УДК 624.1

© В. М. Полунин, ассистент

© И. К. Лобов, магистрант

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: n1ce2u@yandex.ru, LoboffI@yandex.ru

© А. В. Гурский, канд. техн. наук, зам. директора

(ООО «ПКТИ Фундамент-тест»,

Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: avgurskiy@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-94-101

© V. M. Polunin, assistant lecturer

© I. K. Lobov, undergraduate

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: n1ce2u@yandex.ru, LoboffI@yandex.ru

© A. V. Gurskiy, PhD in Sci. Tech., deputy Director

(LLC «PKTI Foundation-test»,

St. Petersburg, Russia)

E-mail: avgurskiy@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ВИБРОИЗВЛЕЧЕНИЯ ШПУНТОВЫХ СВАЙ В УСЛОВИЯХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ПЫЛЕВАТО-ПЕСЧАНЫХ И ПЫЛЕВАТО-ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

NUMERICAL MODELING OF THE PROCESS OF HIGH-FREQUENCY VIBRATION EXTRACTION OF SHEET PILES IN CONDITIONS OF WATER-SATURATED DUSTY-SANDY AND SILT-LOAM SOIL

Наиболее распространенным ограждением котлована являются шпунтовые сваи, которые зачастую погружаются вибрационными установками. В условиях большей толщи водонасыщенных дисперсных грунтов одним из регламентируемых критериев безопасности применения динамической технологии является величина колебаний грунта и конструкций, попадающих в зону влияния. Приведены измеренные колебания грунта околосвайного пространства в процессе виброизвлечения шпунтовых свай. Добавлена характерная осциллограмма виброскорости с характерными этапами производства работ. Выполнен спектральный анализ воздействия с целью определения преобладающей частоты воздействия. Приведено описание процесса численного моделирования виброизвлечения свай. Результатами моделирования являлись расчетные осциллограммы на расстоянии 1,4 и 2,8 м от шпунтовой сваи и определение зоны влияния. Полученные расчетные данные сопоставлены с результатами натурных экспериментов.

Ключевые слова: виброизвлечение свай, полевые измерения, шпунтовые сваи, модель прогнозирования, вибрации грунта, численное моделирование.

The most common excavation walls are sheet piles, which are often sunk by vibration machines. In conditions of big thickness of water-saturated dispersed soils, one of the regulated safety criteria for the use of dynamic technology is the magnitude of soil vibrations and the structures that come to be located in the influence zone. The article presents the measured vibrations of the soil near the pile space in the process of vibration extraction of sheet piles. A characteristic oscillogram of vibration velocity with the characteristic stages of work production is added. Spectral analysis of the impact was performed to assess the prevailing frequency of the impact. The description of the process of numerical simulation of vibration extraction of a pile is given. As for the simulation results, there were obtained calculated oscillograms of the sheet piles located at 1.4 and 2.8 m distance from the sheet pile, and the influence zone was estimated. The calculated data obtained were compared with the results of field experiments.

Keywords: pile vibration extraction, field measurements, sheet piles, prediction model, soil vibration, numerical simulation.

Введение

Строительство в условиях крупных мегаполисов предполагает освоение больших объемов подземного пространства. Для устройства раз-

витой подземной части необходима система ограждающих конструкций, которые будут препятствовать боковому давлению грунта и проникновению грунтовых вод. Наиболее рас-

пространенной ограждающей конструкцией являются шпунтовые стенки из металлических свай различных профилей. Их популярность обусловлена возможностью их последующего извлечения и повторного применения. Однако в условиях большой толщи водонасыщенных сильнодеформируемых грунтов применение технологий с динамическим воздействием приведет к изменению структуры грунта на площадке строительства [1, 2].

Как известно, оценкой динамического воздействия на площадке строительства является уровень колебания [3]. Основные нормативные документы регламентируют следующие величины: скорость v , мм/с (ГОСТ 52892–2007 «Вибрация и удар»); ускорение a , м/с² (ТСН 50-302–2004, ГОСТ 52892–2007 «Вибрация и удар», ВСН 490–87). Критерий предельно допустимого уровня колебаний зависит от геологических условий площадки строительства, технического состояния конструкций сооружений, попадающих в зону влияния. Например, в Санкт-Петербурге есть большое количество объектов архитектурного наследия, для которых применяются очень жесткие нормы по динамическому воздействию. Ускорения в 0,15 м/с² могут вызвать косметические разрушения интерьерных элементов объекта [4, 5].

Наиболее опасным фактором является нарушение структуры грунтов основания, особенно

в большой толще водонасыщенных пылевато-песчаных и пылевато-глинистых оснований. В песчаных рыхлых водонасыщенных грунтах изменение их структуры начинается при ускорениях 0,15 м/с² [6–9]. Такие ускорения называют критическими.

При ведении работ по высокочастотному вибропогружению или виброизвлечению свай актуальной задачей является прогноз распространения колебаний в грунтовом массиве и определение зоны влияния.

Характер распространения волн в грунтах

Колебания в грунте в процессе вибропогружения свай возникают за счет сил трения по боковой поверхности сваи и удара острия сваи о нижележащий грунт. Эти колебания можно описать тремя типами волн: сжатия (первичная — рис. 1, а), сдвиговые волны (вторичные — рис. 1, б) и рэлеевские волны (отраженные, рис. 1, в). Однако это лишь общая схема распространения волн в грунтах при погружении свай. Исследования [10, 11] предполагают распространение цилиндрических волн сжатия, «П-волн» (Cylindrical P-wave), за счет сил трения по боковой поверхности сваи. Наличие данных волн в прогнозируемой модели также обуславливается существенными горизонтальными колебаниями шпунтовой стенки. При виброизвлечении свай предполагается, что сферическими волнами, ге-

Рис. 1. Физическая модель распространения волн в грунтовом массиве (а–в) и предполагаемая схема распространения волн при виброизвлечении свай (з)

нерируемыми острием сваи, можно пренебречь, однако при длительном нахождении шпунтовой стенки в грунте цилиндрические П-, С-волны (Cylindrical P, S-wave) могут значительно увеличить свою амплитуду. Это связано с «засасыванием» шпунтовой сваи с течением времени, в связи с чем значительно увеличиваются силы трения по боковой поверхности (рис. 1, з).

Основной задачей работы являлось получение данных о колебаниях грунтах околосвайного пространства в ходе натурного эксперимента

и сопоставление полученных материалов с результатами численного моделирования.

Методика проведения эксперимента и анализ результатов

В процессе виброизвлечения шпунтовых свай были измерены виброскорости грунта на расстоянии 1,4 и 2,8 м от шпунтовой сваи (рис. 2). Измерения проводились датчиками в одноканальном режиме по вертикальной оси.

Параметры высокочастотного и безрезонансного вибропогружателя ICE 20RF приведены на рис. 3, а. Извлекаемые шпунтовые сваи типа

Рис. 2. Общий вид экспериментальной площадки (а) и схема расположения датчиков в плане относительно извлекаемой сваи (б)

Рис. 3. Параметры вибропогружателя (а) и профиль извлекаемых шпунтовых свай (б)

«Арселор Z36» имели корытообразный профиль и длину 15 м (рис. 3, б).

Виброскорости, полученные в ходе виброизвлечения сваи, представлены на рис. 4. Условно график виброскорости от времени можно разбить на три этапа. Первый этап извлечения сваи длится 0,5–3,5 мин. Происходит предварительное вибрирование сваи для снижения сил бокового трения по поверхности сваи. Также в период 30 с наблюдаются наибольшие величины виброскорости. Затем происходит срыв шпунтовой сваи, уровень динамического воздействия немного снижается. На втором этапе длительностью 4–7 мин выполняются технологические процессы — устройство отверстий для перестыковки шпунтовых свай и пр. Третий этап, на котором происходит полное извлечение сваи, длится 7–9 мин.

Спектр рассматриваемого временного участка приведен на рис. 5. Преобладающая частота составила 29 Гц. Высокая частота работы погружателя и отсутствие явно выраженных пиков во время «пуска» и «выбега» при его работе соответствуют параметрам безопасности с точки зрения использования в условиях городской застройки [12–14]. Также данные параметры необходимы для задания динамической нагрузки при построении численной модели.

Процесс виброизвлечения шпунтовой сваи был смоделирован в геотехническом конечно-

элементном комплексе Plaxis [15]. Расчетная схема и инженерно-геологические условия площадки строительства приведены на рис. 6. При расчетах использовалась модель грунта Hardening Soil, которая допустима при динамических расчетах. Тип поведения грунта — недренированный, по типу «А». Нагрузка изменялась по синусоидальному закону, где частота, Гц, соответствует частоте, полученной в ходе спектрального анализа. Амплитуда изменения нагрузки соответствует вынуждающей силе вибропогружателя. Статическая нагрузка при извлечении шпунтовой сваи принималась равной 150 кН. При расчетах шпунтовые сваи моделировались плоскими конечными элементами типа «плита». Демпфирование грунта задавалось по Рэлею с коэффициентами $\alpha = 0,001$, $\beta = 0,001$. Для возможности учета «срыва» сваи по боковой поверхности назначались контактные элементы — «интерфейсы». Задача решалась за временной промежуток 0,2 с.

Результатом расчета являлось распределение колебаний в грунтовом массиве, осциллограммы на расстоянии 1,4 и 2,8 м от сваи, перемещение сваи во времени.

Изополя виброскорости приведены на рис. 7. Минимальное значение ограничено 1 мм/с — как критерий границы зоны влияния. Расчетная зона влияния составила порядка 14,5 м, что сопоставимо с результатами измерений в ходе натурных наблюдений, которые составили 16 м.

Рис. 4. Фактическая осциллограмма точки на расстоянии 1,4 м от сваи

Рис. 5. Спектр динамического воздействия в период рассматриваемого временного промежутка

Рис. 6. Численная трехмерная модель (а) и принятые параметры грунтового основания (б)

Одним из критериев корректности расчетной модели является график перемещения сваи во времени. В данном случае расчетная амплитуда составила порядка 10 мм (рис. 8). Отметим, что данная величина находится в пределах фактической рабочей амплитуды вибропогружателя 0–15 мм, и это соответствует срыву шпунтовой сваи и ее свободному перемещению относительно грунтового массива.

На рис. 9 приведено сопоставление расчетных и фактических, измеренных в процессе натурных экспериментов, осциллограмм.

Рис. 7. Изополя виброскорости в момент времени $t = 0,2$ с

Рис. 8. График перемещения сваи во времени

Рис. 9. Сопоставление расчетных и экспериментальных осциллограмм

Отметим, что расчетная и фактическая осциллограммы в точке на расстоянии 1,4 м имеют высокую сходимость по амплитуде и периоду, но имеют незначительные смещения по фазе. В точке на расстоянии 2,8 м в момент времени $t = 0,165$ с отмечена хорошая сходимость по величине скорости, однако на других участках она различается, но характер и величины виброскорости имеют близкие значения.

Выводы

1. Значительные динамические воздействия от вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай происходят непосредственно в процессе производства работ и в настоящее время не оцениваются должным образом на предварительных этапах проектирования и строительства. Это может приводить к дополнительным деформациям зданий и сооружений, попадаю-

щих в зону влияния динамических воздействий от вибропогружения и виброизвлечения шпунтовых свай. Данный эффект усиливается для зданий, имеющих низкие категории технического состояния и возведенных на основаниях, сложенных структурно неустойчивыми водонасыщенными грунтами.

2. Использование численного моделирования для прогноза распространения колебаний в массиве грунта и определение зоны влияния позволяют корректировать проектные решения и избежать отрицательных ситуаций в ходе ведения работ.

3. Сопоставление расчетных и экспериментальных величин колебаний показывает высокую сходимость их значений как по характеру (период колебания и смещения по фазе), так и по абсолютным величинам (амплитуда и величина зона влияния).

Библиографический список

1. Мангушев Р. А., Никифорова Н. С. Технологические осадки зданий и сооружений в зоне влияния подземного строительства. М.: АСВ, 2017. 160 с.
2. Мангушев Р. А., Гурский А. В., Сапин Д. А. Учет технологических осадок существующих сооружений при строительстве около них новых зданий с развитым подземным пространством // Инженерно-геологические изыскания, проектирование и строительство оснований, фундаментов и подземных сооружений: сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. 1–3 февраля 2017 г. СПб., 2017. С. 9–22.
3. Маковская Н. А., Глозман Л. М. Динамические исследования — обязательная составляющая геотехнического мониторинга // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2001. № 4. С. 94–100.
4. Шашкин М. А. Вибродинамический мониторинг здания в режиме реального времени с функцией управления технологией ремонтно-строительных работ // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 12. С. 53–59.
5. Глозман Л. М. Динамический мониторинг при возведении фундаментов глубокого заложения в условиях Санкт-Петербурга // Реконструкция исторических городов и геотехническое строительство. 2003. Т. 2. С. 67–72.
6. Вознесенский Е. А. Землетрясения и динамика грунтов // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 2. С. 101–108.
7. Баркан Д. Д. Виброметод в строительстве. М.: Госстройиздат, 1959. 315 с.

8. Еришов В. А. Динамические свойства песчаных грунтов и их учет в оценке устойчивости земляных сооружений: дис. ... д-ра техн. наук. Л., 1970. 180 с.

9. Ковалевский Е. Д. Результаты наблюдений за колебаниями песчаного грунта и осадками зданий при забивке шпунта // Механика грунтов, основания и фундаменты: сб. науч. конф. ЛИСИ. Л., 1967. С. 34–38.

10. Deckner F., Viking K., Hintze S. Wave Patterns in the Ground: Case Studies Related to Vibratory Sheet Pile Driving // Geotechnical and Geological Engineering. 2017. Vol. 35. Issue 6. Pp. 2863–2878. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.01.039.

11. Deckner F., Viking K., Guillemet C., Hintze S. Instrumentation system for ground vibration analysis during sheet pile driving // Geotechnical Testing Journal. 2015. Vol. 38. Issue 6. Pp. 893–905. DOI: 10.1520/GTJ20140275.

12. Верстов В. В., Гайдо А. Н., Иванов Я. В. Технологии устройства ограждений котлованов в условиях городской застройки и акваторий / под ред. В. В. Верстова. СПб.: Лань, 2014. 366 с.

13. Верстов В. В., Гайдо А. Н. Исследование сравнительной эффективности заглубления стального шпунта в плотный грунт различными погружающими машинами // Механизация строительства. 2013. № 2 (824). С. 44–49.

14. Верстов В. В., Белов Г. А. Совершенствование технологических решений по погружению и извлечению шпунта вибрационным методом // Вестник гражданских инженеров. 2007. № 4 (13). С. 38–44.

15. Brinkgerve R. B. J. Plaxis: Finite Element Code for Soil and Rock Analyses. Balkema, 2006. Pp. 53–56.

References

1. Mangushev R. A., Nikiforova N. S. *Tekhnologicheskie osadki zdaniy i sooruzheniy v zone vliyaniya podzemnogo stroitel'stva* [Technological settlement of buildings and structures in the influence zone of underground construction]. Moscow, ASV Publ., 2017, 160 p.
2. Mangushev R. A., Gurskiy A. V., Sapin D. A. *Uchet tekhnologicheskikh osadok sushchestvuyushchikh sooruzheniy pri stroitel'stve okolo nikh novykh zdaniy s razvitym podzemnym prostranstvom* [Accounting for technological settlement of existing structures during the construction of new buildings with developed underground space near them]. *Trudy Vseros. nauch.-tekhn. konf. 1–3 fevralya 2017 g. «Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya, proektirovanie i stroitel'stvo osnovaniy, fundamentov i podzemnykh sooruzheniy»* [Proceedings of the All-Russia sci.-tehn. conf. February 1–3, 2017, "Engineering and geological surveys, design and construction of foundations, foundations and underground structures"]. St. Petersburg, 2017, pp. 9–22.

3. Makovskaya N. A., Glozman L. M. *Dinamicheskie issledovaniya — obyazatel'naya sostavlyayushchaya geotekhnicheskogo monitoringa* [Dynamic research as a mandatory component of geotechnical monitoring]. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo — Urban reconstruction and geotechnical construction*, 2001, no. 4, pp. 94–100.
4. Shashkin M. A. *Vibrodinamicheskiy monitoring zdaniya v rezhime real'nogo vremeni s funktsiyey upravleniya tekhnologiyey remontno-stroitel'nykh rabot* [Vibration dynamic monitoring of a building in real-time mode with the function of managing the technology of renovation and construction works]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo — Industrial and civil engineering*, 2017, no. 12, pp. 53–59.
5. Glozman L. M. *Dinamicheskiy monitoring pri vozvedenii fundamentov glubokogo zalozheniya v usloviyakh Sankt-Peterburga* [Dynamic monitoring in the construction of deep foundations in the conditions of St. Petersburg]. *Rekonstruktsiya istoricheskikh gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo — Reconstruction of historical cities and geotechnical construction*, 2003, vol. 2, pp. 67–72.
6. Voznesenskiy E. A. *Zemletryaseniya i dinamika gruntov* [Earthquakes and soil dynamics]. *Sorosovskiy obrazovatel'niy zhurnal — Soros Educational Journal*, 1998, no. 2, pp. 101–108.
7. Barkan D. D. *Vibrometod v stroitel'stve* [Vibration method in construction]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1959, 315 p.
8. Ershov V. A. *Dinamicheskie svoystva peschanykh gruntov i ikh uchet v otsenke ustoychivosti zemlyanykh sooruzheniy. Diss. dokt. tekhn. nauk* [Dynamic properties of sandy soils and their accounting in the assessment of the stability of earthworks. Dr. Sci. Tech. diss.]. Leningrad, 1970, 180 p.
9. Kovalevskiy E. D. *Rezultaty nablyudeniy za kolebaniyami peschanogo grunta i osadkami zdaniy pri zabivke shpunta* [Results of observations of fluctuations of sandy soil and settlement of buildings during sheet pile driving]. *Trudy nauch. konf. «Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty»* [Proceedings of the scientific conference “Soil mechanics, bases and foundations”]. Leningrad, LISI Publ., 1967, pp. 34–38.
10. Deckner F., Viking K., Hintze S. Wave patterns in the ground: case studies related to vibratory sheet pile driving. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2017, vol. 35, iss. 6, pp. 2863–2878. DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.01.039.
11. Deckner F., Viking K., Guillemet C., Hintze S. Instrumentation system for ground vibration analysis during sheet pile driving. *Geotechnical Testing Journal*, 2015, vol. 38, iss. 6, pp. 893–905. DOI: 10.1520/GTJ20140275.
12. Verstov V. V., Gaydo A. N., Ivanov Ya. V. *Tekhnologiyi ustroystva ograzhdeniy kotlovanov v usloviyakh gorodskoy zastroyki i akvatoriy* [Technologies for the excavation wall construction in conditions of urban development and water areas]. Ed. by Verstov V. V. St. Petersburg, Lan' Publ., 2014, 366 p.
13. Verstov V. V., Gaydo A. N. *Issledovanie sravnitel'noy effektivnosti zaglubleniya stal'nogo shpunta v plotniy grunt razlichnymi pogruzhayushchimi mashinami* [Investigation of the comparative efficiency of steel sheet pile sinking into dense soil by various immersion machines]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva — Mechanization of construction*, 2013, no. 2 (824), pp. 44–49.
14. Verstov V. V., Belov G. A. *Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh resheniy po pogruzheniyu i izvlecheniyu shpunta vibratsionnym metodom* [Improvement of technological solutions for sinking and extraction of sheet piling by vibration method]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov — Bulletin of Civil Engineers*, 2007, no. 4 (13), pp. 38–44.
15. Brinkgerve R. B. J. *Plaxis: Finite Element Code for Soil and Rock Analyses*. Balkema, 2006, pp. 53–56.