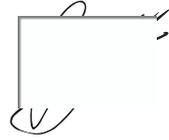


На правах рукописи



ШАКИРОВ Марат Илдусович

**ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО
СОСТОЯНИЯ ГЛИНИСТЫХ ОСНОВАНИЙ
ПЛИТНО-СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ
ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Специальность:

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: **Мирсаяпов Илизар Талгатович**
доктор технических наук, профессор,
член-корр. РААСН

Официальные оппоненты: **Полищук Анатолий Иванович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», г. Краснодар, кафедра «Оснований и фундаментов», заведующий.

Дьяконов Иван Павлович
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра геотехники, доцент.

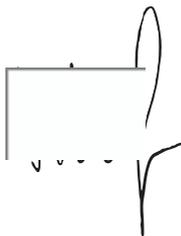
Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет».**

Защита состоится «02» февраля 2023 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.04 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационных советов (аудитория №220 главного корпуса). Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/shakirov-marat-ildusovich>

Автореферат разослан «12» декабря 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Конюшков Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современных условиях при строительстве зданий и сооружений тенденция увеличения нагрузок на грунтовые основания и использование в качестве оснований слабых грунтов способствовали тому, что одним из наиболее распространенных способов увеличения несущей способности и уменьшения осадок, является применение плитно-свайных фундаментов. При этом данный вид фундаментов и их основания наряду со статическими, подвергаются воздействию различного рода циклических нагрузок, которые в целом ряде случаев являются основными, определяющими безопасность эксплуатации зданий и сооружений.

При проектировании зданий и сооружений, во время эксплуатации которых возникает необходимость в совместном учете статических и циклических воздействий, в числе первоочередных задач выступает установление несущей способности фундамента, а также прогнозирование вертикальных деформаций оснований фундаментов, особенно с учетом имеющего место изменения прочностных и деформационных характеристик элементов комбинированного плитно-свайного фундамента и грунтов оснований при циклическом нагружении.

В этой связи, разработка методов несущей способности и расчета осадок плитно-свайных фундаментов на глинистом основании при наличии циклических воздействий является актуальным вопросом.

Степень разработанности темы. Посвященные исследованию плитно-свайных фундаментов работы, имеющиеся в большом количестве, в основном определяют теоретические закономерности поведения плитно-свайных фундаментов под действием статической нагрузки.

Совместное деформирование системы «плитный ростверк – сваи – грунтовое основание» при циклических воздействиях с учетом перераспределения напряжений в элементах вышеуказанной системы на сегодняшний день в исследованиях практически не рассмотрены.

Изменение напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента и его грунтового основания, происходит в соответствии с количеством циклов нагружений. При этом существует зависимость от изменения деформационных и прочностных свойств материала свай, плиты ростверка, грунта межсвайного пространства и в области под нижним концом свай.

Методики определения осадок и несущей способности в текущих нормах проектирования предусмотрены для краткосрочного статического нагружения, с учетом того, что данные нагружения неизменны в процессе всего цикла жизни здания или сооружения. Имеющиеся методы расчета в полной мере не могут учесть особенности изменения напряженно-деформированного состояния глинистых грунтов, служащих основанием плитно-свайного фундамента, испытывающего циклическое нагружение.

В диссертационной работе рассматривается поиск закономерностей, общих принципов расчета и теории, позволяющих дать более точные сведения о поведении плитно-свайных фундаментов в условиях воздействия циклического нагружения.

Цель диссертационной работы является исследование напряженно-деформируемого состояния плитно-свайного фундамента и создание методов расчета для определения несущей способности и осадок для плитно-свайных фундаментов на глинистых основаниях при циклическом нагружении.

Практические и научные задачи:

1. Произвести анализ методов расчета несущей способности и деформаций свайных, плитных и плитно-свайных фундаментов в случае циклического и статического нагружения, существующих в настоящее время, обзор и оценку результатов экспериментальных и теоретических исследований и расчетных моделей для плитно-свайных фундаментов при циклическом и статическом нагружении;

2. Выполнить экспериментальные исследования плитно-свайных фундаментов, включая лотковые и полевые исследования несущей способности и осадок на глинистом основании при статическом и циклическом нагружении;

3. Определить деформации и напряжения, возникающие в элементах плитно-свайного фундамента при действии циклического нагружения.

4. Определить взаимодействия между элементами системы «сваи – плитный ростверк – грунтовое основание» при действии циклической нагрузки на какой-либо плитно-свайный фундамент.

5. Разработка расчетной модели для плитно-свайного фундамента при действии нагрузки по циклическому закону;

6. Подготовить инженерные методы расчета для определения осадки глинистых оснований и несущей способности для плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении;

7. Выполнить апробацию предложенных методов расчета для определения осадок глинистых оснований и несущей способности плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении.

Объект исследования: Плитно-свайные фундаменты на глинистых основаниях при действии циклического нагружения.

Предмет исследования: Влияние циклического нагружения на несущую способность и осадки плитно-свайных фундаментов на глинистых основаниях.

Научная новизна работы:

1. Получены новые экспериментальные данные об особенностях поведения плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении, развитии осадок и потери несущей способности при натурных испытаниях реального объекта и моделей фундамента в лабораторных условиях.

2. Разработана расчетная модель деформирования элементов конструкции плитно-свайного фундамента с учетом возникающего напряженно-деформированного состояния при циклическом нагружении.

3. Получены аналитические зависимости для описания процесса изменения несущей способности и осадки плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении;

4. Разработан метод расчета несущей способности плитно-свайных фундамента при циклическом нагружении;

5. Разработан инженерный метод расчета осадок оснований плитно-свайных фундамента при циклическом нагружении.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в предложенных инженерных методиках определения несущей способности и деформаций плитно-свайных фундамента на глинистых основаниях, позволяющих оценить влияние циклического нагружения на здания и сооружения, возведенных на плитно-свайных фундаментах, с возможностью получения оптимальных проектных решений при проектировании плитно-свайных фундамента.

Теоретическая значимость работы:

– зафиксированы новые экспериментальные данные об изменении напряжений и деформаций в элементах фундамента, в том числе в сваях, в грунте между сваями и под их нижним концом, а также о развитии осадки плитно-свайного фундамента при циклической передаче нагрузки на фундамент;

– предложены аналитические зависимости для вычисления напряжений в элементах плитно-свайного фундамента при действии циклического нагружения;

– получены аналитические уравнения, описывающие изменение осадки и несущей способности плитно-свайного фундамента при действии циклического нагружения;

– разработаны методы расчета несущей способности и осадок плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении с учетом пространственного напряженного состояния свайного основания.

Методология и методы исследования:

Основой исследований, выполненных при подготовке диссертационной работы, являются источники в области геотехники и свайных фундамента, авторами которых являются отечественные и зарубежные ученые, теоретические и экспериментальные методы которые базируются на экспериментальных исследованиях, обобщении и сравнении результатов.

Положения, вынесенные на защиту:

- результаты экспериментальных исследований несущей способности и осадок оснований плитно-свайных фундамента при статическом и циклическом нагружении;

- аналитические зависимости для описания процесса изменения несущей способности и осадки глинистых оснований плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении;

- инженерный метод расчета осадок оснований плитно-свайных фундамента при циклическом нагружении;

- метод расчета несущей способности оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении.

Личный вклад автора заключается в создании метода и в проведении экспериментальных исследований, обработке результатов полученных в ходе проведения экспериментов, проведении анализа и обобщения полученных данных, определении основных закономерностей поведения плитно-свайного фундамента, изменения прочностных и деформационных свойств отдельных компонентов фундамента, разработке расчетного аппарата осадок глинистых оснований и несущей способности плитно-свайных фундаментов при действии циклического нагружения инженерным методом.

Степень достоверности и апробация результатов. Обоснованность и правильность результатов диссертационной работы, полученных выводов подтверждаются использованием в работе законов механики грунтов, проведением экспериментов с использованием современного оборудования и контрольно-измерительных приборов, прошедших поверку и апробацию, дающих необходимую при испытаниях точность измерений, сходимостью экспериментальных данных при сравнении с теоретическими расчетами на основании использования рекомендованных методов.

Основные экспериментально-теоретические результаты диссертационной работы докладывались во время выступления на таких мероприятиях, как ежегодно проводимая Общероссийская конференция молодых ученых, работников и специалистов СПбГАСУ (г. Санкт-Петербург 2012–2013 г.), Международные конференции КГАСУ (г. Казань, 2012–2019 гг.), Международная научно-техническая конференция БНТУ (г. Минск, 2013 г.), Общероссийская конференция «Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов» (г. Йошкар-Ола 2013 г.), Международная межвузовская научно-практическая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных «Строительство – Формирование среды жизнедеятельности» МГСУ (г. Москва, 2014 г.), Международный научно-технический симпозиум КГАСУ (г. Казань, 2014 г.), Международная научно-техническая конференция по геотехнике и энергетике (Германия, Киль 2016 г.), Российская учебно-практическая молодежная конференция по геотехнике (г. Москва, 2015–2016 гг.), Международная научная конференция «Нелинейная механика грунтов и численные методы расчетов в геотехнике и фундаментостроении» (г. Воронеж, 2019 г.), Международная научная конференция «International Scientific Conference on Sociotechnical Construction and Civil Engineering» (г. Казань, 2020–2022 гг.).

Область исследования соответствует требованиям в паспорте научной специальности ВАК 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения, а конкретно п.4 «Разработка новых методов расчета, конструирования и устройства фундаментов на естественном основании, глубокого заложения и свайных фундаментов с учетом взаимодействия их с над фундаментными конструкци-

ями, фундаментами близ расположенных зданий и сооружений и конструкциями подземных сооружений», п. 6 «Разработка новых методов расчета, конструирования и устройства оснований, фундаментов и подземных сооружений в условиях действия динамических и сейсмических нагрузок» и п.9 «Разработка научных основ и основных принципов создания новых, теоретически и экспериментально обоснованных моделей грунтовых сред и основанных на их использовании методов определения свойств грунтов, расчета оснований, фундаментов и подземных сооружений».

Публикации. Ключевые результаты исследования представлены в 21 научной публикации. Из них 6 опубликовали в отечественных рецензируемых научных журналах по перечню ВАК, 5 – в журналах из международных реферативных баз Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа содержит введение, 5 разделов, главные выводы, перечень литературы. Работа представлена на 148 листах печатного текста, содержит в себе 10 таблиц и 71 рисунок.

Автор выражает благодарность научному руководителю члену-корреспонденту РААСН, доктору технических наук, профессору Мирсаяпову Илизару Талгатовичу за помощь в организации и проведении исследований, постоянную поддержку и содействие, оказанное во время выполнения диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, сформулированы основная цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость работы.

В первой главе выполнен анализ результатов имеющихся опытных и теоретических исследований, в которых установлены основные закономерности определения несущей способности и развития осадки оснований свайных фундаментов.

В настоящее время накоплено большое количество экспериментальных и теоретических исследований свайных и плитно-свайных фундаментов при кратковременных статических нагружениях. Разработанные для кратковременного статического нагружения инженерные методы расчета несущей способности и осадок оснований плитно-свайных фундаментов, в полной мере не в состоянии учитывать особенности изменения напряженно-деформированного состояния в свайном основании и в грунте под нижним концом свай плитно-свайного фундамента, а также взаимодействия его элементов в системе «плитный ростверк – сваи – грунт межсвайного пространства – грунт ниже острия свай» при циклическом нагружении, что приводит к существенному снижению надежности проектных решений.

Во второй главе приведена методика проведения исследований плитно-свайных фундаментов, а также одиночных свай при статическом и циклическом нагружении.

Экспериментальные исследования проводились в объемном лабораторном лотке с размерами 1,0×1,0×1,0 м. В качестве ростверка модели фундамента использовалась железобетонная плита с размерами 400×400×40 мм.

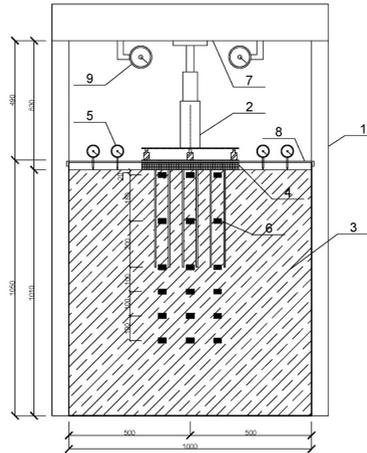


Рис. 1. Схема испытания в лабораторных условиях

Сваи моделировались полыми пластиковыми трубками диаметром 7 мм, с длиной 400 мм, толщиной стенки 1 мм, со следующими механическими характеристиками: модулем деформации $E_{сж}^{пл} = 700$ МПа, прочность на сжатие $R_{сж}^{пл} = 92$ МПа. Во всех испытаниях установка свай осуществлялась путем послойной отсыпки и уплотнения грунта межсвайного пространства, при этом оголовки свай жестко соединялись с плитой ростверка. На разных уровнях от плиты ростверка для определения деформаций в грунте были установлены датчики давления. Усилия в сваях определялись с помощью наклеенных по всей длине свай тензорезисторов. Осадки фиксировались с помощью прогибомеров 6 ПАО с ценой деления 0,01 мм (рис. 1).

В качестве грунта основания для проведения лабораторных испытаний использовалась, просеянная через стандартное сито с ячейками 2 мм., характерная для г. Казани светло-коричневая пластичная супесь, со следующими параметрами: плотность $\rho = 1,5$ г/см³; влажность $W = 12$ %; число пластичности $I_p = 0,06$; показатель текучести $I_L = 0,52$; удельное сцепление $c = 4,5$ кПа; угол внутреннего трения $\varphi = 20^\circ$, модуль деформаций $E = 7$ МПа. Грунты подготавливались в соответствии с ГОСТ 30416-2012.

Для установления влияния циклического нагружения на несущую способность и осадки плитно-свайного фундамента, были проведены экспериментальные исследования при статическом и циклическом нагружении.

Максимальная нагрузка при кратковременных статических испытаниях, прикладываемая до достижения предельной несущей способности, использо-

валась для определения максимальных нагрузок в течении цикла при циклическом нагружении.

Циклические нагрузки, принимаемые по синусоидальному закону и при различных значениях максимальной и минимальной нагрузки цикла, передавались гидравлическим домкратом на модель плитно-свайного фундамента с частотой 0,05Гц. Коэффициент асимметрии цикла нагрузки принимался равным $\rho = \frac{F_{\min}}{F_{\max}} = 0,5$ для всех испытанных моделей плитно-свайного фундамента (табл. 1).

Несущая способность плитно-свайного фундамента для каждого испытания определена экспериментально, при достижении максимальной осадки $S_u = 80$ мм, т. к. после достижения значения 80 мм, осадки развивались непрерывно, неконтролируемо.

Таблица 1

Режимы испытания модели при циклическом нагружении

№ п/п	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	Плитный, образец № 6	циклическая	–	400	200	500
8	Одиночные сваи	статическая	40	8	–	–
9	Одиночные сваи	статическая	40	6	–	–
10	Одиночные сваи	циклическая	40	4	2	80
11	Одиночные сваи	циклическая	40	4	2	80
12	ПСФ, полевые испытания	циклическая	200	25 000	12 500	3000

Помимо лотковых испытаний моделей плитно-свайного фундамента в лабораторных условиях, проведены полевые испытания плитно-свайного фундамента на базе испытательного полигона ФГБОУ ВО КГАСУ.

В качестве грунтового основания применялась супесь пластичная. Грунт уплотнялся равными слоями и режим уплотнения для всех исследуемых образцов был единым. После уплотнения до начала испытаний, в течение 1 месяца грунт выдерживался под собственным весом.

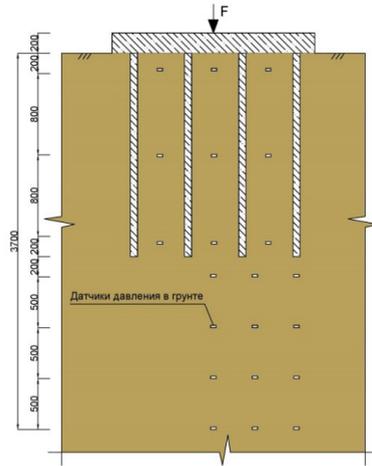


Рис. 3. Схема испытания в полевых условиях

Для определения начальных физико-механических характеристик грунтового основания, были пробурены скважины и отобраны пробы грунта методом режущих колец. У полученных значений отклонение от заданных величин находилось в пределах 0,2% по влажности и по 0,2 кН/м³ по удельному весу, что подтверждает однородность распределения плотности и влажности приготовленного образца грунта $\rho = 1,65$ г/см³, $w = 12\%$, $E = 12,8$ МПа. Также были определены параметры образца грунта: число пластичности $I_p = 0,05$; показатель текучести $I_L = 0,56$; угол внутреннего трения $\varphi = 22^\circ$, удельное сцепление частиц грунта $c = 5$ кПа.

Сваи плитно-свайного фундамента изготавливались следующим образом: сначала пробуривалась скважина длиной 2000 мм, диаметром 70 мм, далее производилась армирование сваи из арматурной стали класса А400 $\varnothing 10$ мм. Для измерения усилий в сваях на арматурные стержни были наклеены тензометрические датчики. Затем скважина заливалась мелкозернистым бетоном класса В15, W4. В качестве плиты была устроена монолитная железобетонная плита с размерами 2,0×2,0 м и высотой 0,2 м, выполненная из тяжелого бетона класса В15 и армированием из арматуры класса А400 $\varnothing 10$ мм с шагом 150×150 мм. Схемы расположения датчиков давления в грунте и свай с установленными на них тензорезисторами показаны на рис. 3.

Осадка плитно-свайного фундамента фиксировалась при помощи прогибомеров 6 ПАО с ценой деления 0,01 мм. Вертикальное нагружение плит-

но-свайного фундамента осуществлялось с помощью гидравлического домкрата. Испытания грунта при циклическом нагружении проводились по следующей методике: сначала на плитно-свайный фундамент ступенями прикладывалась вертикальная статическая нагрузка с интервалом 30 минут, затем при достижении осадки $S = 30$ мм, соответствующей вертикальному нагружению $P_{\max} = 25$ т, начиналась разгрузка плитно-свайного фундамента до $P_{\min} = 12,5$ т.

Циклическое нагружение прикладывалось с чистотой 0,05 Гц. В качестве предельно допустимой осадки плитно-свайного фундамента было принято значение равное 80 мм.

В третьей главе приводится описание результатов экспериментальных исследований плитно-свайных фундаментов и одиночных свай при статическом и циклическом нагружении.

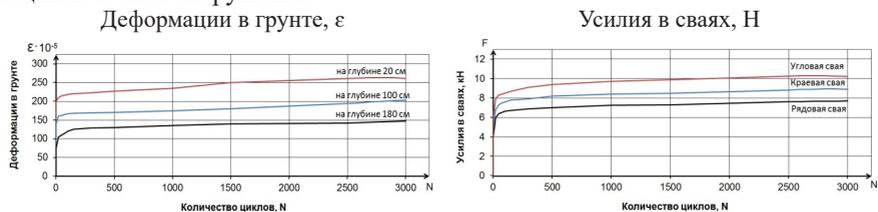


Рис. 4. Изменения деформаций в грунте и усилий в сваях при циклическом нагружении в полевых испытаниях

По результатам экспериментальных исследований плитно-свайного фундамента получены графические зависимости между вертикальной нагрузкой и осадкой, нагрузкой и усилиями в сваях, нагрузкой и деформациями в грунте при статическом нагружении; между количеством циклов нагружения и осадкой, усилиями в сваях, деформациями в грунте при циклическом нагружении.

В условиях циклического нагружения, по мере увеличения количества циклов происходит уменьшение 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. Графики развития деформаций в грунте (рис. 4) показывают, что наибольшие деформации возникают непосредственно под плитой ростверка, а наименьшие в зоне на уровне нижнего конца свай.

Анализ полученных результатов проведенных экспериментальных исследований позволил установить, что уменьшаются деформации в грунте межсвайного пространства с увеличением количества циклов, происходит перераспределение усилий между грунтом межсвайного пространства и сваями. При этом в зоне под нижним концом свай перераспределения нет, где происходит рост деформаций ниже условного фундамента.

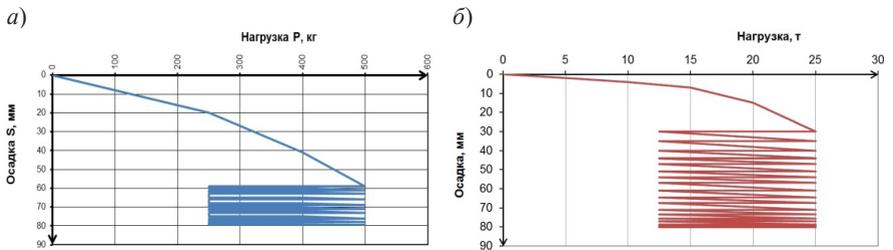


Рис. 5. Графики развития осадки плитно-свайного фундамента при испытании: а) в лабораторных условиях; б) в полевых условиях

По результатам экспериментальных исследований построены графики (рис. 5) изменения осадки модели плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении. Измеренные в процессе циклических нагружений осадки основания, изменяются аналогично деформациям грунта межсвайного пространства после различного количества повторной нагрузки.

На основании проведенных исследований, установлено, что предельная величина циклической нагрузки, воспринимаемая плитно-свайным фундаментом, зависит от условий совместного деформирования грунта, свай, плитного ростверка, их прочностных и деформационных свойств.

Четвертая глава диссертации посвящена описанию и разработке расчетной модели деформирования элементов системы «плитный ростверк – сваи – грунт межсвайного пространства – грунт ниже острия свай» в плитно-свайном фундаменте при циклическом нагружении.

В основании плитно-свайного фундамента совместно деформируются материалы с различными прочностными и деформационными свойствами. Развитие деформаций свайного основания при циклическом нагружении происходит в условиях взаимодействия грунта и свай в связанных условиях. Свободные деформации грунта сдерживается сваями, при этом свободному деформированию свай препятствует окружающий грунт.

В результате такого взаимодействия между элементами в свайном основании возникает дополнительное напряженное состояние и происходит перераспределение усилий между грунтом и сваями при циклическом нагружении. При этом напряжение в сваях увеличивается, а в грунте между сваями уменьшаются по сравнению с первым циклом.

Текущие напряжения в свайном основании представляются в виде:

$$\sigma_p^{\max}(N) = \sigma_p^{\max}(N_1) + \Delta\sigma_p(N) \quad (1)$$

$$\sigma_{gr}^{\max}(N) = \sigma_{gr}^{\max}(N_1) - \Delta\sigma_{gr}(N) \quad (2)$$

где $\sigma_p^{\max}(N_1)$, $\sigma_{gr}^{\max}(N_1)$ – максимальные напряжения цикла при первом цикле нагружения в сваях и грунте соответственно.

$\sigma_p^{\max}(N)$, $\sigma_{gr}^{\max}(N)$ – дополнительные напряжения, возникающие в свайном

основании в процессе циклического напряжения в сваях и в грунте соответственно.

Аналитические выражения для определения дополнительных (остаточных) напряжений в грунте межсвайного пространства и в сваях представляются в виде:

$$\Delta\sigma_{gr}(N) = \frac{\varepsilon_{pl}^{gr}(N) \cdot E_p(N) \cdot \frac{A_{p1} \cdot n}{A_{gr}}}{1 + \frac{E_p(N)}{E_{gr}(N)} \cdot \frac{A_{p1} \cdot n}{A_{gr}}} \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_p(N) = \frac{\varepsilon_{pl}^{gr}(N) \cdot E_p(N)}{1 + \frac{E_p(N)}{E_{gr}(N)} \cdot \frac{A_{p1} \cdot n}{A_{gr}}} \quad (4)$$

где $\varepsilon_{pl}^{gr}(N)$ – деформации циклической ползучести грунта;

A_{p1} – площадь поперечного сечения одной сваи;

n – общее количество свай в расчетной площади основания.

Вышеописанные особенности деформирования свайного основания при циклическом нагружении использованы при разработке расчетной модели деформирования плитно-свайного фундамента. Этот процесс рассматривается в пространственной постановке с учетом совместного деформирования всех элементов системы «плитный ростверк–сваи–грунт межсвайного пространства–грунт ниже острия свай» за счет жесткого соединения свай и плитного ростверка и перераспределения усилий между элементами системы.

Напряжения в отдельных конкретных зонах системы определяются путем совместного решения пяти уравнений квазистатики, при этом за основу приняты уравнения, разработанные профессором З. Г. Тер-Мартirosяном и его учениками, для случая статического нагружения, и модифицированные для случая циклического нагружения в зависимости от количества циклов нагружения и параметров циклического нагружения. При этом учитываются изменения зоны предельного равновесия по боковой поверхности свай в зависимости от координаты точки пересечения эпюр мобилизованного касательного напряжения $\tau(N)$ и предельного касательного напряжения $\tau^*(N)$ (рис. 6).

Для аналитического описания процесса несвободного деформирования элементов принята расчетная схема (рисунок 6), предложенная профессором З. Г. Тер-Мартirosяном.

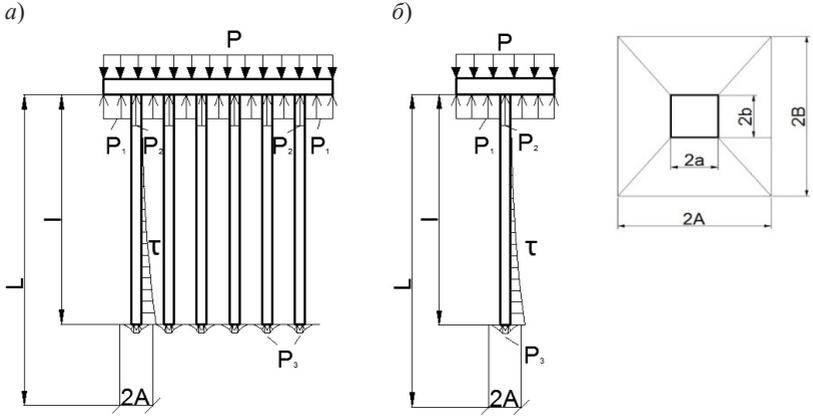


Рис. 6. Расчетная схема взаимодействия: а) плитно-свайного фундамента с массивом грунта; б) одиночной сваи с однородным массивом грунта с размером ячейки $2A \times 2B$

Разработаны уравнения механического состояния грунта и системы «свая – грунт», а также уравнения равновесия усилий.

$$\left\{ \begin{aligned}
 p \cdot AB &= p_2(N) \cdot ab + p_1(N)(AB - ab) \\
 p_2(N) \cdot ab &= p_3(N) \cdot ab - 4(a+b) \cdot l \cdot \frac{\tau_0(N)}{\alpha} \cdot e^{-\alpha l} + (a+b) \cdot l \cdot \frac{\tau_0(N)}{\alpha} \\
 \frac{p_1(N) \cdot \beta_{gr} \cdot L}{E_{gr}(N)} \left(1 - \frac{l}{L} \right) + \frac{k_1 \cdot \tau_0(N) \cdot (A-a)}{3G_{gr}(N)} + \frac{k_2 \cdot \tau_0(N) \cdot (B-b)}{3G_{gr}(N)} &= \\
 &= \frac{\omega \cdot a \cdot p_3(N) \cdot (1 - \nu_{gr}) \cdot k(l)}{G_{gr}(N)} \\
 \frac{p_1(N) \cdot \beta_{gr} \cdot L}{E_{gr}(N)} + \frac{k_1 \cdot \tau_0(N) \cdot e^{-\alpha l} \cdot (A-a)}{3G_{gr}(N)} + \frac{k_2 \cdot \tau_0(N) \cdot e^{-\alpha l} \cdot (B-b)}{3G_{gr}(N)} &= \\
 &= \frac{\tau_0(N)(a+b)l}{ab\alpha \cdot E_p} + \frac{\tau_0(N)(a+b)e^{-\alpha l}}{ab\alpha^2 \cdot E_p} + \\
 \frac{p_3(N) \cdot l}{E_p} + \frac{\omega \cdot a \cdot p_3(N) \cdot (1 - \nu_{gr}) \cdot k(l)}{G_{gr}(N)} - \frac{\tau_0(N)(a+b)}{ab\alpha^2 \cdot E_p} &
 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$p_1(N) = \sigma_{gr1}^{\max}(N) - \Delta\sigma_{gr}(N) \quad (6)$$

$$p_2(N) = \sigma_p^{\max}(N) + \Delta\sigma_p(N) \quad (7)$$

$$p_3(N) = \sigma_{gr3}^{\max}(N) - \Delta\sigma_{gr}(N) \quad (8)$$

$$\tau(N) = \tau_0^*(N) \cdot e^{-\alpha z} \quad (9)$$

$$\tau(z) = \tau_0 \cdot e^{-\alpha z} \quad (10)$$

Совместное решение системы уравнений позволяет получить искомые значения осадок и несущей способности плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении.

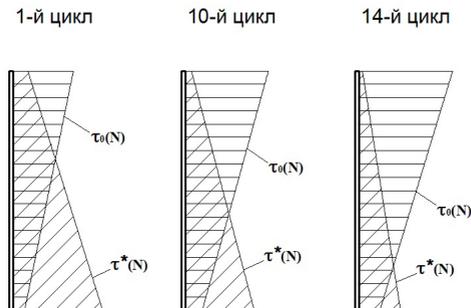


Рис. 7. Эпюры мобилизованного касательного напряжения и предельного касательного напряжения

Зоны предельного равновесия, учитывая жесткость материала сваи, определяются точкой пересечения эпюр мобилизованного касательного напряжения ($\tau(N)$) и предельного касательного напряжения (рис. 7). Предельное касательное напряжение при циклическом нагружении вычисляется по формуле:

$$\tau^*(N) = \gamma \cdot z \cdot \text{tg}\varphi(N) + c(N) + \Delta\sigma_x^{\text{лоп}} \cdot \text{tg}\varphi(N) \quad (11)$$

где, $c(N)$ – удельное сцепление грунта при циклическом нагружении.

Касательное напряжение $\tau_0(N)$ определяется следующим образом:

$$\tau_0(N) = \frac{a \cdot b (p_3(N) - p_2(N))}{(a + b) \cdot l \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot (4e^{-\alpha l} - 1)} \quad (12)$$

В зависимости от длины сваи на уровень пяты может приходиться различная доля нагрузки, т. к. в случае увеличения длины сваи, растет площадь боковой поверхности.

Напряжения, возникающие в грунте под ростверком, на уровне оголовка сваи, под пятой сваи определяются из совместного решения системы уравнений (5–10). Несущая способность плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении определяется при расчетных значениях ($\gamma_f > 1$) нагрузки, прочностных и деформационных характеристик грунта с учетом снижения усталостной прочности и увеличения деформации циклической ползучести по величине предельного сопротивления грунтового основания по условию ограничения развития в нем вертикальных деформаций, в соответствии с заранее заданными условиями и в зависимости от соотношения $\tau_0(N) \leq \tau^*(N)$ оценивается из условий:

$$p_1(N) \leq \sigma_{1u}(N) \quad (13)$$

$$p_3(N) \leq \sigma_{1u}(N) \quad (14)$$

где, $\sigma_{1u}(N)$ – предельные напряжения в грунте при трехосном циклическом нагружении, которые определяются на основании модели грунта при трехосном сжатии разработанной профессором Мирсаяповым И. Т. и Королевой И. В. и записывается в виде:

$$\sigma_{1u}(N) = \frac{4}{A_1} \left[\sigma_v(t, t_1, N) \cdot A_{sh} \cdot \cos \alpha_1 \cdot (t, t_1, N) + \tau_v(t, t_1, N) \cdot A_{sh} \cdot \sin \alpha_1 \cdot (t, t_1, N) \right] \quad (15)$$

При одновременном выполнении условий (13) и (14) несущая способность основания плитно-свайного фундамента обеспечена. Если условия не выполняются, несущая способность основания не обеспечивается и возможны три варианта достижения предельного состояния по несущей способности:

- 1) под плитным ростверком, а затем после какого-то количества циклов под нижним концом сваи;
- 2) под нижним концом сваи;
- 3) одновременное достижение под плитным ростверком и под нижним концом сваи, т.е. в грунте под плитным ростверком $P_{1(N)}^{\max} \leq \sigma_{1u}(N)$, в грунте под нижним концом сваи $P_{3(N)}^{\max} \leq \sigma_{1u}(N)$.

Этот процесс периодически повторяется в процессе циклического нагружения, пока осадки основания не станут больше чем предельно допустимые.

Для расчета осадки основания плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении используется модель, принятая по СП 24.13330.2011. Исходя из нее, общая осадка представляется в виде суммы осадок условного фундамента, дополнительной осадки за счет продавливания сваей грунта на уровне подошвы условного фундамента и дополнительной осадки за счет сжатия ствола свай, которые определяются из решения системы ранее приведенных уравнений (5–10).

Осадка условного фундамента при циклическом нагружении определяется исходя из приведенной расчетной схемы на рис. 8. Принимается объемное напряженное состояние грунта основания условного фундамента. Разбивая сжимаемую толщу основания на слои, для каждого слоя, исходя из схемы для девиатора напряжений, определяем деформации, соответствующие значению вертикального давления, а затем значения деформации в пределах сжимаемой толщи суммируется.

Расчет величины деформации основания условного фундамента проводится в следующей последовательности:

$$\sigma_z = \sigma_{zqi} + \sigma_{zpi} \quad \sigma_y = \sigma_{yqi} + \sigma_{ypi} \quad \sigma_x = \sigma_{xqi} + \sigma_{xpi} \quad (16)$$

Вычисляются суммарные значения напряжений от собственного веса грунта и дополнительной нагрузки на основание

Определяются условные модули: $K_v(N)$ – объемный модуль и $G_v(N)$ – модуль сдвига грунта, характеризующие переход из природного состояния основания, в состояние после приложения циклической нагрузки.

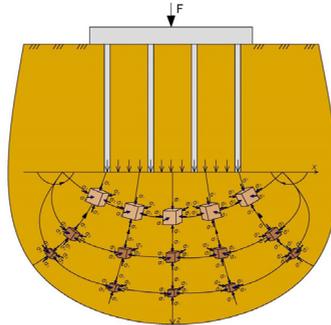


Рис. 8. Схема объемного напряженно-деформированного состояния основания условного фундамента при циклическом нагружении

Приращение осевой деформации i -го слоя в момент нагружения определяется по формуле:

$$\Delta \varepsilon_{z,i} = \frac{\Delta \sigma_z}{G_V} - \Delta \sigma \cdot \frac{3K_V - G_V}{3K_V \cdot G_V} \quad (17)$$

Приращение осевой деформации i -го слоя при циклическом нагружении определяется по формуле:

$$\Delta \varepsilon_{z,i}(N) = \frac{\Delta \sigma_z(N)}{G_V(N)} - \Delta \sigma \cdot \frac{3K_V(N) - G_V(N)}{3K_V(N) \cdot G_V(N)} \quad (18)$$

Осадку условного фундамента при циклическом нагружении можно вычислить по формуле:

$$S_{ef} = \sum_{i=1}^n (\Delta \varepsilon_{z,i} + \Delta \varepsilon_{z,i}(N)) \cdot h_i, \quad (19)$$

где, h_i – толщина i -го слоя; n – количество слоев.

$\Delta \varepsilon_{z,i}$ – приращение осевой деформации i -го слоя в момент приложения нагрузки;

$\Delta \varepsilon_{z,i}(N)$ – приращение осевой деформации i -го слоя при циклическом нагружении.

При определении осадки продавливания плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении, рассматривается предельное напряженно-деформированное состояние системы «плитный ростверк-свая-грунт межсвайного пространства-грунт ниже острия сваи».

Осадка продавливания плитно-свайного фундамент определяется для стадии, когда касательные напряжения по боковой поверхности отсутствуют в верхней и средней части свай вследствие достижения предельного сопротивления на сдвиг. Принимается, что в грунте под подошвой плитного ростверка и под острием сваи реализуется пространственное напряженное состояние. Продавливание грунта под острием сваи происходит когда напряжения под пятой сваи и под плитным ростверком превышают усталостную прочность и предельные деформации грунта при трехосном циклическом сжатии.

После определенного количества циклов нагружения напряжения в грунте достигают предела выносливости в каком-то из элементов:

- под плитным ростверком, а затем после какого-то количества циклов под нижним концом сваи;
- под нижним концом сваи;
- одновременное достижение под плитным ростверком и под нижним концом сваи. Затем происходит продавливание тонкого слоя грунта под нижним концом сваи и, как следствие, происходит приращение перемещения (осадка) плитно-свайного фундамента. Этот процесс периодически повторяется, пока общая суммарная осадка свайного фундамента не достигает заданного предельного значения для конкретного здания или сооружения.

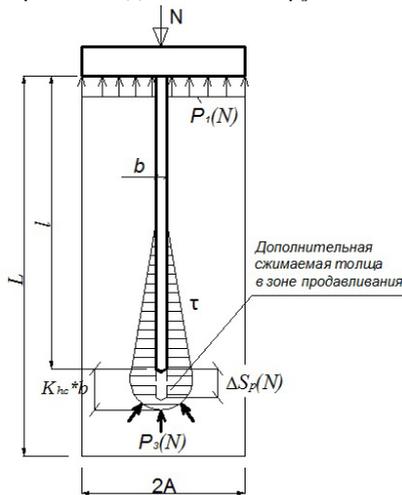


Рис. 9. Расчетная схема системы свая-грунт при расчете осадки продавливания

Исходя из вышеперечисленного и принятой расчетной схемы системы «свая-грунт» (рис. 9), осадки продавливания плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении определяются методом послойного суммирования деформаций слоев, при разделении условной глубины дополнительной сжимаемой толщи в зоне продавливания на равные слои:

$$\Delta S_p(N) = \sum_{i=1}^n K_{HC} \cdot b \cdot \varepsilon_{zi}(N), \quad (20)$$

где $K_{HC}(N)$ – коэффициент учитывающий размеры зоны продавливания при максимальной нагрузке цикла;

$\varepsilon_z(N)$ – относительная вертикальная деформация грунта в зоне продавливания сваи в условиях напряженного состояния в i -ом слое грунта.

Относительная осевая вертикальная деформация в грунте в зоне продавливания сваи представляется в виде:

$$\varepsilon_z(N) = \Delta \varepsilon_z = \frac{\Delta \sigma_z(N)}{G_v(N)} - \Delta \sigma_i(N) \frac{3K_v(N) - G_v(N)}{3K_v(N) \cdot G_v(N)}, \quad (21)$$

где $\Delta\sigma_z(N)$ – приращение вертикальных напряжений в грунте при циклическом нагружении;

$\Delta\sigma_i^{\max}$ – интенсивность напряжений в грунте в зоне продавливания сваи;

$\Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y = P_3^{\max}(N) \cdot \cos\varphi$; $\Delta\sigma_z(N) = P_3^{\max}(N)$;

$K_v(N)$ – условный модуль объемных деформаций;

$G_v(N)$ – условный модуль сдвига грунта при трехосном сжатии;

$\Delta\varepsilon_i(N)$, $\Delta\varepsilon_i(N)$, – приращение объемных деформаций и интенсивности деформаций при циклическом нагружении.

Дополнительная осадка плитно-свайного фундамента за счет сжатия ствола при действии циклических нагрузок происходит за счет деформации бетона сваи при первом цикле нагружения и за счет деформации стесненной циклической ползучести бетона при последующих циклах нагружения.

При этом рассматривается **две стадии**. Первая стадия соответствует первому циклу нагружения до максимальной нагрузки цикла, и расчеты производятся как для статического нагружения.

На второй стадии рассматривается влияние деформаций циклической ползучести железобетонной сваи на увеличение общих деформаций ствола сваи, и как следствие дополнительных осадок плитно-свайного фундамента за сжатия ствола сваи.

Эти случаи автоматически учитываются при решении системы уравнений (5–10) для разных уравнений нагрузки и количества циклов нагружения.

При этом дополнительная осадка $\Delta S_c(N)$ представляется в виде суммы:

$$\Delta S_c(N) = \Delta S_{c1}(N=1) + \Delta S_{c2}(N), \quad (22)$$

где $\Delta S_{c1}(N=1)$ – дополнительная осадка за счет сжатия ствола сваи при первом нагружении до максимальной нагрузки.

$\Delta S_{c2}(N)$ – дополнительная осадка за счет сжатия ствола сваи при циклическом нагружении, вследствие развития и накопления стесненных деформаций циклической ползучести бетона.

Сопоставление результатов расчета несущей способности и осадок плитно-свайных фундаментов, по разработанным методикам с результатами лабораторных и полевых экспериментальных исследований, показало хорошую сходимость расчетных и экспериментальных значений (отклонения не более 11–15 %).

В пятой главе приведена апробация разработанных методов расчета плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении по результатам геотехнического мониторинга следующих объектов на плитно-свайных фундаментах:

1. Железобетонный силов, построенный в 1984 г. префектуре Осака Япония (рис. 10, а).

2. Участок высокоскоростной железной дороги Пекин-Шанхай длиной 845м (рис. 10, б).

3. Плитно-свайный фундамент под оборудование в г. Казань (рис. 10, в).

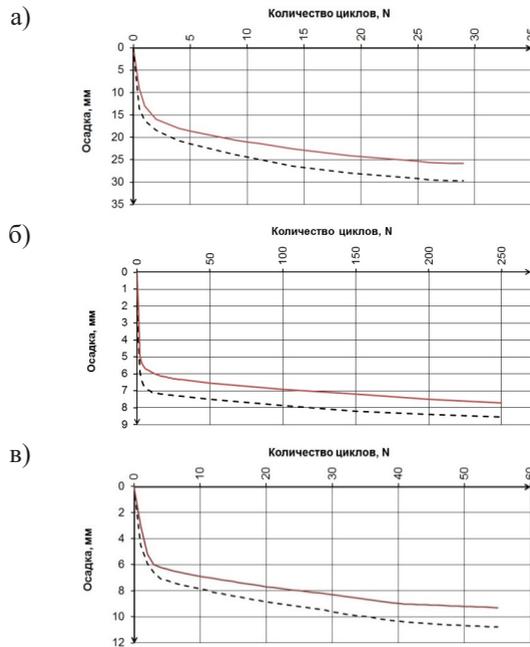


Рис. 10. Графики сопоставления опытных и расчетных значений осадки.

— фактическая осадка;
 - - - результаты расчета

Сопоставление результатов расчета с данными геотехнического мониторинга приведены на рисунках 10, а–в. Как видно из приведенных рисунков, данные получены на основе расчетных моделей, показывают хорошую сходимость с результатами геотехнического мониторинга реальных объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Действующие нормы проектирования свайных фундаментов СП 24.13330.2021, СНиП 2.02.03-85 не позволяют рассчитывать плитно-свайные фундаменты при циклическом нагружении с учетом реального деформирования системы «свайное основание – плитный ростверк». В связи с этим назрела необходимость в разработке методов расчета несущей способности и осадок плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении, с учетом совместного деформирования системы «плитный ростверк – сваи – грунт межсвайного пространства – грунт ниже острия свай».

2. Выполнены экспериментальные исследования несущей способности и осадок плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении с целью обоснования гипотез, положенных в основу расчетных моделей, а также для проверки точности и надежности инженерных методов расчета. Результаты ис-

следований показали, что при циклическом нагружении несущая способность плитно-свайных фундаментов уменьшается до 3,14 раза по сравнению с однократным кратковременным статическим нагружением, а осадки увеличиваются до 2,2 раза по сравнению с первым статическим нагружением до максимальной нагрузки циклов в зависимости от параметров циклического нагружения.

3. 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.

4. Разработана методика расчёта несущей способности плитно-свайного фундамента на глинистом основании при циклическом нагружении, включающая выражения для определения: напряжений в грунте межсвайного пространства, ниже острия свай, под плитным ростверком и в сваях, предельных касательных напряжений в грунте, зоны предельного равновесия и условий достижения предельного равновесия. Несущая способность определяется по величине предельного сопротивления грунтового основания, по условию ограничения развития в нем вертикальных деформаций в соответствии заранее заданным условиям. Предложенная методика позволяет достоверно рассчитывать несущую способность плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении на всех стадиях нагружения, с учетом совместного деформирования всех элементов системы плитный «ростверк – сваи – грунт межсвайного пространства – грунт ниже острия свай».

5. Разработан новый метод расчета осадки плитно-свайного фундамента на глинистом основании при циклическом нагружении. Общая осадка представляется в виде суммы осадок условного фундамента, дополнительной осадки за счет продавливания сваей грунта на уровне подошвы условного фундамента и дополнительной осадки за счет сжатия ствола сваи. При вычислении осадки условного фундамента принимается объемно-напряженное состояние грунта основания, учитывается изменение напряженного состояния, прочностных и деформационных характеристик грунта при циклическом нагружении и используется метод суммирования деформаций элементарных слоев.

6. Осадка продавливания определяется для стадии, когда касательные напряжения по боковой поверхности отсутствуют в верхней и средней части свай. Установлено, что продавливание грунта под острием сваи происходит, когда напряжения под пятой сваи и плитным ростверком превышают усталостную прочность и предельные деформации грунта при трехосном циклическом сжатии.

7. Дополнительная осадка за счет сжатия ствола сваи представляется в виде суммы осадки при первом нагружении до максимальной нагрузки цикла и осадки при циклическом нагружении, вследствие развития и накопления стесненных деформаций циклической ползучести бетона. Предложенная методика позволяет

достоверно и точно прогнозировать величину осадки плитно-свайного фундамента за счет сжатия ствола сваи при циклическом нагружении.

8. В диссертационной работе получены новые аналитические выражения для определения предельного касательного напряжения в грунте межсвайного пространства, дополнительной осадки продавливания, дополнительной осадки за счет сжатия ствола сваи, осадки условного фундамента, напряжений в грунте с учетом перераспределения усилий между элементами плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении.

9. Результаты расчетов несущей способности и осадок плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении, по разработанным методам расчета хорошо согласуются с результатами испытаний (отклонение составляет не более 15 %). Достоверность и надежность результатов расчёта подтверждается сопоставлением с данными натурных наблюдений за осадками плитно-свайного фундамента железобетонного силоса, двух фундаментов под оборудование, плитно-свайного фундамента железнодорожных путей, модели плитно-свайного фундамента в полевых условиях и 6-ти моделей в лабораторных условиях.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Работы в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Шакиров, М. И. Особенности деформирования моделей плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении / И. Т. Мирсаяпов, М. И. Шакиров // Жилищное строительство. – 2012. – №11. – С.12–14. (0,23/0,12п.л.)

2. Шакиров, М. И. Поведение моделей плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении / И. Т. Мирсаяпов, М. И. Шакиров // Известия КГАСУ. – 2012. – №4(22). – С. 199–203. (0,39/0,21п.л.)

3. Шакиров, М. И. Несущая способность и осадки плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении / И. Т. Мирсаяпов, М. И. Шакиров // Известия КГАСУ. – 2016. – № 1(35). – С.111–117. (0,445/0,225п.л.)

4. Шакиров, М. И. Полевые испытания комбинированного плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении / И. Т. Мирсаяпов, М. И. Шакиров, Д. Д. Сабирзянов // Известия КГАСУ. – 2019. – №2(48). – С.175–181. (0,38/0,18п.л.)

5. Шакиров, М. И. Расчет осадки основания комбинированных плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении / И. Т. Мирсаяпов, М. И. Шакиров // Известия КГАСУ. – 2019. – №4(50). – С.255–262. (0,46/0,23п.л.)

6. Шакиров, М. И. Деформации грунтовых оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении / М. И. Шакиров // Известия КГАСУ. – 2022. – №1(59). – С.19–28. (0,58п.л.)

Печатные работы изданиях индексируемых Scopus:

7. Shakirov, M. I. Behaviour models of pile-plate foundations under cyclic loading // Baltic piling days conference: Baltic Piling Days / I. T. Mirsayapov, M. I. Shakirov // Baltic Piling. – London: CRC Press, 2013. – P. 195–199. (0,23/0,12п.л.)

8. Shakirov, M. I. Bearing capacity and settlement of raft-pile foundations under cyclic loading / I. T. Mirsayapov, M. I. Shakirov // *Energy Geotechnics: Proceedings of the 1st International Conference on Energy Geotechnics, ICEGT 2016*. – London: CRC Press, 2016. – Pp. 423-428. – DOI: 10.1201/b21938-67 (0,35/0,18п.л.)

9. Shakirov, M. I. Combined plate-pile foundations settlement calculation under cyclic loading / I. T. Mirsayapov, M. I. Shakirov // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 890. – P. 012069. – DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012069 (0,46/0,23п.л.)

10. Shakirov, M. I. Field Tests of Combined Pile Raft Foundation Under Cyclic Loading / I. T. Mirsayapov, M. I. Shakirov, D. D. Sabirzyanov // *Lecture Notes in Civil Engineering: Proceedings of STCCE 2021. Selected Papers*. – Cham: Springer, 2021. – P. 175-182. – DOI 10.1007/978-3-030-80103-8_19 (0,4/0,18п.л.)

11. Shakirov, M. I. Deformation features of raft-pile foundation models under cyclic loading / I. T. Mirsayapov, M. I. Shakirov // *Lecture Notes in Civil Engineering: Proceedings of STCCE 2021. Selected Papers*. – Cham: Springer, 2021. – P. 203-212. – DOI 10.1007/978-3-030-80103-8_22 (0,52/0,26п.л.)

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 25.11.2022. Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 146.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.