

DOI: 10.52409/20731523_2022_1_19
УДК 624.154.001.8

Деформации грунтовых оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении

М.И. Шакиров¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: в современных условиях при строительстве зданий и сооружений одной из наиболее важных задач при проектировании зданий и сооружений, в процессе эксплуатации, которых необходимо учитывать влияние циклических нагрузок, является прогноз осадок оснований плитно-свайных фундаментов с учетом изменения прочностных и деформационных характеристик. Целью исследования является - на основании экспериментальных исследований установить закономерности развития деформаций оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении.

В статье установлены основные закономерности изменения деформаций грунтовых оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении, являющиеся экспериментальной базой для создания новых методов расчета оснований плитно-свайных фундаментов.

Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в том, что они позволяют более точно и достоверно оценивать осадку плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении, повысить эксплуатационную надежность, экономичность и разработать адекватные проектные решения таких фундаментов.

Ключевые слова: плитно-свайный фундамент, деформации, усилия, циклическое нагружение, основание фундамента, грунтовый массив.

Для цитирования: М.И. Шакиров. Деформации грунтовых оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении//Известия КГАСУ 2022 № 1(59). С19-28.

DOI: 10.52409/20731523_2022_1_19

Raft-pile foundation ground base deformation under cyclic loading

M.I. Shakirov¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract: Problem statement. In modern conditions, in the construction of buildings and structures, one of the most important tasks in the design of buildings and structures, which require taking into account the influence of cyclic loads during their exploitation, is the forecast of raft-pile foundations ground base settlement, taking into account changes in strength and deformation characteristics. The purpose of the study is to establish the raft-pile foundations ground base deformation development patterns under cyclic loading on the basis of experimental research.

Results. The main change patterns in deformations of raft-pile foundations ground base under cyclic loading are established, which serve as an experimental basis for creating new Methods for calculating raft-pile foundation ground base.

Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry lies in the fact that they allow more accurate and reliable evaluating of the settlement of raft-pile foundations under cyclic loading, increasing operational reliability and efficiency and developing adequate design solutions for such foundations.

Keywords: raft-pile foundation, deformations, forces, cyclic loading, foundation ground base, soil mass.

For citation: M. Shakirov, Raft-pile foundation ground base deformation under cyclic loading//News KSUAE 2022 №1 (59). С19-28. DOI: 10.52409/20731523_2022_1_19

1. Введение

В условиях плотной городской застройки, возведение зданий повышенной этажности приводит к увеличению нагрузок на основания фундаментов. При этом одним из наиболее эффективных способов увеличения несущей способности и уменьшения осадки основания зданий и сооружений является применение комбинированных плитно-свайных фундаментов [1-5]. В то же время данный вид фундаментов помимо статических нагрузок испытывают также и циклические воздействия [6-9].

В связи с этим, возникает необходимость исследования напряженно-деформированного состояния свайного основания комбинированных плитно-свайных фундаментов учитывающие совместную работу элементов фундамента и грунтового основания в процессе циклического нагружения.

При этом практически не исследован вопрос влияния циклических нагружений на плитно-свайные фундаменты, возникающих в процессе строительства и эксплуатации зданий и сооружений [10-11].

Целью исследования является - на основании экспериментальных исследований установить закономерности развития деформаций оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении.

Задачами работы являются:

- выполнение экспериментальных исследований поведения плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении;
- установление закономерностей развития деформаций грунта межсвайного пространства и усилий в сваях плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении;
- установление закономерностей развития вертикальных деформаций (осадок) оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении.

2. Материалы и методы

Экспериментальные исследования плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении были проведены в лабораторных условиях. Поэтапный принцип проведения экспериментов и анализ результатов позволил системно объединить все исследования для обработки результатов проведенных исследований.

По результатам экспериментальных исследований получены графические и аналитические зависимости изменения прочностных и деформационных характеристик грунтового основания и элементов плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении.

Для исследования особенностей работы комбинированного плитно-свайного фундамента в грунте, была разработана методика проведения испытаний и создана модель плитно-свайного фундамента.

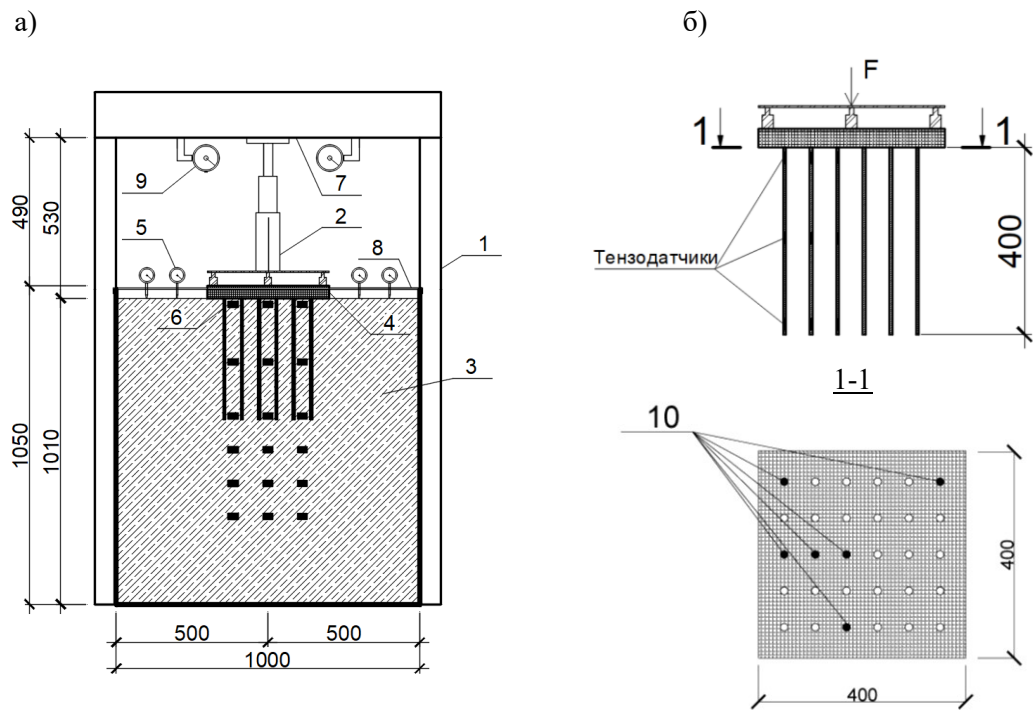


Рис.1. Схема испытания в лабораторных условиях (иллюстрации автора):

а) схема расположения грунтовых датчиков; б) схема расположения тензодатчиков по длине свай

1 – объемный лоток; 2 – загрузочное устройство; 3 – грунт основания; 4 – плитно-свайный фундамент; 5 – индикаторы часового типа; 6 – датчики давления в грунте; 7 – упорная конструкция нагружающего устройства; 8 – траверса индикаторов часового типа;

9 – прогибомеры; 10 – сваи с датчиками

Лабораторное исследование заключалось в испытании шести моделей плитно-свайного фундамента, каждый из которых состоял из плиты ростверка и свай, жестко заземленных в ростверк и испытании одиночных свай. Испытания проводились на действие циклических нагрузок для установления несущей способности фундамента, зависимости вертикальных перемещений в грунте от нагрузки, определения деформаций и напряжений, возникающих в сваях, межсвайном массиве грунта и в грунте ниже условного фундамента.

Были проведены испытания плитно-свайного фундамента на действие статической и циклической нагрузки, выполненного из свай, представляющие собой полые пластиковые трубки, диаметром 7 мм с длиной 40 см и толщиной стенки 1 мм. Ростверк представлял собой железобетонную плиту с размерами в плане 40x40 см. и толщиной 4 см, армированную двумя арматурными сетками из проволоочной арматуры В500 Ø3 мм. Грунтом основания являлась пластичная супесь (модуль деформации $E=7$ МПа, угол внутреннего трения $\varphi=20^\circ$, удельное сцепление $c = 4,5$ кПа, плотность $1,5$ т/м³).

Таблица 1

Режимы испытания модели при циклическом нагружении

№	Фундамент	Вид нагрузки	Длина свай, см	Нагрузка, кг		Кол-во циклов нагружения, N
				P _{max}	P _{min}	
1.	Плитно-свайный (ПСФ) образец №1	статическая	40	1100	-	-
2.	ПСФ 2	циклическая	40	1000	500	15
3.	ПСФ 3	циклическая	40	600	300	200
4.	ПСФ 4	циклическая	40	500	250	500
5.	ПСФ 5	циклическая	40	400	200	1500
6.	ПСФ 6	циклическая	40	350	175	2500
7.	ПСФ, полевые испытания	циклическая	200	25000	12500	3000

Сначала проводилось статическое испытание модели плитно-свайного фундамента с целью определения предельной несущей способности основания при заданной предельной величине осадки равной $[S_u] = 80$ мм, характера развития осадки, деформаций и усилий в сваях и грунтах межсвайного пространства и ниже острия свай. Полученное значение предельной несущей способности основания учитывалось при назначении максимальной нагрузки цикла при циклическом нагружении.

Усилия в сваях определялись с помощью наклеенных по длине тензорезисторов на высоте 20, 200 и 370 мм от оголовка свай.

3. Результаты и обсуждение

На основании проведенного эксперимента, при поэтапном нагружении кратковременной статической нагрузкой получено значение предельной несущей способности, равной $P_{ст} = 1100$ кг·с.

В результате испытаний установлено, что статическое нагружение приводит к увеличению усилий в сваях. Характер изменения усилий в сваях показывает перераспределение усилий из свай в грунты межсвайного пространства. Также установлено, что происходит увеличение напряжений в грунте во всех зонах грунта по мере увеличения нагружения. При этом необходимо отметить, что наибольшее увеличение напряжений происходит под плитным ростверком.

Опытным путем установлено, что по мере увеличения нагрузок интенсивность нарастания осадок существенно уменьшалась, но полной их стабилизации не наблюдается. Такая закономерность развития осадок объясняется тем, что в общем случае изменение осадок зависит от развития деформаций грунта межсвайного пространства под ростверком, деформаций сдвига между грунтом и сваями и деформаций грунта в зоне под нижним концом свай.

В начальной стадии реализуются деформации уплотнения практически во всех зонах. Приращение деформаций уплотнения после нагружения практически прекращались, что вызвало уменьшение интенсивности нарастания осадок.

Осадки основания, измеренные в процессе ступенчатых статических нагружений, изменяются аналогично деформациям грунта межсвайного пространства.

Результаты экспериментальных исследований моделей плитно-свайных фундаментов при действии циклических нагрузок показывают, что по мере увеличения количества циклов нагружения, не зависимо от величины максимальной нагрузки цикла, происходит снижение несущей способности основания. В таблице 2 приведены результаты

исследования моделей плитно-свайных фундаментов, которые наглядно показывают снижение несущей способности при циклическом нагружении.

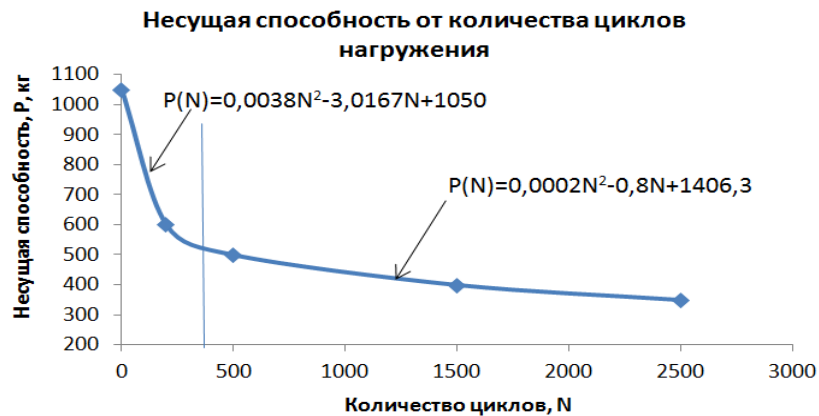
Таблица 2

Результаты испытания моделей плитно-свайных фундаментов

№ п/п	Шифр модели	P_{\max} , кг	P_{\min} , кг	$\rho = \frac{F_{\min}}{F_{\max}}$	Количество циклов до достижения предельной несущей способности
1	ПСФ-2	1000	550	0,5	15
2	ПСФ-3	600	300	0,5	200
3	ПСФ-4	500	250	0,5	500
4	ПСФ-5	400	200	0,5	1500
5	ПСФ-6	350	175	0,5	2500

Как видно из таблицы 2 снижение несущей способности по сравнению с однократным кратковременным статическим нагружением составляет 3,14 раза.

а)



б)



Рис.2. Изменение несущей способности моделей плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении (иллюстрации автора):

а) в координатах $P_{\max}-N$; б) в координатах $P_{\max} - \ln N$

На рисунке 2 показаны уравнения регрессии снижения несущей способности плитно-свайного фундамента в координатах $P_{max}-N$ и $P_{max}-\ln N$. Приведенные графики наглядно показывают закономерности снижения несущей способности моделей плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении по мере увеличения количества циклов нагружения. Видно, что наиболее интенсивное снижение несущей способности происходит при больших значениях максимальной нагрузки цикла P_{max} , составляющих (0,55-0,91) от предельной несущей способности при однократном кратковременном статическом нагружении.

Циклические нагружения вызвали увеличения осадок основания как в пределах плитного ростверка, так и за его пределами, причем интенсивность их развития зависела от координаты рассматриваемой точки. Интенсивное развитие осадок происходило в начальной стадии нагружения в течении первых (1...5) циклов повторных нагружений в зависимости от величины максимальной нагрузки цикла циклического нагружения.

После 5...15 циклов повторного нагружения интенсивность нарастания осадок существенно уменьшалась, но полной их стабилизации не наблюдается. Такая закономерность развития осадок объясняется тем, что в общем случае изменение осадок зависит от развития деформаций грунта межсвайного пространства под ростверком, деформаций сдвига между грунтом и сваями и деформаций грунта в зоне под нижним концом свай.

В начальной стадии реализуются деформации уплотнения практически во всех зонах. Приращение деформаций уплотнения после 5 цикла нагружений практически прекращался, что вызвало уменьшение интенсивности нарастания осадок. Осадки основания, измеренные в процессе ступенчатых циклических нагружений после различного количества повторной нагрузки, изменяются аналогично деформациям грунта межсвайного пространства. Происходит качественное превращение диаграммы $P - S$, т.е. переход криволинейной диаграммы в прямолинейную, что свидетельствует о переходе деформирования грунта в линейную стадию.

Анализ изменения осадок оснований после различного количества циклов показывает, что приращение осадок происходит, в основном, за счет увеличения их остаточной части.

Величина же осадки в течении одного цикла меняется незначительно. При испытаниях зафиксированы изменения этих («упругих») осадок по мере увеличения количества циклов нагружений. В течении первых 20 циклов эти осадки несколько уменьшаются. Снижение «упругих» осадок можно объяснить уплотнением за счет уменьшения объема пор грунта, которое по интенсивности опережает уменьшения модуля сдвига деформаций сдвига между сваями и окружающим грунтом. Поскольку интенсивное уплотнение грунта происходит в начальный период повторных нагружений, а изменение сцепления между грунтом и сваями является более длительным процессом, то уже после 20 циклов нагружений «упругие» осадки оснований начинают увеличиваться. В случае если не достигается предельное состояние основания, к моменту 1200 циклов нагружения наступает относительная стабилизация, т.е. зависимость $P - S_{уп}$ становится близкой к линейной. Причины, вызывающие изменение «упругих» и остаточных осадок, вероятно, различны.

«Упругая» часть осадки связана с уплотнением грунта в начальной стадии, разрушением структурных связей между твердыми частицами грунта и уменьшением модуля сцепления между сваями и окружающим грунтом, упругой разгрузкой свай при уменьшении нагрузки, а остаточная часть – с неупругими деформациями грунта под плитным ростверком вследствие циклической ползучести и развития микротрещин усталости в пластически деформированных локальных зонах.

В условиях циклического нагружения, по мере увеличения количества циклов происходит увеличение деформаций в грунте межсвайного пространства и в грунте ниже острия свай по сравнению с первым циклом нагружения. При этом происходит развитие усилий в сваях с увеличением количества циклов и наибольшие усилия возникают в угловых и рядовых сваях, а наименьшие в центральных. Графики развития деформаций в грунте межсвайного пространства показывают, что наибольшие деформации возникают непосредственно под плитой ростверка, а наименьшие в зоне на уровне нижнего конца свай.

Изменение усилий в сваях, расположенных в характерных зонах плитно-свайного фундамента, приведены на рисунке 3. Как видно из рисунков циклическое нагружение приводит к увеличению усилий в сваях. Характер изменения усилий в сваях показывает перераспределение усилий из свай в грунты межсвайного пространства.

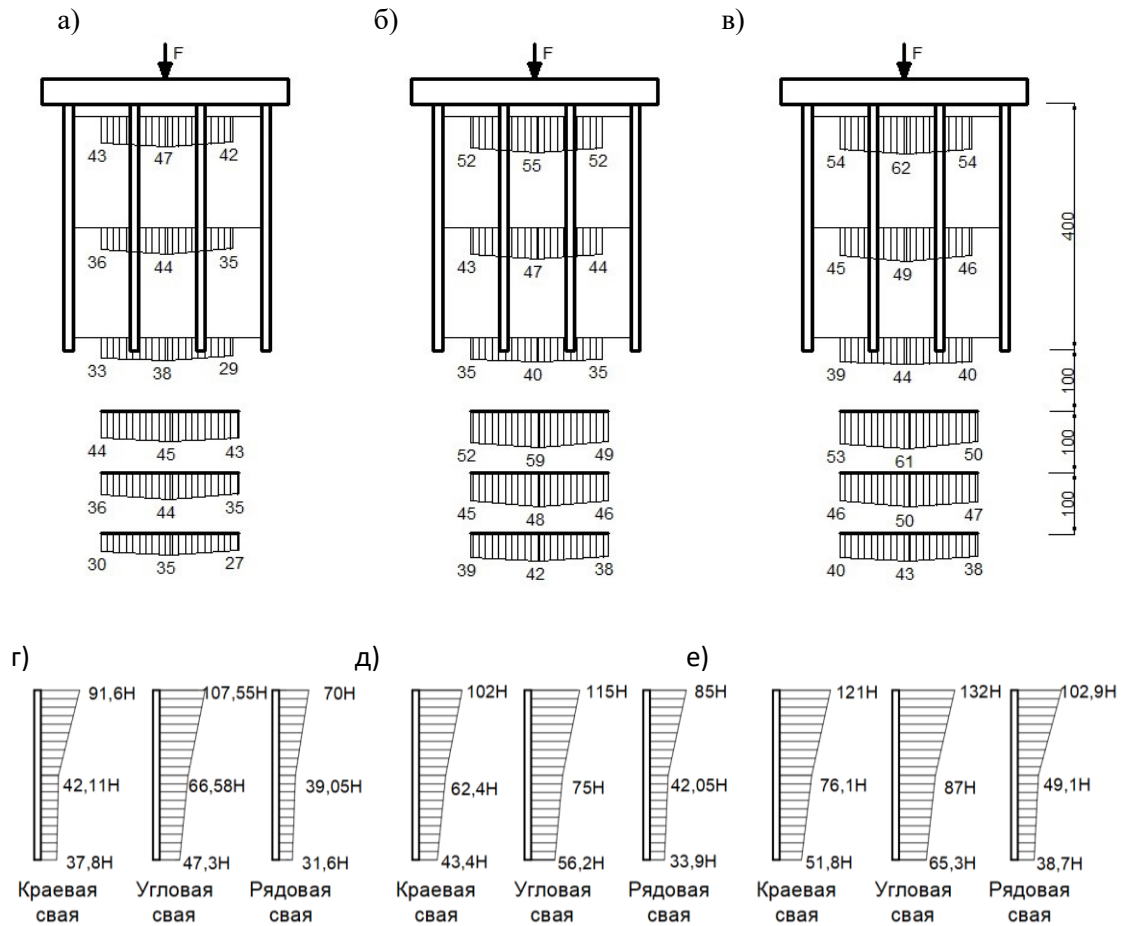


Рис.3. Эпюры изменения деформаций в грунте и усилий в сваях модели плитно-свайного фундамента ПСФ-2 ($P_{max}=1000\text{кг}$) (иллюстрации автора):

- а) распределение напряжений в грунте межсвайного пространства и в основании после 1 цикла;
- б) после 10 цикла;
- в) после 14 цикла;
- г) распределение усилий по длине краевой, угловой и рядовой сваи после 1 цикла;
- д) после 10 цикла;
- е) после 14 цикла

На рисунке 4 приведены графики изменения деформаций в различных зонах грунта межсвайного пространства. Как видно из рисунков, происходит увеличение деформаций в грунте во всех зонах грунта по мере увеличения количества циклов нагружения. При этом необходимо отметить, что наибольшее увеличение деформаций происходит под плитным ростверком.

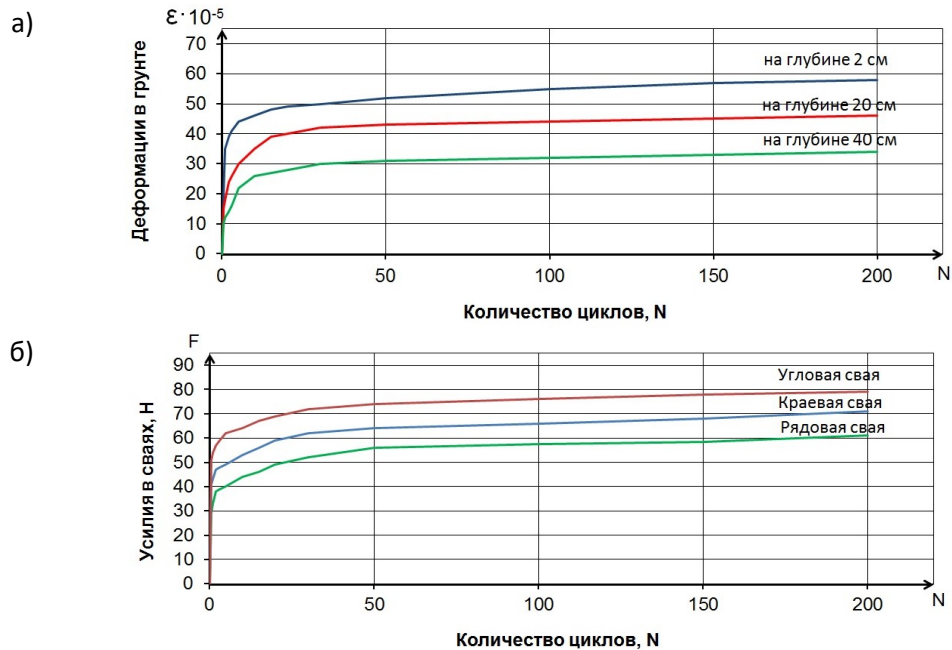


Рис. 4. Изменение деформаций в грунте межсвайного пространства (а) и усилий в сваях (б) плитно-свайного фундамента ПСФ-3 при циклическом нагружении (иллюстрации автора)

4. Заключение

Выполненные экспериментальные исследования деформаций оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении позволили установить:

1. При циклическом нагружении происходит изменение напряжений и усилий в сваях на разных зонах свайного основания. Напряжения в грунте и усилия в сваях с различной интенсивностью развиваются на всем протяжении испытаний наиболее интенсивные изменения происходят на начальной стадии нагружения, примерно до 100 циклов.

2. В условиях циклического нагружения, по мере увеличения количества циклов происходит увеличение деформаций в грунте межсвайного пространства по сравнению с первым циклом нагружения, но в то же время увеличиваются деформации в грунте под нижним концом свай. При этом происходит развитие усилий в сваях с увеличением количества циклов и наибольшие усилия возникают в угловых и рядовых сваях, а наименьшие в центральных. Наибольшие деформации возникают непосредственно под плитой ростверка, а наименьшие в зоне на уровне нижнего конца свай.

3. Анализ полученных результатов проведенных экспериментальных исследований позволил установить, что уменьшаются напряжения в грунте межсвайного пространства с увеличением количества циклов, происходит перераспределение усилий между грунтом межсвайного пространства и сваями.

4. Анализ изменения осадок оснований показывает, что в основном приращение осадок происходит за счет увеличения их необратимой части и составляет до 23-220 % от первоначальной при испытании в лотках.

Список литературы

1. Katzenbach R. et al. Soil-structure-interaction of Tunnels and Superstructures During Construction and Service Time // Procedia Engineering. 2013. Volume 57. P 35–44.
2. Katzenbach R., Leppla S., Ramm H., Seip M., Kuttig H.: Design and construction of deep foundation systems and retaining structures in urban areas in difficult soil and groundwater conditions. Procedia Engineering (57), 540-548 (2013).

3. Bhaduri A., Choudhury D.: Serviceability-Based Finite-Element Approach on Analyzing Combined Pile-Raft Foundation. *International Journal of Geomechanics* 2 (20), 43-51 (2020).
4. Boudaa S., Khalfallah S., Bilotta E.: Static interaction analysis between beam and layered soil using a two-parameter elastic foundation. *International Journal of Advanced Structural Engineering* 1 (11), 21-30 (2019).
5. Мирсаяпов Илизар Т., Королева И. В. Прочность и деформируемость глинистых грунтов при режимном пространственном напряженном состоянии с учетом трещинообразования // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2016. № 1. С. 16–23.
6. Шакиров И. Ф., Гайфуллина В. А. Исследование влияния добавок на инъекционные свойства цементных растворов, применяемых при укреплении грунтов напорной цементацией : сб. ст. Технические науки – от теории к практике – XXI Международной научно-практической конференции / СПбГАСУ. СПб. 2017. С. 37–41.
7. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlement of raft-pile foundations under cyclic loading : dig. of art. 1 st International conference on energy geotechnics / ICEGT. Kiel. Germany, 2016. P. 423–428.
8. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Behaviour of pile–plate foundations under cyclic loading : dig. of art. *Baltic Piling Days – Proceedings of the baltic piling days conference / Estonian Geotechnical Society ISSMGE*. Tallin, 2012. P. 31–34.
9. Mirsayapov, I.T., Koroleva, I.V.: Changes in physical and mechanical characteristics of soil under triaxial loading. In: CRC Press. CONFERENCE 2019, GFAC, vol.466, pp. 193-196.
10. R. Khuziakhmetov, D. Nurieva Determination of the Reasons for the Fallof Pile Driving Machine Main Technical Near the Slope of the Foundation Pit IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.890 162304. doi: 10.1088/1757-899X/890/1/012136
11. Mirsayapov, I.T., Aysin, N.N.: Influence of a deep construction pit on a technical condition of surrounding buildings. In: CRC Press. CONFERENCE 2019, GFAC, vol.466, pp 197-201.

References

1. Katzenbach R. et al. Soil-structure-interaction of Tunnels and Superstructures During Construction and Service Time // *Procedia Engineering*. 2013. Volume 57. P 35–44.
2. Katzenbach R., Leppla S., Ramm H., Seip M., Kuttig H.: Design and construction of deep foundation systems and retaining structures in urban areas in difficult soil and groundwater conditions. *Procedia Engineering* (57), 540-548 (2013).
3. Bhaduri A., Choudhury D.: Serviceability-Based Finite-Element Approach on Analyzing Combined Pile-Raft Foundation. *International Journal of Geomechanics* 2 (20), 43-51 (2020).
4. Boudaa S., Khalfallah S., Bilotta E.: Static interaction analysis between beam and layered soil using a two-parameter elastic foundation. *International Journal of Advanced Structural Engineering* 1 (11), 21-30 (2019).
5. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V. The strength and deformability of clay soils under the regime spatial stress state in view of cracking // *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov*. 2016. № 1. P. 16–23.
6. Shakirov I.F., Gayfullina V. A. Researches of the effect from additives on the cement mortars injection properties used in strengthening soil pressure cementation : dig. of art. Technical sciences – from theory to practice – XXI international scientific-practical conference / SPbGASU. SPb. 2017. P. 37–41.
7. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlement of raft-pile foundations under cyclic loading : dig. of art. 1 st International conference on energy geotechnics / ICEGT. Kiel. Germany, 2016. P. 423–428.
8. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Behaviour of pile–plate foundations under cyclic loading : dig. of art. *Baltic Piling Days – Proceedings of the baltic piling days conference / Estonian Geotechnical Society ISSMGE*. Tallin, 2012. P. 31–34.
9. Mirsayapov, I.T., Koroleva, I.V.: Changes in physical and mechanical characteristics of soil under triaxial loading. In: CRC Press. CONFERENCE 2019, GFAC, vol.466, pp. 193-196.

10. R Khuziakhmetov, D. Nurieva Determination of the Reasons for the Fallof Pile Driving Machine Main Technical Near the Slope of the Foundation Pit IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.890 162304. doi: 10.1088/1757-899X/890/1/012136

11. Mirsayapov, I.T., Aysin, N.N.: Influence of a deep construction pit on a technical condition of surrounding buildings. In: CRC Press. CONFERENCE 2019, GFAC, vol.466, pp 197-201.

Информация об авторах

Марат Илдусович Шакиров, ассистент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
E-mail: shakirovm123@mail.ru

Information about the authors

Marat I. Shakirov, assistant, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation
E-mail: shakirovm123@mail.ru