

Контроль качества буронабивных свай с помощью ферромагнитной водной суспензии

Мария Алексеевна АВДУШЕВА, ассистент, e-mail: m.avdusheva@narfu.ru

Аркадий Михайлович АЙЗЕНШТАДТ, доктор химических наук, профессор, зав. кафедрой композиционных материалов и строительной экологии, e-mail: a.isenshtadt@narfu.ru

Александр Леонидович НЕВЗОРОВ, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой инженерной геологии, оснований и фундаментов, e-mail: a.nevzorov@narfu.ru

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова», 163002 Архангельск, наб. Северной Двины, 17

Аннотация. Характерные дефекты буровых свай, такие как нарушение целостности ствола из-за вывалов грунта в скважину, оголение арматурного каркаса, размывание бетонной смеси грунтовыми водами, выявляются традиционными методами контроля качества ствола лишь после набора бетоном прочности, когда устранить их уже невозможно. В этих случаях требуемую несущую способность фундамента обеспечивают за счет свай-дублеров. Авторами предложен способ контроля качества ствола изготавливаемой в грунте сваи путем измерения электропроводности бетонной смеси, в состав которой введена тонкодисперсная добавка электропроводного вещества, например, магнетита. Равномерность распределения добавки в бетонной смеси обеспечивается использованием суспензии, смешиваемой с водой для затворения. Преимущество метода состоит в выявлении и устранении дефектов в ходе бетонирования. Лабораторными исследованиями был определен оптимальный состав тонкодисперсной добавки, а также установлена зависимость удельной электрической проводимости смеси от концентрации добавки и частоты переменного тока. Полученные результаты могут являться научной основой создаваемых способов контроля сплошности ствола буронабивных свай в процессе производства работ по значениюм электрической проводимости бетонной смеси после бетонирования.

Ключевые слова: агрегативная устойчивость, ферромагнитная суспензия, тонкодисперсный магнетит, бетонная смесь, буронабивная свая, электрическая проводимость, контроль качества.

QUALITY CONTROL OF BORED PILES USING FERROMAGNETIC WATER SUSPENSION

Maria A. AVDUSHEVA, e-mail: m.avdusheva@narfu.ru

Arkady M. AYZENSHTADT, e-mail: a.isenshtadt@narfu.ru

Alexander L. NEVZOROV, e-mail: a.nevzorov@narfu.ru

Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Severnaya Dvina Emb. 17, Arkhangelsk 163002, Russian Federation

Abstract. Typical defects of bored piles are damages of shaft integrity, such as necking defects, water intrusions etc. They are defined by traditional quality control methods after development of strength, when the defects cannot be eliminated. In this case, the bearing capacity of the foundation is provided by setting of the additional piles. The authors proposed a quality control method, which consists in measuring the electrical conductivity of the concrete mixture. A finely dispersed electrically conductive additive is added to the mixture. For example, this additive is magnetite. The uniformity of distribution of the additive in the concrete mixture is completed by using for addition of suspension and water to a concrete mix. The advantage of the method is the identification and elimination of defects during concreting. Laboratory studies have determined the optimal composition of a finely dispersed additive, and also established the dependence of the specific electrical conductivity of the mixture on the concentration of the additive and the frequency of the alternating current. The results obtained can serve as a scientific basis for the created methods for monitoring the continuity of the bored pile shaft in the process of performing work on the values of the electrical conductivity of the concrete mixture after concreting.

Key words: aggregate stability, ferromagnetic suspension, finely-dispersed magnetite, mortar mix, bored pile, electrical conductivity, quality control

Введение

Строительство в условиях сложившейся городской среды, когда рядом со строительной площадкой расположены здания, инженерные сооружения и коммуникации, значительно усложняет производство работ по уст-

ройству фундаментов. В первую очередь сказанное относится к погружению свай. Зачастую эта технологическая операция требует осуществления специальных мероприятий по снижению динамических воздействий, например, проходки лидерных сква-

жин, ограничения энергии удара молота и др. [1]. Казалось бы, проблема решается применением буровых свай [2]. Их изготовление включает в себя следующие технологические операции: проходку скважины, погружение в нее арматурного каркаса и по-

дачу бетонной смеси, а в неустойчивых грунтах еще погружение и извлечение инвентарной обсадной трубы. Характерными проблемами при устройстве таких свай являются технологические осадки рядом расположенных зданий и сооружений и нарушение целостности ствола из-за вывалов грунта в скважину, оголение арматурного каркаса, размывание бетонной смеси грунтовыми водами и т. д. [3].

Контроль качества ствола свай обычно выполняют путем измерения времени прохождения продольной волны с помощью ультразвукового зондирования, а в отдельных сваях еще и отбором и испытанием керна [4–6]. При использовании указанных методов обнаружить дефекты удается лишь при наборе бетоном прочности, когда устранить их уже нельзя [7]. Обычно в этих случаях требуемую несущую способность фундамента обеспечивают за счет свай-дублеров.

Известны методы контроля качества железобетонных конструкций по их магнитной проницаемости и температуре, измеряемой в различных точках в ходе формирования и набора прочности бетонной смесью. Выявленные аномалии по магнитной проницаемости или температуре свидетельствуют о наличии дефектов [8, 9].

Авторами статьи предложен способ контроля качества ствола изготавливаемой в грунте свай путем измерения электропроводности бетонной смеси [10]. Его преимущество — выявление и устранение дефектов в ходе бетонирования ствола. Для получения контрастных значений электропроводности смеси в различных геологических и гидрогеологических условиях предложено вводить в бетонную смесь порошок электропроводного вещества, например, магнетита [11]. Причем, кроме концентрации магнетита, существенное влия-

ние на результаты измерений оказывает частота переменного электрического тока.

При практической реализации данного способа достоверность результатов определяется в первую очередь равномерностью распределения тонкодисперсной добавки электропроводного вещества в объеме бетонной смеси. Это приводит к ряду ограничений при производстве бетона в промышленных объемах, так как зачастую бетоносмесительные цеха не оснащены специальными бункерами для дозирования высокодисперсного компонента. Известен зарубежный опыт применения добавок в суспензионном виде. Исследования ряда авторов показали, что наибольшая степень однородности распределения компонентов бетонной смеси достигается при включении в состав не порошковых добавок, а смешиваемых с водой для затворения суспензий [12]. При этом необходимо выполнение условий, обеспечивающих стабильность размерных характеристик дисперсной фазы. Предварительными исследованиями электрокинетических свойств водных систем, содержащих тонкодисперсный порошок магнетита, было установлено, что агрегативная устойчивость твердой фазы наблюдается при нейтральной или слабощелочной рН дисперсионной среды.

Цель данной работы — исследование влияния рецептурно-технологических факторов на электропроводящие свойства бетонной смеси, затворяемой модифицированной водной суспензией на основе ферромагнитного материала коллоидной степени дисперсности. В качестве рецептурного фактора принимался во внимание концентрационный параметр суспензии, а технологического — частота подаваемого в систему переменного электрического тока. Для исключения влия-

ния на получаемые результаты размеров, количества и состава крупного заполнителя исследования выполнялись на растворных смесях.

Методы и материалы

В качестве сырьевого материала использовали порошок магнетита, добываемый вблизи г. Учалы Республики Башкортостан на Кирябинском месторождении. Привлекательность данного сырья обусловлена тем, что в процессе добычи оно уже проходит процесс первоначального измельчения на дробильных машинах. Истинная плотность порошка магнетита составила $\rho = 4,98 \text{ г/см}^3$. Химический состав образцов, масс. %: $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 77$, $\text{FeO} - 22,88$, $\text{Mn} - 0,07$, $\text{Cu} - 0,03$, п.п. — $0,02$.

Обеспечение повторяемости результатов в процессе получения тонкодисперсной фазы требует тщательного подбора методов механического диспергирования и отработки наиболее эффективного режима. Для этого был проведен ряд лабораторных экспериментов с вариацией времени и характеристик размола.

В качестве рабочего оборудования применяли планетарную шаровую мельницу Retsch RM100. Магнетит характеризуется высокой твердостью, сопоставимой с твердостью стали, поэтому при размолу на шаровой мельнице использовалась карбид вольфрамовая гарнитура, с целью минимизации возможности попадания в образец стальной пудры в процессе дробления. Размол производился при частоте вращения ротора 7 с^{-1} сухим методом.

Размер частиц полученных образцов определялся на анализаторе Delsa Nano методом фотонно-корреляционной спектроскопии. Удельная площадь поверхности для образцов сухого помола установлена на приборе ПСХ-10А.

Определение функциональной

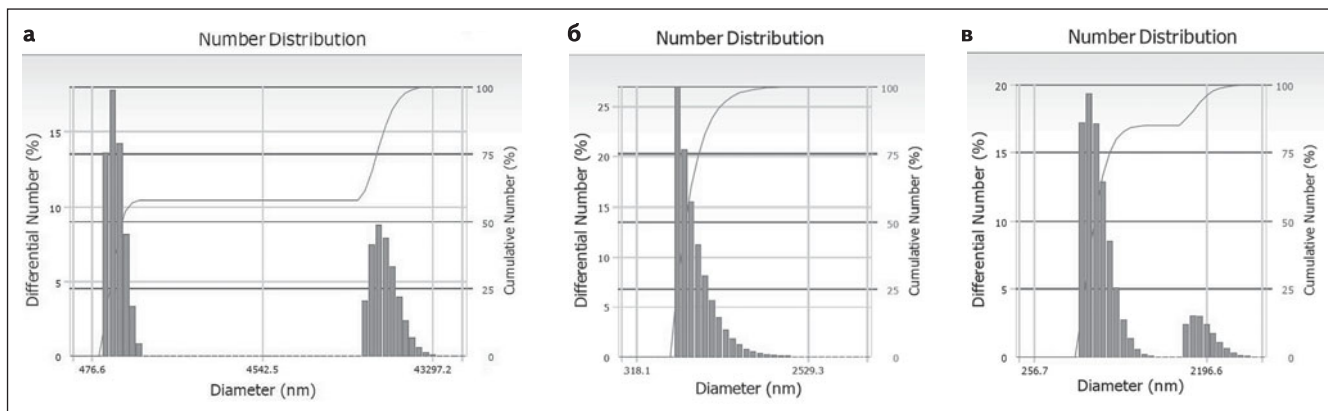


Рис. 1. Размерное распределение частиц в опытных образцах при времени размола 30 (а), 60 (б) и 90 (в) мин

взаимосвязи между электрической проводимостью растворной смеси и содержанием в ней добавки электропроводного вещества выполнялось на опытных образцах мелкозернистого бетона. Соотношение компонентов в смеси цемент:песок:вода составляло 1:2:0,5. В качестве вяжущего применялся портландцемент марки ЦЕМ I-42,5Н, в роли мелкозернистого заполнителя — речной полиминеральный песок с модулем крупности $M_k = 1,07$.

Полученную суспензию на основе тонкодисперсного магнетита вводили в состав вместе с водой затворения. Измерения удельной электрической проводимости образцов смеси без добавки, а также с содержанием тонкодисперсного магнетита 1, 3, 5, 10, 20 % массы вяжущего выполнялись на приборе-измерителе иммитанса E7-20 в диапазоне частот переменного тока 50–500 Гц.

Результаты и обсуждения

На основе анализа состава образцов, измельченных методом сухого помола на планетарной шаровой мельнице Retsch RM100, получены фракционные распределения частиц для каждого размерного ряда (рис. 1).

В первом случае (см. рис. 1а) измельчение проводилось в течение 30 мин при использовании 20 помольных тел диаметром 10 мм. По результатам фотонно-корреляционной спектроскопии 57,7 % частиц имели размер менее 1 мкм, среднемассовый размер составил 7,08 мкм.

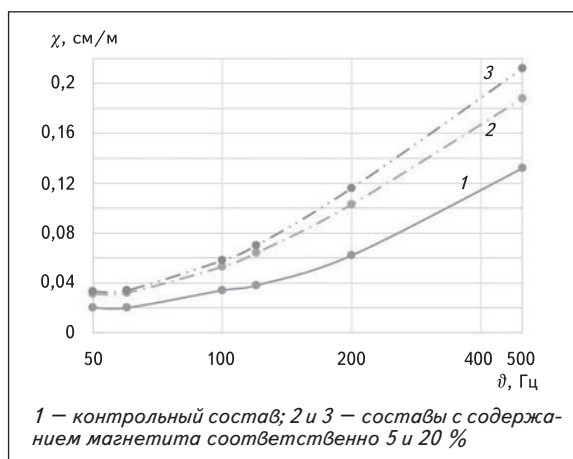
При втором режиме сухого помола (см. рис. 1б) механоактивация магнетита выполнялась 60 шарами диаметром 5 мм в течение двух циклов по 30 мин с технологическим перерывом 15 мин (на охлаждение оборудования). В результате был получен среднемассовый диаметр частиц 3,77 мкм, а 85,1 % частиц имели размер менее 1 мкм.

В третьем случае (см. рис. 1в)

время измельчения было увеличено: два цикла по 45 мин с перерывом 15 мин. По итогам фракционного анализа среднемассовый диаметр частиц составил 4,2 мкм, при этом 94,7 % частиц имело размер менее 1 мкм.

Для приготовления водной суспензии магнетита использовался порошок, имеющий наименьшее значение среднемассового диаметра, полученный по второму режиму помола: сухое диспергирование при частоте вращения ротора 7 с^{-1} и суммарном времени размола 60 мин, с применением карбидвольфрамовой гарнитуры с 60 шарами диаметром 5 мм. Удельная площадь поверхности частиц составила $102 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Рис. 2. Зависимость удельной электрической проводимости χ образцов от частоты электрического тока ν



1 — контрольный состав; 2 и 3 — составы с содержанием магнетита соответственно 5 и 20 %

Для оценки влияния ферромагнитной суспензии на электрическую проводимость растворной смеси были проведены измерения показателей ее удельной электрической проводимости для контрольного образца (без включения магнетита), а также у образцов с содержанием дисперсной фазы в суспензии от 1 до 20 %.

В качестве примера на рис. 2 представлены характерные зависимости среднего значения удельной электрической проводимости

сти χ от частоты электрического тока ϑ для контрольной смеси и образцов с содержанием тонкодисперсного магнетита 5 и 20 %, полученные по данным трех параллельных измерений.

Полученные результаты показали, что с увеличением частоты электрического тока электрическая проводимость смесей различного состава устойчиво растет. При этом удельная электрическая проводимость образцов при частоте 500 Гц превышает значения, полученные у образцов на частоте 50 Гц в 5 раз. Введение тонкодисперсной добавки магнетита в виде водной суспензии совместно с водой затворения в количестве 1–20 % массы цемента привело к увеличению электрической проводимости при частоте 50 Гц на 18–50 %. Линейное увеличение проводимости наблюдалось в диапазоне частот от 120 до 500 Гц.

Математическим выражением, описывающим полученные результаты для всех серий эксперимента, является уравнение полинома второй степени

$$\chi = a\vartheta^2 + b\vartheta + c. \quad (1)$$

Значения коэффициентов выражения (1) для всех образцов представлены в таблице, при этом достоверность аппроксимации R^2 составила 0,99.

Дифференцирование выражения (1) по частоте переменного тока позволило получить математическое выражение (2) для скорости изменения удельной электрической проводимости от частоты

$$\frac{d\chi}{d\vartheta} = 2a\vartheta + b. \quad (2)$$

Выражение (2) показывает, что для растворной смеси с концент-

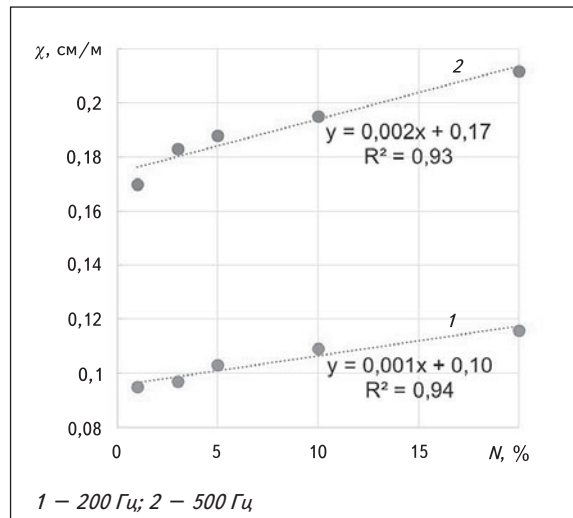


Рис. 3. Зависимость удельной электрической проводимости χ от количества тонкодисперсного магнетита N при частоте переменного тока 200 и 500 Гц

Значения коэффициентов уравнения (1)

Параметр	Содержание добавки, %					
	0	1	3	5	10	20
$-a \cdot 10^7$	0,1	4,8	3,8	4,5	4,9	5,3
$b \cdot 10^4$	3,4	5,9	5,6	6	6,4	6,9
$c \cdot 10^{-3}$	3	4,3	0,3	0,9	1	4

рацией дисперсной фазы 20 % чувствительность метода измерения удельной электрической проводимости максимальная (величина тангенса угла наклона зависимости (2) максимальна), а при концентрации 3 % эта характеристика метода минимальна (данное сопоставление не учитывает смесь без добавки магнетита, так как в этом случае предлагаемый способ контроля не реализуется).

Функциональная зависимость удельной электрической проводимости растворной смеси от концентрации магнетита при частоте переменного тока 200 и 500 Гц представлена на рис. 3.

Для всех серий эксперимента соблюдается прямолинейная зависимость между рассматриваемыми параметрами. При этом угловой коэффициент линейных уравнений, описывающих дан-

ную взаимосвязь, изменяется на порядок с увеличением частоты тока от 50 до 500 Гц (данные зависимости не учитывают значения электропроводности растворной смеси без добавки магнетита). Необходимо отметить, что измерение удельной электрической проводимости растворной смеси и реализация данного принципа измерений сплошности бетонного композита в новых технологиях и методиках испытаний возможны только при условии включения в состав растворной смеси водной суспензии на основе магнетита.

Выводы

1. Результаты лабораторных экспериментов и полученные на их основе функциональные зависимости удельной электрической проводимости от частоты переменного тока показали, что введение вод-

ной суспензии на основе магнетита в состав растворной смеси приводит к увеличению электрической проводимости. Получены математические модели, характеризующие данную взаимосвязь.

2. Установлено, что величина электропроводности растворной смеси линейно зависит от концентрации в ней тонкодисперсной добавки магнетита, при этом данные зависимости в диапазоне частот задаваемого электрического тока 50–500 Гц имеют свои характеристические параметры.

3. Полученные результаты позволяют оптимизировать состав смеси и условия ее применения с учетом особенностей технологического процесса, реализующегося на конкретных строительных площадках.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Мангушев Р. А., Ершов А. В., Осокин А. И. Современные свайные технологии. М. : АСВ, 2010. 235 с.
2. Шулятьев О. А., Мозгачева О. А., Поспехов В. С. Освоение подземного пространства городов. М. : АСВ, 2017. 510 с.
3. Мангушев Р. А., Пономарев А. Б. К вопросу контроля качества изготовления и приемки буронабивных свай // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2014. № 3. С. 88–111
4. Hussein M. N., Likins G. Deep foundations quality control and quality assurance testing methods [Глубокие основы контроля качества и методы его обеспечения] // Florida Engineering Society Journal. 2005. March. Pp. 10–13.
5. Beckhaus K., Heinzelmann H. Ultrasonic integrity testing for bored piles – a challenge [Ультразвуковая проверка целостности буронабивных свай – сложная задача] // Proc. of the Int. Symp. on Non-Destructive Testing in Civil Engineering. 2015. Pp. 694–701.
6. Руководство для проектировщиков к Еврокоду 7: Геотехническое проектирование – общие правила / пер. с англ. М. : МГСУ, 2013. 360 с.
7. Жариков И. С., Лакетич А., Лакетич Н. Влияние качества бетонных работ на прочность бетона монолитных конструкций // Строительные материалы и изделия. 2018. Том 1. № 1. С. 51–58.
8. Патент РФ № 2165495, МПК E02D5/46. Способ контроля характеристик жидкой колонны в процессе ее образования / Герус С. В., Дементиенко В. В., Миргородский В. И., 1999.
9. Патент РФ № 2538362, МПК G01K 13/00. Устройство для контроля свай и способ его использования / Пискалко Д. Р., Рауш Ф., Коттон Д. А., Ференс М., 2011.
10. Патент РФ № 2642760, МПК E02D33/00. Способ выявления и устранения дефектов изготавливаемой в грунте сваи / Авдусева М. А., Невзоров А. Л., Айзенштадт А. М., 2017.
11. Авдусева М. А., Невзоров А. Л. Влияние магнетита на электропроводность растворной смеси // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 55–58.
12. Пухаренко Ю. В., Аубакирова И. У., Никитин В. А. [и др.]. Модифицирование цементных композитов смешанным наноклеродным материалом фуллереноидного типа // Технологии бетонов. 2013. № 12. С. 13–15.

R E F E R E N C E S

1. Mangushev R. A., Ershov A. V., Osokin A. I. *Sovremennye svaynye tekhnologii* [Modern pile technologies]. Moscow, ASV Publ., 2010. 235 p. (In Russian).
2. Shulyatev O. A., Mozgacheva O. A., Pospikhov V. S. *Osvoenie podzemnogo prostranstva gorodov: nauchnoe izdanie* [Development of the underground space of cities]. Moscow, ASV Publ., 2017. 510 p. (In Russian).
3. Mangushev R. A., Ponomarev A. B. On the issue of quality control of manufacturing and acceptance of bored piles. *Vestnik PNIPIU. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 3, pp. 88–111. (In Russian).
4. Hussein M. N., Likins G. Deep foundations quality control and quality assurance testing methods. *Florida Engineering Society Journal*, 2005, March, pp. 10–13.
5. Beckhaus K., Heinzelmann H. Ultrasonic integrity testing for bored piles – a challenge. *Proceedings of the Int. Symp. on Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, 2015, pp. 694–701.
6. *Rukovodstvo dlya proektirovshchikov k Evrokodu 7: Geotekhnicheskoe proektirovanie – obshchie pravila* [Guide for designers to Eurocode 7: Geotechnical design-General rules]. Moscow, MGSU Publ., 2013. 360 p. (In Russian).
7. Zharikov I. S., Laketich A., Laketich N. Influence of the quality of concrete works on the strength of concrete of monolithic structures. *Stroitel'nye materialy i izdeliya*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 51–58. (In Russian).
8. Patent RF 2165495, MPK E02D5/46. Method for monitoring the characteristics of a liquid column during its formation. Gerus S. V., Dementienko V. V., Mirgorodskiy V. I., 1999. (In Russian).
9. Patent RF №2538362, MPK G01K 13/00. Pile control device and method of its use. Piskalko D. R., Raush F., Kotton D. A., Ferens M., 2011. (In Russian).
10. Patent RF №2642760, MPK E02D33/00. Method for detecting and eliminating defects of a pile made in the ground. Avdusheva M. A., Nevzorov A. L., Ayzenshtadt A. M., 2017. (In Russian).
11. Avdusheva M. A., Nevzorov A. L. Effect of magnetite on the electrical conductivity of the solution mixture. *Stroitel'nye materialy*, 2017, no. 11, pp. 55–58. (In Russian).
12. Pukharenko Yu. V., Aubakirova I. U., Nikitin V. A. et al. Modification of cement composites with mixed fulleroid nanocarbon materials. *Tekhnologii betonov*, 2013, no. 12, pp. 13–15. (In Russian).

Для цитирования: Авдусева М. А., Айзенштадт А. М., Невзоров А. Л. Контроль качества буронабивных свай с помощью ферромагнитной водной суспензии // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 4. С. 28–32. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.04.28-32.

For citation: Avdusheva M. A., Ayzenshtadt A. M., Nevzorov A. L. Quality Control of Bored Piles Using Ferromagnetic Water Suspension. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2021, no. 4, pp. 28–32. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2021.04.28-32. ■