



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого
Инженерно-строительный институт

Программа «Строительная механика, расчет конструкций и оснований»

Выпускная квалификационная работа магистра

УСИЛЕНИЕ СЛАБЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ЦЕМЕНТНЫМ ИНЪЕКЦИРОВАНИЕМ

Выполнил:

студент гр. №3140801/02001
Мартынов М.В.

Научный руководитель:

доцент ВШПГиДС ИСИ
Зимин С.С.

Санкт-Петербург
2022

Актуальность темы.

Проблема укрепления оснований существует при проектировании, строительстве, эксплуатации и реконструкции зданий и сооружений, если в основании залегают слабые грунты. К таким грунтам относятся, в частности, водонасыщенные заторфованные, илистые текучепластичные и текучие супеси и суглинки. Эти грунты сильно сжимаются и здания, возведенные на основаниях из таких грунтов, могут получить значительные осадки и повреждения конструкций. Укрепление слабых грунтов оснований востребовано и актуально в Санкт-Петербурге, где мощность указанных грунтов может достигать 10-15м

Степень разработанности темы исследования.

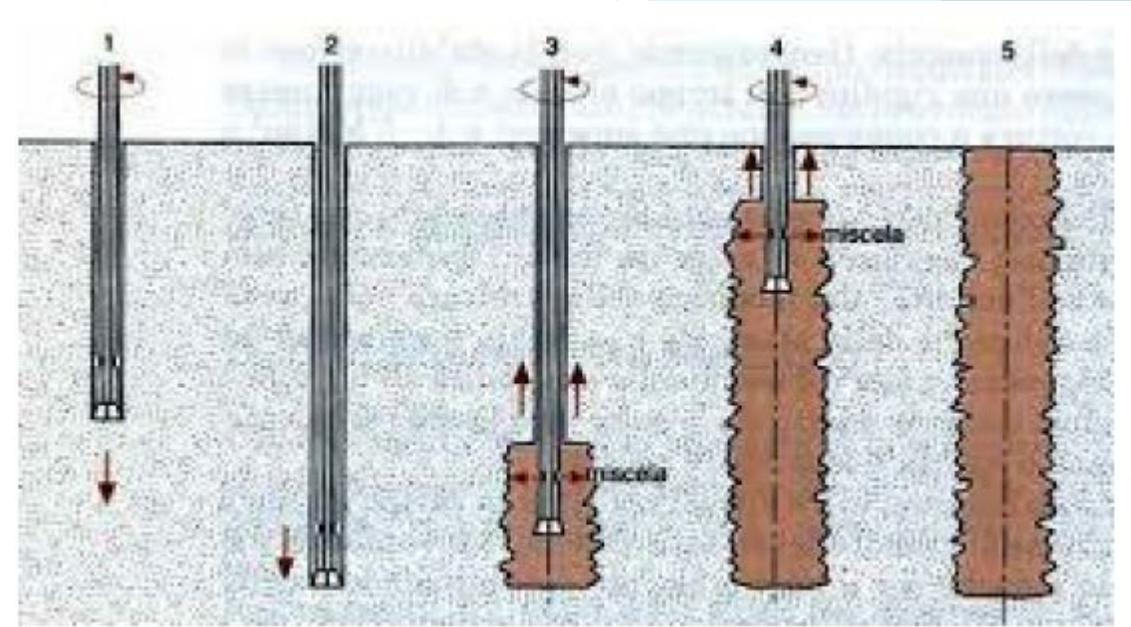
Вопросами касающиеся усиления инъектированием слабых грунтов в различные временные периоды занимались такие выдающиеся ученые, как Мангушев Р.А.[28, 29], Улицкий В.М.[30], Соловьева В.Я[31], Герсеванов Н. М.[32], Коновалов П.А.[11], Шашкин А.Г.[33], Абелев М.Ю.[1-2] и другие.

Технология Jet grouting

Сущность струйной цементации заключается в использовании энергии высоконапорной струи цементного раствора для разрушения и одновременного перемешивания грунта с цементным раствором. После твердения образуется новый материал - грунтоцемент, обладающий высокой прочностью и малой сжимаемостью.

Технологический процесс цементации грунта выполняют в два этапа – в процессе прямого и обратного хода:

- 1) в процессе прямого хода – бурение лидерной скважины до проектной отметки;
- 2) в процессе обратного хода – нагнетание под большим давлением цементного раствора, вращение и подъем колонны.



Обзор публикаций и экскурс в историю создания

Современные исследования по методу струйной цементации в литературе можно разделить на 4 темы:

1. Контроль качества. Исследование ключевых параметров (процентное отношение цемента, давление впрыска, скорость подъема и т.д.) влияющих на производство грунтоцементных колонн.
2. Подбор оптимальных параметров влияющих на несущую способность. Изменение прочности на одноосное сжатие в зависимости от характеристик грунта, влияние в/ц отношения, получение проектных значение модуля Юнга колонны в зависимости от н.у.
3. Рассмотрение грунтоцементных элементов в качестве подпорных стен. Определение изгибающих моментов, боковых смещений.
4. Численное моделирование. Сравнение теоретических, полуэмпирических методов с моделированием в геотехнических программных комплексах, подбор грунтовой модели отвечающей упрочнению грунта.

1. Ребиндер П. А., Серб-Сербина Н.Н. Придание грунтам водонепроницаемости и механической прочности. Л.: Академия наук СССР, 1942. 267 с.
2. Безрук В.М. Теоретические основы укрепления грунтов цементами, 1956. 241 с.
3. Yahiro T. and Yoshida, H. Induction grouting method utilising high speed water jet. Proc of Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, 1973, pp. 359-362 and 402-403.

Диссертационные исследования

В работе 2020 года «Усиление слабых грунтов оснований зданий струйной цементацией» Михайловского В.П. являющиеся продолжением исследования 2017 года публикации Гарманова Г. В. «Усиление слабых грунтов оснований современными методами» исследована эффективность применения способа струйной цементации для усиления слабых грунтов оснований и разработке методики расчета осадки сооружения в зависимости от параметров грунтоцементных столбов.

Полученные результаты выполненных расчетов с помощью численного моделирования в ПК Plaxis показывают высокую эффективность применения струйной цементации для создания отдельно стоящих грунтоцементных столбов с целью усиления слабых грунтов основания фундаментов мелкого заложения.

Предложенный в работе алгоритм позволяет проводить дальнейшие исследования в области расчета и подбора параметров материалов для улучшения прочностных и деформационных свойств грунтоцемента.

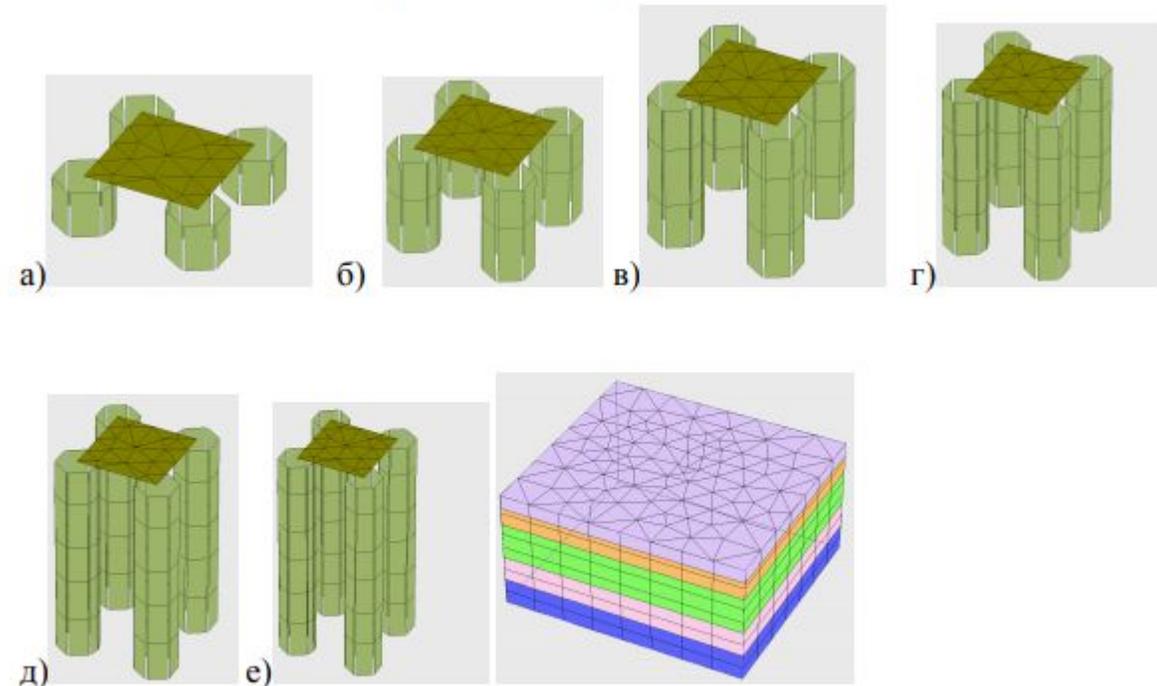


Рисунок 2.23 - Расчетные схемы платформы совместно с грунтоцементными столбами для первой тестовой серии расчетов, соответственно длина грунтоцементных элементов составляет:

Нормативная документация

Основными нормативными документами в РФ касательно технологии струйной цементации являются:

СП 291.1325800.2017 КОНСТРУКЦИИ ГРУНТОЦЕМЕНТНЫЕ АРМИРОВАННЫЕ ГОСТ Р 59538-2021 РАСТВОРЫ ИНЪЕКЦИОННЫЕ ДЛЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТА

В СП291 собран верифицированный опыт российских авторов, даны справочные таблицы касательно углов внутреннего трения грунтоцементных колонн, прочности на сжатие, рекомендуемый диаметр в зависимости от компонентности технологии. Прочность по ГЦ берется на 56 сутки, что допускает введение переходного коэффициента. В целом нормативный документ свидетельствует о накопленном опыте в частности однокомпонентной технологии jet-grouting, который СП не ограничивает в применении в отличие от двух-трех компонентной технологии.

Основными зарубежными нормативными документами являются Еврокоды.

Одним из таких документов является **BS EN 12716:2001** замененный на **12716:2019-03**

«Специальные геотехнические работы -струйная цементация».

В п. 3 идет описание и термины, касающиеся разновидностей струйной цементации (одно-, двух- и трехкомпонентной). В п.4 приведены основные требования к геологическим изысканиям и необходимой проектной документации, а также экологические требования. В п. 6 указаны требования к водно-цементным растворам, их испытания на соответствие качеству применяемых материалов. В п.7 представлены требования к замерам геометрических параметров полученных грунтоцементных столбов, а также к испытаниям прочности полученных образцов (последовательность и скорость выполнения работ, время схватывания и затвердевания, а также диаметр колонн). В п. 8 приведена технология производства работ. Наиболее ценная информация представлена в «Прил. И», там приведены основные технологические и получаемые параметры для одно-, двух- и трехкомпонентной технологий струйной цементации (давление раствора (МПа), расход раствора (л/мин), давление воды (МПа) , расход воды (л/мин), давление воздуха (МПа) ,расход воздуха (m^3 /мин)).

Обзор геотехнических расчетных комплексов



PLAXIS[®]
CONNECT Edition



SOFiSTiK

Op⁺um^{G2}

ZSoil



Программ для инженерных расчетов, которые специализируются на геотехнических проблемах достаточно много как на российском рынке (FEM-models), так и зарубежном (Plaxis, optum g2, SOFiSTiK и т. д.) позволяющих с высокой степенью достоверности выполнять расчеты ГЦЭ.

Наиболее распространенный геотехнический ПВК как при обучении в ВУЗах, так и в проектных институтах это PLAXIS (2D, 3D), именно он был выбран как основной для настоящего исследования.

В 2010 года появилась 3D версия, которая позволила работать с такими элементами как сваи в полной мере, до этого в 2D версии присутствовали только сваи получаемые осесимметрией или вовсе свая заменялась плитой с аналогичными геометрическими характеристиками.

Основным плюсом ПВК PLAXIS является то, что программа ввиду обширного функционала способствует саморазвитию пользователя в геотехнологическом анализе.

Объект исследования – слабые грунтовые основания зданий и сооружений до и после усиления грунтов.

Предмет исследования – НДС основания здания и сооружений до и после усиления грунтов методом инъектирования в рамках проведенного численного исследования.

Методы исследования. В рамках диссертационного исследования применялись российские и иностранные нормативы: СП 291.1325800.2017 и DIN EN 12716:2019-03 соответственно, после чего выполнено численное моделирование с использованием программно-вычислительного комплекса Plaxis 3D, с последующим проведением верификационных тестов в ПК Midas GTS NX.

Научная новизна.

Заключается в обосновании применения при усилении инъектированием оснований зданий и сооружений балочных элементов в моделях слабых грунтовых в рамках сопоставления результатов численного исследования с данными полевого эксперимента.

Практическая значимость.

Заключается в совершенствовании методики расчета при укреплении оснований инъектированием и оценке ее применения к объекту культурного наследия. Результаты исследования могут быть использованы для доработки существующих нормативных документов.

Цель работы: разработка методики расчетного обоснования применения способа инъектирования для укрепления слабых грунтов оснований зданий и сооружений с использованием математического моделирования.

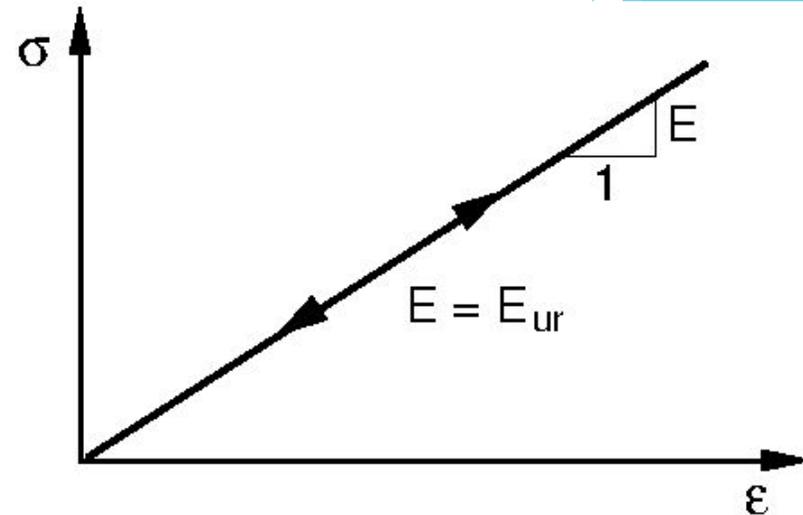
Задачи:

- Обоснование выбора модели грунтов и грунтоцементных материалов, применяемого для расчетов в ПК;
- Верификация полевого эксперимента в ПК;
- Верификация расчетов в другом ПК;
- Проверка расчетов с учетом натуральных данных;
- Расчет усиления струйной цементацией объекта культурного наследия;
- Формирование рекомендаций по доработке нормативной базы;

Обзор моделей грунта, применяемых при усилении

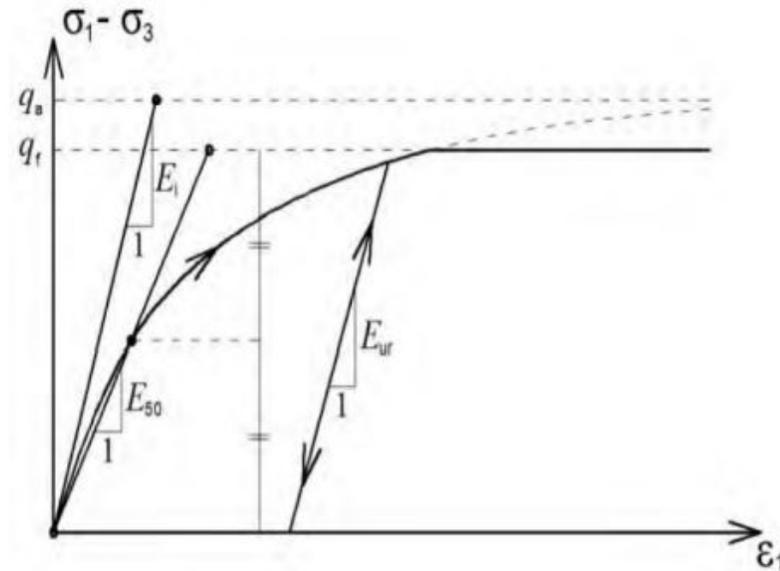
Linear elastic model (линейная упругая модель)

Модель представляет собой закон Гука об изотропной линейной упругости. Включает в себя два постоянных параметра жесткости: модуль Юнга E , и коэффициент Пуассона ν . Используется для жестких массивных сооружений, находящихся в толще грунта.



Hardening Soil model (модель упрочняющегося грунта)

Уругопластический тип гиперболической модели, описывающий пластичность грунтов при их упрочнении за счет трения. Модель может использоваться для моделирования поведения как песков и гравия, так и слабых грунтов, таких как глины и илы.



Исходные данные полевого эксперимента

Исходные данные экспериментов:

Al-Kinani AM, Ahmed MD (2020) Field study of the effect of jet grouting parameters on strength based on tensile and unconfined compressive strength.

Al-Kinani, Ali M., and Mahmood D. Ahmed (2019).

Comparison of Single and Group Jet Grouting Columns Capacity Based on Field Load Test and Theoretical Methods.

Таблица 2. Описание и классификация грунтов.

Table 2. Soil description and classification.

Глубина (м)	Глубина залегания УГВ (м)	Плотность естественной влажности γ_{wat} , кН/м ³	Глинистые частицы %	Ил %	USCS Единая Система Классификации грунтов
0.0-1.0	0,75	-	-	-	Засыпка (Суглинок легкий)
1.0-2.5		20,48	61	39	Суглинок легкий
2.5-3.5		21,02	70	30	Глина легкая
3.5-4.5		21,98	72	28	Глина легкая
4.5-7.5		21,5	60	40	Суглинок легкий
7.5-8.0		21,4	62	38	Суглинок легкий

Таблица 1. Свойства грунта.

Table 1. Soil Properties.

Глубина (м)	Тип образца	L.L % Граница текучести (w_L)	P.L % Граница пластичности (w_p)	P.I% Число пластичности	Gs (γ_s/γ_w)	Содержание воды, %
0.0-1.0	DS (нарушенный)	32	15	17	2,61	34,73
1.0-2.5	US (ненарушенный)	34	19	15	2,62	35,26
2.5-3.5	US (ненарушенный)	60	29	31	2,78	37,95
3.5-4.5	US (ненарушенный)	59	30	29	2,76	38,22
4.5-7.5	US (ненарушенный)	35	21	14	2,58	33,71
7.5-8.0	DS (нарушенный)	36	21	15	2,61	34,78

Таблица 6. Дополнительные данные.

Table 6. Additional data.

Глубина (м)	e	C (кПа)	ϕ (град)	E ₅₀ (МПа)
0.0-1.0	0,63	30	5	0,89*(по рез-там компрессионного теста)
1.0-2.5	0,53	34,34	7	6,87
2.5-3.5	0,67	21	6	4,2
3.5-4.5	0,5	38	7	7,6
4.5-7.5	0,51	43,34	8	8,67
7.5-8.0	0,51	50	9	10

Таблица 3. Краткое изложение результатов теста на консолидацию.

Table 3. Summary of consolidation test results.

Глубина (м)	Pc (кПа)	Cc	Cr	Cv (мм ² /сек)	e ₀	e _f
0.0-2.0	70	0,529	0,0598	0,02	0,63	0,475

Таблица 4. Зависимость неограниченной прочности на сжатие от глубины залегания

Table 4. Dependence of unlimited compressive strength on the depth of occurrence

Глубина (м)	q _{unconfined} (кПа)
1.0-1.5	60
1.5-2.5	73
2.5-3.5	42
3.5-4.5	76
4.5-5.5	86
5.5-7.5	87
7.5-8.0	100

Таблица 5. Параметры грунтоцементной колонны.

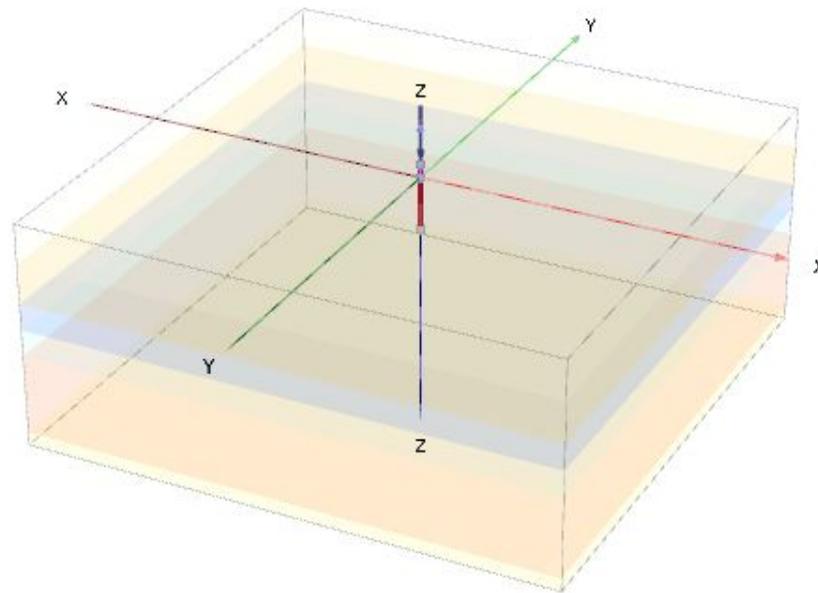
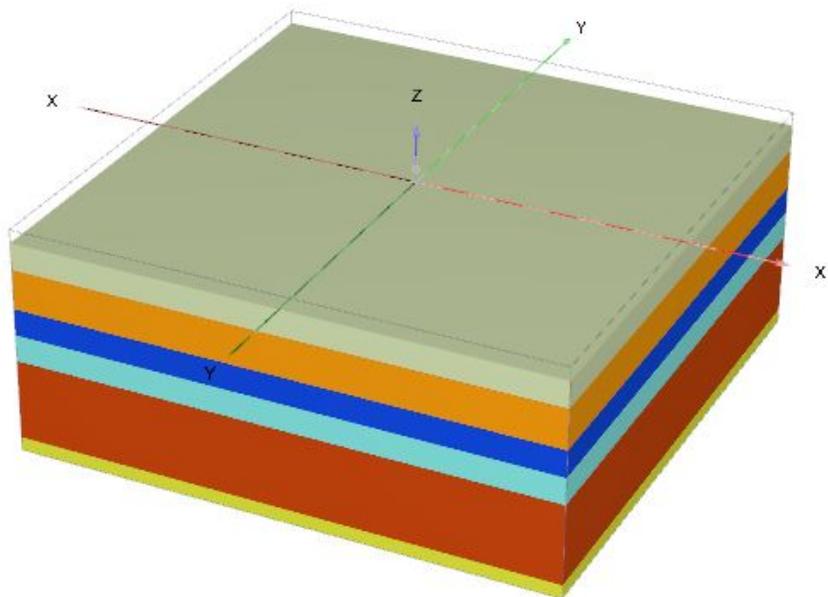
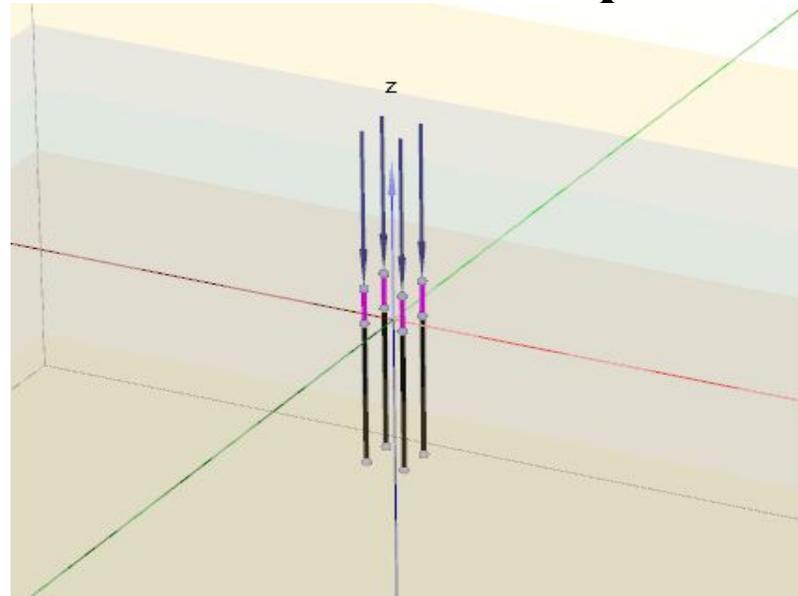
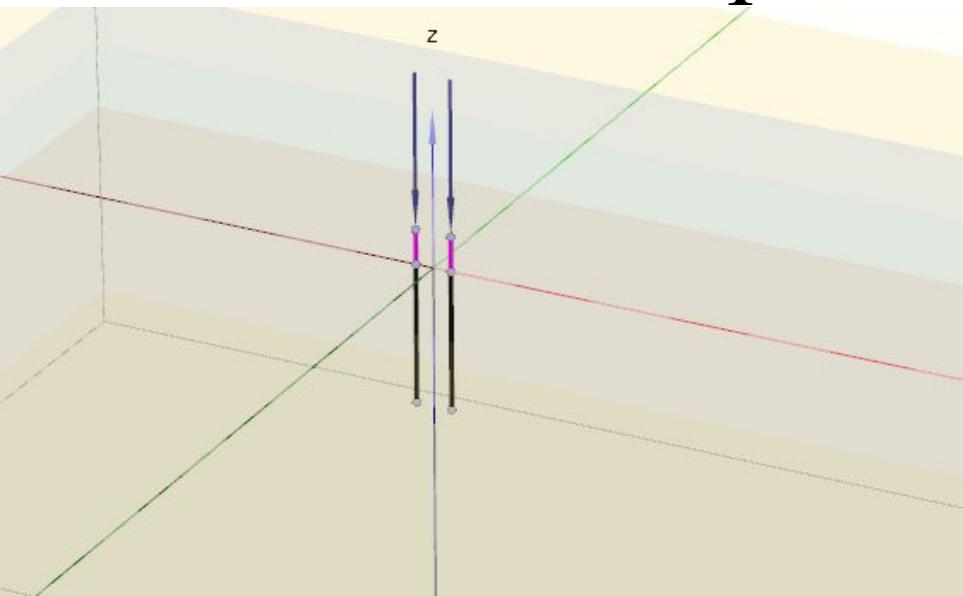
Table 5. Parameters of the soil-cement column.

Диаметр (м)	Длина (м)	q _{unconfined} (МПа)	E (МПа)	C (кПа)	ϕ (град)
0,150	2,0	4,57	800	680	38

Этапы производства грунтоцементных колонн



Моделирование полевого эксперимента



Последовательность расчета и результаты

№ фазы	Фаза расчета (<i>Phase ID</i>)	Тип расчета (<i>Calculation type</i>)	Режим приложения нагрузок (<i>Loading type</i>)
1	Период до начала строительства – <i>Initial phase</i> (начальная фаза)	<i>K0 procedure</i> (генерирование н.у.)	<i>Staged construction</i> (позатпное строительство)
2	Погружение свай/свай	<i>Plastic</i> (пластический)	<i>Staged construction</i> (позатпное строительство)
3	Консолидация грунтового массива	<i>Consolidation</i> (Консолидация)	<i>Staged construction</i> (позатпное строительство)
4	Позатпное нагружение с шагом: 3,75 кН (одиночная свая) До нагрузки 30кН включительно	<i>Plastic</i> (пластический)	<i>Staged construction</i> (позатпное строительство)
	6 кН (группа свай 1*2) До нагрузки 60кН включительно		
	7,5 кН (группа свай 2*2) До нагрузки 120кН включительно		
	Позатпное разгружение: С шагом 7,5 кН (одиночная свая) До полной разгрузки		
5	До 36 кН, до 12 кН, затем полное разгружение (группа свай 1*2)	<i>Plastic</i> (пластический)	<i>Staged construction</i> (позатпное строительство)
	До 97,5 кН, до 75 кН, до 45 кН, затем полное разгружение (группа свай 2*2)		

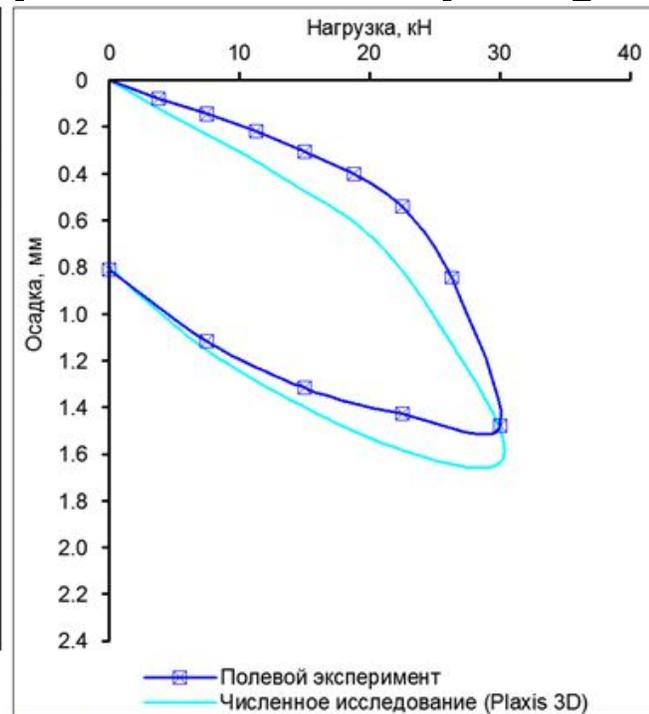


Рис. 1. Сравнение численного и полевого исследования. Одиночная свая

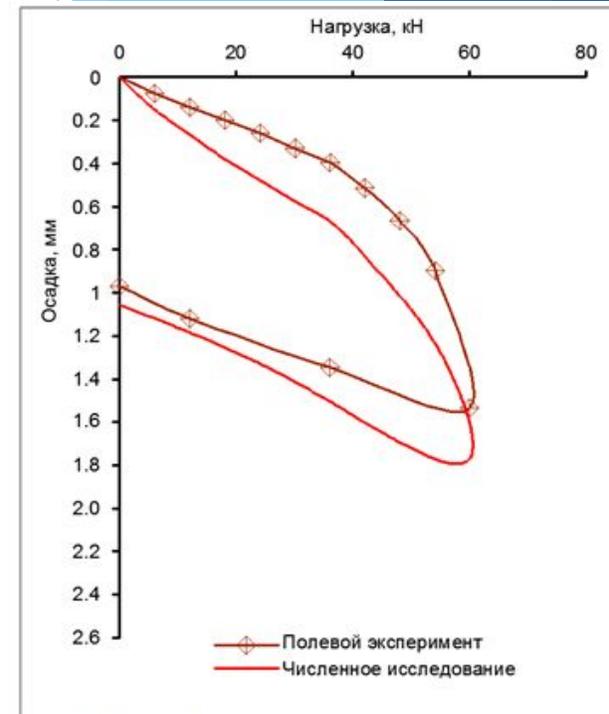


Рис. 2. Сравнение численного и полевого исследования. Группа свай 1*2

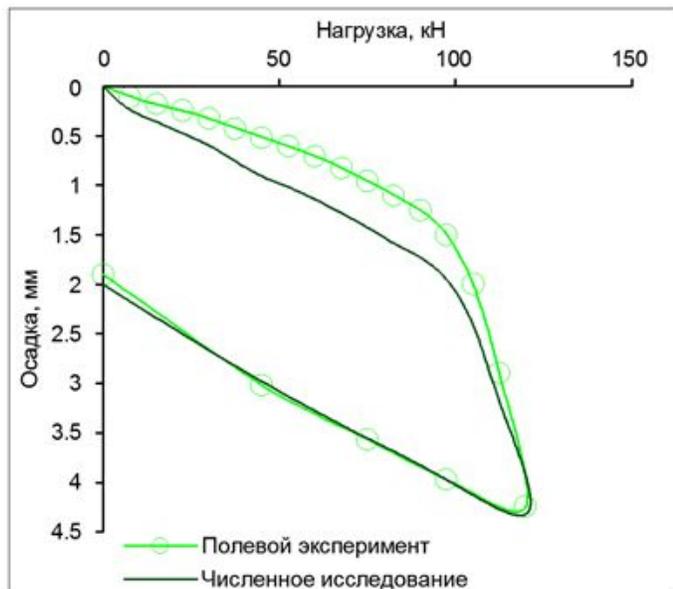
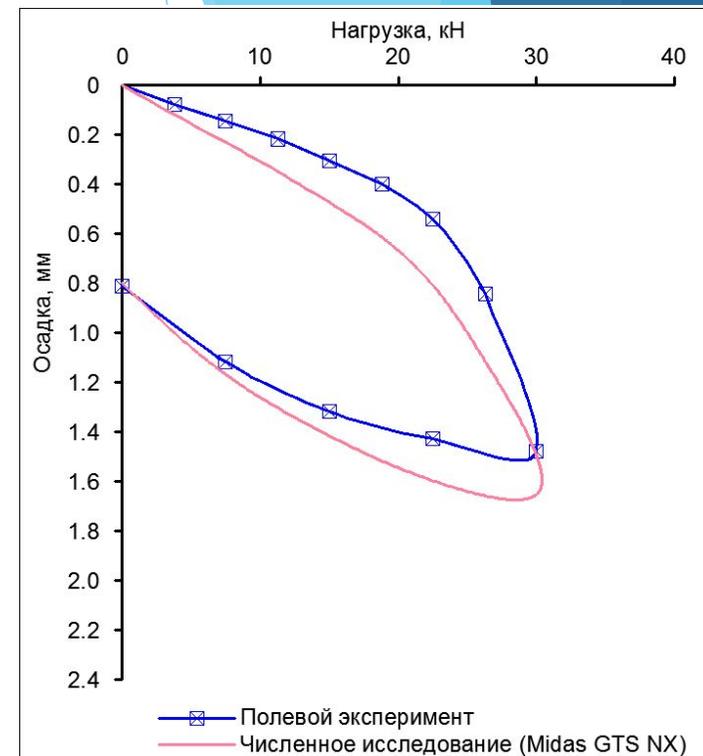
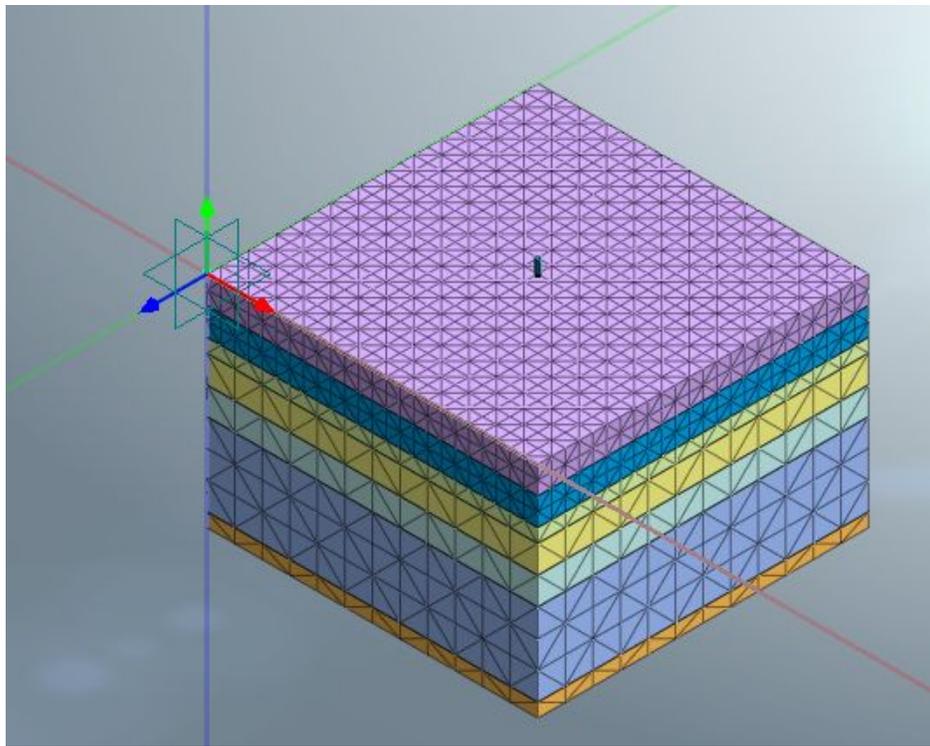
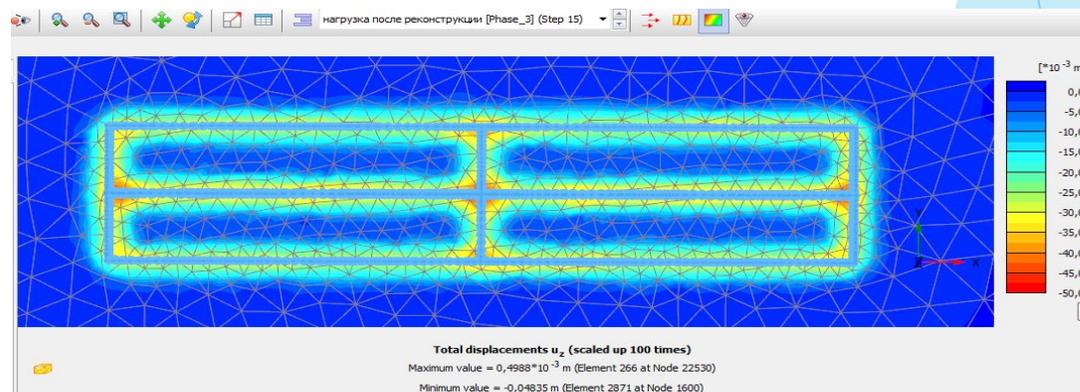
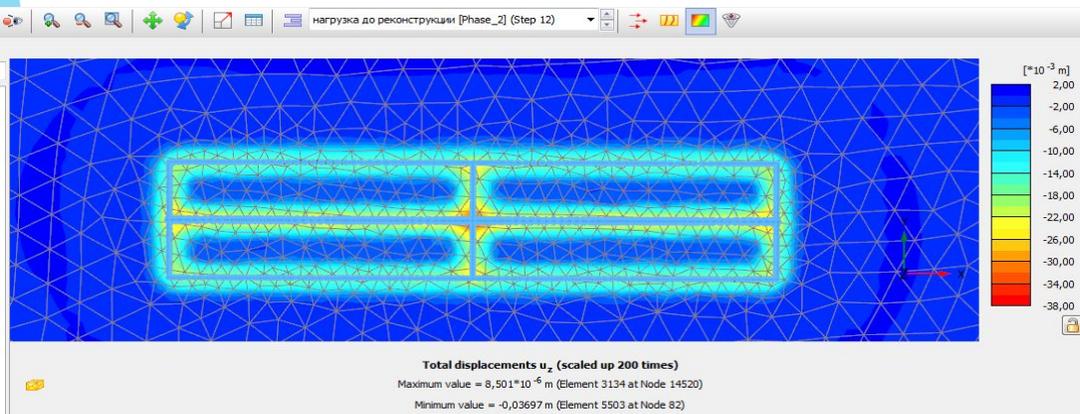
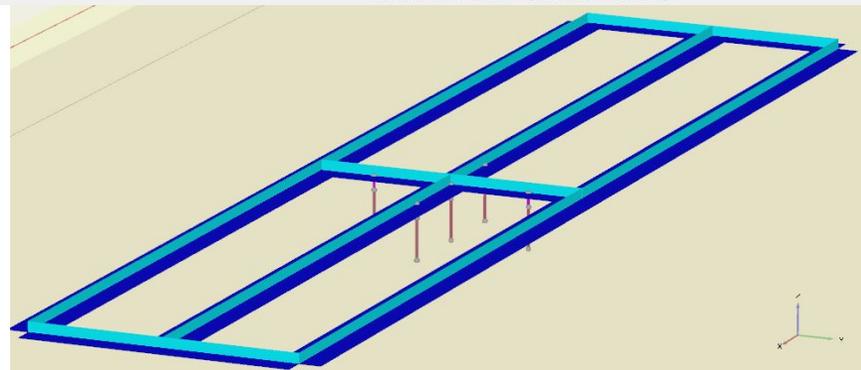
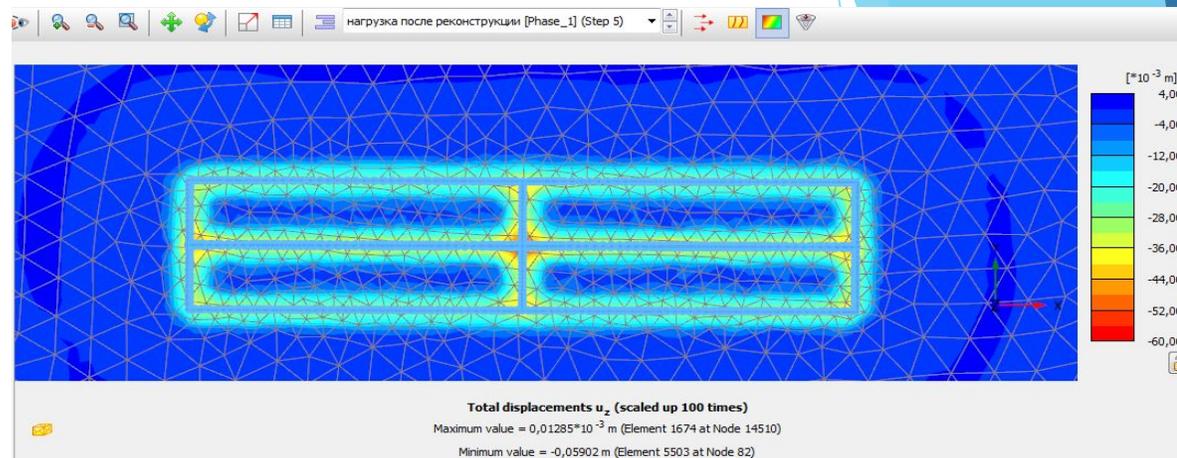
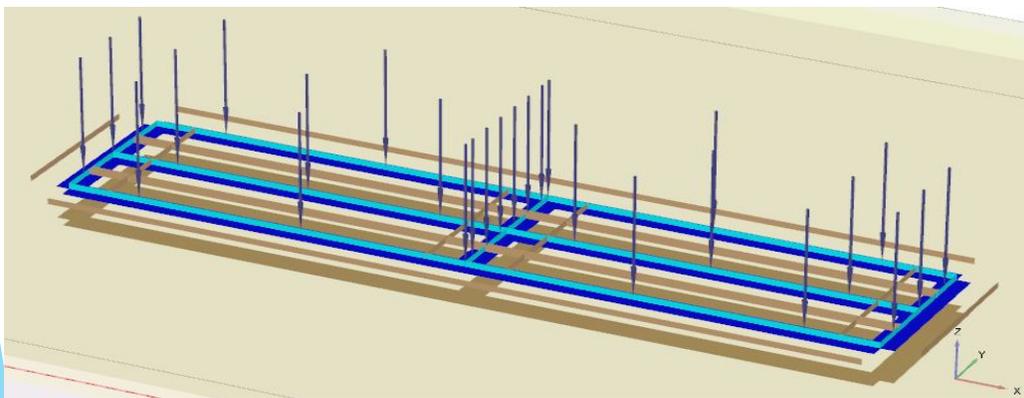
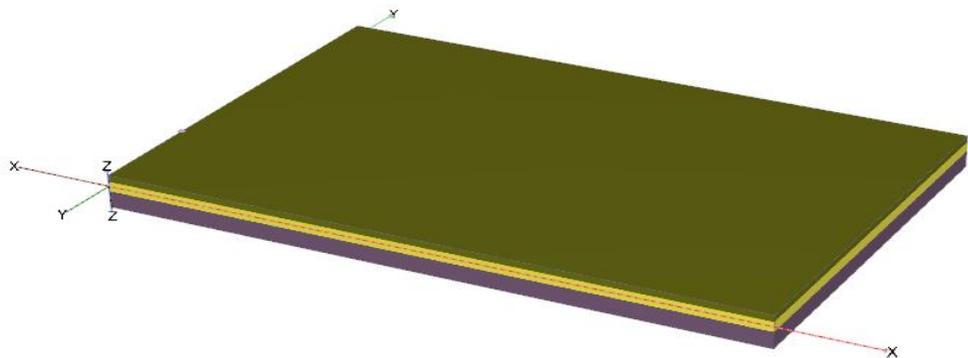


Рис. 3. Сравнение численного и полевого исследования. Группа свай 2*2

Верификация проведенных экспериментов в Midas GTS NX



наследия



Апробация результатов и публикационная активность

Апробация результатов исследования.

Промежуточные результаты диссертационного исследования были представлены в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого в рамках мероприятий, проводимых ВШПГиДС:

1. Дополнительное заседание учебной конференции "Проектирование и расчет строительных конструкций и оснований" проходившее 17 мая 2021 г.
2. Семинар "Зимние слушания магистрантов СМИСК" проходивший 18 января 2022 г.
3. Семинар с участием членов ГЭК проходивший 28 марта 2022 г.

Публикации и реализация результатов исследования.

Принято к публикации:

1. Зимин С.С., Мартынов М.В. Численное моделирование полевого эксперимента по усилению струйной цементацией // Инженерные исследования. 2022. №2 (7).

Резюме работы (Заключение)

1. В качестве модели грунта обосновано применение модели «*Hardening Soil*». В качестве задания ГЦЭ обосновано применение элемента «*Embedded beam*».

2. На основе проделанных численных экспериментов дана предварительная качественная геотехническая оценка. Упрощенный метод моделирования грунтоцементных элементов завышает осадки при максимальной нагрузке - до 15 %, но при полной разгрузке экспериментальной модели в зоне остаточных деформаций достигают незначительных превышений - до 3,7%. Наибольшая сходимость результатов с данными полевого эксперимента наблюдается в схеме – «Свайное поле 2*2».

3. Верификационный расчет в ПВК Midas GTS NX полевого эксперимента показал высокую сходимость результатов с численным исследованием, проведенным в ПВК Plaxis 3D, максимальное отклонение составило менее 1%.

4. С помощью струйной цементации по однокомпонентной технологии выполнено в ПВК Plaxis 3D моделирование усиления слабых грунтовых оснований на стадии реконструкции существующего объекта культурного наследия с целью снижения будущих осадок при увеличении эксплуатационных нагрузок. После усиления основания значение дополнительной осадки не превышает нормативных значений.

5. Рекомендации по доработке нормативной базы основаны на изложенной в настоящей работе методике расчетного обоснования усиления струйной цементацией слабых грунтов с использованием в математической модели конечных элементов в виде погруженной балки с заданными расчетными сопротивлениями по боковой поверхности и под нижним концом сваи.