



УДК 624.154: 699.8: 551.448

Магзумов Р.Н. – младший научный сотрудник

E-mail: lsf_ps@mail.ru

ГУП институт «БашНИИСтрой»

Адрес организации: 450064, Россия, г. Уфа, ул. Конституции, д. 3

Определение дополнительных нагрузок на ленточные свайные фундаменты при образовании карстового провала

Аннотация

Целью работы явилось исследование напряженно-деформированного состояния системы «грунтовое основание – свайный фундамент» при образовании карстового провала и определение дополнительных нагрузок на конструкции фундамента при образовании провала.

Исследования проводились с использованием сертифицированной и верифицированной геотехнической программы MIDAS GTS.

Разработана методика определения дополнительных нагрузок на конструкции ленточного свайного фундамента при образовании карстового провала.

Ключевые слова: карстовый провал, свайные фундаменты, горизонтальное давление грунта.

Расчет свайных ленточных фундаментов на закарстованных территориях, как правило, производят на расчетный диаметр карстового провала. Однако провал имеет некоторую глубину, а борта провала неустойчивы и возможно их обрушение. Следовательно, на сваи, расположенные на границе карстового провала, действует горизонтальное давление от обрушивающегося грунта. Разрушение этих свай приведет к увеличению расчетного пролета ростверка над карстовым провалом как минимум на $2a$, где a – шаг свай, что может привести к аварийной ситуации при необеспечении несущей способности ростверка. В действующих нормативных документах этот фактор не учитывается.

Дополнительные горизонтальные нагрузки на ленточные свайные фундаменты при образовании карстового провала во многом зависят от расположения провалов относительно конструкций фундамента. Наиболее опасные варианты приведены на рис. 1.

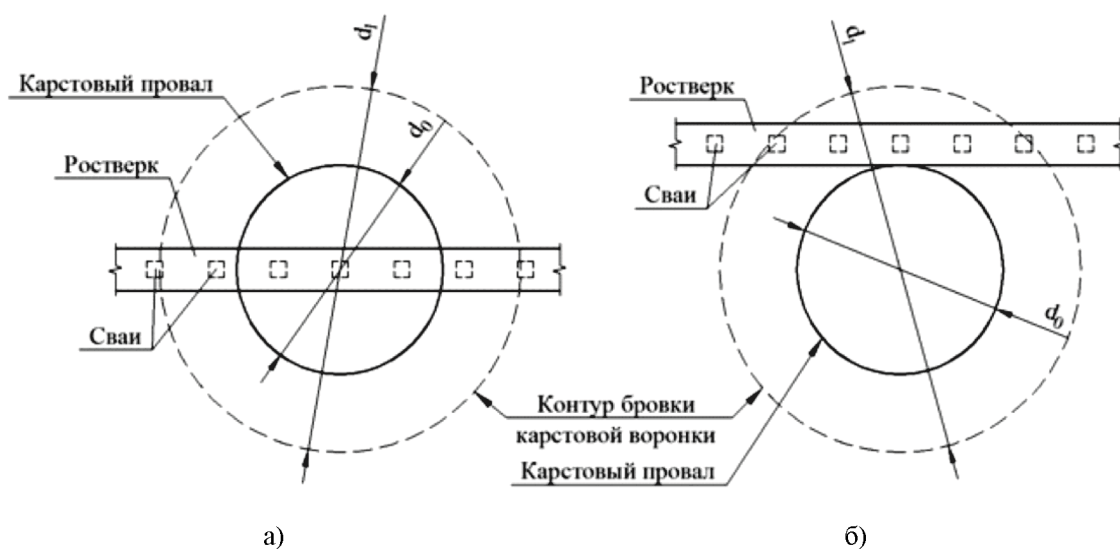


Рис. 1. Наиболее опасные варианты расположения карстового провала в плане относительно фундамента:
а, б – варианты расположения провалов; d_0 – первоначальный диаметр карстового провала;
 d_1 – диаметр карстового провала после обрушения бортов провала

При образовании провала по схеме, приведенной на рис. 1а, свайный ряд оказывается ориентированным по направлению обрушения грунта и, соответственно, действия горизонтальной нагрузки. Давление в этом случае перераспределяется между сваями. Усилия от реакций сваи в месте сопряжения с ростверком действуют вдоль ростверка и создают дополнительное сжимающее усилие в нём. При образовании карстового провала по схеме, приведенной на рис. 1б, свайный ряд располагается перпендикулярно направлению действия горизонтального давления от обрушения грунта. В этом случае давление грунта передается на сваи как на однорядные подпорные сооружения. Усилия от реакций свай передаются перпендикулярно оси ростверка, что приводит к его работе на изгиб в горизонтальной плоскости. С точки зрения передачи наибольшего горизонтального давления на сваи наиболее опасным представляется вариант, представленный на рис. 1б. Также при этом варианте ростверк работает на изгиб в горизонтальной плоскости, что не учитывается в действующих нормативных документах по карстозащитным фундаментам. Поэтому в дальнейших исследованиях рассматривается вариант на рис. 1б.

Исследование напряженно-деформированного состояния системы «грунт – свайный фундамент» и определение действующих нагрузок на сваи и ростверк при карстовом провале выполним с использованием геотехнической программы MIDAS GTS v.2013, реализующей метод конечных элементов и имеющей верифицированные модели грунта. Использование геотехнической программы является фактически единственным инструментом изучения напряженно-деформированного состояния основания при образовании карстового провала. При этом возможен учет совокупности факторов, влияющих на формирование горизонтального давления на конструкции фундамента, а именно, физических и прочностных характеристик грунта и перемещений свай и ростверка.

По натурным наблюдениям, карстовые провалы в основном имеют круглую форму в плане. В этом случае в грунтовом массиве возникают внутренние усилия осесимметричного характера, что может снижать давление на сваю (радиальная составляющая давления). В случае образования карстового провала неправильной геометрической формы в плане осевая симметрия провала может быть нарушена. Поэтому для определения горизонтальной нагрузки на сваю от давления грунта целесообразным представляется моделирование карстового провала без учета условий осевой симметрии.

Наблюдения и статистический анализ за проявлением карстовых провалов на территории России позволяют выделить следующие наиболее вероятные диапазоны геометрических размеров провалов, принятые в качестве исходных данных для расчетов: диаметр карстового провала – 6-10 м, глубина провала – 4-10 м.

Моделирование свай производится объемными конечными элементами. Вертикальная нагрузка на сваю принята равной 300 кН, что наиболее типично для фундаментов 3-5-этажного жилого здания при шаге свай $3d$, где d – сторона сваи. Исходные данные для численных расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для численных расчетов

Размеры модели $a \times b$	15x20 м
Длина свай	12 м
Глубина карстового провала	4-10 м
Диаметр карстового провала	6 м; 10 м
Модель грунта	Модель Мора-Кулона
Нагрузка на сваю	300 кН
Граничные условия сваи	Верхний конец закреплен: шарнирно неподвижно/податливо
Тип КЭ	Грунтовый массив и сваи: 8-ми узловой гексаэдр
Решение СЛАУ	Мультифронтальный прямой решатель
Нелинейный решатель	Метод Ньютона-Рафсона

Фрагмент расчетной модели в MIDAS GTS представлен на рис. 2.

По результатам численных расчетов построены эпюры горизонтального давления на сваю. Характерная эпюра давления представлена на рис. 3. Эпюры давления для частных случаев грунтовых условий и глубин карстовых провалов показаны на рис. 4.

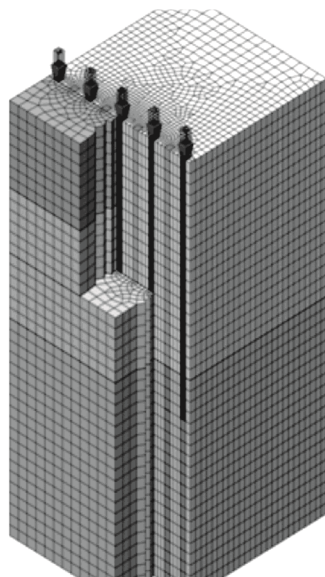


Рис. 2. Расчетная модель в MIDAS GTS

Таблица 2

Нормативные значения прочностных и деформационных характеристик грунтов по СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений»

Наименование грунтов	По показателю текучести	Кoeff. Пуассона	Модуль деформации E , МПа	Удельное сцепление c , кПа	Угол внутреннего трения φ , град
Супеси	Текучие	0,35	10	11	21
Суглинки	Полутвердые	0,35	17	25	23
	Мягкопластичные	0,37	10	12	13

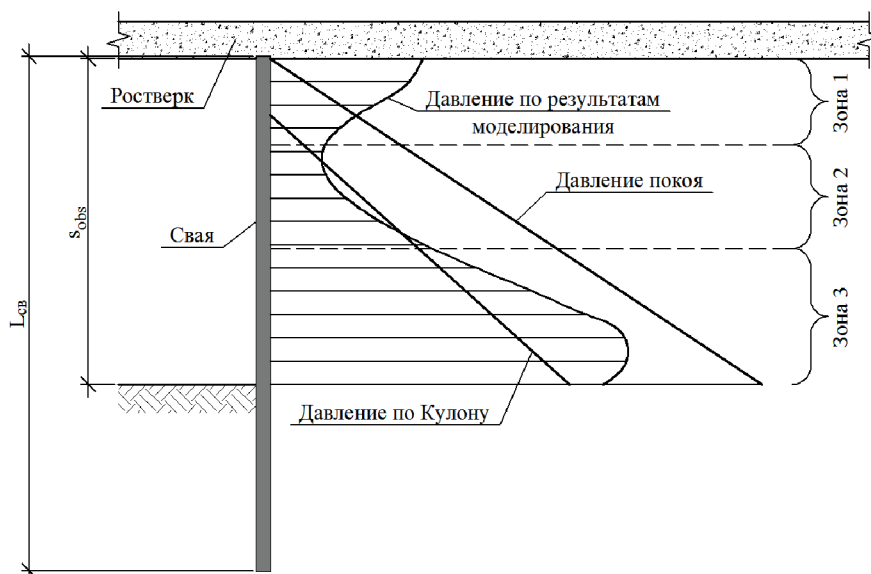


Рис. 3. Эпюра горизонтального давления на сваю. Зоны формирования давлений грунта

Анализ результатов расчетов показывает, что имеется определенная закономерность формирования горизонтального давления на сваю по её высоте. Характер давления, полученного по результатам моделирования, показан на рис. 3. По глубине сваи можно выделить три зоны формирования давления.

В зоне 1 наличие шарнирно неподвижного закрепления головы сваи приводит к формированию увеличенного давления, по сравнению с активным давлением по теории Кулона. По мере возрастания податливости закрепления головы сваи увеличенное давление снижается вплоть до активного давления. Аналогичная зависимость описывается в теории давления грунта на подпорные стенки. Глубже по длине сваи давление грунта постепенно уменьшается с увеличением горизонтального перемещения ствола сваи.

Зона 2 является «переходной» зоной. На данном участке сваи горизонтальные перемещения сваи достигают наибольших значений, и давление грунта приближается или становится равным активному давлению, определяемому по классической теории Кулона.

В зоне 3 горизонтальные перемещения сваи уменьшаются, и наблюдается увеличение давления на сваю, которое становится равным активному давлению или занимает промежуточное значение между активным давлением и давлением покоя.

Результаты моделирования показывают наличие зависимости характера распределения давления и его значений от прочностных характеристик грунта и глубины карстового провала.

Введем давление q_n , приведенное на 1 м глубины провала и вычисляемое по формуле:

$$\frac{q_n}{s_{obs}} = 0,4c \cdot \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \Rightarrow q_n = 0,4s_{obs}c \cdot \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right). \quad (1)$$

Коэффициент «0,4» в формуле (1) определен эмпирическим путем по результатам численного моделирования.

При $q_n < 20$ кН/м² давление грунта на сваю q_z можно аппроксимировать линейно возрастающей функцией от глубины z :

$$q_z = kz. \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности k вычисляется из условия, что при $z = s_{obs}$ $q_z = P_a$, где P_a – активное давление грунта по Кулону, определенное на глубине карстового провала s_{obs} .

При $q_n > 20$ кН/м² давление грунта на сваю q_z можно аппроксимировать билинейной функцией. До глубины $z = 0,4s_{obs}$ давление принимается равномерно распределенной по высоте сваи и определяется по формуле:

$$q_1 = \frac{1}{3}\gamma \cdot 0,4 \cdot s_{obs} \cdot (1 - \sin\varphi), \quad (3)$$

где γ – удельный вес грунта.

Ниже глубины $0,4s_{obs}$ – давление возрастает по линейному закону до величины, определяемой по формуле:

$$q_2 = p_0 - q_n = p_0 - 0,4s_{obs} \cdot c \cdot \operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right), \quad (4)$$

где p_0 – давление покоя на глубине s_{obs} .

Примеры аппроксимированных с помощью формул (1)-(4) эпюр горизонтального давления представлены на рис. 4. Там же показано влияние податливости закрепления головы сваи на формирование горизонтального давления грунта на сваю.

Моделирование карстовых провалов по варианту, представленному на рис. 1б, показало, что ростверк воспринимает горизонтальное давление от реакции свай в месте сопряжения с ростверком. Под воздействием данного давления ростверк работает на изгиб в горизонтальной плоскости.

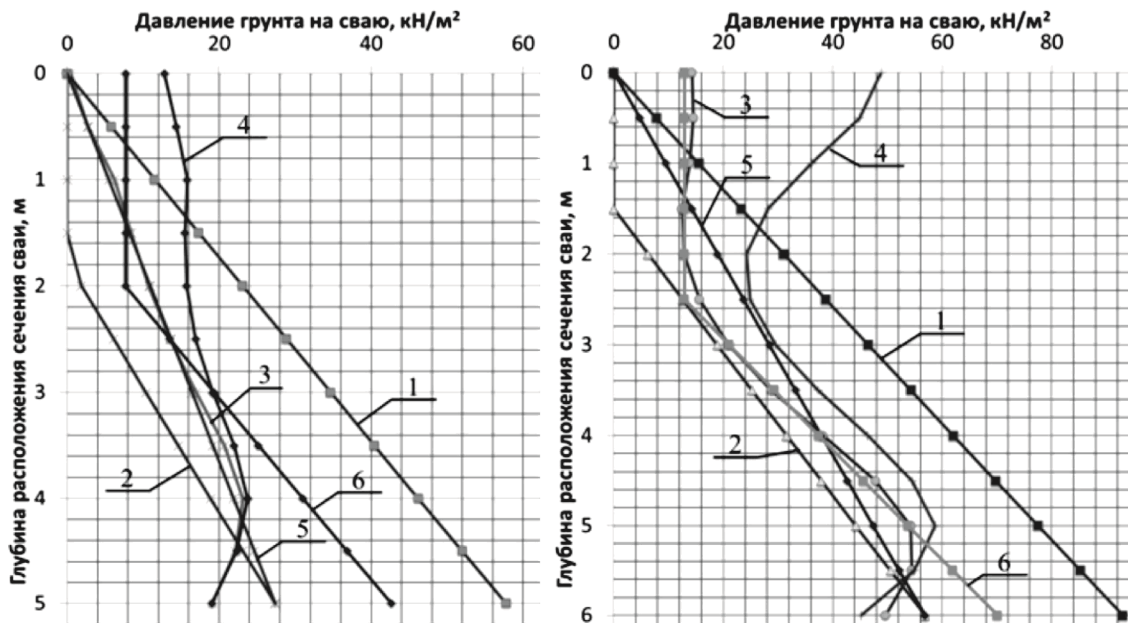


Рис. 4. Аппроксимированные эпюры горизонтального давления на сваю:
 слева – глубина провала – 5 м, грунт – супесь текучая, $q_n=15,1\text{кН/м}^2 < 20\text{кН/м}^2$;
 справа – глубина провала – 6 м, грунт – суглинок мягкопластичный, $q_n=22,9\text{кН/м}^2 > 20\text{кН/м}^2$;
 1 – давление покоя, 2 – давление по Кулону, 3 – давление по расчету при податливом закреплении
 головы сваи, 4 – давление по расчету при неподвижном закреплении головы сваи,
 5 – линейно-аппроксимированное давление, 6 – билинейно-аппроксимированное давление

Для определения характера эпюры горизонтального давления на ростверк выполнены численные расчеты для различных геометрических размеров провалов, шага свай и свойств грунтов.

Результаты расчетов показали, что величина давления и характер распределения по длине ростверка зависят в основном от диаметра и глубины провала. Шаг свай влияет на значение горизонтальной нагрузки (реакция свай), а на распределение давления по длине ростверка влияние шага незначительно.

Длина зоны распределения горизонтального давления оценивалась соотношением $L/(s_{obs} \cdot d)$, где L – длина зоны распределения горизонтального давления на ростверк, d – диаметр карстового провала. Относительная длина зоны распределения горизонтального давления на ростверк для различных видов грунтов представлена в табл. 3.

Таблица 3

Относительная длина зоны распределения горизонтального давления на ростверк для различных видов грунтов по СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений»

Наименование грунтов	По показателю текучести	Шаг свай 0,9 м; $d=6$ м;	Шаг свай 1,8 м; $d=10$ м;
		$s_{obs}=7$ м	$s_{obs}=7$ м
Супеси	Пластичные	0,19	0,17
	Текучие	0,21	0,21
Суглинки	Полутвердые	0,21	0,18
	Тугопластичные	0,23	0,21
	Мягкопластичные	0,23	0,22
Глины	Полутвердые	0,21	0,18
	Тугопластичные	0,26	0,28
	Мягкопластичные	0,28	0,26

Как видно из табл. 3, для рассмотренных грунтов наблюдается линейная зависимость от геометрических размеров карстового провала.

Основываясь на результатах выполненных исследований, предлагается следующая схема расчетной эпюры горизонтального давления на ростверк (рис. 5).

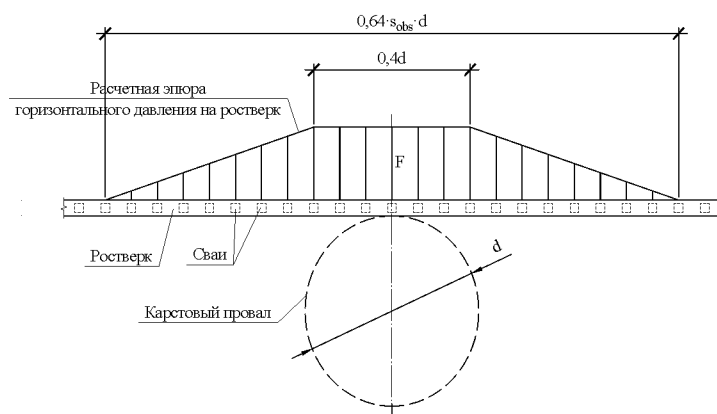


Рис. 5. Эпюра распределения горизонтального давления на ростверк,
 F – максимальная реакция сваи в месте сопряжения с ростверком

В соответствии с представленными схемами действующих нагрузок на сваи и ростверк можно выполнить их расчет по I предельному состоянию и определить внутренние усилия любым удобным методом с учетом граничных условий.

Список библиографических ссылок

1. Рекомендации по проектированию фундаментов на закарстованных территориях. – М.: НИИОСП, 1985. – 78 с.
2. ТСН 302-50-95. РБ 1996. Инструкция по изысканиям, проектированию, строительству и эксплуатации зданий и сооружений на закарстованных территориях. – Уфа: Госстрой РБ.
3. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* введ. 20.05.2011. – М.: ОАО «ЦПП», 2011. – 166 с.

Magzumov R.N. – junior researcher

E-mail: lsf_ps@mail.ru

GUP Institute «BashNIStroy»

The organization address: 450064, Russia, Ufa, Konstituzii st., 3

Determination of pile strip foundation extra loads when karst hole formation

Resume

Pile strip foundations are often used for construction on karsted areas. However, existing Codes do not fully regulate the analysis of foundation constructions on the karsted areas. In particular, extra loads due to pressure of soil downfall on the hole edges on foundation structures are not taken into account. It can provoke pile failure at the hole boundary and increase of the bearing distance of the raft above the karst hole. With the inadequate bearing capacity of the raft it can lead to emergency situation.

The goal of the work is to determine the character and values of piles and the raft extra loads when karst hole forms. For this purpose, the numerical modeling is performed in the geotechnical program MIDAS GTS. The foundation soil is clay soil of very soft and soft consistency.

By results of numerical investigations by means of approximation of pressures obtained, pile horizontal pressures are determined. In dependence on soil strength characteristics and the hole depth, the diagram of pile horizontal pressure is approximated by linear or bilinear function. The numerical values of pressure are evaluated by formulas given in the paper.

Keywords: karst hole, pile foundations, horizontal soil pressure.

Reference list

1. Recommendations for design of foundations for the karsted areas. – М.: НИОСП, 1985. – 78 p.
2. TSN 302-50-95. RB 1996. Use of survey, design, construction and operation of buildings and structures on karsted areas. – Ufa: Gosstroy RB.
3. SP 22.13330.2011. Foundations of buildings and structures. SNIP 2.02.01-83 updated edition is introduced on 20.05.2011. – М.: JSC «ZPP» 2011. – 166 p.