 52(2). Pp. 52–71. DOI:10.19199/2018.2.0557-1405.52.
 3. Shafaghat, A., Khabbaz, H. Recent advances and past discoveries on tapered pile foundations: a review. *Geomechanics and Geoengineering*. 2020. Pp. 1–30. DOI:10.1080/17486025.2020.1794057.
 4. Poulos, H.G. Challenges in the design of tall building foundations. *Geotechnical Engineering*. 2014. 45(4). Pp. 108–113.
 5. Herrera, R., Jones, L.E., Lai, P. Driven concrete pile foundation monitoring with embedded data collector system. *Geotechnical Special Publication*. 2009. (185). Pp. 621–628. DOI:10.1061/41021(335)78.
 6. Li, G.W., Pei, H.F., Yin, J.H., Lu, X.C., Teng, J. Monitoring and analysis of PHC pipe piles under hydraulic jacking using FBG sensing technology. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 2014. 49(1). Pp. 358–367. DOI:10.1016/j.measurement.2013.11.046.
 7. Gelman, L., Kırilngiç, A.S. Novel vibration structural health monitoring technology for deep foundation piles by non-stationary higher order frequency response function. *Structural Control and Health Monitoring*. 2020. 27(6). DOI:10.1002/stc.2526.
 8. Amir, J.M. Pile Integrity Testing: History, Present Situation and Future Agenda. *Deep Foundations, Proceedings of 3rd Bolivian International Conference, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia*. 2017. Pp. 17–32.
 9. Rausche, F., Likins, G.E., Shen, R.K. Pile integrity testing and analysis. *Proceedings of the 4th International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles, Hague, The Netherlands*. 1992. Pp. 613–617.
 10. Kapustin, V.V. *Primenenie volnovykh metodov dlia opredeleniia dliny svai. Tekhnologii seismorazvedki*. 2009. 2. Pp. 113–117.
 11. Klinkova, K.I., Aleshin, D.N. *Obsledovanie fundamentov na svainom osnovanii s pomoshchiu metoda nerazrushaiushchego kontrolya. Nauka i molodezh problemy poiski resheniia Trudy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii studentov aspirantov i molodykh uchenykh Novokuznetsk*. 2011. 15. Pp. 204–208.
 12. Korobov, A.I., Burov, V.A., Dmitriev, K.V., Rumiantseva, O.D. *Rezonansnaia akusticheskaiia spektroskopiiia tverdykh tel Metodicheskaiia razrabotka spetspraktikuma kafedry akustiki. Lomonosov Moscow State University*. 2012.
 13. Mangushev, R.A., Ershov, A.V., Osokin, A.I. *Sovremennye svainye tekhnologii*. ACB, Moscow. 2010.
 14. Parrock, A., Hartley, F., Naidoo, D., Green, T. Results of some recent sonic integrity testing of piles. *Civil Engineering/Siviele Ingenieurswese*. 2004. 12(4). Pp. 9–13.
 15. Du, S., Li, D., Chen, Y. The study of the quantity of wave speed in low strain integrity testing of foundation pile. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. 170–173. Pp. 77–82. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.170-173.77.
 16. Basile, C., Saxena, D., Saxena, A. Value engineering optimizes foundation design and construction in Karst terrain - A case history. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering*. 2009. 3. Pp. 1949–1952. DOI:10.3233/978-1-60750-031-5-1949.
 17. Vatin, N., Ilizar, M., Nurmukhametov, R. Composite helical micro pile's bearing capacity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 890(1). Pp. 012037. DOI:10.1088/1757-899X/890/1/012037. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/890/1/012037> (date of application: 28.08.2020).
 18. Hassan, W., Veronesi, W. Finite element analysis of Rayleigh wave interaction with finite-size, surface-breaking cracks. *Ultrasonics*. 2003. 41(1). Pp. 41–52. DOI:10.1016/S0041-624X(02)00393-1.
 19. Chen, F., Wang, R.J. Dimension effect on low strain integrity testing of piles. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering-Chinese Edition*. 1998. 20(5). Pp. 92–96.
 20. 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).

KHaritonov, A.Yu.; Ulybin, A.V.

Low Strain Integrity Testing of Piles. Application for Piles Located under Pile Cap;

2020; *Construction of Unique Buildings and Structures*; Volume 92 Article No 9201. doi:10.18720/CUBS.92.1

21. Lu, Z.T., Liu, D.J., Long, L.L., Wang, F., Jing, W.Z. 3-D numerical computation for low strain integrity testing of piles. 2011. 34(6). Pp. 905–909.
22. Chai, H.Y. Integrity testing of piles in platform-pile systems. Proceedings of the International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Lisbon, Portuga. 2008. Pp. 429–434.
23. Chai, H.Y., Phoon, K.K., Zhang, D.J. Effects of the source on wave propagation in pile integrity testing. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2010. 136(9). Pp. 1200–1208. DOI:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000272.