

На правах рукописи



Евдокимов Александр Геннадьевич

**РАСЧЕТ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ МОСТОВЫХ ОПОР
ПРИ ОБРАЗОВАНИИ КАРСТОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ**

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ)

Научный руководитель: доктор технических наук
Готман Наталья Залмановна

Официальные оппоненты: **Знаменский Владимир Валерианович**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», кафедра «Механики грунтов и геотехники», профессор
Королева Ирина Владимировна
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра «Основания, фундаменты, динамика сооружений и инженерная геология», доцент

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

Защита состоится 13 ноября 2024 г., в 16:30 на заседании диссертационного совета 40.2.002.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул Образцова, д. 9, стр. 9 (ул. Часовая, д. 22/2, стр. 1, ауд. 329).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.miit.ru.

Автореферат разослан «___» сентября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Артюшенко Игорь Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В связи с высокой актуальностью модернизации и расширения магистральной инфраструктуры в нашей стране, в ближайшем будущем может быть создано тысячи километров новых ж/д путей и автомобильных дорог. При этом, неизбежным будет процесс инженерно-строительного освоения площадок, на которых протекают опасные природные (карстовые) процессы. Мостовые переходы с опорами на кустовых свайных фундаментах наиболее подвержены негативному влиянию карстовых процессов.

В настоящее время в нормативной и в научной литературе недостаточно учтены особенности поведения свайных фундаментов мостовых опор на карстоопасном основании при возникновении разных типов карстопроявлений, что требует проведения специальных исследований.

При расчете карстозащитных свайных фундаментов мостовых опор должны быть учтены возможные типы карстопроявлений, влияющие на выбор расчетных параметров карстовых деформаций, а также изменение напряженно-деформированного состояния массива грунта, взаимодействующего со сваями, в зоне карстопроявлений. Учет этих изменений традиционно выполняется путем исключения ряда свай в зоне карстопроявлений по типу «провал», в то время как в связи с разнообразием геологического сложения оснований свайных фундаментов опор возможны карстопроявления по типу «оседание». В этом случае зона карстопроявлений увеличивается, а взаимодействие свай с деформируемым массивом грунта приводит к увеличению нагрузок на сваи и снижению их несущей способности.

Исследование и усовершенствование методов расчета свай при возникновении карстовых деформаций позволят повысить эффективность и надежность проектных решений. Поэтому данная тема исследования является актуальной и имеет практическую ценность.

Степень разработанности темы исследования

Российскими и зарубежными учеными выполнено большое количество как теоретических, так и экспериментальных исследований, направленных на изучение работы фундаментов зданий и сооружений при карстовых деформациях.

Исследованием процесса карстовых деформаций и проблемой проектирования зданий и сооружений на карстоопасных территориях занимались многие отечественные и зарубежные ученые: Аникеев А.В., Андрейчук В.Н., Ашпиз Е.С., Гарбер В.А., Готман А.Л., Готман Н.З., Давлетяров Д.А., Илюхин В.А., Ковалев В.А., Каюмов М.З., Леоненко М.В., Магзумов Р.Н., Мартин В.И., Метелюк Н.С., Мулюков Э.И., Незамутдинов Ш.Р., Поспехов В.С., Протодьяконов М.М., Патрикеев А.Б., Сорочан Е.А., Толмачев В.В., Травкин А.И., Троицкий Г.М., Уткин М.М., Хоменко В.П., Шахунянц Г.М., Шапошников А.В., Шейнин В.И., Aderhold G., Beck V.F., Reuter F., Milanovic P.T., Walham T., Bell F.G., Sowers G.F. и др. Однако, в работах ученых не учитываются закономерности распределения касательных напряжений на боковой поверхности свай в зависимости от параметров карстовых деформаций.

Свайный фундамент мостовой опоры в большинстве случаев представляет собой куст из буронабивных свай, объединенных ростверком. Поведение группы свай при нагружении, а также при действии карстовых деформаций, имеет свои особенности и отличается от поведения одиночной сваи. При этом традиционно рассматриваются карстовые деформации по типу «провал».

Существенный вклад в изучение особенностей работы свай, в том числе поведение свай в составе группы в своих многочисленных исследованиях внесли следующие ученые: Алехин В.С., Безволев С.Г., Барвашов В.А., Бартоломей А.А., Бартоломей Л.А., Бахолдин Б.В., Готман А.Л., Готман Н.З., Григорян А.А., Глухов В.С., Дорошкевич Н.М., Зерцалов М.Г., Знаменский В.В., Королева И.В., Лалетин Н.В., Мангушев Р.А., Мирсаяпов И.Т., Никифорова Н.С., Пилягин А.В., Полищук А.И., Пономарев А.Б., Разводовский Д.Е., Скибин Г.М., Тер-Мартirosян А.З, Тер-Мартirosян З.Г., Улицкий В.М., Фадеев А.Б., Федоровский В.Г., Чунюк Д.Ю., Шапиро Д.М., Шарафутдинов Р.Ф., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Шейнин В.И., Шулятьев О.А., Randolph M.F., Katzenbach R. и др. Тем не менее, в исследованиях ученых не затрагиваются особенности работы кустовых фундаментов при возникновении карстовых деформаций.

Цель и задачи исследования. Целью работы является развитие методики расчета свайного фундамента мостовой опоры при образовании карстовых деформаций в основании.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- выполнить анализ нормативной и научной литературы по исследуемой теме, обобщить опыт проектирования фундаментов мостовых опор на карстоопасном основании;

- составить вариативную расчетную конечно-элементную модель и разработать методику численных исследований с учетом вариативности расчетных параметров для проведения численного эксперимента;

- изучить влияние расчетных параметров карстовых деформаций на взаимодействие свай с грунтовым основанием, которое выражается в изменении касательных напряжений на боковой поверхности свай и вертикальных напряжений в нижнем конце свай;

- с учетом выявленных закономерностей разработать аналитические решения для расчета свай, а именно: дополнительных нагрузок на сваи, несущей способности свай, осадок фундаментов мостовых опор и коэффициента жесткости свай при образовании карстовых деформаций в основании;

- усовершенствовать методику расчета свайных фундаментов мостовых опор на карстоопасном основании и составить рекомендации по выполнению численных расчетов фундаментов.

Объектом исследования в диссертации являются свайные фундаменты мостовых опор на карстоопасном основании.

Предметом исследования является взаимодействие свай с окружающим грунтовым массивом при действии карстовых деформаций.

Научная новизна заключается в следующем:

- получены закономерности распределения касательных напряжений на боковой поверхности свай фундамента мостовой опоры в зависимости от параметров карстовых деформаций;
- разработаны аналитические методы расчета дополнительных нагрузок на сваи, осадок фундаментов и коэффициента жесткости свай при образовании карстовых деформаций по типу «оседание»;
- предложен новый способ назначения граничных условий по нижней грани модели при выполнении численных расчетов свайных фундаментов мостовых опор на образование карстовых деформаций в основании;
- усовершенствованы аналитические методы расчета несущей способности свай фундаментов мостовых опор при образовании карстовых деформаций по типу «оседание»;
- составлены рекомендации по выполнению численных расчетов свайных фундаментов мостовых опор при действии карстовых деформаций.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке аналитических методов расчета осадок и несущей способности свай фундаментов мостовых опор при образовании карстовых деформаций, основанных на полученных закономерностях распределения касательных напряжений на боковой поверхности свай в зависимости от параметров карстовых деформаций.

Практическая значимость заключается в предложении методики расчета свайных фундаментов мостовых опор при образовании карстовых деформаций, учитывающей все варианты возможных карстопроявлений в основании свай и включающей рекомендации по выполнению численных расчетов. Методика может быть применена при проектировании фундаментов опор на закарстованных территориях.

Методология и методы исследования. Достижение цели исследования и решение задач осуществлялось с использованием следующих методов:

- анализ и синтез – при уточнении и конкретизации проблемы расчета карстовых свайных фундаментов при действии карстовых деформаций в обзоре литературы (глава 1); при разработке аналитических методов расчета свайных фундаментов мостовых опор при действии карстовых деформаций (глава 4) и рекомендаций по выполнению численных расчетов (глава 5);
- обобщение – при обобщении опыта проектирования фундаментов мостовых опор на карстоопасных площадках (глава 1);
- сравнение – при обосновании использования численных исследований взаимодействия свай с грунтовым основанием при действии карстовых деформаций (глава 2);
- классификация – при выделении существенных признаков фундаментов мостовых опор и разделению их по геометрическим параметрам и типам основания для составления вариативных расчетных схем (глава 2);
- моделирование – при составлении численной модели для моделирования физического эксперимента (глава 2); при составлении численной вариативной

модели для выполнения исследования особенностей взаимодействия свай фундамента мостовых опор с грунтовым основанием при действии карстовых деформаций (глава 3).

Для решения поставленных задач в части аналитических и численных исследований использовались классические решения механики грунтов, теории упругости, условия пластичности и прочности Мора-Кулона. При выполнении численных исследований были использованы программные комплексы, реализующие метод конечных элементов. Анализ и интерпретация результатов численного исследования выполнялась с использованием методов математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

- закономерности распределения касательных напряжений на боковой поверхности свай фундамента мостовой опоры в зависимости от параметров карстовых деформаций;
- аналитические методы расчета дополнительных нагрузок на сваи, осадок фундаментов и коэффициента жесткости свай при образовании карстовых деформаций по типу «оседание»;
- способ назначения граничных условий по нижней грани модели при выполнении численных расчетов свайных фундаментов мостовых опор на образование карстовых деформаций в основании;
- аналитические методы расчета несущей способности свай фундаментов мостовых опор при образовании карстовых деформаций по типу «оседание»;
- рекомендации по выполнению численных расчетов свайных фундаментов мостовых опор при действии карстовых деформаций.

Степень достоверности основывается на:

- применении классических методов механики грунтов и строительной механики, апробированных методов численного моделирования, использованием верифицированных программных комплексов;
- удовлетворительной сходимости численных исследований с обоснованными результатами экспериментальных исследований, опубликованных в научной литературе, а также результатов аналитических и численных решений.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались на заседаниях кафедры «Автомобильные дороги, аэродромы, основания и фундаменты» ФГАОУ «Российский университет транспорта», на внутренних научно-практических конференциях «Неделя науки» в период с 2019 по 2022 г.; на научно-технической конференции с иностранным участием «Нелинейная механика грунтов и численные методы расчетов в геотехнике и фундаментостроении» в 2019 г. (ВГТУ, г. Воронеж); на научно-практической конференции с международным участием «Пути к конкурентно способным и экономичным решениям по строительству зданий и сооружений транспортной инфраструктуры» в 2019 г. (РОАТ РУТ (МИИТ), г. Москва); на II всероссийской конференции с международным участием «Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий» в 2021 г. (ПНИПУ, г. Пермь); на международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы проектирования, строительства

и эксплуатации автомобильных дорог, аэродромов и транспортных сооружений» в 2021 г. (РУТ (МИИТ), г. Москва); на 80-й международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ в 2022 г. (МАДИ, г. Москва); на IV международной научно-технической конференции «Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении» в 2022 г. (ЮРГПУ (НПИ), г. Новочеркасск); на 2-й Международную научно-техническую конференцию памяти профессора Д.М. Шапиро «Использование современных моделей в механике грунтов, геотехнических расчетах и фундаментостроении» в 2023 г. (ВГТУ, г. Воронеж).

Результаты данного исследования были использованы при разработке «Методики учета нагрузок, воздействующих на фундаменты опор мостовых сооружений высокоскоростной железнодорожной линии при образовании карстовых деформаций», разработанной НИИОСП им. Н.М. Герсевича – АО «НИЦ «Строительство».

По теме диссертации опубликовано 7 работ, из них: 2 работы в рецензируемых научных изданиях; 1 работа в издании, входящем в международную базу цитирования Scopus.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 155 наименований. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков, 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, описана степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе выполнен литературный обзор, дан краткий анализ механизма карстовых деформаций, методов расчета и проектирования фундаментов различных зданий и сооружений на закарстованных территориях.

Показано, что на данный момент механизм карстовых деформаций, хоть сам процесс и скрыт от прямого наблюдения, изучен достаточно хорошо, что позволяет определить особенности деформирования толщи грунта, залегающего непосредственно над растущей полостью.

В научной и нормативной литературе принципиально рассматривается два варианта свайного карстозащитного фундамента:

- 1) с прорезанием сваями карстующейся толщи и опиранием на монолитные скальные грунты;
- 2) со сваями, нижний конец которых расположен выше карстующихся скальных грунтов.

В обоих вариантах рекомендовано учитывать дополнительные нагрузки, передаваемые на сваи в процессе деформирования грунта основания при возникновении и росте карстовой полости. Данные нагрузки в нормативных документах рассматриваются как «негативное трение». Наиболее сложным является определение дополнительных нагрузок для второго варианта фундамента, когда возможны 2 типа карстопроявлений: «провал» и «оседание».

При традиционном подходе выполняются только расчеты фундамента на карстовые деформации типа «провал», при котором часть свай в зоне провала исключается из работы. При таком подходе может быть исключена из работы значительная часть свай фундаментов опор мостов (свайных кустовых фундаментов), что не требуется, когда в основании нижних концов свай реализуются деформации по типу «оседание». Данный тип карстовых деформаций возможен при залегании глинистых грунтов под нижними концами свай и над кровлей карстующихся грунтов при росте полости в карстующихся грунтах. В этом случае негативное трение развивается на участке высотой h , на котором просадки грунта при росте карстовой полости оказываются больше, чем осадка сваи (рисунки 1). Однако, нормативная документация и научная литература недостаточно полно раскрывает этот вопрос, отсутствуют указания по расчету значения дополнительной нагрузки, воздействующей на сваи.

Проведено множество исследований по изучению работы свай в составе группы как с точки зрения несущей способности по грунту, так и с точки зрения деформируемости основания фундамента. Результаты исследования свайно-плитных фундаментов (аналог большеразмерного кустового фундамента) при

образовании карстовых деформаций в основании свай показывают, что поведение сваи в составе группы будет отличаться от поведения одиночной сваи.

Результаты анализа научной и нормативной литературы позволили сформулировать цель и основные задачи исследования, направленного на разработку методов расчета свайных фундаментов опор, учитывающих разные типы карстовых деформаций и особенности взаимодействия свай с грунтом.

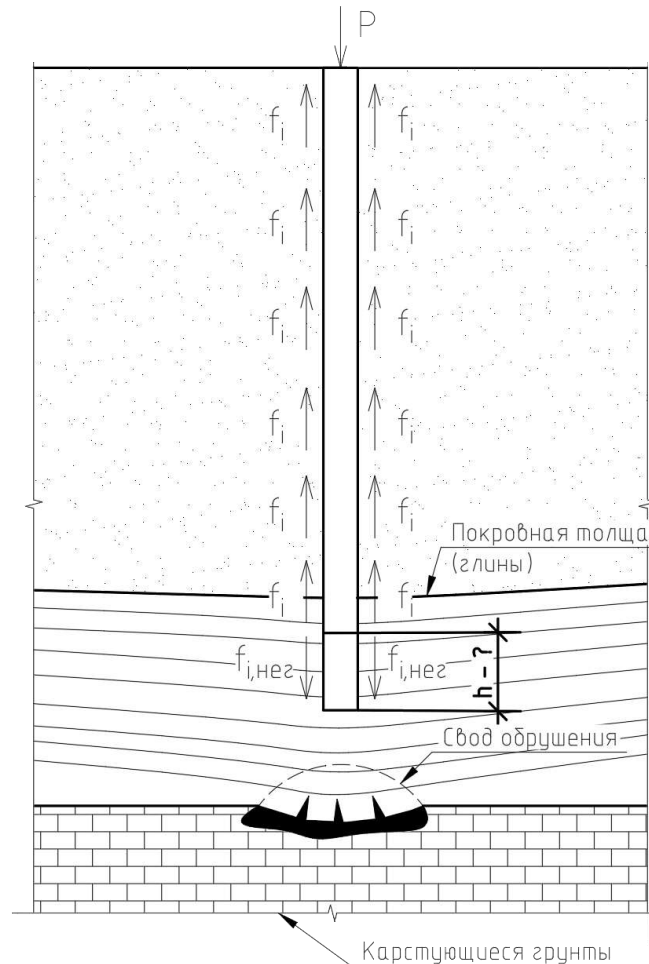


Рисунок 1 – Схема формирования сил сопротивления грунта (f_i) и негативного трения ($f_{i,нег}$) над карстовой полостью

Во второй главе выполнено экспериментальное обоснование метода расчета и обобщение входных параметров оснований и фундаментов в численном исследовании.

Основным инструментом исследования в данной работе является численное моделирование, основанное на методе конечных элементов (МКЭ).

Расчетная конечно-элементная модель имеет следующие характеристики. В качестве модели грунтового основания принята упругопластическая модель Мора-Кулона. Свая и грунт моделируются треугольными 15-ти узловыми элементами. Для описания несовместности деформаций на контакте «свая-грунт» используются специальные интерфейсные элементы. Для подтверждения достоверности расчетной конечно-элементной модели выполнено сравнение результатов численного моделирования с натурным экспериментом.

Натурный эксперимент был проведен в Китае, на площадке для строительства протяженного эстакадного моста. Мост проходит через область, в которой присутствует множество скрытых карстовых полостей.

Тестовая свая – буронабивная железобетонная, длиной 19,5 м и диаметром 1,5 м. Свая выполнена над карстовой полостью, которая имеет высоту 3,2 м и размеры в плане 6,0х3,0 м. Низ сваи находится на расстоянии 1,5 м от свода полости (посадка представлена на рисунке 2, а). Испытание проводилось методом ступенчатого нагружения. Вертикальная нагрузка прикладывалась за 11 шагов, с каждым шагом увеличение составляло 2 МН. В результате проведенного испытания получена кривая зависимости перемещений оголовка сваи от прикладываемой нагрузки.

Для проведения численного эксперимента была выполнена серия расчетов в программном комплексе Plaxis 2D. Расчеты выполнялись в осесимметричной постановке (рисунок 2, б).

Сопоставление графика «нагрузка-осадка», распределения осевой силы по длине сваи и трения по боковой поверхности сваи, полученных численным расчетом, с аналогичными экспериментальными результатами подтвердило их удовлетворительную сходимость.

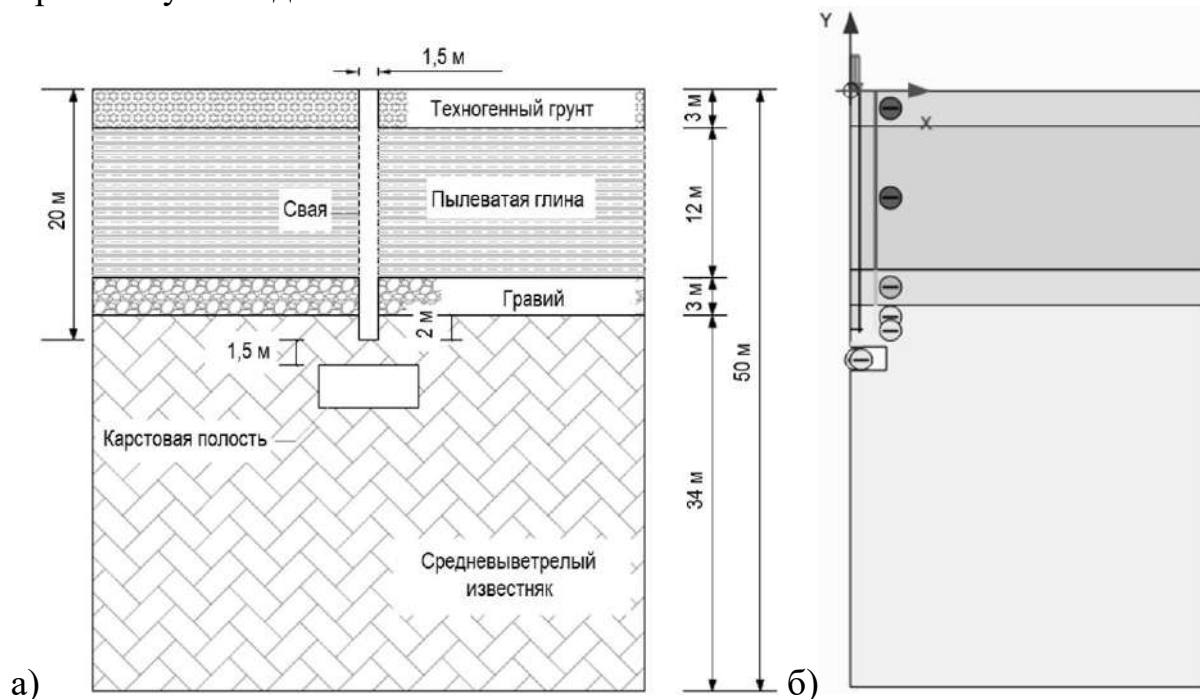


Рисунок 2 – Посадка испытываемой сваи на инженерно-геологический (а) разрез и общий вид конечно-элементной модели (б)

Произведена оценка применения расчетных моделей МКЭ для моделирования карстовых деформаций и установлено, что в случае наличия слоя водоупорных глин под нижними концами свай над карстующимися грунтами наиболее целесообразно выполнять расчеты на карстовые деформации по типу «оседание» (рисунок 3). При этом высота «свода обрушения» (h , м) в карстующихся грунтах, определяемая расчетом как область сгущения «точек пластических деформаций» над карстовой полостью (B , м), должна быть меньше мощности слоя глин (b , м),

а формирование этого свода следует рассмотреть для двух расчетных случаев: при формировании свода ниже нижних концов свай (рисунок 3, а) и выше нижних концов свай (рисунок 3, б).

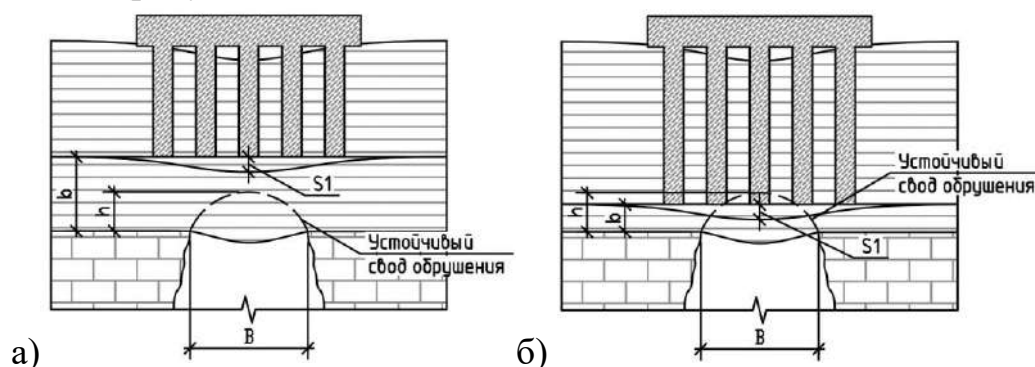


Рисунок 3 – Расчетные случаи для деформаций по типу «оседание»: а – свод обрушения находится не доходит до свай, б – свод обрушения расположен выше низа свай

С целью определения входных параметров оснований и фундаментов в численном моделировании проведен анализ и систематизация проектных решений фундаментов мостовых опор на различных объектах. Для выполнения численных расчетов было выделено 2 типа фундамента мостовых опор, основные параметры которых представлены в таблице 1 и на рисунке 4.

Таблица 1 – Выделенные фундаменты мостовых опор

	Тип 1	Тип 2
Тип свай	Висячие	Висячие
Число свай, шт.	12	36
Площадь условного фундамента	~ 80 м ²	~ 250 м ²
Диаметр свай, м	1,2	1,2
Длина свай, м	33	33
Тип соединения свай с ростверком	Жесткое	Жесткое

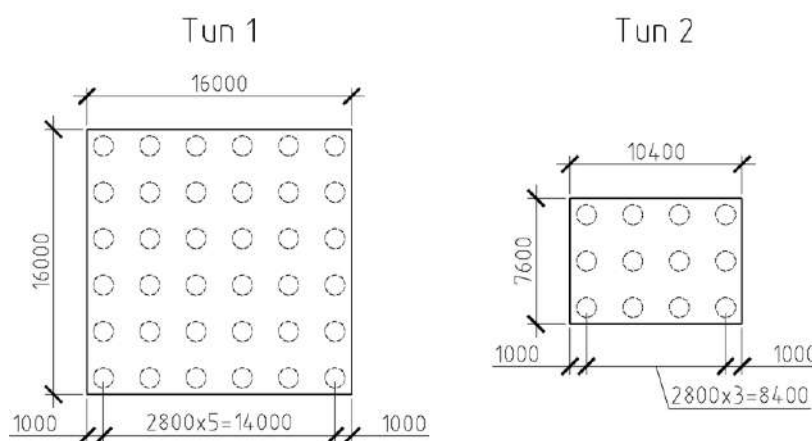


Рисунок 4 – Конструкция рассчитываемых ростверков

Обосновано моделирование карстовой полости «упрощенным способом», когда расчетная модель ограничивается снизу кровлей карстующихся скальных грунтов, а сама полость представлена отключением связей в вертикальном направлении (рисунок 5).

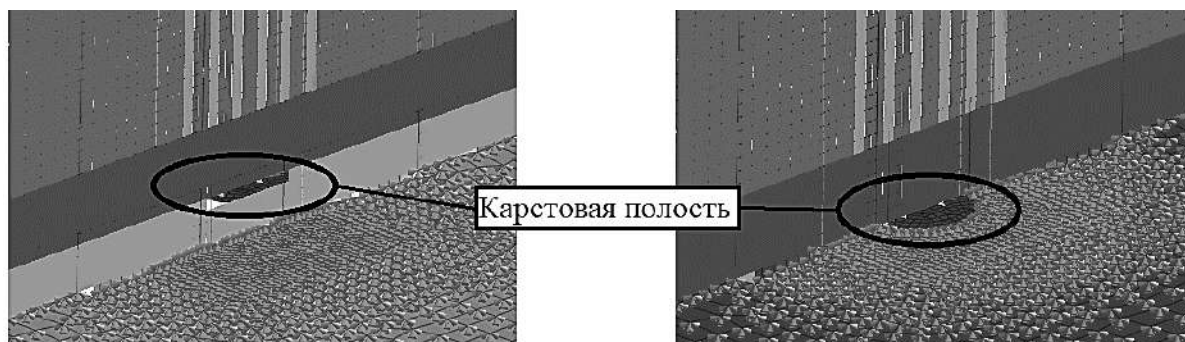


Рисунок 5 – Способ моделирования карстовой полости: а – традиционный способ; б – упрощенный способ

На основании выполненной классификации фундаментов опор по геометрическим параметрам и типам основания составлена вариативная конечно-элементная модель со следующими параметрами:

- однослойный грунтовый массив, представленный твердой глиной;
- размер расчетной области L (рисунок б) определен из условия отсутствия влияния его на результаты расчета, узлы на границах области закреплены;
- размер расчетной области H (рисунок б) ограничен кровлей скальных карстующихся грунтов, узлы на границах области закреплены, кроме прогнозируемой карстовой полости;
- прогнозируемая карстовая полость представлена отсутствием закрепления по вертикали узлов в ее пределах;
- учтена несовместность деформаций конструкции и грунта введением специальных интерфейсных элементов на контакте свай и грунта.

Расчеты выполнены при варьировании следующих параметров, выбор которых определен в результате планирования эксперимента на основании факторного анализа (глава 3):

- расстояние до кровли скального грунта b (рисунок 3): 6 м, 10 м, 14 м, 18 м, 22 м;
- расчетный размер полости за время эксплуатации V (рисунок 3): 3 м, 5,5 м, 7,8 м, 10 м;
- тип фундамента: тип 1 и тип 2 (таблица 1, рисунок 4).

Численные расчеты выполняются в трехмерной постановке. Грунт, ростверк и сваи моделируются объемными элементами. Для моделирования бетона использовалась линейно-упругая модель. Для моделирования грунта применяется упругопластическая модель Кулона-Мора.

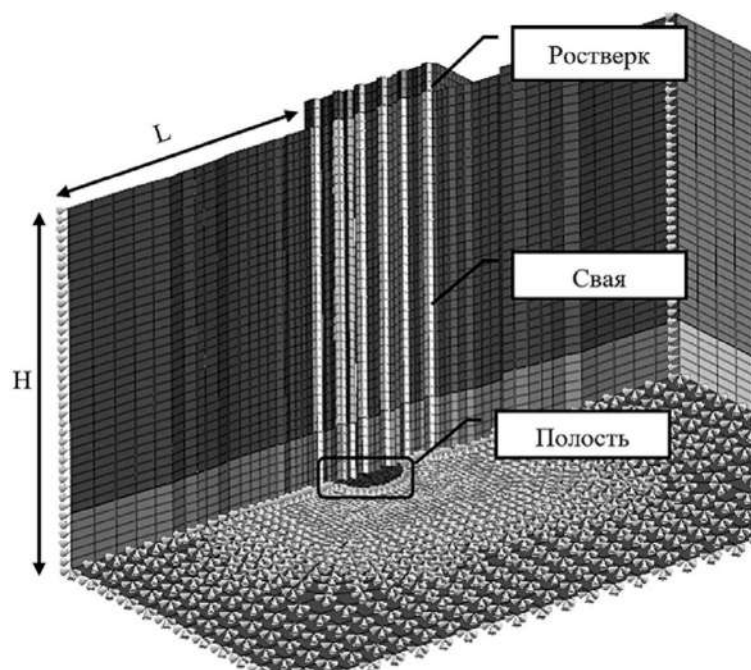


Рисунок 6 – Конечно-элементная модель, разрез

В третьей главе разработана методика выполнения численных исследований.

Численные исследования выполняются путем математического моделирования нагружения свайного фундамента мостовой опоры при росте карстовой полости в основании нижних концов свай. Расчет выполняется в соответствии со следующей этапностью.

1. Определение исходного напряженно-деформированного состояния грунтового массива. На данном этапе выполняется вычисление начальных напряжений в грунтовом массиве до выполнения строительства опоры моста.

2. Активация конструкций фундамента мостовой опоры (ростверк, сваи, интерфейсные элементы), активация расчетной нагрузки. На данном этапе моделируется строительство опоры и нагружение ее эксплуатационной нагрузкой. После завершения расчета выполняется анализ касательных напряжений на боковой поверхности свай.

3. Отключение связей по оси Z в пределах площади карстовой полости. На данном этапе моделируется рост карстовой полости в карстующихся грунтах до ее прогнозируемого диаметра. После завершения расчета выполняется повторный анализ касательных напряжений на боковой поверхности свай в тех же элементах, что и в предыдущем этапе.

Дополнительная нагрузка на сваю при образовании карстовых деформаций (P_1 , кН) определяется по формуле:

$$P_1 = u \cdot \sum \Delta\tau_{z,i} \cdot h_i \quad (1)$$

где: u – наружный периметр поперечного сечения ствола свай, м; $\Delta\tau_{z,i}$ – изменение значения касательного напряжения на боковой поверхности свай на рассматриваемом i -м слое по сравнению с расчетным этапом в нормальных условиях эксплуатации, кН/м²; h_i – толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с

боковой поверхностью сваи, м. При этом, при расчете по формуле (1) учитываются только те слои, на которых наблюдается уменьшение или изменение его знака с «−» на «+».

Дополнительная нагрузка на сваю, реализуемая в момент образования полости за счет негативного трения на боковой поверхности свай (P_1), а также дополнительная осадка (S_1), определяются для 2-х расчетных случаев:

– прогнозируемый свод обрушения над полостью формируется в глинистых грунтах над карстующимися грунтами, размеры свода – менее расстояния до нижнего конца свай: $h/b \leq 1$ (рисунок 3, а);

– прогнозируемый свод обрушения над полостью формируется в глинистых грунтах над карстующимися грунтами, размеры свода – выше нижних концов свай: $h/b > 1$ (рисунок 3, б).

В работе отслеживается доля увеличения нагрузки на сваю $\Delta P = P/P_1$ и доля увеличения осадки свайного фундамента $\Delta S = S_1/S$, где P и S – нагрузка на сваю и осадка фундамента в нормальных условиях эксплуатации до образования полости в основании свай.

Методика разработана при условии формирования устойчивого «свода обрушения» над полостью и исключения «всплытия» полости подошву ростверка. Для этого в процессе расчетов контролируется рост прогнозируемого свода обрушения (путем фиксации положения точек Кулона-Мора над карстовой полостью – рисунок 7).

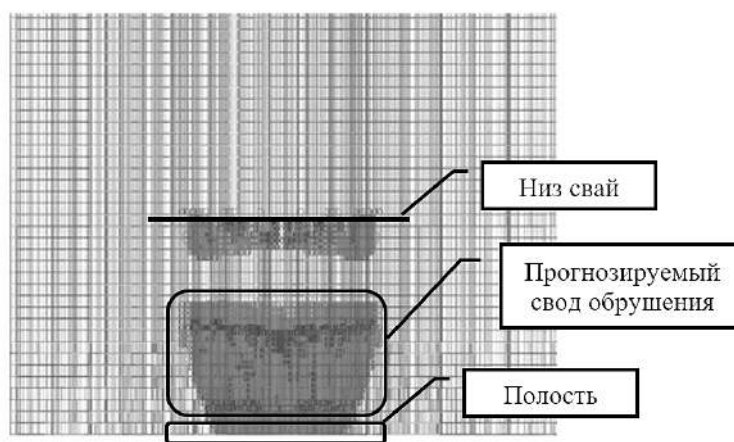


Рисунок 7 – Пластические точки Мора-Кулона над полостью

При помощи полного факторного эксперимента типа 2^k определено, что наибольшее влияние на расчетные параметры свайного фундамента опоры моста, определяемые при образовании карстовых деформаций по типу «оседание», оказывают расчетный диаметр карстовой полости и расстояние от низа свай до кровли карстующихся грунтов.

В четвертой главе на основании численных вариативных расчетов разработан аналитический метод расчета дополнительных нагрузок на сваи и осадок фундаментов при образовании карстовых деформаций в основании.

В результате анализа результатов численных расчетов установлено, что сопротивление грунта под нижним концом сваи полностью исключается, а по боковой поверхности сваи – исключается частично. При этом, сопротивление

грунта по боковой поверхности сваи исключается на том участке, на котором возникает эффект «негативного трения». Соотношение длины участка, на котором возникает эффект «негативного трения» (l , м), к длине сваи (L , м) зависит от формирования «свода обрушения» над карстовой полостью в карстующихся грунтах, а именно – от области расположения прогнозируемого свода обрушения: свод обрушения доходит до низа свай или выходит выше концов свай (1-й или 2-й расчетные случаи соответственно, рисунок 3).

В результате возникновения эффекта «негативного трения» на сваи, расположенные над карстовой полостью в карстующихся грунтах, передаются дополнительные нагрузки (P_1), определяемые по формуле 1, вызывающие дополнительные осадки фундамента и снижение коэффициента жесткости свай. В связи с исключением сопротивления грунта по боковой поверхности сваи на участке, на котором возникает эффект «негативного трения», несущая способность свай снижается.

На рисунке 8 представлены графики зависимости дополнительной нагрузки, действующей на сваю при образовании карстовых деформаций (P_1 , кН) от расчетного диаметра карстовой полости (B , м) при различных расстояниях от низа свай до кровли карстующихся грунтов (b , м).

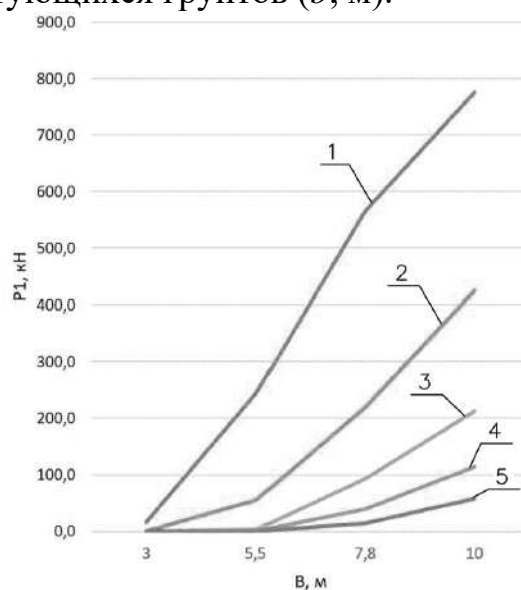


Рисунок 8 – График зависимости дополнительной нагрузки на сваю (P_1 , кН) от диаметра полости (B , м) и расстояния от низа свай до кровли карстующихся грунтов (b , м): 1 – $b=6$ м, 2 – $b=10$ м, 3 – $b=14$ м, 4 – $b=18$ м, 5 – $b=22$ м

Анализ этих графиков показывает, что с ростом диаметра полости в карстующихся грунтах дополнительная нагрузка на сваи возрастает, а с увлечением расстояния от кровли карстующихся грунтов до низа свай она снижается.

После статистической обработки результатов расчета получены аналитические зависимости для расчета дополнительных нагрузок на сваи, несущей способности свай, осадок фундаментов и коэффициента жесткости свай в зависимости от расчетных параметров карстовых деформаций (b/B , рисунок 3) и условий

формирования свода обрушения над карстовой полостью (рисунок 3): $h/b \leq 1$ (1-й расчетный случай) и $h/b > 1$ (2-й расчетный случай).

Для определения отношения дополнительной нагрузки на сваю (P_1) к нагрузке на сваю в нормальных условиях эксплуатации (P) до образования полости, была выполнена статистическая обработка результатов расчета и получена аналитическая зависимость P/P_1 от b/B (формула 2 для расчетного случая 1) и зависимость P/P_1 от A_n/A (формула 3 для расчетного случая 2).

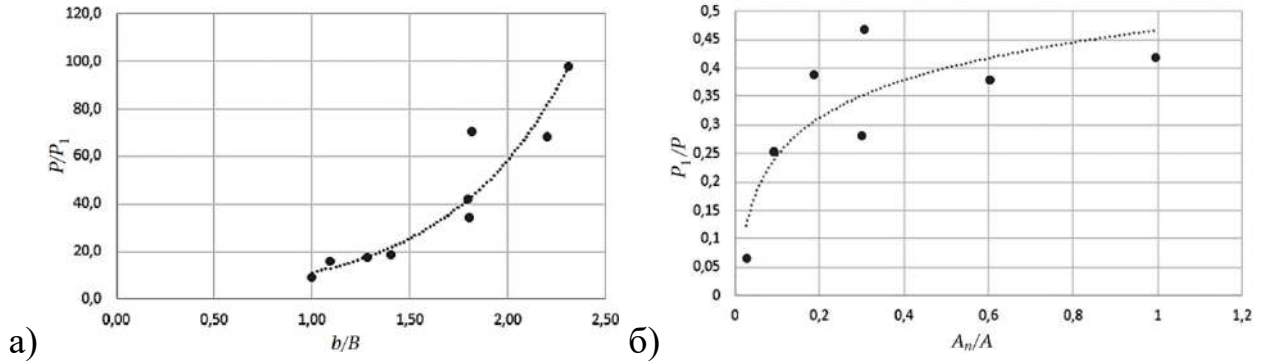


Рисунок 9 – График зависимости значения P/P_1 к отношению b/B (а) и значения P_1/P к отношению A_n/A (б)

$$\frac{P}{P_1} = 2,1e^{1,7\frac{b}{B}} \quad (2)$$

$$\frac{P_1}{P} = 0,1\ln\left(\frac{A_n}{A}\right) + 0,5. \quad (3)$$

Таким образом, дополнительная нагрузка на сваю P_1 определяется в зависимости от проектной нагрузки, передаваемой на сваю в нормальных условиях эксплуатации (P) до образования полости, размера полости (B) и расстояния от нижнего конца свай до кровли карстующихся грунтов (b) по формуле 4 для расчетного случая 1, и в зависимости от площади полости (A_n) и площади условного фундамента (A) по формуле 5 для расчетного случая 2.

$$P_1 = P / (2,1e^{1,7\frac{b}{B}}) \quad (4)$$

$$P_1 = P \left(0,1\ln\left(\frac{A_n}{A}\right) + 0,5 \right). \quad (5)$$

Очевидно, что помимо возникновения дополнительной нагрузки на сваю, часть свай исключается из работы при определении несущей способности, а именно:

- полностью исключается сопротивление грунта под нижним концом свай;
- частично исключается сопротивление грунта по боковой поверхности свай.

Сопротивление грунта по боковой поверхности свай исключается на том участке, на котором возникает эффект «негативного трения». В результате вы-

полненных вариативных расчетов и анализа касательных напряжений на боковой поверхности свай установлено, что соотношение длины участка исключения сопротивления грунта по боковой поверхности l, m к длине свай L, m для первого расчетного случая можно принять равным 0,2, а для второго – 0,4.

На рисунке 10 (а) представлена зависимость отношения осадки ростверка после образования карстовой полости к осадке ростверка до образования карстовой полости (S_1/S) к отношению расчетного диаметра полости к расстоянию от кровли карстующихся грунтов до низа свай k (B/b) для 2-х вариантов площади условного фундамента (первый расчетный случай), а на рисунке 10 (б) – зависимость отношения значения S_1/S к отношению площади полости ($A_n, м$) к площади условного фундамента ($A, м$) (второй расчетный случай).

Была выполнена линейная аппроксимация функций по значениям коэффициентов S_1/S .

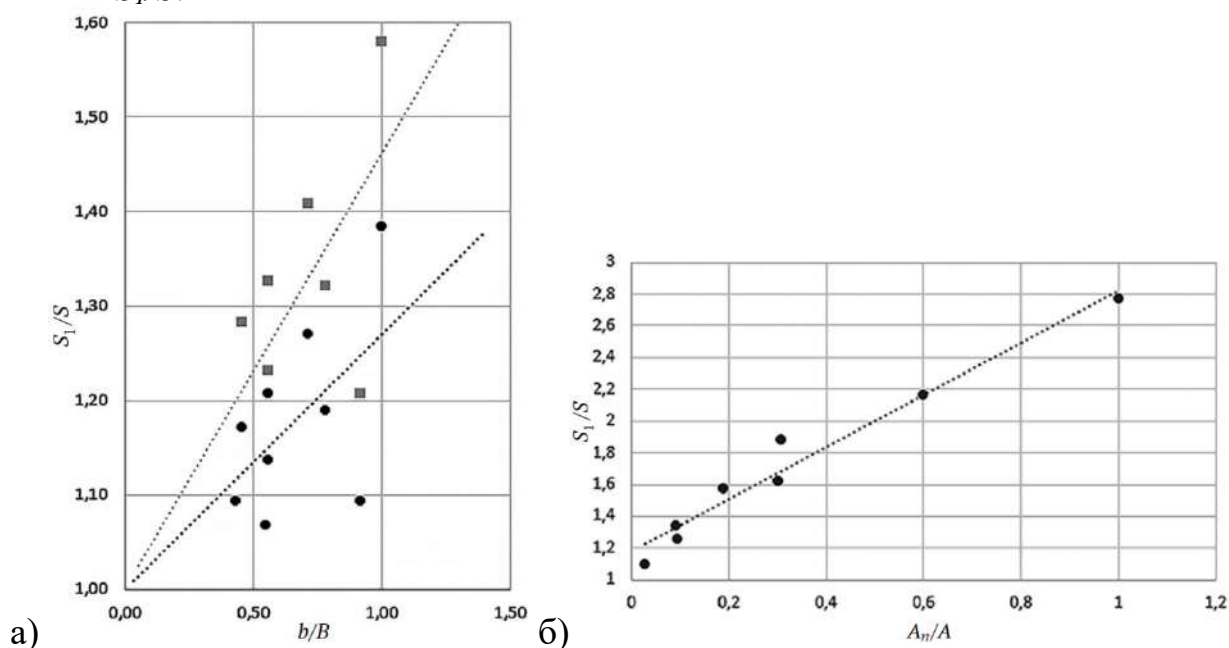


Рисунок 10 – График зависимости значения S_1/S к отношению B/b (а) и значения S_1/S к отношению A_n/A : ● – $A > 150 м^2$, ■ – $A < 150 м^2$

Таким образом, получены следующие зависимости для определения осадки фундамента после образования полости в зависимости от числа свай в ростверке, расчетного диаметра карстовой полости и расстояния от низа свай до кровли карстующихся грунтов для первого расчетного случая:

- при площади условного фундамента менее $150 м^2$:

$$\frac{S_1}{S} = 0,6 \frac{B}{b} + 1, \quad (6)$$

- при площади условного фундамента более $150 м^2$:

$$\frac{S_1}{S} = 0,4 \frac{B}{b} + 1. \quad (7)$$

Аналогичная зависимость была получена для второго расчетного случая:

$$\frac{S_1}{S} = 1,7 \frac{A_{II}}{A} + 1,2. \quad (8)$$

Используя зависимости 6-8 в инженерных расчетах, можно определить осадку ростверка после образования карстовой полости, зная значение осадки до образования полости (в нормальных условиях эксплуатации).

Несущая способность по грунту буронабивной сваи фундамента мостовой опоры при действии карстовых деформаций по двум расчетным случаям может быть записана следующим образом:

$$F_{d,oc.1} = \gamma_c u \sum_{i=0}^{0,8L} \gamma_{R,f} f_i h_i, \quad (9)$$

$$F_{d,oc.2} = \gamma_c u \sum_{i=0}^{0,6L} \gamma_{R,f} f_i h_i, \quad (10)$$

где $F_{d,oc.1}$ – несущая способность по грунту одиночной сваи при оседании по первому расчетному случаю; $F_{d,oc.2}$ – то же, по второму расчетному случаю; γ_c – коэффициент условий работы сваи; в случае опирания ее на глинистые грунты со степенью влажности $S_r < 0,85$ – $\gamma_c = 0,8$, в остальных случаях – $\gamma_c = 1$; $\gamma_{R,f}$ – коэффициент условий работы грунта на боковой поверхности сваи, зависящий от способа образования скважины и условий бетонирования и принимаемый по таблице 7.6 СП 24.13330; u – периметр поперечного сечения ствола сваи, м; L – длина сваи, м; f_i – расчетное сопротивление i -го слоя грунта на боковой поверхности ствола сваи, кПа, принимаемое по таблице 7.3 СП 24.13330; h_i – толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м.

Для выполнения расчета несущей способности свай по грунту фундаментов мостовых опор может быть учтена их работа в составе группы. При взаимодействии свай в составе грунта друг с другом через грунтовую среду возникают дополнительные вертикальные и горизонтальные напряжения, т.е. создается эффект «обжатия» свай грунтом от нагрузок, передаваемых на соседние сваи. Величина дополнительного «обжатия» характеризует увеличение сопротивления на боковой поверхности и под нижним концом сваи в составе группы по сравнению с одиночной свайей.

Функция зависимости общих вертикальных напряжений в грунте в межсвайном пространстве от глубины, параметров свайного поля и характеристик грунта, учитывающая эффект «обжатия», определена Алехиным В.С. и записывается в следующем виде:

$$\sigma_z = \frac{D + \gamma}{B} (e^{HB} - 1), \quad (10)$$

где $B = K_0 tg \varphi \frac{u}{A}$, $D = c \frac{u}{A}$, u – периметр сваи, $A = \frac{\pi}{4} (a^2 - d^2)$, a – шаг свай, d – диаметр сваи, H – длина сваи.

При развитии в основании сваи карстовой полости, сопротивление сваи под нижним концом исключается, а по боковой поверхности – частично снижается. В таком случае функция 10 примет следующий вид:

$$\sigma_z = \sigma_{zg} + \sigma_{z,об.}, \quad (11)$$

где σ_{zg} – напряжения от собственного веса грунта и $\sigma_{z,об.}$ – дополнительные напряжения от эффекта «обжатия»; σ_{zg} и $\sigma_{z,об.}$ определяются с учетом снижения сопротивления сваи при образовании карстовых деформаций.

Эффект «обжатия» боковой поверхности для свайных фундаментов мостовых опор при образовании карстовых деформаций в основании свай предлагается учитывать по схеме на рисунке 11. На схеме представлена сумма вертикальных напряжений в грунте в околосвайном пространстве: σ_{zg} и $\sigma_{z,об.}$ из формулы 11. Представленная схема учитывает исключение сопротивления сваи по боковой поверхности на участке, на котором развивается «негативное трение». Также, снижается величина обжатия $\sigma_{z,об.,2}$ по сравнению со свайей, на которую не действуют карстовые деформации.

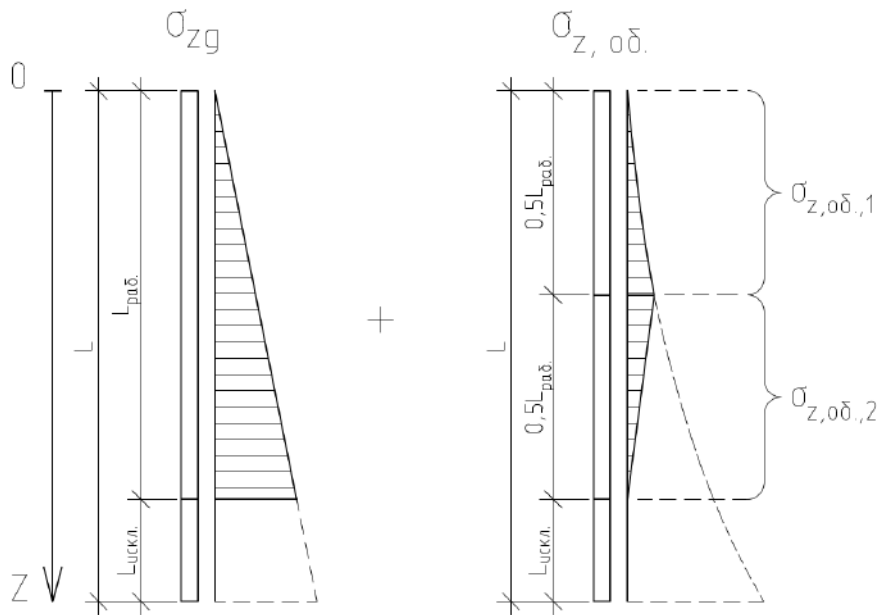


Рисунок 11 – Схема учета эффекта «обжатия» при образовании карстовой полости в основании свай

С учетом схемы на рисунке 11 функция зависимости дополнительных напряжений в грунте между сваями ($\sigma_{z,об.}$) в общем виде примет вид:

$$\sigma_{z,об.} = \begin{cases} \sigma_{z,об.,1} = \frac{D + \gamma}{B} (e^{zB} - 1) - z\gamma, & 0 < z \leq 0,5L_{раб.}; \\ \sigma_{z,об.,2} = -\frac{\sigma_{z,об.,1}(0,5L_{раб.})}{0,5L_{раб.}} z + 2\sigma_{z,об.,1}(0,5L_{раб.}), & 0,5L_{раб.} < z \leq L_{раб.}; \\ 0, & z > L_{раб.} \end{cases} \quad (12)$$

Коэффициент увеличения несущей способности сваи в составе группы при действии карстовых деформаций для двух расчетных случаев (рисунок 3) определяется как отношение площадей эпюр вертикальных напряжений с учетом эффекта «обжатия» (функция 11) и без учета (σ_{zg}).

$$k_{Fd,oc.1} = \frac{S_{\sigma z,oc.1}}{S_{\sigma zg,1}} = 0,5 + \frac{(D + \gamma)(e^{0,4HB}(0,2HB + 1) - 0,6HB - 1)}{0,32\gamma H^2 B^2}; \quad (13)$$

$$k_{Fd,oc.2} = \frac{S_{\sigma z,oc.2}}{S_{\sigma zg,2}} = 0,5 + \frac{(D + \gamma)(e^{0,3HB}(0,15HB + 1) - 0,45HB - 1)}{0,18\gamma H^2 B^2}; \quad (14)$$

где $S_{\sigma z,oc.1}$ и $S_{\sigma z,oc.2}$ – площадь эпюры, определенной функцией 11 для оседания по 1-му и 2-му расчетному случаю (рисунок 3); $S_{\sigma z,1}$ и $S_{\sigma z,2}$ – площадь эпюры вертикальных напряжений в грунте от собственного веса (σ_{zg}) для 1-го и 2-го расчетных случаев соответственно.

Таким образом, несущая способность по грунту для свай в составе группы с учетом повышающих коэффициентов может быть определена следующим образом:

$$F_{d,z,oc.1} = k_{Fd,oc.1} \gamma_c u \sum_{i=0}^{0,8L} \gamma_{R,f} f_i h_i, \quad (15)$$

$$F_{d,z,oc.2} = k_{Fd,oc.2} \gamma_c u \sum_{i=0}^{0,6L} \gamma_{R,f} f_i h_i. \quad (16)$$

В пятой главе разработана новая методика расчета свайных фундаментов мостовых опор при образовании карстовых деформаций, включающая все возможные виды карстопроявлений и разработанные аналитические методы расчета свай при образовании карстовых деформаций по типу «оседание» (глава 4). Приведены рекомендации по проектированию и по выполнению численных расчетов свайных фундаментов опор на карстоопасных площадках.

Приведен пример расчета свайного фундамента мостовой опоры по предлагаемой методике для одного из выполненных объектов, в котором выполнено сопоставление аналитического и численного решений для определения дополнительной нагрузки на сваи опоры.

Выполнено определение высоты прогнозируемого свода обрушения с использованием численных расчетов. Расчет выполнен в программном комплексе Plaxis 2D в осесимметрично постановке (согласно методике, описанной в главе 5). Для описания поведения грунтов использована упруго-пластическая модель Мора-Кулона.

В данных условиях высота прогнозируемого свода обрушения составляет 1,7 м. Из этого определяется тип карстовых деформаций – «оседание», так как прогнозируемый свод обрушения не выходит к низу свай.

Несущая способность сваи по грунту – 1779 тс, допускаемая нагрузка – 1270 тс, действующая нагрузка на голову сваи (согласно проекту) – 628 тс.

Несущая способность сваи по грунту с учетом карстовых деформаций – 731 тс, допускаемая нагрузка – 522 тс, действующая нагрузка на голову сваи (особое сочетание) – 475 тс.

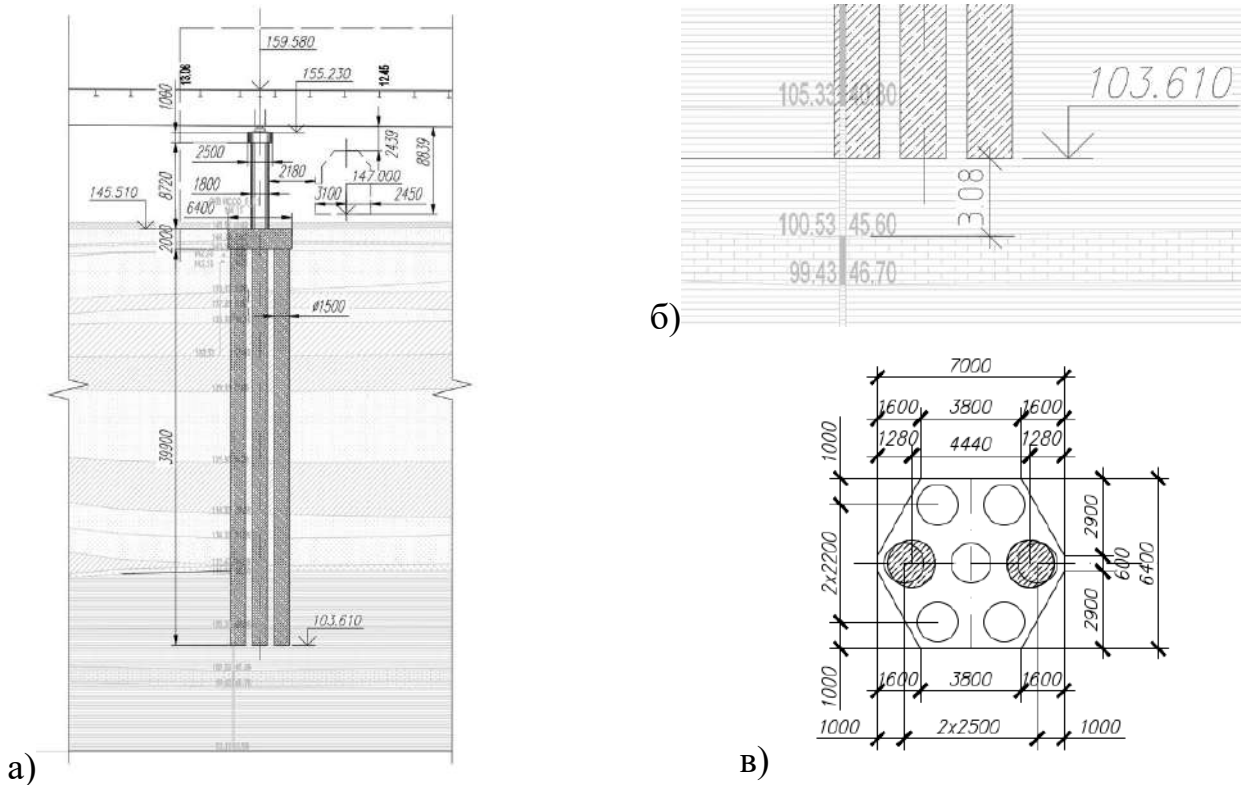


Рисунок 12 – Фрагмент посадки опоры на инженерно-геологический разрез (а), расстояние от низа свай до кровли карстуемых грунтов (б) и план опоры (в)

Определим дополнительную нагрузку, действующую на сваю при образовании карстовых деформаций (формула 2):

$$P_1 = P / \left(2,1e^{1,7 \frac{b}{B}} \right) = 475 / \left(2,1e^{1,7 \frac{3}{3}} \right) = 41 \text{ тс.} \quad (17)$$

Выполним проверку условия обеспечения несущей способности сваи по грунту, для этого определим значение расчетной нагрузки на сваю с учетом дополнительной нагрузки:

$$N = P + P_1 = 475 + 41 = 516 \text{ тс,} \quad (18)$$

$$\gamma_n \cdot N = 516 \text{ тс} < \frac{F_d}{\gamma_{c,g}} = \frac{731}{1,4} = 522 \text{ тс.} \quad (19)$$

Для подтверждения полученного вывода об обеспечении несущей способности сваи по грунту при действии карстовых деформаций выполнен численный расчет в пространственной постановке.

В результате анализа касательных напряжений на боковой поверхности сваи на различных стадиях по формуле 1 определим дополнительную нагрузку, передаваемую на сваю при действии карстовых деформаций:

$$P_1 = u \sum \Delta \tau_{z,i} h_i = 4,71 \cdot ((87,2 - 83,9) \cdot 1 + (108,8 - 41,6) \cdot 1) = 332,1 \text{ кН} = 33,2 \text{ тс.} \quad (20)$$

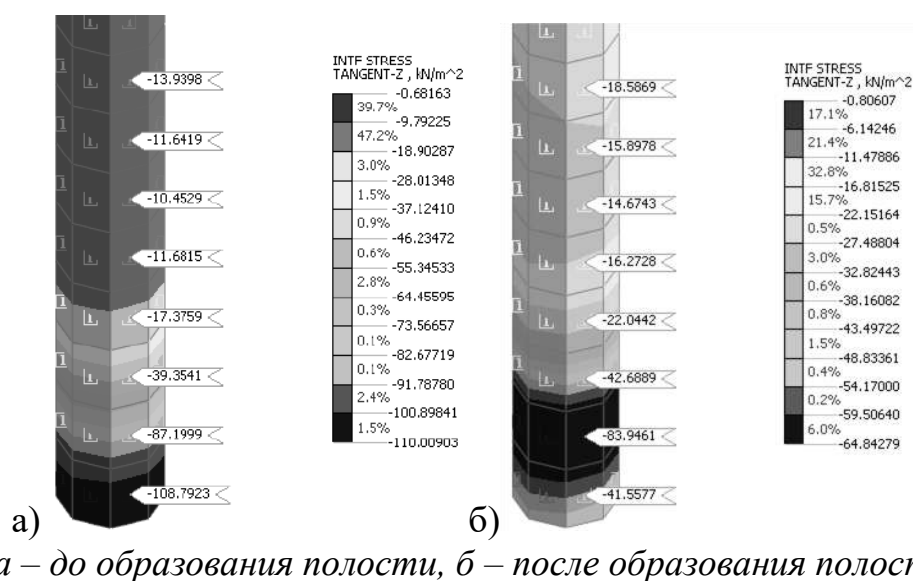


Рисунок 13 – Касательные напряжения на боковой поверхности, кН/м²

Сравним значения дополнительной нагрузки, определенные аналитическим (формула 17) и численным (19) расчетом:

$$41 < 31,2; \frac{41 - 31,2}{41} \cdot 100\% = 19\%.$$

Расхождение между результатами составляет менее 20%, что говорит о достаточном запасе надежности, который обеспечивает предлагаемое аналитическое решение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 На основании анализа нормативных методов расчета и проектирования свайных фундаментов мостовых опор на закарстованных территориях установлено, что традиционно выполняются расчеты только на карстовые деформации типа «провал», когда часть свай в зоне провала исключается из работы фундамента. Однако, когда под нижними концами свай над карстующимися грунтами залегают глинистые грунты, карстовая полость формируется под нижними концами свай и не «всплывает» под подошву ростверка, поэтому все сваи фундамента включаются в работу, но с учетом особенностей их взаимодействия с грунтом над полостью. В данном случае возникают карстовые деформации по типу «оседание».

2 При возникновении карстовых деформаций по типу «оседание», вызванных ростом полости в карстующихся грунтах в основании свай фундамента, на сваи передаются дополнительные нагрузки, в том числе за счет «негативного трения» на боковой поверхности свай, а несущая способность свай над полостью снижается. Для учета этих факторов выполнены численные и теоретические исследования, и разработана новая методика расчета и проектирования свайного фундамента мостовой опоры при образовании карстовых деформаций в основании по типу «провал» и «оседание».

3 На основании нормативной документации и сопоставления результатов численных расчетов с результатами натурных экспериментов обосновано

использование компьютерных программ, реализующих метод конечных элементов и теорию прочности Мора-Кулона для выполнения численных исследований.

4 Для выполнения численных исследований систематизированы проектные решения фундаментов мостовых опор на различных объектах, составлена пространственная вариативная конечно-элементная модель, обоснованы и сформулированы расчетные требования, обеспечивающие реализацию карстовых деформаций по типу «оседание», а также новые упрощенные методы задания граничных условий по нижней грани конечно-элементной модели. На основании факторного эксперимента обоснованы варьируемые исходные данные: расчетный диаметр карстовой полости в карстующихся грунтах и расстояние от низа свай до кровли карстующихся грунтов.

5 Численные исследования выполнены с использованием верифицированных программных комплексов в соответствии с разработанной методикой, в которой предложены методы определения негативного трения и методы определения дополнительных нагрузок на сваи над карстовой полостью по результатам численного моделирования свайного фундамента опоры над карстовой полостью.

6 По результатам численных исследований получены аналитические зависимости для определения дополнительных нагрузок на сваи, осадок фундаментов и коэффициентов жесткости при образовании карстовых деформаций в основании свай.

7 По результатам математического анализа особенностей взаимодействия свай с грунтом над карстовой полостью в составе группы свай получено аналитическое решение для расчета несущей способности свай.

8 По результатам выполненных исследований разработана новая методика проектирования свайного фундамента опоры моста на закарстованных территориях, учитывающая возможность возникновения карстовых деформаций двух типов («оседание» и «провал»), разработаны рекомендации по выполнению численных расчетов свайных фундаментов опор на карстоопасных площадках, учитывающие особенности взаимодействия свай с грунтом над карстовой полостью. Разработанная методика включена в нормативный документ «Методика учета нагрузок, воздействующих на фундаменты опор мостовых сооружений высокоскоростной железнодорожной линии при образовании карстовых деформаций», разработанная НИИОСП им. Н.М. Герсеева – АО «НИЦ «Строительство».

9 Перспективой дальнейшей разработки темы является расширение области исследования, а именно: учет влияния дополнительных видов нагружения ростверков (момент, горизонтальная сила); учет влияния карстующихся прослоек скальных грунтов, прорезаемых сваями, на несущую способность и дополнительные нагрузки на сваи при действии карстовых деформаций.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Готман, Н.З. Численные исследования взаимодействия основания и буронабивных свай фундамента мостовой опоры при возникновении карстовых

деформаций / Н.З. Готман, А.Г. Евдокимов // Construction and Geotechnics. – 2021. – № 4. – С. 5-18.

2. Готман, Н.З. Расчет свайных фундаментов мостовой опоры с учетом образования карстовых деформаций в основании / Н.З. Готман, А.Г. Евдокимов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2023. – № 5. – С. 2-8.

3. Готман, Н.З. Применение численных расчетов оснований при проектировании карстозащитных мероприятий / Н.З. Готман, А.Г. Евдокимов // Нелинейная механика грунтов и численные методы расчетов в геотехнике и фундаментостроении: материалы науч.-техн. конф. с иностранным участием. – 2019. – С. 24-29.

4. Готман, Н.З. К вопросу о моделировании основания свайных фундаментов над растущей карстовой полостью / Н.З. Готман, А.Г. Евдокимов // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: материалы международной научно-технической конференции, г. Новочеркасск 28-30 сентября 2022 г. – 2022. – С. 55-60.

5. Gotman, N.Z. Determination of additional load on the bridge foundation pile under karst deformation / N.Z. Gotman, A.G. Evdokimov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – № 1928(012058).

Евдокимов Александр Геннадьевич

РАСЧЕТ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ МОСТОВЫХ ОПОР ПРИ ОБРАЗОВАНИИ КАРСТОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать

Объем 1,5 п.л.

Заказ №

Формат 60x90/16

Тираж 80 экз.

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9