

Готман Н.З., Евдокимов А.Г. Численные исследования взаимодействия основания и буронабивных свай фундамента мостовой опоры при возникновении карстовых деформаций // *Construction and Geotechnics*. – 2021. – Т. 12, № 4. – С. 5–18. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.01

Gotman N.Z., Evdokimov A.G. Determination of additional load on the bridge foundation pile when the karst deformation development. *Construction and Geotechnics*. 2021. Vol. 12. No. 4. Pp. 5-18. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.01



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 12, № 4, 2021

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2021.4.01

УДК 624.154.5

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОСНОВАНИЯ И БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ ФУНДАМЕНТА МОСТОВОЙ ОПОРЫ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ КАРСТОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Н.З. Готман^{1,2}, А.Г. Евдокимов^{1,3}

¹Российский университет транспорта, Москва, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

³Подземпроект, Москва, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 21 августа 2021

Принята: 11 октября 2021

Опубликована: 28 декабря 2021

Ключевые слова:

карст, мостовая опора, карстовая деформация, свайный фундамент, дополнительная нагрузка, несущая способность.

АННОТАЦИЯ

При образовании карстовых деформаций в основании мостовых опор на сваи фундамента передаются дополнительные нагрузки, а несущая способность основания снижается. В статье предлагаются методы определения дополнительных нагрузок на сваи фундамента и несущей способности свай в зависимости от типа карстовых деформаций.

Составлена методика выполнения численных вариативных расчетов, основанная на анализе изменения касательных напряжений на боковой поверхности свай на разных этапах нагружения проектной нагрузкой и при росте полости в карстующихся грунтах.

Обоснованно выбрана расчетная модель и критерии оценки устойчивости свода над полостью. Выполнена серия численных расчетов, и после статистической обработки результатов получены аналитические зависимости для определения дополнительной нагрузки на сваю от расстояния от нижних концов свай до кровли карстующихся грунтов и расчетного диаметра полости.

© ПНИПУ

© Готман Наталья Залмановна – доктор технических наук, профессор, e-mail: natalya.gotman@marksgroup.ru.

Евдокимов Александр Геннадьевич – инженер I категории, аспирант, e-mail: evdokimov@marksgroup.ru.

Natalya Z. Gotman – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: natalya.gotman@marksgroup.ru.

Alexander G. Evdokimov – Engineer I category, postgraduate, e-mail: evdokimov@marksgroup.ru.

DETERMINATION OF ADDITIONAL LOAD ON THE BRIDGE FOUNDATION PILE WHEN THE KARST DEFORMATION DEVELOPMENT

N.Z. Gotman^{1,2}, A.G. Evdokimov^{1,3}

¹Russian University of transport, Moscow, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

³Podzemproekt, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 21 August 2021
Accepted: 11 October 2021
Published: 28 December 2021

Keywords:

karst, bridge support, karst deformation, pile foundation, additional load, bearing capacity.

ABSTRACT

When karst deformations are formed at the base of bridge supports, additional loads are transferred to the piles, and the bearing capacity of the base decreases. The article proposes methods for determining additional loads on the piles and the bearing capacity of piles, depending on the type of karst deformations.

A method for numerical variation calculations based on the analysis of the change of shear stresses on the lateral surface of the piles at different stages of loading with the growth of a cavity in karst soils.

The correct design model and criteria for evaluation the stability of the arch over the cavity were selected. A series of numerical calculations were performed. Analytical solutions to determine the additional load on the pile depending on the distance from the bottom of the pile to the roof of karst soils and the predicted diameter of the cavity in karst soils were obtained.

© PNRPU

Введение

Исследования поведения свай при образовании карстового провала в основании [1–5], выполненные в России и за рубежом, показывают, что на сваи передаются дополнительные вертикальные и горизонтальные нагрузки. В нормах РФ (СП 24.13330.2011, п. 13.10) дополнительные вертикальные нагрузки рассматриваются как «негативное трение» и указывается на необходимость их учета в расчете при образовании карстовых деформаций.

На основании анализа типов свайных фундаментов мостовых опор в карстоопасных районах и механизма разрушения покровной толщи над карстовой полостью разработана методика комплексных численных расчетов, учитывающая следующие особенности поведения «висячих» свай в составе фундамента и свайного ростверка при образовании карстовых деформаций:

– при росте карстовой полости происходит деформация покровной толщи, в связи с чем на боковой поверхности свай развивается «негативное трение», на сваю передается дополнительная нагрузка (P_1) и снижается ее несущая способность;

– дополнительная нагрузка на сваю P_1 , кН, определяется по формуле

$$P_1 = u \cdot \tau \cdot l, \quad (1)$$

где u – наружный периметр поперечного сечения ствола сваи; τ – «негативное трение»; l – размер участка по длине сваи, на котором развивается «негативное трение»;

– несущая способность сваи формируется за счет сопротивления грунта на ее боковой поверхности только в верхней части, сопротивление под нижним концом свай над полостью снижается;

– в условиях деформации покровной толщи и передачи дополнительных нагрузок на сваи и на ростверк деформативность основания свайного ростверка локально снижается,

что может вызвать изменение усилий в сечениях ростверка, дополнительную осадку фундамента и неравномерные деформации основания пролетного строения.

Принимая во внимание данные особенности, при выполнении исследования учитывалось следующее:

– расчеты выполняются в зависимости от прогнозируемого типа карстовых деформаций («провал» или «оседание») в объемной постановке в программных комплексах Midas GTS NX или Plaxis 3D при варьировании следующих факторов: шаг свай; нагрузка на ростверк; число свай в ростверке; диаметр карстовой полости в карстующихся грунтах; расстояние от низа свай до кровли карстующихся грунтов;

– тип карстовых деформаций определяется условиями формирования устойчивого «свода обрушения» [6]: если высота прогнозируемого свода (b) за нормативный срок эксплуатации сооружения не превышает расстояния от кровли карстующихся грунтов до низа свай (m), то карстовые деформации развиваются по типу «оседание» (рис. 1, a и \bar{b}), в противном случае деформации развиваются по типу «провал» (рис. 1, \bar{b}); оценка размеров «свода обрушения» в покровной толще грунта над карстовой полостью выполняется при помощи реализованного в модели грунта критерия прочности и определяется по рекомендациям СП 499.1325800.2021;

– при моделировании образования полости в карстующихся грунтах возникновение «негативного трения» определяется изменением знака и величины касательных напряжений на боковой поверхности свай по сравнению с расчетным этапом в нормальных условиях эксплуатации, а дополнительная нагрузка на сваю и размер участков по длине свай, где развивается «негативное трение», определяются снижением касательных напряжений в нижней части свай;

– по результатам расчетов выполнялась оценка влияния варьируемых факторов на дополнительные нагрузки на сваи, выбраны наиболее значимые факторы;

– для варьируемых наиболее значимых факторов выполнены численные расчеты и определены отношения дополнительной нагрузки на сваю (P_1) к нагрузке на сваю в нормальных условиях эксплуатации (P) до образования полости, а также отношение длины участка (l), на котором развиваются силы «негативного трения», к общей длине свай (L);

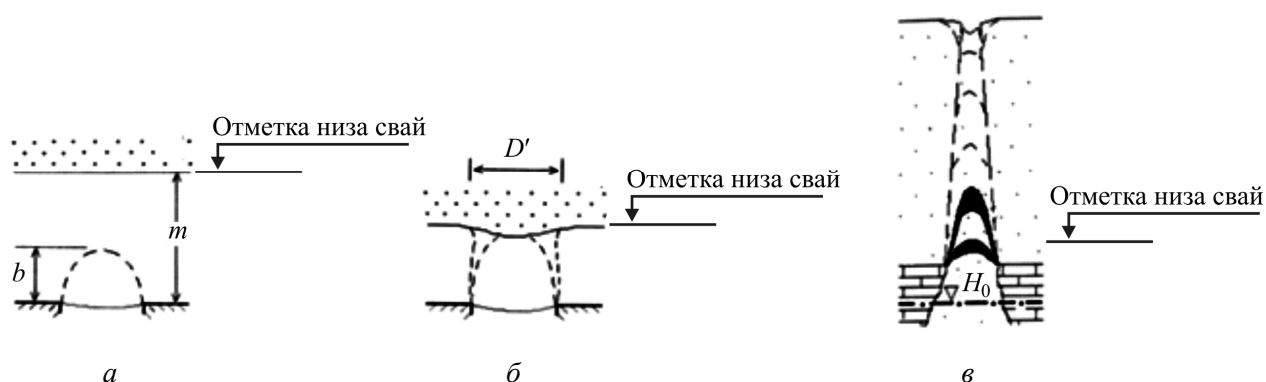


Рис. 1. Тип карстовых деформаций: a – «оседание» с размерами свода ниже концов свай, \bar{b} – «оседание» с размерами свода на уровне или выше концов свай, v – «провал»

Fig. 1. Type of karst deformation: a – «subsidence» with the collapse arch is below the end of the piles, \bar{b} – «subsidence» with the collapse arch is above the end of the piles, v – «collapse»

– по результатам статистической обработки результатов расчетов получены функциональные зависимости дополнительных нагрузок на сваи при образовании карстовых деформаций по типу «оседание» в зависимости от нагрузок на сваи в нормальных условиях эксплуатации (P), расчетного диаметра карстовой полости в карстующихся грунтах, расстояния от нижнего конца свай до кровли карстующихся грунтов и размеров фундамента для двух расчетных случаев образования свода над карстовой полостью, а именно размерами свода ниже концов свай (рис. 1, *a*) и в уровне и выше концов свай (рис. 1, *b*) без выхода под подошву ростверка.

Выполненные численные исследования позволили разработать инженерные методы расчета и методику расчета свайных фундаментов опор на карстоопасной территории, учитывающую дополнительные нагрузки, воздействующие на фундаменты при образовании карстовых деформаций.

Методика численных исследований и обоснование принятой расчетной модели

Для разработки инженерного метода расчета выполняются комплексные численные исследования путем математического моделирования свайного фундамента мостовой опоры в разнообразных инженерно-геологических условиях при образовании карстовых деформаций. Методика выполнения расчета составлена на основании анализа проектной документации для мостовых переходов на участке ВСМ «Москва – Казань». В результате анализа была составлена вариативная конечно-элементная расчетная модель (рис. 2) со следующими параметрами:

- ◆ однослойный грунтовый массив, представленный твердой глиной с характеристиками, указанными в табл. 1;
- ◆ ростверк квадратной или прямоугольной формы, объединяющий 36 или 12 свай (тип 1 и тип 2 соответственно) диаметром 1,2 м и длиной 33 м, конструкция показана на рис. 3;
- ◆ размер расчетной области L (по X и Y) определен из условия отсутствия влияния его на результаты расчета, узлы на границах области закреплены;
- ◆ размер расчетной области H (по Z) ограничен кровлей скальных карстующихся грунтов, узлы на границах области закреплены, кроме прогнозируемой карстовой полости;
- ◆ прогнозируемая карстовая полость представлена отсутствием закрепления по оси Z узлов в ее пределах (рис. 2);
- ◆ учтена несовместность деформаций конструкции и грунта в соответствии с п. 9.16 СП 22.13330.2016 введением специальных интерфейсных элементов на контакте свай и грунта.

Таблица 1

Физико-механические характеристики грунтов

Table 1

Physical and mechanical properties of soils

№ п/п	Наименование характеристики	ИГЭ-1 Глина
1	Плотность грунта, кН/м ³	18,0
2	Модуль деформации, МПа	25,0
3	Угол внутреннего трения, град	20,0
4	Удельное сцепление, кПа	80,0

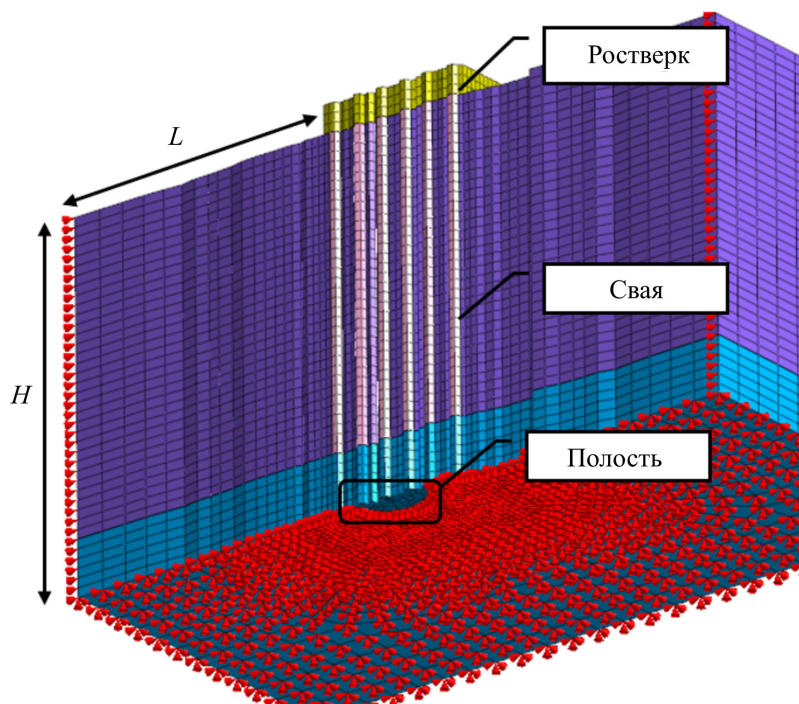


Рис. 2. Конечно-элементная модель (разрез)
 Fig. 2. Finite element model (section)

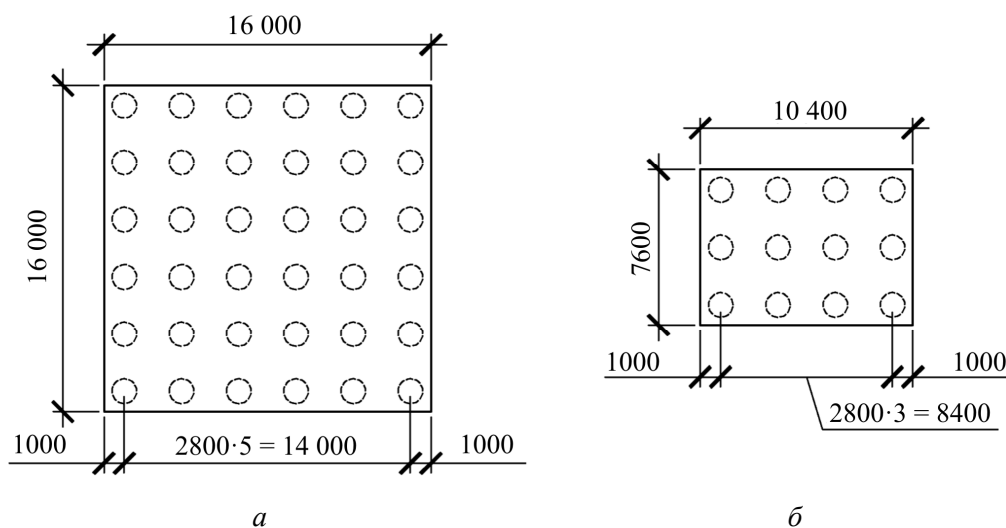


Рис. 3. Конструкция рассчитываемого ростверка:
 а – ростверк, объединяющий 36 свай (тип 1); б – ростверк, объединяющий 12 свай (тип 2)
 Fig. 3. Design of calculated raft: а – 36-pile uprights (type 1); б – 12-pile uprights (type 2)

Расчеты выполнены при варьировании следующих параметров:

- ◆ расстояние до кровли скального грунта (b): 6; 10; 14; 18; 22 м;
- ◆ расчетный размер полости за время эксплуатации (B): 3; 5,5; 7,8; 10 м;
- ◆ нагрузка на сваю: 280; 390 тс;
- ◆ шаг свай: 2,4; 3,4 м
- ◆ количество свай в ростверке: 36; 12 шт.;
- ◆ место расположения карстовой полости: по центру ростверка, в углу ростверка.

Численные расчеты выполняются в трехмерной постановке. Грунт, ростверк и сваи моделируются объемными элементами. Для моделирования бетона использовалась линейно-упругая модель. Для моделирования грунта применяется упруго-пластическая модель Кулона – Мора. При помощи реализованного в модели критерия прочности возможна оценка размеров «свода обрушения» в покровной толще грунта над карстовой полостью, при котором реализуется тип деформации «оседание» под нижними концами свай, а также выход полости выше низа свай фундамента и ее «всплытие» под подошву ростверка, что приводит к типу деформации «провал» [7–9]. Возможность использования данного критерия прочности подтверждается сходимостью результатов расчетов с данными модельного эксперимента образования «свода обрушения» над полостью [10].

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. Общий вид модели на данном этапе и разрез представлены на рис. 4.

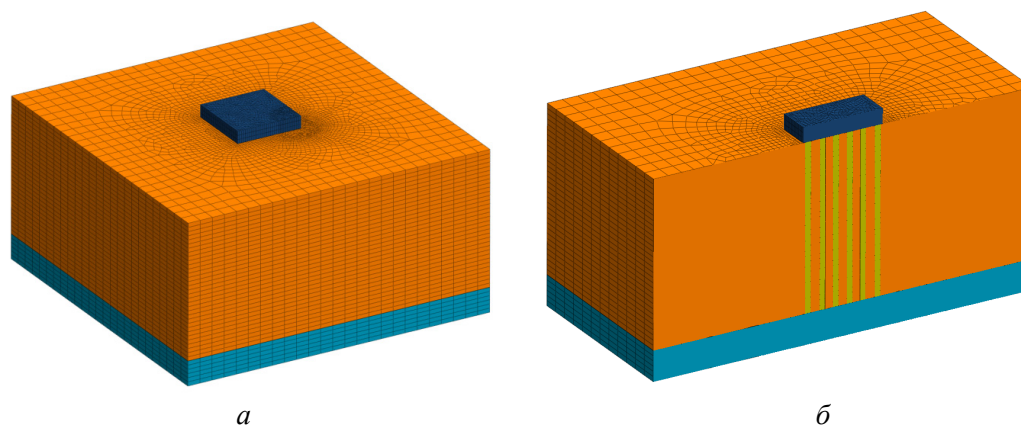


Рис. 4. Общий вид модели: *a* – на начальном этапе и *б* – разрез
Fig. 4. General view of the model: *a* – at the initial stage and *б* – the section

2. Активация конструкций фундамента мостовой опоры (ростверк, сваи, интерфейсные элементы), активация расчетной нагрузки. На данном этапе моделируются строительство опоры и нагружение ее эксплуатационной нагрузкой. После завершения расчета выполняется анализ касательных напряжений на боковой поверхности сваи. Изополю касательных напряжений на боковой поверхности сваи представлены на рис. 5.

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 сваи в тех же элементах, что и на предыдущем этапе. Изополю касательных напряжений на боковой поверхности сваи представлены на рис. 5.

В нормальных условиях эксплуатации касательные напряжения на боковых поверхностях свай возрастают с глубиной, притом на крайних и угловых сваях этот рост начинается от верха сваи (свая включается в работу целиком), а в центральных – касательные напряжения развиваются в нижней части сваи (за счет эффекта «обжатия» боковая поверхность центральных свай включается в работу не полностью). Аналогичные результаты экспериментально-теоретических исследований поведения свай в составе группы получены российскими и западными учеными [11–15].

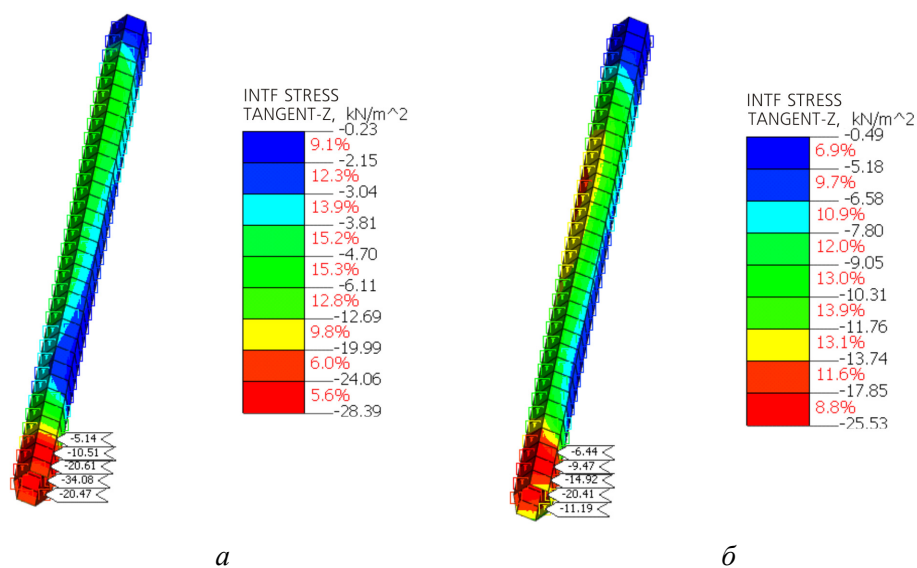


Рис. 5. Касательные напряжения на боковой поверхности сваи (τ_z , кН/м²):
 а – до образования полости; б – после образования полости
 Fig. 5. Tangential stresses on the lateral surface of the pile (τ_z , кН/м²):
 а – before cavity formation; б – after cavity formation

При образовании полости возникает проседание грунта покровной толщи, что приводит к изменению характера работы боковой поверхности свай: касательные напряжения на боковой поверхности в нижней части снижаются, а вдоль остальной длины сваи – увеличиваются (рис. 5). Это говорит о возникновении эффекта «негативного трения» в нижней части свай и о включении в работу большей части ее боковой поверхности при образовании полости. Дополнительная нагрузка на сваю при образовании карстовых деформаций (P_1 , кН) определяется по формуле

$$P_1 = u \cdot \sum \Delta \tau_{z,i} \cdot h_i, \quad (2)$$

где u – наружный периметр поперечного сечения ствола сваи, м; $\Delta \tau_{z,i}$ – изменение значения касательного напряжения на боковой поверхности сваи 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 τ_z или изменение его знака с «-» на «+».

В процессе расчетов контролируется рост прогнозируемого свода обрушения (рис. 6). Дополнительная нагрузка на сваю, реализуемая в момент образования полости, определяется для следующих условий:

- прогнозируемый свод обрушения над полостью формируется в глинистых грунтах над карстующимися грунтами, размеры свода – менее расстояния до нижнего конца свай;
- прогнозируемый свод обрушения над полостью формируется в глинистых грунтах над карстующимися грунтами, размеры свода – на уровне нижних концов свай.

В работе отслеживается доля увеличения нагрузки на сваю $\Delta P = P/P_1$, где P – это нагрузка на сваю в нормальных условиях эксплуатации. Для инженерного использования строится зависимость значения ΔP к отношению b/B , зная которую, можно определить до-

полнительную нагрузку на сваю, имея известные значения нагрузки на нее в условиях нормальной эксплуатации P , расстояние от кровли карстующихся грунтов до низа свай b и расчетный диаметр карстовой полости B .

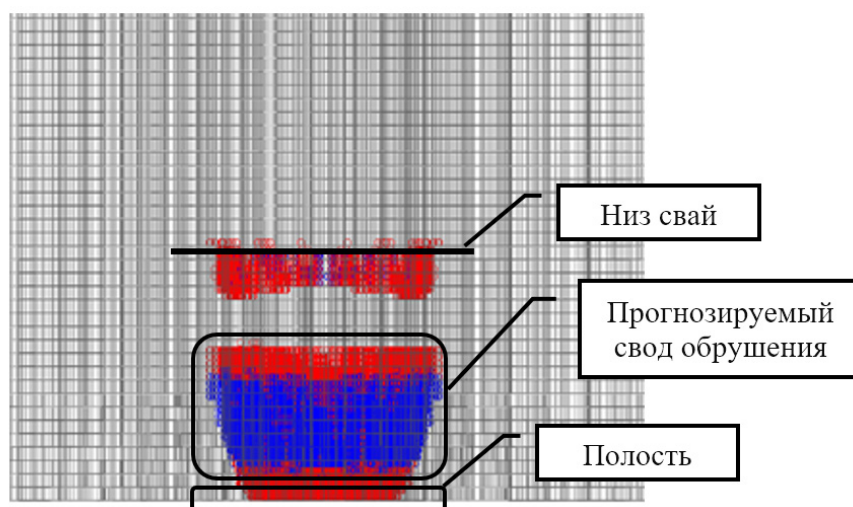


Рис. 6. Пластические точки Кулона – Мора над полостью
Fig. 6. Mohr-Coulomb plastic points above cavity

Анализ результатов численных исследований

На основании результатов расчетов установлено, что наиболее значимыми факторами при определении дополнительной нагрузки на сваю при образовании карстовых деформаций в геотехнических расчетах являются расчетный диаметр карстовой полости и расстояние от низа свай до кровли карстующихся грунтов.

После выполнения вариативных расчетов были получены и обработаны следующие результаты:

- 1) положение точек Кулона – Мора над карстовой полостью для оценки размеров «свода обрушения» и контроля развития этого свода (рис. 6);
- 2) изменение касательных напряжений на боковой поверхности сваи ($\Delta\tau_z$, кН/м^2) при росте карстовой полости (рис. 5).

По результатам расчета анализа положения точек Кулона – Мора построены графики зависимости отношения h/b (высота «свода обрушения» / расстояние от кровли карстующихся грунтов до низа свай соответственно) от отношения b/B (расстояние от кровли карстующихся грунтов до низа свай / диаметр полости соответственно). График показан на рис. 7.

Высота свода h может быть определена по результатам геотехнического осесимметричного расчета нагружения свайного фундамента над карстовой полостью диаметром B . Размер (диаметр) карстовой полости в карстующихся грунтах допускается принять равным ее ширине, образование которой возможно за срок эксплуатации здания.

Ширину (диаметр) карстовой полости B , м, определяют по формуле

$$B = B_0 + VT, \quad (3)$$

где B_0 – начальный размер карстовой полости, пустоты, трещины, м, определяемый по результатам бурения и данным геофизических исследований (при отсутствии этих значений B_0 рекомендуется принимать равным не менее 1,5 м); V – максимальная среднегодовая ско-

рость роста полости (растворения) карстующихся пород, см/год, определяемая по данным инженерно-геологических изысканий (СП 22.13330.2016, п. 6.12.7); T – расчетный срок эксплуатации здания (сооружения).

Возможность развития свода над полостью в глинистых грунтах до низа свай определяется условием $h/b \leq 1$, а при развитии свода выше низа свай – $h/b > 1$.

Далее представлены результаты исследований для этих двух расчетных случаев.

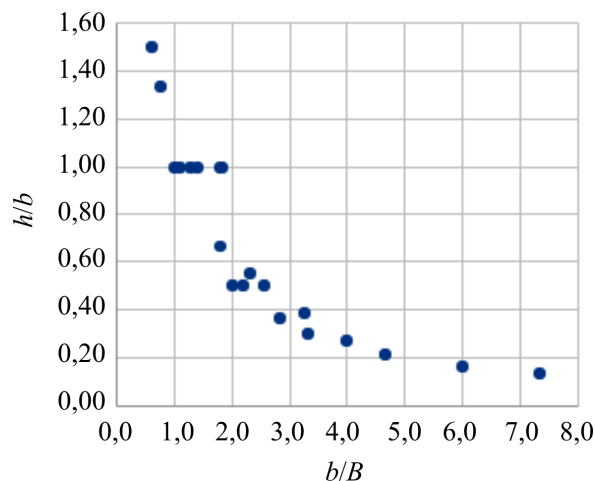


Рис. 7. Зависимость относительного расстояния от прогнозируемого верха свода обрушения до низа свай (h/b) от отношения расстояния от кровли карстующихся грунтов до низа свай к расчетному диаметру полости (b/B)

Fig. 7. Dependence of the relative distance from the predicted top of the collapse vault to the bottom of the piles (h/b) on the ratio of the distance from the top of karst soils to the bottom of the piles to the maximum cavity diameter (b/B)

Определение дополнительной нагрузки на сваю при образовании карстовых деформаций по типу «оседание» ($h/b \leq 1$)

На рис. 8 представлены графики зависимости дополнительной нагрузки на сваю (P_1 , кН) от диаметра полости (B , м) и расстояния до кровли карстующихся грунтов (b , м). Данные графики построены на основании вариативных численных 3D расчетов свайного фундамента мостовой опоры при образовании карстовых деформаций.

Для определения дополнительной нагрузки на сваю (P_1) к нагрузке на сваю в нормальных условиях эксплуатации (P) до образования полости, была выполнена статистическая обработка результатов расчета (рис. 9) и получена аналитическая зависимость P/P_1 от b/B :

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

Величина достоверного приближения составляет $R^2 = 0,9194$. 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):

$$P_1 = P / \left(2,1e^{1,7 \frac{b}{B}} \right). \quad (5)$$

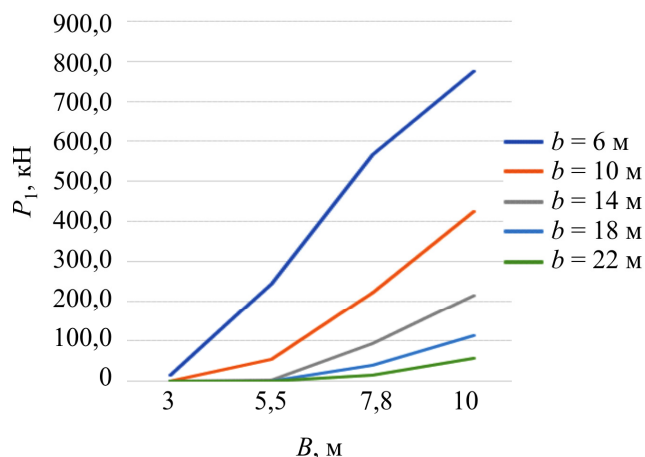


Рис. 8. График зависимости дополнительной нагрузки на сваю (P_1 , кН) от диаметра полости (B , м)
 Fig. 8. Additional pile load (P_1 , kN) versus cavity diameter (B , m) graph

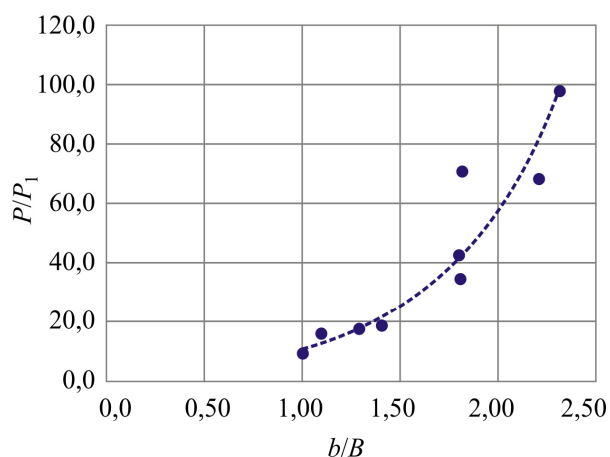


Рис. 9. График зависимости значения P/P_1 к отношению b/B
 Fig. 9. Plot of P/P_1 value versus b/B ratio

Определение длины участка исключения сопротивления грунта по боковой поверхности при расчете несущей способности ($h/b \leq 1$)

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

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

Сопротивление грунта по боковой поверхности сваи исключается на том участке, на котором возникает эффект «негативного трения». В результате выполненных вариативных расчетов установлено, что в данных условиях соотношение длины участка исключения сопротивления грунта по боковой поверхности l , м к длине сваи L , м допускается принять равным 0,2.

Определение дополнительной нагрузки на сваю при образовании карстовых деформаций по типу «оседание» ($h/b > 1$)

Для определения дополнительной нагрузки на сваю при образовании карстовых деформаций по типу «оседание», но при высоте образовавшегося свода в глинистых грунтах более расстояния от нижнего конца свай до кровли карстующихся грунтов была выполнена серия численных расчетов, при которых карстовая полость подводилась непосредственно к низу свай. В данных расчетах выполнялась оценка изменения касательных напряжений на боковой поверхности свай при росте карстовой полости.

На рис. 10 представлен график зависимости отношения дополнительной нагрузки на сваю (P_1 , кН) к исходной нагрузке на сваю (P , кН) к отношению площади полости (A_n , м) и площади свайного ростверка (A , м). Данный график построен на основании вариативных численных 3D расчетов свайного фундамента мостовой опоры при образовании карстовых деформаций.

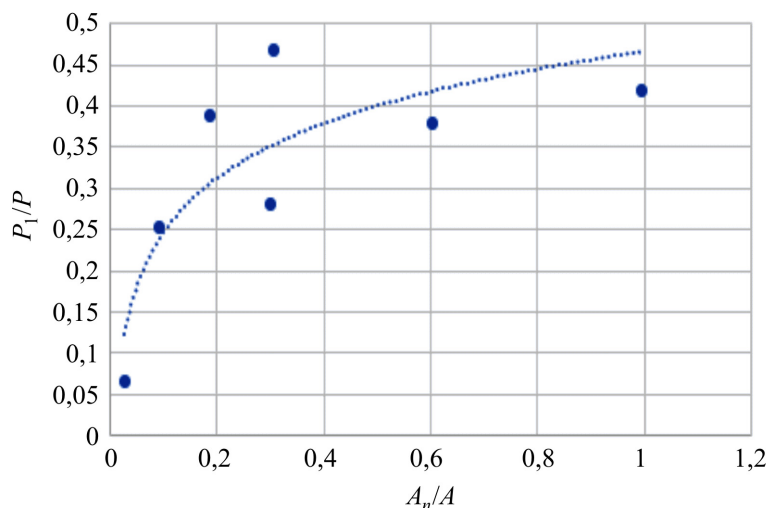


Рис. 10. График зависимости значения P_1/P к отношению A_n/A
 Fig. 10. Plot of P_1/P value versus A_n/A ratio

Для определения дополнительной нагрузки на сваю (P_1) к нагрузке на сваю в нормальных условиях эксплуатации (P) до образования полости была выполнена статистическая обработка результатов расчета (рис. 10) и получена аналитическая зависимость P_1/P от A_n/A :

$$\frac{P_1}{P} = 0,1 \ln \left(\frac{A_n}{A} \right) + 0,5. \quad (6)$$

Величина достоверного приближения составляет $R^2 = 0,7112$. 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, площади полости (A_n) и площади свайного ростверка (A):

$$P_1 = P \cdot \left(0,1 \ln \left(\frac{A_n}{A} \right) + 0,5 \right). \quad (7)$$

Определение длины участка исключения сопротивления грунта по боковой поверхности при расчете несущей способности ($h/b > 1$)

Аналогично случаю, описанному в п. 3.2, помимо возникновения дополнительной нагрузки на сваю, часть сваи также исключается из работы при определении несущей способности, а именно:

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

Сопротивление грунта по боковой поверхности сваи исключается на том участке, на котором возникает эффект «негативного трения». В результате выполненных вариативных расчетов установлено, что в данных условиях соотношение длины участка исключения сопротивления грунта по боковой поверхности l , м к длине сваи L , м допускается принять равным 0,4.

Определение дополнительной нагрузки на сваю при образовании карстовых деформаций по типу «провал»

При карстовых деформациях по типу «оседание» «негативное трение» развивается на локальном участке, а при карстовых деформациях по типу «провал» оно может развиваться по всей длине свай. Поэтому при деформациях по типу «провал» сваи в зоне провала исключаются из работы, «негативное трение» учитывается по всей длине сваи и прикладывается как дополнительная нагрузка на фундамент в зоне провала.

При выходе провала на поверхность грунта возможен срез по цилиндрической поверхности вдоль сваи. При этом вокруг сваи образуются зоны пластических деформаций (рис. 11).

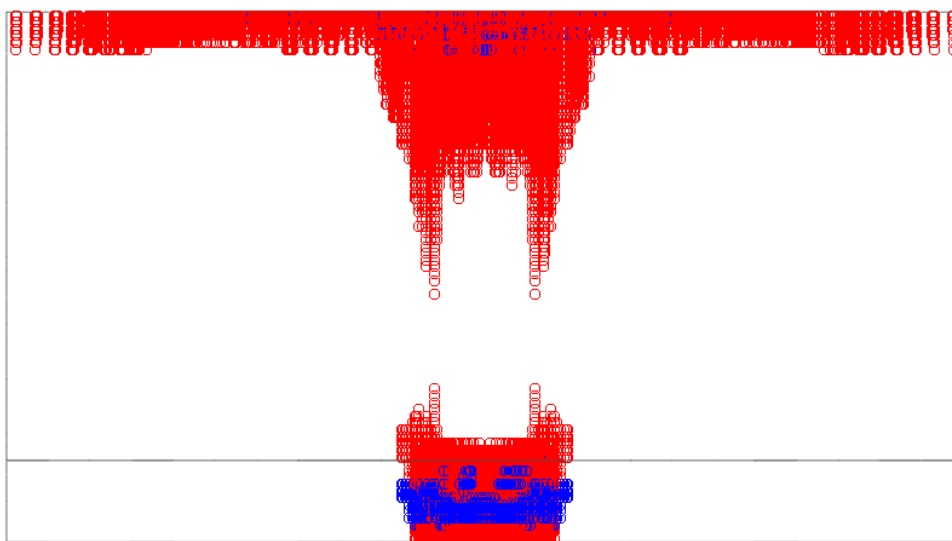


Рис. 11. Пластические точки при образовании карстовых деформаций по типу «провал»

Fig. 11. Mohr-Coulomb plastic points during the formation of karst deformations of the «collapse» type

Учитывая это, «негативное трение» в условиях деформаций по типу «провал» может быть определено по таблицам СП 24.13330.2011, а дополнительная нагрузка на сваю определится по формуле (1) при l , равной длине сваи, и τ , определенному по табл. 7.3 СП 24.13330.2011. При этом сопротивление грунта τ принимается со знаком «минус».

Выводы

1. На основании численных расчетов показано, что при образовании карстовых деформаций в основании свайного фундамента мостовой опоры на сваи действуют дополнительные нагрузки, а также определена величина этих нагрузок для глинистых покровных толщ над карстующимися грунтами.

2. Установлено, что доля дополнительной нагрузки в значительной степени зависит от расстояния от нижнего конца свай до кровли карстующихся грунтов и диаметра карстовой полости в карстующихся грунтах.

3. Определены соотношения расстояния от нижнего конца свай до кровли карстующихся грунтов и диаметра полости, при которых формируется устойчивый свод над полостью высотой не более расстояния до нижних концов свай.

4. Получена формула для вычисления дополнительных нагрузок на сваи опоры моста в зависимости от диаметра полости в карстующихся грунтах и расстояния от нижнего конца свай до кровли карстующихся грунтов при условии формирования устойчивого свода над полостью.

5. Определена длина участка исключения сопротивления грунта по боковой поверхности при расчете несущей способности свай.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Готман А.Л., Магзумов Р.Н. Метод расчета свайных ленточных фундаментов при образовании карстового провала // Вестник МГСУ. – 2014. – № 2. – С. 74–83.
2. Готман Н.З., Давлетяров Д.А. Исследование работы свайного ленточного фундамента при образовании карстового провала // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2017. – № 2. – С. 2–7.
3. Готман Н.З. Расчет противокарстовых фундаментов зданий и сооружений // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2008. – № 1. – С. 20–25.
4. Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. – М.: Недра, 1990. – 151 с.
5. Waltham T., Bell F., Culshaw M. Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction. – Chichester: Praxis Publishing Ltd, 2005. – 383 p.
6. Аникеев А.В. Провалы и воронки оседания в карстовых районах: механизмы образования, прогноз и оценка риска. – М.: РУДН, 2017. – 328 с.
7. Адерхолд Г. Классификация провалов и мульд оседаний в карстоопасных районах Гессена. Рекомендации по оценке геотехнических рисков при проведении строительных мероприятий: монография / ред. Е.В. Копосов; пер. В.В. Толмачев. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2010. – 112 с.
8. Толмачев В.В. Методы оценки карстовой опасности для строительных целей: состояние и перспективы // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2012. – № 4. – С. 354–363.
9. Хоменко В.П. Карстово-суффозионные процессы и их прогноз. – М.: Наука, 1986. – 93 с.
10. Готман Н.З. Оценка параметров карстопоявлений по результатам численных расчетов оснований // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2019. – № 5. – С. 2–7.
11. Бартоломей А.А., Омельчак И.М., Юшков Б.С. Прогноз осадок свайных фундаментов. – М.: Стройиздат, 1994. – 384 с.
12. Готман Н.З., Алехин В.С. Расчет предельного сопротивления основания сваи в составе групп // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2020. – № 1. – С. 8–13.
13. Katzenbach R., Moormann C. Recommendations for the design and construction of piled rafts // 15th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Istanbul). – 2001. – С. 927–930.
14. Randolph M., Wroth C. Analysis of deformation of vertically loaded piles // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 1978. – С. 1465–1488.
15. Randolph M. Design Methods For Pile Groups and Piled Rafts // Soil mechanics and foundation engineering. – 1994. – № 13. – С. 6182.

References

1. Gotman A.L., Magzumov R.N. Method of analysis of a pile in strip foundation while karst hole. *Vestnik MGSU*, 2014, no. 2, pp. 74–83.
2. Gotman N.Z., Davletyarov D.A. Investigation of the operation of the pile strip foundation during the formation of a karst sinkhole. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2017, no. 2, pp. 2–7.
3. Gotman N.Z. Analysis of karst protective foundations of buildings and structures. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2008, no. 1, pp. 20–25.
4. Tolmachev V.V., Troitskiy G.M., Khomenko V.P. Engineering and construction development of karst territories. Moscow, Nedra, 1990, 151 p.
5. Waltham T. Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction. Chichester: Praxis Publishing Ltd, 2005, 383 p.
6. Anikeev A.V. Collapses and sinkholes of subsidence in karst areas: mechanisms of formation, forecast and risk assessment. Moscow, RUDN, 2017, 328 p.
7. Aderhold G. Classification of sinkholes and subsidence troughs in karst-hazardous regions of Hesse. Recommendations for assessing geotechnical risks during construction activities. Wiesbaden, 2005, 113 p.
8. Tolmachev V.V. Methods of karst hazard assessment for the construction purposes: state-of-art and prospects. *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2012, no. 4, pp. 354–363.
9. Khomenko V.P. Karst-suffusion processes and their prediction. Moscow, Nauka, 1986, 93 p.
10. Gotman N.Z. Evaluation of karst manifestation parameters by results of numerical calculations of foundations. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2019, no. 5, pp. 2–7.
11. Bartolomey A.A., Omelchak I.M., Yushkov B.S. Forecast settlement pile foundations. Moscow, Strojizdat, 1994, 384 p.
12. Gotman N.Z., Alekhin V.S. Calculation of the ultimate resistance of the pile basis in pile groups. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2020, no. 1, pp. 8–13.
13. Katzenbach R., Moormann C. Recommendations for the design and construction of piled rafts. *15th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2001, pp. 927–930.
14. Randolph M., Wroth C. Analysis of deformation of vertically loaded piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1978, pp. 1465–1488.
15. Randolph M. Design methods for pile groups and piled rafts. *Soil mechanics and foundation engineering*, 1994, no. 13, pp. 61–82.