Зерцалов М.Г., Знаменский В.В., Хохлов И.Н. Об особенностях расчета несущей способности буронабивных свай в скальных массивах при действии вертикальной нагрузки // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2018. – № 1. – С. 52–59. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.05

Zertsalov M.G., Znamenskiy V.V., Khokhlov I.N. About the peculiarities of calculation of bearing capacity of socketed shafts in rock under the action of vertical load. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2018. No. 1. Pp. 52-59. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.05

**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**
№ 1, 2018
**PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.05

УДК 624.154.5

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ В СКАЛЬНЫХ МАССИВАХ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ

М.Г. Зерцалов¹, В.В. Знаменский¹, И.Н. Хохлов²

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

²ООО «Научно-инженерный центр Тоннельной ассоциации», Москва, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 06 августа 2017
Принята: 21 декабря 2017
Опубликована: 30 марта 2018

Ключевые слова:

буронабивные сваи, скальные массивы, вертикальные нагрузки, расчеты, несущая способность

АННОТАЦИЯ

Буронабивные сваи большого диаметра обычно используются для передачи нагрузки от наземных конструкций и сооружений через слои слабых грунтов на более прочные подстилающие скальные породы. Нередко при строительстве мостов и высотных зданий на слабых грунтах, подстилаемых скальными массивами, фундаменты на буронабивных сваях рассматриваются как наиболее эффективные и экономически выгодные фундаменты глубокого заложения. В статье анализируются основные особенности расчетов буронабивных свай в скальных массивах на вертикальные нагрузки. Перечислены основные факторы, обусловленные структурными особенностями и механическими характеристиками скальных массивов, влияющие на работу свай под нагрузкой. Рассмотрены основные виды взаимодействия буронабивных свай со скальными массивами при действии вертикальных нагрузок, а также механизмы потери сваями несущей способности. Также представлены результаты численного моделирования и предложен разработанный на их основе метод расчета свай в скальных грунтах при действии вертикальных нагрузок в условиях пространственной упругопластической задачи, учитывающий работу контакта сваи и скального массива. Результаты исследований представлены в виде параметрических уравнений регрессии, а также номограмм, позволяющих провести «экспресс-анализ» работы свай под нагрузкой, что может быть особенно полезно на предварительной стадии проектирования свайных фундаментов. Авторами предлагается продолжать работы по дальнейшему изучению и обобщению отечественного и зарубежного опыта устройства свай в скальных массивах, развивать на его основе отечественные исследования и корректировать существующие нормативные документы, в которых на сегодняшний день подробно не освещаются вопросы проектирования свай в скальных массивах.

© ПНИПУ

© Зерцалов Михаил Григорьевич – доктор технических наук, профессор, e-mail: zertsalov@mgsu.ru.

Знаменский Владимир Валерианович – доктор технических наук, профессор, e-mail: geosts@yandex.ru.

Хохлов Иван Николаевич – кандидат технических наук, главный инженер, e-mail: inh.2017@yandex.ru.

Mikhail G. Zertsalov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: zertsalov@mgsu.ru.

Vladimir V. Znamenskiy – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: geosts@yandex.ru.

Ivan N. Khokhlov – Ph.D. in Technical Sciences, Chief-Engineer, e-mail: inh.2017@yandex.ru.

ABOUT PECULIARITIES OF CALCULATING THE BEARING CAPACITY OF SOCKETED SHAFTS IN ROCK UNDER VERTICAL LOAD

M.G. Zertsalov¹, V.V. Znamenskiy¹, I.N. Khokhlov²

¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

²Scientific Engineering Center of Tunneling Association, Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 06 August 2017
Accepted: 21 December 2017
Published: 30 March 2018

Keywords:

socketed shafts, rock mass,
vertical loads, calculations,
bearing capacity

ABSTRACT

Large diameter socketed shafts are usually used to transfer loads from the above-ground constructions and structures through layers of soft soils to sound bedrock. Often during the construction of bridges and high-rise buildings on soft soils, underling rock formations, socketed shaft foundations are considered to be the most efficient and beneficial deep foundations. In this article the main peculiarities of calculating socketed shafts in rock under the action of vertical loads are analyzed. The major factors affecting the performance of socketed shafts under loads are associated with composition, structure and mechanical properties of rock mass. The main types of interaction of socketed shafts with rock mass under the action of vertical loads, as well as mechanisms of loss of bearing capacity of socketed shafts are described. The article presents the results of numerical simulations in terms of the three-dimensional elasto-plastic problem by considering the performance of the interface between the socketed shaft and the rock mass. Besides, it outlines the method of calculating the drilled shafts in rock under the action of vertical loads which is proposed and developed on their basis. The results are presented in the form of the parametric regression equations and nomograms allowing to perform an 'express-analysis' of the socketed shafts, which can be especially useful at the preliminary stage of design of socketed shaft foundations. The authors propose to carry out further studies and generalize domestic and foreign best practices related to socketed shaft foundations, thus improving national studies, as well as to modify the existing regulations, which at present do not contain detail issues of designing socketed shafts in rock.

© PNRPU

Работающие в условиях сжатия буронабивные сваи большого диаметра обычно используются для передачи нагрузки от наземных конструкций и сооружений через слои слабых грунтов на более прочные подстилающие скальные породы. При этом сваи либо могут опираться на скальное основание, либо заглубляются в него. Как показывает мировая практика, диаметр таких свай может меняться в пределах от 0,5 до 2,0 м и более, а длина заглубленной части достигать 30 м и более (рис. 1).

Устройство подобных свай, как указывается в [1], имеет множество преимуществ по сравнению с другими видами фундаментов. При строительстве мостов и высотных зданий на слабых грунтах, подстилаемых скальными массивами, фундаменты на буронабивных сваях рассматриваются как наиболее эффективные и экономически выгодные фундаменты глубокого заложения [2]. По данным американских исследователей [3], таких фундаментов только в 1997 г. сооружено на сумму более 1 млрд долл. С тех пор объем устройства свай в скальных грунтах постоянно возрастал.

Несмотря на то что механизм работы свай в скальном грунте аналогичен работе свай в грунте нескальном (дисперсном), характер ее взаимодействия с массивом при вертикальных нагрузках отличается значительно и определяется факторами, обусловленными структурными особенностями и механическими характеристиками скальных грунтов.

На основании анализа результатов лабораторных исследований, многочисленных натурных испытаний, а также результатов численного моделирования стало возможным выделить факторы, оказывающие наибольшее влияние на работу свай в скальных грунтах. К ним следует отнести: структурные особенности скального массива, отношение модуля

упругости материала сваи к модулю деформации скального грунта, свойства контакта сваи с породным массивом и отношение глубины заделки сваи в скальный массив к ее диаметру. Необходимость учета этих факторов вносит большую неопределенность в решение задачи о взаимодействии сваи со скальным массивом и требует проведения ее испытания в натурных условиях для построения графиков «нагрузка – осадка».

Рис. 1. Схема устройства буронабивных свай-опор мостового перехода через р. Огайо, США
Fig. 1. The arrangement of socketed shafts for piers of the Ohio River crossing, USA

В естественном состоянии скальные массивы представляют собой неоднородные трещиноватые среды. С учетом этого инженерные свойства массивов определяются, с одной стороны, структурой и происхождением скальных блоков, а с другой стороны – механическими и геометрическими характеристиками нарушений сплошности скального массива. При этом следует учитывать, что определение его прочностных и деформационных характеристик невозможно экспериментальным путем из-за наличия масштабного фактора [4–6]. Принимая это во внимание, механические характеристики скальных массивов чаще всего определяют по эмпирическим зависимостям. Анализ поведения средне- и сильнотрещиноватых массивов скальных грунтов при выполнении критерия квазисплошности [4] возможно рассматривать с позиции механики сплошной среды, заменяя структуру, состоящую из блоков и трещин, квазисплошной квазигоднородной средой, характеризующейся эффективными деформационными и прочностными характеристиками, которые учитываются в используемых математических моделях поведения скальных массивов.

В настоящей статье рассматриваются результаты численного моделирования и предлагается разработанный на их основе метод расчета свай в скальных грунтах при действии вертикальных нагрузок в условиях пространственной задачи, учитывающий работу контакта сваи и скального массива. Численное моделирование на базе МКЭ выполнялось с использованием программного комплекса Z-SOIL_PC v 2013, ориентированного на решение геотехнических задач.

Общий вид расчетных фрагментов взаимодействия сваи с вмещающим массивом представлен на рис. 2.

Рис. 2. Пространственная модель взаимодействия свай с массивом скального грунта при расчете на вертикальную нагрузку

Fig. 2. Three-dimensional model of interaction of socketed shafts with rock mass in case of vertical loading calculation

Численное моделирование и обработка полученных результатов проводились в соответствии с методом планирования эксперимента, на основании чего были получены уравнения регрессии (функции отклика), позволяющие определять зависимость между нагрузками на сваю и ее осадками [7]. В качестве независимых использовались три фактора: RQD , E_c/E_r , L/D , где RQD – показатель качества скального массива, характеризующий степень его трещиноватости, E_c/E_r – отношение модуля упругости материала сваи к модулю упругости ненарушенного скального грунта и L/D – отношение длины сваи к ее диаметру.

Характеристики рассматриваемых скальных массивов были выбраны в пределах между нижней и верхней границей осредненных значений модулей упругости ненарушенных скальных грунтов средней прочности [8]. Для скальных массивов средней прочности показатель RQD варьируется в пределах 25–75 %. При значениях RQD меньших, чем 25 %, механические характеристики скальных массивов изменяются незначительно, а при значениях RQD больших, чем 75 %, скальные массивы можно рассматривать как практически ненарушенные [5, 9, 10]. Соответственно, осредненные значения прочности на одноосное сжатие этих грунтов составили $\sigma_c = 20 \dots 100$ МПа [8]. Прочностные характеристики скальных массивов по модели Кулона – Мора характеризовались удельным сцеплением c_m и углом внутреннего трения φ_m , эмпирические значения которых определялись по методике, предложенной Хоеком [9].

Сдвиговые смещения сваи относительно скального массива моделировались специальными контактными элементами [11], работа которых также определялась моделью Кулона – Мора. В качестве упругих характеристик контактного элемента принимались касательная (вдоль сваи) и нормальная жесткости – K_s и K_n . На основе анализа опытных данных сдвигов бетонных штампов по скальным основаниям принималось осредненное значение касательной жесткости – $K_s = 100\,000$ кН/м³. Значение нормальной жесткости K_n подсчитывалось по зависимостям, известным из теории упругости [12]. Прочностные характеристики контакта «бетон – скальный грунт» назначались по рекомендациям, приводимым в нормативной литературе (СП 23.13330.2011. Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02–85. М.: Минрегион России, 2010).

Для свай, работающих на вертикальную нагрузку, в качестве функций отклика принимались нагрузки на сваю и осадки ее оголовка в характерных точках графика осадок сваи A , B и C . Соответственно, A и B – точки начала и окончания разрушения контакта со скальным грунтом и C – точка начала разрушения материала сваи или скального массива (рис. 3).

Рис. 3. График «нагрузка – осадка» свай при пластическом характере разрушения контакта свая – массив

Fig. 3. “Load-displacement” curves of socketed shafts in case of plastic failure of interface between the shaft and rock mass

Результаты исследований позволили получить уравнения регрессии, связывающие нагрузки и осадки свай в характерных точках для висячей сваи и сваи-стойки. В качестве примера приведены уравнения (1)–(6) для висячей сваи, т.е. сваи, несущая способность которой обеспечивается как сопротивлением грунта по боковой поверхности, так и прочностью грунта под свайей.

Начало разрушения контакта (точка A):

– нагрузка

$$Y = 6,94 - 2,04 \cdot X_1 + 0,99 \cdot X_2 + 0,46 \cdot X_3 - 0,59 \cdot X_1 \cdot X_2 + 1,34 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1,29 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,59 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3; \quad (1)$$

– осадка

$$Y = 5,625 + 1,475 \cdot X_1 - 1,95 \cdot X_2 + 1,475 \cdot X_3 - 1,4 \cdot X_1 \cdot X_2 + 1,125 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1,1 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,75 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (2)$$

Конец разрушения контакта (точка B):

– нагрузка

$$Y = 15,71 - 6,41 \cdot X_1 + 4,01 \cdot X_2 + 3,91 \cdot X_3 - 3,41 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,89 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1,59 \cdot X_2 \cdot X_3 + 1,29 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3; \quad (3)$$

– осадка

$$Y = 13,92 + 1,1 \cdot X_1 - 2,75 \cdot X_2 + 6,38 \cdot X_3 - 3,78 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,8 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1,55 \cdot X_2 \cdot X_3 + 1,325 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (4)$$

Начало разрушения скального массива или сваи (точка С):

– нагрузка

$$Y = 18,82 - 9,025 \cdot X_1 + 2,725 \cdot X_2 + 4,625 \cdot X_3 - 2,125 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,025 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,775 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,575 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3; \quad (5)$$

– осадка

$$Y = 18,09 - 1,105 \cdot X_1 - 5,305 \cdot X_2 + 7,43 \cdot X_3 - 2,455 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,47 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,47 \cdot X_2 \cdot X_3 - 1,22 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3, \quad (6)$$

где $X_1 - RQD$, $X_2 - E_c/E_r$, $X_3 - L/D$.

Анализ графиков (см. рис. 3) показывает, что после приложения к свае вертикальной сжимающей силы вдоль контакта со скальным массивом развиваются касательные напряжения, увеличивающиеся с возрастанием нагрузки. Характер деформирования на этом (первом) участке линейный. Участок заканчивается при достижении касательными напряжениями величины сопротивления контакта сдвигу (точка А). Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к постепенному (пластическому) разрушению контакта, которое продолжается до тех пор, пока не произойдет сдвиг по всей длине боковой поверхности сваи (точка В). Характер деформирования на этом (втором) участке графика нелинейный. При дальнейшем увеличении нагрузки большая ее часть передается на скальный массив, линейное деформирование которого (третий участок) продолжается до достижения материалом сваи или массивом прочности на сжатие (точка С).

Анализ результатов выполненных расчетов позволяет отметить следующее: характер графика осадок сваи и протяженность первых двух ее участков полностью определяются как характеристиками скального массива, так и значениями жесткости контакта и величины сопротивления сдвигу по боковой поверхности сваи.

В целях упрощения практического использования данных уравнений для экспресс-анализа были составлены номограммы, позволяющие графическим способом выполнять поиск значений функций отклика [7].

Результаты численного моделирования подтвердили также отмеченную многими исследователями особенность характера кривой осадок свай при действии вертикальной нагрузки [2]. Во всех расчетных случаях (см. рис. 3), как и при натурных испытаниях свай, график осадок в пределах второго участка (разрушение контакта) имеет нелинейный характер. В слабых грунтах эта нелинейность проявляется сильнее, но участок разрушения контакта сравнительно короткий. С повышением жесткости контакта, возрастающей с увеличением прочности скального массива, нелинейность практически исчезает, но длина участка разрушения контакта существенно увеличивается (см. нижнюю и верхнюю кривые на рис. 3). Принимая это во внимание, в расчетных методах обычно полный график осадок представляется в виде полигонального графика [1, 13–15], состоящего из двух или трех линейных участков в зависимости от того, произойдет ли сначала полное разрушение контакта или начнет разрушаться скальный массив под сваей либо материал сваи.

Выводы

1. Разработан метод расчета взаимодействия свай со скальными грунтами при действии вертикальных нагрузок, позволяющий на предварительных стадиях проектирования определять несущую способность и соответствующие нагрузкам осадки свай, в том числе в графической форме.

2. Полученные результаты свидетельствуют о том, что описанная в СП 24.13330.2011 методика расчета свайных фундаментов в скальных грунтах на вертикальные нагрузки не учитывает многих факторов, оказывающих значительное влияние на несущую способность и осадки свай, что, как правило, приводит к завышению получаемых результатов.

3. Учитывая сложность механизма взаимодействия свай со скальным массивом, необходимо дальнейшее изучение и обобщение зарубежного опыта, накопленного в этой области, развитие на его основе отечественных исследований и корректировка существующих нормативных документов.

Библиографический список

1. Zhang L. Drilled shafts in rock. Analysis and design. – A.A. Balkema publishers, 2004. – 383 p.
2. NCHRP Synthesis 360: Rock-socketed shafts for highway structure foundations – Transportation research board executive committee. – Washington, D.C., 2006. – 137 p.
3. O’Neil M.W., Majano R.E. Analysis of axial and lateral drilled shaft socket load test and axial pile load tests for foundation for T.H. 36 bridge over the St. Croix river, Stillwater, Minnesota. – Minnesota Department of Transportation. – January 1996. – 122 p.
4. Зерцалов М.Г. Геомеханика. Введение в механику скальных грунтов. – М.: Изд-во АСВ, 2014. – 352 с.
5. Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F. Support of underground excavations in hard rock. – Balkema, Rotterdam, 1995. – 234 p.
6. Лушников В.В., Солдатов Б.А., Маргулян В.Е. Об оценке трещиноватости скальных грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2014. – № 5. – С. 25–28.
7. Зерцалов М.Г., Никишкин М.В., Хохлов И.Н. К расчету буронабивных свай в скальных грунтах на действие осевых сжимающих нагрузок // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2017. – № 3. – С. 2–8.
8. International Society for Rock Mechanics, Commission on Standardization of Laboratory and field test. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. – 1978. – No. 15 – P. 319–368.
9. Hoek E., Brown E.T. Practical estimates of rock mass strength // International journal of rock mechanics and mining sciences. – 1997. – No. 34(8). – P. 1165–1186.
10. Zhang L., Einstein H.H. Estimating the deformation modulus of rock masses // Pacific Rocks 2000, Proceedings of 4th North American Rock Mechanics Symposium, Seattle, WA. – 2000. – P. 703–708.
11. Орехов В.Г., Зерцалов М.Г., Толстиков В.В. Исследования схемы разрушения системы бетонная плотина – скальное основание // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1987. – Т. 204. – С. 71–76.
12. Boresi A.P. Elasticity in engineering mechanics. – Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1965. – P. 656.
13. Carter J.P., Kullhawy F.H. Analysis and design of drilled shaft foundations socketed into rock. – Report EL-5918, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1988. – 188 p.
14. Akgunern C., Kirkit M. Axial bearing capacity of socketed single cast-in-place piles // Soils and Foundations. – 2012. – No. 52(1) – P. 59–68.
15. On behavior of load transfer for drilled shafts embedded in weak rocks / Z. Heng, X. Yao, Z. Minghua, Y. Pingbao // Computers and Geotechnics. – 2017. – No. 85. – P. 177–185.

References

1. Zhang L. Drilled shafts in rock. Analysis and design. A.A. Balkema publishers, 2004, 383 p.
2. NCHRP Synthesis 360: Rock-socketed shafts for highway structure foundations – Transportation research board executive committee. Washington, D.C., 2006. – P. 137
3. O'Neil M.W., Majano R.E. Analysis of axial and lateral drilled shaft socket load test and axial pile load tests for foundation for T.H. 36 bridge over the St. Croix river, Stillwater, Minnesota. *Minnesota Department of Transportation*, January 1996, 122 p.
4. Zertsalov M.G. Geomechanika. Vvedenie v mehaniku skal'nyh gruntov [Geomechanics. Introduction to rock mechanics soil]. Moscow, ASV, 2014, 352 p.
5. Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F. Support of underground excavations in hard rock. Balkema, Rotterdam, 1995, 234 p.
6. Lushnikov V.V., Soldatov B.A., Marguljan V.E. Ob ocenke treshhinovatosti skal'nyh gruntov [Evaluation of fissuring in rocky soils]. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov*, 2014, no. 5, pp. 25 – 28.
7. Zertsalov M.G., Nikishkin M.V., Khokhlov I.N. K raschetu buronabivnyh svaj v skal'nyh gruntah na dejstvie osevyh szhimayushchih nagruzok [Calculation of bored piles in rocky soil on the action of axial compressive loads]. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov*, 2017, no. 3, pp. 2–8.
8. International Society for Rock Mechanics, Commission on Standardization of Laboratory and field test. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int.J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1978, no. 15, pp. 319-368.
9. Hoek E., Brown E.T. Practical estimates of rock mass strength. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 1997, no. 34(8), pp. 1165-1186.
10. Zhang L., Einstein H.H. Estimating the deformation modulus of rock masses. *Pacific Rocks 2000, Proceedings of 4th North American Rock Mechanic Symposium*, Seattle, WA, 2000, pp. 703 – 708.
11. Orehov V.G., Zertsalov M.G., Tolstikov V.V. Issledovaniya shemy razrusheniya sistemy betonnoy plotiny – skal'noye osnovanie [Research scheme of destruction of the concrete dam – rock Foundation]. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva*, 1987, vol. 204, pp. 71–76.
12. Boresi A.P. Elasticity in engineering mechanics. Prentice – Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1965, 656 p.
13. Carter J.P., Kullhawy F.H. Analysis and Design of Drilled Shaft Foundations Socketed into Rock. *Report EL-5918, Electric Power Research Institute*, Palo Alto, CA, 1988, 188 p.
14. Akgunern C., Kirkit M. Axial bearing capacity of socketed single cast-in-place piles. *Soils and Foundations*, 2012, no. 52(1), pp. 59–68.
15. Heng. Z., Yao, X., Minghua, Z., Pingbao, Y. On behavior of load transfer for drilled shafts embedded in weak rocks. *Computers and Geotechnics*, 2017, no. 85, pp. 177–185.