

УДК 624.15

## Расчет свайных фундаментов на закарстованных территориях

Лодыгина Н.Д.

Анализ крупных аварий вследствие карстовых деформаций показал, что во всех случаях были допущены ошибки на различных стадиях строительства: выборе площадки, инженерных изысканиях, проектировании, строительстве или эксплуатации сооружений. В работе были выполнены численные исследования напряженно-деформированного состояния свайного ленточного фундамента при образовании карстового провала. Расчетная схема сваи представляет собой стержень, упруго защемленный в грунт одним концом, другой имеет шарнирно-неподвижное сопряжение с ростверком и линейно возрастающей нагрузкой на сваю. Определены деформации (перемещения, углы поворота сечений), изгибающий момент и напряжения в свае в зависимости от переменной величины  $z$ , которая изменяется от нуля в шарнире до  $l$  в жесткой заделке. Данный метод расчета позволяет выполнить силовой анализ действующих сил на сваю при карстовом провале от обрушивающегося горизонтального давления грунта, провести все виды расчетов (проверочный, проектный и расчет на грузоподъемность) сваи.

*Ключевые слова:* расчет свайных фундаментов, карст, напряжения, деформации, метод сил.

## Calculations on pile foundations on karst territories

Lodigina N.D.

The analysis of major accidents caused by karst deformation shows that in every case the mistakes have been made at different stages of construction: site selection, engineering survey, design, facilities construction and their operation. The paper presents calculations on stress-strain state of the pile strip foundation in the course of karst hole formation. The pile design scheme is presented as a rod elastically secured into the ground at one end while the other end has a pivotally-fixed pairing with grillage and load linearly increasing on the pile. The paper defines pile deformation (displacement, cross sections rotation angles), bending moment and strains in the pile, depending on variable  $z$ , which values range from zero in the joint to  $l$  in a tight sealing. This calculation technique makes it possible to perform the power analysis of forces acting on the pile in karst holes caused by the caving-in horizontal soil pressure, as well as to do all kinds of calculations on piles (including test, design and load capacity).

*Keywords:* calculations on pile foundations, karst, strain, deformation, technique.

### Введение

К закарстованным территориям относятся карстовые области, в геологическом строении которых присутствуют растворимые горные породы и возможны поверхностные и подземные проявления карста [1].

Карст существенно влияет на ландшафтные особенности территории, ее рельеф, подземные воды, реки и озера, почвенно-растительный покров и хозяйственную деятельность населения [2, 3]. Карстовые процессы значительно осложняют строительство и эксплуатацию зданий и сооружений. Анализ крупных аварий вследствие карстовых деформаций по-

казал, что во всех случаях были допущены ошибки на различных стадиях строительства: выборе площадки, инженерных изысканиях, проектировании, строительстве или эксплуатации сооружений [4].

Конструкции фундаментов зданий и сооружений, возводимых на закарстованных территориях, имеют свои особенности [5]. Они обусловлены необходимостью обеспечения восприятия дополнительных усилий в элементах надземных конструкций в условиях почти полной неопределенности количества и мест появления различных видов карстовых деформаций.

При проектировании сооружений на территориях, где возможны карстовые оседания, целесообразно применять методы определения взаимодействия сооружения с деформирующимся основанием с учетом закономерностей формирования карстовых оседаний, прогнозов их скорости и продолжительности. Возможные аварии и повреждения сооружений на закарстованных территориях классифицируются следующим образом [5]:

- катастрофические разрушения, приводящие к пожарам и взрывам, гибели людей и заражению окружающей среды вредными химическими и радиоактивными веществами на больших территориях;

- частичные разрушения и повреждения, приводящие к временному прекращению нормальной эксплуатации сооружений и к локальному загрязнению окружающей среды;

- повреждения, практически не приводящие к затруднению нормальной эксплуатации сооружения.

В последние 20 лет в гражданском и промышленном строительстве наметилась тенденция к существенному увеличению нагрузок на фундаменты за счет повышения этажности жилых зданий и использования тяжелого технологического оборудования в промышленных сооружениях. Зачастую возведение таких зданий осуществляется на карстующих территориях. В тех случаях, когда у поверхности залегают слои слабых грунтов (например, карсты), которые не могут служить основанием для фундаментов проектируемого сооружения, возникает необходимость передачи нагрузки на более плотные слои, расположенные на глубине основания почвы. В подобных ситуациях чаще всего прибегают к устройству свайного фундамента. Наиболее эффективными являются фундаменты в виде сплошных свайных полей из забивных свай, объединенных плитой, получившие название свайные фундаменты. В таком фундаменте сваи сводят осадки до нормативно допускаемых величин,

а плита, обладая высокой распределительной способностью, обеспечивает нормальную работу фундамента в условиях неравномерных деформаций основания, что особенно важно при карстовом провале.

Сваей называют погруженный в готовом виде или изготовленный в грунте стержень, предназначенный для передачи нагрузки от сооружения на грунт основания. Распределительные плиты или балки, объединяющие головы свай, выполняются, как правило, из железобетона и называются ростверками. Ростверк воспринимает, распределяет и передает на сваи нагрузку от расположенного выше здания или промышленного сооружения. Если ростверк заглублен в грунт (или его подошва расположена на поверхности грунта), то его называют низким ростверком. Если подошва ростверка расположена выше поверхности грунта – это высокий ростверк. На закарстованных территориях наиболее часто применяют высокий ростверк.

Цель работы – рассмотреть вопросы расчета свайных фундаментов на территориях с активным проявлением карстовых процессов.

### **Расчет свайных фундаментов**

В работе были выполнены численные исследования напряженно-деформированного состояния грунтового массива и свайного ленточного фундамента при образовании карстового провала. Задачей исследования является расчет ленточных свайных фундаментов зданий с учетом возникающего горизонтального давления на сваи при обрушении грунта на границах провала. Расчетная схема сваи представляет собой стержень, упруго защемленный в грунт одним концом, другой имеет шарнирно-неподвижное сопряжение с ростверком и линейно возрастающей нагрузкой на сваю [6]. Применяя принцип независимости действия сил, вначале рассматривали горизонтальную нагрузку на сваю, которая возрастает

от нуля в шарнирном закреплении до максимума в жесткой заделке. В шарнирном закреплении сваи с ростверком возникает неизвестная сила  $X_1$ . Стержень (свая) с заданной нагрузкой статически неопределима один раз. Неизвестную силу  $X_1$  определяем из канонического уравнения метода сил:

$$\delta_{11} \cdot X_1 + \Delta_{1q} = 0. \quad (1)$$

Коэффициенты  $\delta_{11}$  и  $\Delta_{1q}$  определили по правилу Верещагина перемножением эпюр:

$$\delta_{11} = \frac{l^3}{3EI}, \quad \Delta_{1q} = -\frac{q_{\max} \cdot l^4}{30EI}.$$

Неизвестная сила  $X_1$  из решения канонического уравнения метода сил (1) равна

$$X_1 = \frac{q_{\max} \cdot l}{10}.$$

Кроме горизонтальных сил на сваю действуют вертикальные силы: вес сваи по всей ее длине и сила давления со стороны сооружения. В данном исследовании пренебрегаем вертикальными нагрузками от обрушения грунта. В шарнире от действия вертикальных сил возникает неизвестная сила  $X_2$ . Данная схема сваи так же являются статически неопределимой один раз. Для раскрытия статической неопределимости, т. е. для определения  $X_2$ , применили канонические уравнения метода сил:

$$\delta_{22} X_2 + \Delta_{2q} = 0. \quad (2)$$

Коэффициент при  $X_2$  и свободный член канонического уравнения равны:

$$\delta_{22} = \frac{l}{EA}, \quad \Delta_{2q} = -\frac{\gamma Al^2}{2EA}.$$

Неизвестная сила из уравнения (1)

$$X_2 = \frac{\gamma Al}{2}.$$

Определив неизвестные силы, были определены деформации (перемещения, углы поворота сечений), изгибающий момент и напряжения в свае в зависимости от переменной величины  $z$ , которая изменяется от нуля в шарнире до  $l$  в жесткой заделке.

Уравнение линейных перемещений в общем виде:

$$Y(z) = \frac{q_{\max}}{60EI} \left[ -\frac{l^3}{2} z + l \cdot z^3 - \frac{z^5}{2l} \right];$$

угол поворота поперечных сечений сваи:

$$Q(z) = \frac{q_{\max}}{60EI} \left[ -\frac{l^3}{2} + 3l \cdot z^2 - 2,5 \frac{z^4}{l} \right];$$

напряжения в произвольном сечении:

$$\delta = \frac{q_{\max} z}{bn^2} \left( \frac{3l}{5} - \frac{1}{l} \cdot z^2 \right) - \gamma z - \frac{F}{bn} + \gamma \frac{l}{2}.$$

Изгибающий момент в произвольном сечении сваи:

$$M_{изг} = \frac{q_{\max}}{2} z \left( \frac{l}{5} - \frac{z^2}{3l} \right).$$

Здесь

$q_{\max}$  – максимальное значение распределенной нагрузки в жесткой заделке, Н/мм;

$F$  – сила давления со стороны сооружения на сваю, Н;

$\gamma$  – удельный вес материала сваи, Н/мм<sup>3</sup>;

$l$  – длина сваи, мм;

$b, h$  – поперечные размеры сваи, мм;

$E$  – модуль упругости первого рода, МПа;

$I$  – момент инерции поперечного сечения сваи, мм<sup>4</sup>.

### Заключение

В работе проведено численное исследование напряжений, перемещений поперечной силы и изгибающего момента по длине сваи. Построены эпюры изменения линейных перемещений, углов поворота, напряжений и изгибающего момента в зависимости от переменной  $z$ .

Данный метод расчета позволяет выполнить силовой анализ действующих сил на сваю при карстовом провале от обрушивающегося горизонтального давления грунта, провести все виды расчетов (проверочный, проектный и расчет на грузоподъемность) сваи.

---

**Литература**

1. *Осипов В.И., Кутепов В.Н., Зверев В.П.* Опасные экзогенные процессы. – М.: ГЕОС, 1999. – 290 с.
2. *Шаранов Р.В.* Некоторые вопросы мониторинга экзогенных процессов // *Фундаментальные исследования*, 2013, № 1-2. – С. 444-447.
3. *Шаранов Р.В.* Мониторинг экзогенных процессов // *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*, 2012, № 2. – С.39-42.
4. *Шаранов Р.В.* Переход от технических к природно-техническим системам // *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*, 2012, № 2. – С.43-46.
5. *Рекомендации по проектированию зданий и сооружений в карстовых районах СССР.* – М.: Стройиздат, 1967.
6. *Готман А.Л., Магзумов Р.Н.* Метод расчета свайных ленточных фундаментов при образовании карстового провала // *Вестник МГТУ*, 2014, №2. – С 74-83.

**References**

1. *Osipov V.I., Kutepov V.N., Zverev V.P.* *Opasnye jekzogennye processy* [Exogenous processes]. – Moscow: GEOS, 1999. – 290 p.

2. *Sharapov R.V.* Nekotorye voprosy monitoringa jekzogenykh processov [Some problems of exogenous processes monitoring] // *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2013, № 1-2. – P. 444-447.

3. *Sharapov R.V.* Monitoring jekzogenykh processov [Monitoring of exogenous processes] // *Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti* [Engineering industry and life safety], 2012, № 2. – P.39-42.

4. *Sharapov R.V.* Perekhod ot tehnicheskikh k prirodno-tehnicheskim sistemam [The transition from the technical to the natural-technical systems] // *Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti* [Engineering industry and life safety], 2012, № 2. – P.43-46.

5. *Rekomendacii po proektirovaniyu zdaniy i sooruzhenij v karstovykh rajonah SSSR* [Recommendations for the design of buildings and structures in karst regions of the USSR]. – Moscow: Stroyizdat, 1967.

6. *Gotman A.L., Magzumov R.N.* Metod rascheta svajnykh lentochnykh fundamentov pri obrazovanii karstovogo provala [Calculation method of pile strip foundations in the formation of karst failure] // *Vestnik MGTU*, 2014, №2. – P.74-83.

**Статья поступила в редакцию 15 мая 2014 г.**

---

*Лодыгина Нина Дмитриевна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техносферная безопасность» Муромского института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром, Россия. E-mail: [nina.lodygina@yandex.ru](mailto:nina.lodygina@yandex.ru)

---

*Lodigina Nina Dmitrievna* – Ph.D., Murom Institute of Vladimir State University, Murom, Russia. E-mail: [nina.lodygina@yandex.ru](mailto:nina.lodygina@yandex.ru)