BETOH N XEJE30BETO

УДК 624.155.113

DOI: https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-52-59

Д.Ю. СНЕЖКОВ¹, инженер;

С.Н. ЛЕОНОВИЧ^{1,2}, д-р техн. наук, иностранный академик РААСН (sleonovich@mail.ru); Н.А. БУДРЕВИЧ¹, инженер; MIAO JIJUN², инженер

¹ Белорусский национальный технический университет (220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65) ² Qingdao University of Technology (266033, China, 11 Fushun Rd, Qingdao)

Оценка качества буронабивных свай сейсмоакустическим и межскважинным ультразвуковым методами

Целью работы являлось исследование однородности структуры буронабивных свай, определение фактической их длины, выявление дефектов свай методами: межскважинный ультразвуковой (V3) мониторинг (CHUM – Crosshole Ultrasonic Method), эхоимпульсный метод (PEM – Puls Echo Metod). Объект исследования – буронабивные железобетонные сваи диаметром ~800 мм. На основе полученных в ходе экспериментальных исследований данных сделаны выводы о длине сваи, дефектах сплошности буронабивных свай.

Ключевые слова: сваи буронабивные, неразрушающий контроль, эхоимпульсный метод, межскважинный ультразвуковой мониторинг.

Для цитирования: Снежков Д.Ю., Леонович С.Н., Будревич Н.А., Miao Jijun. Оценка качества буронабивных свай сейсмоакустическим и межскважинным ультразвуковым методами // *Бетон и железобетон.* 2022. № 4–5 (612–613). С. 52–59. DOI: https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-52-59

D.Yu. SNEZHKOV¹, Engineer; S.N. LEONOVICH^{1,2}, Doctor of Sciences (Engineering, Foreign Member of RAACS (sleonovich@mail.ru); N.A.BUDREVICH¹, Engineer; MIAO JIJUN², Engineer ¹ Belorussian National Technical University (65 Prospect Nezavisimosti, Minsk, 220013, Republic of Belarus) ² Qingdao University of Technology (266033, China, 11 Fushun Rd, Qingdao)

Evaluation of the Quality of Bored Piles by Seismoacoustic and Interwell Ultrasonic Methods

The aim of the work was to study the uniformity of the structure of bored piles, to determine their actual length, to identify pile defects by methods: inter-well ultrasonic (US) monitoring (CHUM – Crosshole Ultrasonic Method), echo-pulse method (PEM – Puls Echo Method). The object of study is bored reinforced concrete piles with a diameter of ~800 mm. Based on the data obtained in the course of experimental studies, conclusions were made about the length of the pile, defects in the continuity of bored piles.

Keywords: bored piles, non-destructive control, echo-pulse method, interwell ultrasonic monitoring.

For citation: Snezhkov D.Yu., Leonovich S.N., Budrevich N.A., MIAO JIJUN. Evaluation of the quality of bored piles by seismoacoustic and interwell ultrasonic methods. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 4–5 (612–613), pp. 52–59. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-52-59

Устройство свайных фундаментов является одним из основных и важных видов работ в строительстве [1–3 и др.]. Как правило, некоторая часть буронабивных свай после их устройства имеют дефекты. Чтобы избежать серьезных проблем при строительных работах, связанных с нарушением сплошности ствола свай, необходимо производить ее оценку неразрушающим методом сразу после их устройства с целью выявления дефектов на ранней стадии строительства. Основные преимущества неразрушающего метода: быстрое получение данных и возможность проверки большого количества данных; определение длины сваи в пределах 80 м; выявление дефектов разного характера в стволе сваи; возможность

диагностики любой сваи одним человеком самостоятельно [4–7].

Методика испытаний и приборы контроля

Основу метода CHUM составляет продольное профилирование тела сваи путем регистрации скорости/времени распространения ультразвукового импульса в направлении, поперечном по отношению к оси буронабивной сваи [8, 9]. Генерацию и прием УЗ импульса производят отдельными преобразователями, которые размещают в трубах доступа (ТД), предварительно заполняемых водой. Оба преобразователя устанавливаются на одном горизонтальном уровне, после чего производится измерение

BETCH N XENE30BETC



Puc. 1. Схема проведения испытаний межскважинным ультразвуковым методом CHUM (ASTM D6760-16 «Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing»)

Fig. 1. Scheme of testing by ultrasonic crosshole testing method CHUM (ASTM D6760-16 «Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing»)



Рис. 2. Ультразвуковые сенсоры и датчики погружения в рабочих позициях на каналообразующих трубах испытуемой сваи **Fig. 2.** Ultrasonic sensors and immersion sensors in working positions on the channel-forming pipes of the tested pile

скорости/времени распространения УЗ импульса. После регистрации УЗ импульса преобразователи смещаются на один шаг профилирования и процедура измерения повторяется. Принципиальная схема представлена на рис. 1. Ультразвуковые сенсоры и датчики погружения в рабочих позициях представлены на рис. 2.

Испытания целостности конструкции методом РЕМ (рис. 3) осуществляется путем формирова-



Puc. 3. Испытания методом PEM **Fig. 3.** PEM testing

ния импульса акустической волны и регистрации импульсов, возникающих при отражении зондирующего импульса от неоднородностей в теле сваи (Standard ASTM D5882-16: «Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations»). Информационными параметрами являются измеренные колебательные скорости и ускорения зон контроля при прохождении акустической волны в теле сваи и характеристические временные интервалы, соответствующие глубине расположения участков отражения акустического импульса. Ориентировочное значение скорости распространения акустической волны в бетоне сваи определялось по ГОСТ 17624-2012 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности» ультразвуковым прибором «Пульсар-2.2 ДБС».

Отражение волны от границы раздела сред происходит из-за изменения полного акустического импеданса сваи.

Акустический импеданс Z определяется как:

$$Z = S \cdot \sqrt{E \cdot \rho},\tag{1}$$

где *S* – площадь сечения сваи; *E* – модуль упругости; *ρ* – плотность материала сваи.

Любое изменение *S*, *E* или р приведет к изменению импеданса и, как следствие, к отражению аку-

Научно-технический журнал



Рис. 4. Влияние формы сваи на форму акустического отклика **Fig. 4.** Influence of the pile shape on the shape of the acoustic response



Рис. 5. Состав измерительного комплекта «Пульсар-2.2 ДБС»: 1 – электронный блок; 2 – разъемы для подключения УЗ датчиков; 3 – разъем для подключения датчиков длины кабеля; 4 – УЗ датчик; 5 – смотчики кабеля; 6 – кабель для подключения УЗ датчиков (10 м); 7 – датчик положения (энкодер) H1; 8 – датчик положения (энкодер) H2

Fig. 5. The composition of the measuring set «Pulsar-2.2 DBS»: 1 – electronic unit; 2 – connectors for connecting ultrasonic sensors; 3 – connector for connecting cable length sensors; 4 – ultrasonic sensor; 5 – cable winders; 6 – cable for connecting ultrasonic sensors (10 m); 7 – position sensor (encoder) H1; 8 – position sensor (encoder) H2

стической волны. Отражения могут быть вызваны следующими причинами: достижением акустической волны конца сваи; уменьшением/увеличением поперечного сечения; потерей сплошности (попаданием грунта, воды, воздуха в тело сваи, образованием поперечных трещин); изменением физикомеханических свойств бетона по длине сваи; контрастной сменой слоев грунта по глубине расположения сваи.

Не вызывают отражения следующие дефекты: постепенное (на протяжении нескольких диаметров)

2 3

Н И ЖЕНЕЗИК

Рис. 6. Схемы расположения труб доступа (ТД) и трасс (сечений) по методу CHUM: <u>1-2</u> – направление трасс испытаний бетона опытных свай

Fig. 6. Layouts of access pipes (AP) and routes (sections) according to the CHUM method: 1-2 - - direction of concrete testing routes for experimental piles



Рис. 7. Общий вид прибора «Спектр-3.0»: 1 — сейсмоприемник; 2 — устройство для записи, обработки и отображения данных **Fig.** 7. The «Spektr-3.0» device: 1 — geophone; 2 — device for recording, processing and displaying data

изменение диаметра сваи; изогнутая форма сваи; мелкие дефекты.

От знака изменения импеданса на границе раздела сред зависит знак отражения (рис. 4).

Приборы и оборудование

Ультразвуковые измерения по методу СНUМ выполняются с использованием приборного комплекса «Пульсар-2.2 ДБС». Состав комплекса приведен на рис. 5.

Для проведения испытаний в стволы изготавливаемых опытной и анкерных свай в арматурные кар-



Рис. 8. План расположения буронабивных свай **Fig. 8.** Plan of the location of bored piles

касы устанавливаются вертикальные металлические трубы (каналы) доступа (ТД) с внутренним диаметром >50 мм, заполняемые водой.

Изготовление опытных свай предусматривает установку трех (четырех) труб доступа. На рис. 6 показана схема прозвучивания тела сваи в плане ее поперечного сечения. Это позволяет произвести измерения по трем направлениям (рис. 6), захватывающим периферию сечения сваи, где наиболее вероятно образование дефектов сплошности.

Крепление труб к каркасу должно обеспечивать их вертикальность и неизменяемость положения во время бетонирования. Отклонение труб доступа от вертикали не должно превышать 1–1,5% по длине ствола. Нижний торец труб должен находиться на уровне нижнего торца сваи. На нижних торцах труб были установлены заглушки для обеспечения герметичности канала доступа. Для верхних торцов труб были предусмотрены съемные (срезаемые) заглушки в целях предохранения трубы от попадания в них бетона и посторонних предметов.

Испытания целостности конструкции методом РЕМ выполняются с использованием приборного комплекса «Спектр-3.0». Состав комплекса приведен на рис. 7.

Сейсмоприемник 1 воспринимает механические колебания исследуемого объекта, преобразует их в электрический сигнал и передает его в электронный



Таблица 1 Table 1

Результаты ультразвуковых измерений Results of ultrasonic tests

№ сваи	Среднее время распространения УЗ импульса, мкс	Средняя скорость распространения УЗ импульса (база 0,12 м), м·с ⁻¹				
1оп	30,4	3947				
2оп	30,35	3954				
Зоп	30,31	3960				
4оп	30,85	3890				
5оп	Не было доступно					
6оп	Не было доступно					

Таблица 2 Table 2

Результаты контроля свай сейсмоакустическим методом (PEM) Results of Pile Inspection by Puls Echo Metod (PEM)

№ сваи	Глубина эхоотклика УЗК, м					Предполагаемая		
	Echo 1	Echo 2	Echo 3	Echo 3	Echo 5	Echo 6	длина	примечание
1оп	3	5–6	11–13	17	20	23	28–29	
2оп								
Зоп		7	11–12		19	25–27	27	
4оп	2,5	8–9	11	15–16	20		29–31	
5оп								
6оп								

Таблица 3 Table 3

Результаты межскважинного УЗ мониторинга свай Results of cross-well ultrasonic monitoring of piles

№ сваи	Трасса измерений		Нижняя отметка, м					
1оп	1–2	3	5–7	12	20,5	23–24	27	29,5
	2–3	2–6	-	-	-	_	28	29,5
	1–3	2–6	-	13	-	-	-	29,5
2оп	1–2	2–11*	12–15				29,5	
	2–3	2–11*	12–17				29,5	
	1–3			12–15				29,5
Зоп	1–2			7!	12,5–20*			27,5
	2–3			9				27,5
	1–3	1–2!	2,4–4,5	7!				27,5
4оп	1–2	(1–2)	2,5–4!	7,5–9,5				29,5
	2–3	(1–2)	2,5–4!	8–9	16–17,5			29,5
	1–3		2,5–4!		17,5–22			29,5
5оп	1–2	(2)	(5)					9
	2–3							9
	1–3	(1,5–2)						9
6оп	1–2	(2,5)	(8,5)	-	-	_	_	9
	2–3	(2,5)	(7)	-	-	_	_	9
	1–3	_	_	_	_	_	_	9
Примечания: В скобках – одиночные отсчеты со снижением скорости УЗК на 1-2 %; * – снижение скорости УЗ импульса на								

Примечания: В скобках – одиночные отсчеты со снижением скорости УЗК на 1–2 %; * – снижение скорости УЗ импульса на 2,5–3,5 % на значительном интервале отметок; ! – значительное (>5%) снижение скорости УЗК; остальные значения соответствуют одиночным отсчетам со снижением скорости УЗК на 2–3%.

BETOH N XENE30BETOH



Рис. 9. Ультразвуковой профиль сваи 10n **Fig. 9.** Ultrasonic pile profile 10n

блок 2. Электронный блок оцифровывает сигнал, производит запись и последующую обработку полученного сигнала. Электронный блок выполнен на основе планшетного компьютера под управлением OC Android.

Результаты испытаний

Испытаниям подвергались опытные сваи: 1оп, 2оп, 3оп, 4оп; две сваи, подготовленные для испытаний на выдергивание: 5оп и 6оп (рис. 8)

Для определения скорости распространения акустической волны *V* были выполнены ультразвуковые измерения на выступающих из грунта оголовках свай. Результаты измерений приведены в табл. 1–3.

Свая 1оп

Для сваи 1оп наблюдается значительная неоднородность структуры сваи в интервале отметок от -1 до -6 м, проявляющаяся раз-

ницей (более 10%) во времени распространения УЗ импульса по трем измерительным траекториям с выраженными пиками отклонений времени на отметках -3, -7, -12, -23 м (рис. 9). Указанные оценки хорошо коррелируют с данными сейсмоакустического метода (рис. 10). Длина сваи, по данным сейсмоаку-



Puc. 10. Рефлектограммы сваи 10n **Fig. 10.** Reflectograms of pile 10n



Puc. 11. Ультразвуковой профиль сваи 2оп **Fig.11.** Ultrasonic pile profile 2on







Рис. 12. Ультразвуковой профиль сваи Зоп **Fig. 12.** Ultrasonic pile profile Зоп



Puc. 13. Рефлектограммы сваи Зоп **Fig. 13.** Reflectograms of pile Зоп

стического метода, составляет 28–29 м; по данным УЗ испытаний – 29,5 м.

Свая 2оп

Для сваи 2оп выполнялся только УЗ мониторинг (рис. 11). Сейсмоакустический метод не ис-

Scientific and technical journal



Рис. 14. Ультразвуковой профиль сваи 40n **Fig. 14.** Ultrasonic pile profile 40n

пользовался из-за невозможности доступа к поверхности оголовка сваи. Выявлена выраженная зона неоднородности бетона в интервале отметок -12,5–15 м. В интервале отметок 2–11 м по всем траекториям наблюдалось равномерно «размытое» пониженное значение скорости УЗ на уровне 3% от среднего по всей свае.

Свая Зоп

По данным УЗ мониторинга за-

регистрированы пиковые неоднородности структуры сваи в интервале отметок от -1–2 м, -2,5 – -4,5 м и на отметке -7 м, проявляющие себя разницей (~30%) во времени распространения УЗ импульса по двум измерительным траекториям. В интервале отметок -12,5 – -20 м наблюдалось равномерно «размытое» пониженное значение скорости УЗ на уровне 3–5% от среднего по всей свае (рис. 12). Наличие дефектов на отметках -7 и -12 м было подтверждено. Дефекты на отметках -2,5 и -4,5 м не обнаружены, что может свидетельствовать об их появлении после испытаний нагружением (рис. 13). Длина сваи составляет 27–27,5 м.

Свая 4оп

По данным УЗ мониторинга (рис. 14) зарегистрирована пиковая неоднородность структуры сваи в интервале отметок от -2,5 до -4 м, проявляющаяся разницей (~25–30%) во времени распространения УЗ импульса по всем трем измерительным траектори-



Puc. 15. Рефлектограммы сваи 40n **Fig. 15.** Reflectograms of pile 40n



Heasese of Natra bases top \$ Wease 4 B Happe 2 V. ALE 300 B



Puc. 16. Ультразвуковой профиль сваи 5оп **Fig. 16.** Ultrasonic pile profile 5on

Puc. 17. Ультразвуковой профиль сваи боп **Fig. 17.** Ultrasonic pile profile 5on

ям. Данные двух измерительных траекторий указывают на присутствие дефекта сплошности на отметках -7,5 – -9,5 м. Перечисленные дефекты регистрируются и сейсмоакустическим методом (рис. 15). По одной измерительной траектории регистрируется дефект сплошности на отметках в диапазоне 16–17,5 м, который подтверждается и данными сейсмоакустического метода. Длина сваи по данным сейсмоакустического метода 29–31 м.

Свая 5оп

Присутствуют относительно небольшие (в пределах 2%) снижения скорости УЗ (рис. 16) на отметках -1,5 и -7 м. Длина сваи соответствует проекту – 9 м. Сейсмоакустический метод контроля не использовался из-за невозможности доступа к поверхности оголовка сваи. Наблюдается некоторое монотонное снижение на 2,5% как средней скорости УЗК, так и скорости УЗК по каждой измерительной траектории на протяжении всего ствола сваи, что может быть

Scientific and technical journal

BETOH N XENE30BETOH

обусловлено неточностью установки каналообразующих труб или изменением свойств бетонной смеси в процессе ее укладки.

Свая 6оп

Сваю 6оп можно рассматривать как бездефектную. Присутствуют относительно небольшие (в пределах 2%) снижения скорости УЗ (рис. 17) на отметках -2,5 и -7 – 8 м. Длина сваи соответствует проекту – 9 м. Сейсмоакустический метод контроля

Список литературы

- 1. Пономарев А.Б. Свайные фундаменты как элементы устойчивого строительства // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2015. № 1. С. 103–119.
- 2. Опалихина А.А. Свайные фундаменты на винтовых сваях в условиях Крайнего Севера // Инновационная наука. 2018. № 6. С. 31–34.
- 3. Крутов В.И., Когай В.К., Глухов В.С. Свайные фундаменты из набивных свай в пробитых скважинах // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2010. № 2. С. 10–14.
- Леонович С.Н., Снежков Д.Ю., Будревич Н.А. Исследование качества буронабивных свай Impact-Есho методом (неразрушающий контроль). Проблемы современного строительства: Материалы Международной научно-технической конференции. Минск, 28 мая 2021. С. 258–269.
- Liang M.T., Su P.J. Detection of the corrosion damage of rebar in concrete using Impact-Echo method // *Cement and Concrete Research.* 2001. Vol. 31. No. 10, pp. 1427–1436.
- Liu P.-L., Yeh P.-L. Vertical spectral tomography of concrete structures based on Impact-Echo depth spectra // NDT & E International. 2010. Vol. 43. No. 1, pp. 45–53.
- Kachanov V.K., Sokolov I.V., Avramenko S.L. Problems of acoustic testing of large-size concrete building structures // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2008. Vol. 44. No. 12, pp. 812–819.
- Капустин В.В., Чуркин А.А., Лозовский И.Н., Кувалдин А.В. Возможности сейсмоакустических и ультразвуковых методов при контроле качества свайных фундаментов // Геотехника. 2018. Т. 10. № 5–6. С. 62–71.
- Arkhipov A. Check and monitoring of condition of concrete slurry wall, jet-grouting and frozen soil fences by crosshole sounding method in underground construction // *Procedia Engineering*. 2016, pp. 11–18.

не использовался из-за невозможности доступа к поверхности оголовка сваи.

Вывод

Произведена оценка качества буронабивных свай двумя методами неразрушающего контроля: сейсмоакустическим и межскважинным ультразвуковым. Выявлены различные дефекты, отклонения, изменения. Обсуждается достоверность и надежность полученных результатов.

References

- 1. Ponomarev A.B. Pile foundations as elements of sustainable construction. *Vestnik of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture.* 2015. No. 1, pp. 103–119. (In Russian).
- Opalikhina A.A. Pile foundations on screw piles in the conditions of the Far North. *Innovatsionnaya nauka*. 2018. No. 6, pp. 31–34. (In Russian).
- Krutov V.I., Kogai V.K., Glukhov V.S. Pile foundations from stuffed piles in punched wells. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov.* 2010. No. 2, pp. 10–14. (In Russian).
- Leonovich S.N., Snezhkov D.Yu., Budrevich N.A. Investigation of the quality of bored piles by the Impact-Echo method (non-destructive testing). Problems of Modern Construction: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. Minsk, May 28, 2021, pp. 258–269. (In Russian).
- Liang M.T., Su P.J. Detection of the corrosion damage of rebar in concrete using Impact-Echo method. *Cement and Concrete Research*. 2001. Vol. 31. No. 10, pp. 1427–1436.
- Liu P.-L., Yeh P.-L. Vertical spectral tomography of concrete structures based on Impact-Echo depth spectra. *NDT & E International.* 2010. Vol. 43. No. 1, pp. 45–53.
- Kachanov V.K., Sokolov I.V., Avramenko S.L. Problems of acoustic testing of large-size concrete building structures. *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2008. Vol. 44. No. 12, pp. 812–819.
- Kapustin V.V., Churkin A.A., Lozovsky I.N., Kuvaldin A.V. Possibilities of seismoacoustic and ultrasonic methods in quality control of pile foundations. *Geotekhnika*. 2018. Vol. 10. No. 5–6, pp. 62–71. (In Russian).
- 9. Arkhipov A. Check and monitoring of condition of concrete slurry wall, jet-grouting and frozen soil fences by crosshole sounding method in underground construction. *Procedia Engineering*. 2016, pp. 11–18.