

А. З. ГАЙСИН
С. А. КРУТЯЕВ
А. О. ГЛАЗАЧЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИАМЕТРА БУРОНАБИВНОЙ СВАИ НА ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОСТЕЛИ ПРИ РАСЧЕТЕ НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ НАГРУЗКИ

**STUDY OF THE INFLUENCE OF A BORED PILE DIAMETER ON CHANGE
 OF COEFFICIENT OF SUBGRADE REACTION AT CALCULATION
 FOR HORIZONTAL LOADS**

Показана проблема проектирования фундаментов с использованием длинных буронабивных свай большого диаметра. Такие сваи чаще всего применяются при строительстве зданий и сооружений, на фундаментах которых передаются большие нагрузки, причем такие здания часто строятся на площадках со сложными грунтовыми условиями. При проектировании фундаментов с применением таких свай возникает необходимость их расчета на горизонтальную нагрузку и изгибающий момент. Статья посвящена исследованиям зависимости коэффициента постели от диаметра сваи при расчете длинных буронабивных свай большого диаметра в глинистых грунтах. При проектировании фундаментов с применением таких свай возникает необходимость их расчета на горизонтальную нагрузку и изгибающий момент. Для определения закономерности изменения коэффициента постели от диаметра сваи выполнены численные исследования в трехмерной постановке. По полученным результатам построены графики «нагрузка – перемещение». Показана методика расчета коэффициента постели при известных перемещениях оголовка сваи и приложенной нагрузки. Выявлены закономерности изменения деформативности грунтового основания при увеличении диаметра сваи и предложен коэффициент, учитывающий эту зависимость.

Ключевые слова: буронабивная свая, коэффициент постели, горизонтальная нагрузка

Сегодня все больше строится зданий и сооружений со значительными нагрузками на фундаменты. Наиболее рациональным решением является использование буронабивных свай. Изготовление таких свай требует немало финансовых затрат, поэтому важной задачей для проектировщика является использование максимально несущей способности основания при недопущении излишней материалоемкости. Для этого требуется применение соответствующих методик расчета усилий в свае и ее деформации. Этот вопрос является наиболее

The problem of designing foundations using long bored piles of large diameter is shown. Such piles are most often used in the construction of buildings and structures, on the foundations of which large loads are transferred, and such buildings are often built on sites with difficult soil conditions. When designing foundations using such piles, it becomes necessary to calculate them for horizontal load and bending moment. The article is devoted to studies of the dependence of the coefficient of subgrade reaction on the diameter of piles when calculating long bored piles of large diameter in clay soils. To determine the patterns of changes in the coefficient of subgrade reaction from the diameter of the piles, numerical studies in a three-dimensional setting were performed. Based on the results obtained, the graphs «load – displacement» are constructed. The method of calculating the coefficient of subgrade reaction with known movements of the pile head and the applied load is shown. The regularities of changes in the deformability of the soil base with an increase in the diameter of the pile are revealed and a coefficient taking into account this dependence is proposed.

Keywords: bored pile, coefficient of subgrade reaction, horizontal load

важным при расчете буронабивных свай большого диаметра и большой длины. Вопрос взаимодействия наиболее часто применяемых свай с грунтовым основанием довольно хорошо изучен [1–8], чего нельзя сказать о больших диаметровых сваях.

При проектировании фундаментов с применением таких свай возникает необходимость их расчета на горизонтальную нагрузку и изгибающий момент. Однако существующие методы расчета, в том числе изложенные в нормативных документах, малоприменимы для таких

свай, поскольку расчетные параметры их работы в грунте несколько отличаются от свай с небольшим поперечным сечением. Одним из таких факторов является малая изученность зависимости коэффициента постели от диаметра сваи.

Проблема расчета буронабивных свай большого диаметра на горизонтальную нагрузку в первую очередь представляет собой решение задачи выбора модели грунта и составление расчетной схемы. Наибольшее распространение и широкое применение на данный момент нашла модель местных деформаций Фусса-Винклера, при использовании которой свая рассматривается как балка на линейно-деформируемом основании. В этой модели в качестве расчетного параметра грунта принят коэффициент постели C_z , характеризующий деформационные свойства грунта.

Эта модель достаточно хорошо и многосторонне проработана математически, имеет замкнутые решения для различных закономерностей изменения коэффициента постели по глубине. Она достаточно точно отражает деформационные явления при нагружении балок относительно малого постоянного по длине поперечного сечения, например, горизонтально нагруженных свай массового применения сечением 30x30 см. Поэтому для решения задачи расчета односвайных фундаментов из свай большого диаметра целесообразно использовать модель местных деформаций с экспериментальным обоснованием определяющих ее параметров.

Для получения формулы определения коэффициента постели предположим, что при вдавливании в грунт сваи развитого поперечного сечения происходит деформация грунта не только непосредственно перед сваей, но и за ее пределами, как это описывает теория упругого полупространства.

Тогда в соответствии с М.И. Горбуновым-Посадковым [5] из равенства осадок по двум теориям – теории местных деформации и теории упругости получим для определения коэффициента постели формулу

$$C_z = \frac{E_0}{(1-\mu^2) \cdot b \cdot \omega}, \quad (1)$$

где E_0 – модуль деформации;

μ – коэффициент Пуассона;

b – ширина контактной поверхности сваи;

ω – коэффициент, зависящий от соотношения сторон контактной поверхности сваи.

Здесь формула дана для свай, имеющих прямоугольное поперечное сечение с соотношением сторон l/b . В нашем же случае для буронабивных свай, имеющих круглое поперечное сечение, необходимость применения коэффициента, зависящего от соотношения

сторон прямоугольника, отпадает. Однако для корректного определения коэффициента постели для свай с развитым поперечным сечением возникает целесообразность применения дополнительного масштабного коэффициента ψ , учитывающего зависимость коэффициента постели от диаметра сваи.

Тогда формула (1) запишется в виде:

$$C_z = \frac{E_0 \cdot \psi}{(1-\mu^2) \cdot d}. \quad (2)$$

Для определения закономерности изменения коэффициента постели от диаметра сваи выполнены численные исследования с использованием программного пакета «Plaxis 3D» в трехмерной постановке. Исследование выполнено для условной одиночной сваи в однослойном грунтовом основании с размерами расчетной области 50x50x15(г) м (рис. 1).

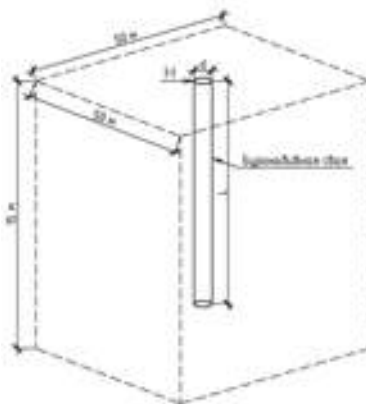


Рис. 1. Расчетная схема буронабивной сваи

Основание представлено глиной полутвердой консистенции со следующими характеристиками: удельный вес 19 кН/м³, модуль деформации 15 МПа, коэффициент поперечной деформации 0,42, удельное сцепление 15 кПа, угол внутреннего трения 15°. При расчете принята упруго-пластическая модель грунта Кулона-Мора.

Серии расчетов выполнены для буронабивных свай длиной 10 м и диаметрами от 400 до 1200 мм с шагом изменения диаметра 200 мм. Для минимизации влияния изгиба ствола сваи и перевода его в работу по «жесткой» схеме модуль упругости материала сваи принят равным $E = 3 \cdot 10^{13}$ кПа, что превышает показатели для бетона в 10^6 раз.

Действующая на оголовок сваи горизонтальная нагрузка принимается возрастающей с шагом 50 кН до возникновения в основании значительных зон пластических деформаций. Полученные результаты расчета представлены на рис. 2.

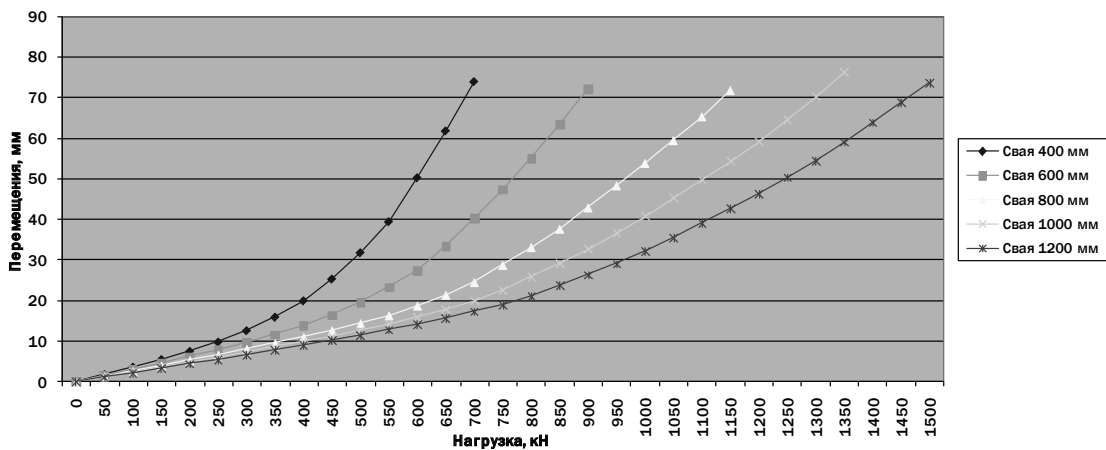


Рис. 2. График «нагрузка-перемещение» свай

Так как коэффициент постели характеризует линейные деформации грунта от приложенной нагрузки, выделим из полученных графиков участки с линейной зависимостью, т. е. до начала развития зон пластических деформаций грунта вокруг сваи. Из анализа графиков «нагрузка-перемещение» можно отметить, что до смещения головы сваи в пределах 10 мм зависимость линейно зависит от нагрузки. Для дальнейших расчетов в указанном диапазоне принимаем перемещение головы сваи в 10 мм и определим соответствующие принятому перемещению нагрузки. Для сваи диаметром 400 мм смещение оголовка в 10 мм происходит при горизонтальной нагрузке 54,24 кН, для сваи 600 мм – 64,92 кН, 800 мм – 188 кН, 1000 мм – 376 кН и для сваи 1200 мм – 450,8 кН.

Для полученных пар «нагрузка-перемещение» выполним расчет коэффициента постели C_z по методике, предложенной проф. А.Л. Готманом [9], путем выполнения обратного расчета, т. е. определение C_z при известных перемещениях оголовка сваи и приложенной на сваю нагрузке.

Расчетная схема предлагаемой методики представлена на рис. 3.

При выводе формул по данной методике приняты следующие предположения.

1. Основание по глубине в пределах длины сваи неоднородное, многослойное, разбито на n слоев с постоянными в пределах каждого i -го слоя коэффициентами постели K_i (C_z).

2. Размер сечения сваи по глубине d – постоянный, жесткость на изгиб принята бесконечной.

3. Изменение горизонтального перемещения сваи U_z по глубине принимаем как для жесткого стержня в упругой среде в виде

$$U_z = U_0(1 - z/l_0), \tag{3}$$

где U_0 – горизонтальное перемещение сваи в уровне поверхности грунта;

l_0 – глубина расположения точки нулевых перемещений, $l_0 = U_0/\varphi_0$;

φ_0 – угол поворота сваи в уровне поверхности грунта.

4. Давление грунта q_z на единицу длины сваи пропорционально ее горизонтальному перемещению U_z и коэффициенту постели K_z :

$$q_z = dK_z U_z. \tag{4}$$

Из условия равновесия действующих и реактивных сил, в соответствии с расчетной схемой на рис. 3 запишем поперечную силу Q_z и изгибающий момент M_z в произвольном сечении сваи на глубине z при действии внешних

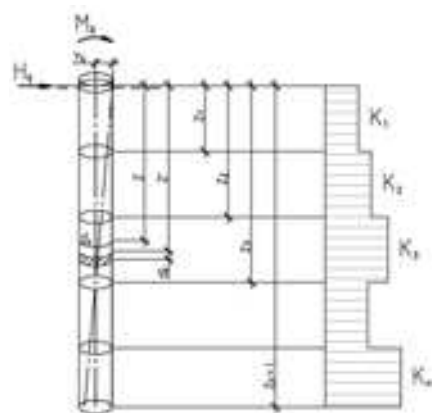


Рис. 3. Расчетная схема буронабивной сваи

горизонтальной нагрузки H_0 и изгибающего момента M_0 :

$$\begin{aligned} Q_0 &= H_0 - Q_z^p; \\ M_z &= M_0 + H_0 z - M_z^p. \end{aligned} \quad (5)$$

Исходя из принятых выше предпосылок, запишем сопротивление грунта q_z на глубине z :

$$q_z = d \cdot U_0 \cdot K_z \cdot \left(1 - \frac{z}{l_0}\right), \quad (6)$$

где K_z – коэффициент постели i -го слоя грунта, соответствующего глубине z .

Тогда поперечная сила Q_z^p и изгибающий момент M_z^p в произвольном сечении сваи z от сопротивления грунта q_z i -го слоя будет:

$$\begin{aligned} Q_z^p &= U_0 \cdot K_i \cdot d \int_{z_{i-1}}^z \left(1 - \frac{\bar{z}}{l_0}\right) \cdot d \cdot \bar{z}; \\ M_z^p &= U_0 \cdot K_i \cdot d \int_{z_{i-1}}^z \left(1 - \frac{\bar{z}}{l_0}\right) (z - \bar{z}) \cdot d \cdot \bar{z}. \end{aligned} \quad (7)$$

После интегрирования выражений (7), суммирования по длине сваи до слоя j , в котором расположено сечение z , и преобразований с учетом значения b , выражения (5) будут иметь вид:

$$\begin{aligned} Q_z &= H_0 + U_0 \cdot \Phi_1 + \varphi_0 \cdot \Phi_2, \\ M_z &= M_0 + H_0 \cdot z + U_0 \cdot \Phi_3 + \varphi_0 \cdot \Phi_4, \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 &= -d \cdot a_z; \quad \Phi_2 = -d \cdot \frac{b_z}{2} \\ \Phi_3 &= \frac{d}{12} (-12a_z + 6b_z) = \frac{d}{2} (b_z - 2a_z \cdot l) \\ \Phi_4 &= \frac{d}{12} (6b_z - 4d_z) = \frac{d}{6} (3b_z l - 2d_z) \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} a_z &= \sum_{i=1}^j K_i (z_i - z_{i-1}); \quad b_z = \sum_{i=1}^j K_i (z_i^2 - z_{i-1}^2) \\ d_z &= \sum_{i=1}^j K_i (z_i^3 - z_{i-1}^3) \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

j – количество слоев выше сечения z ;
 K_i – коэффициент постели i -го слоя грунта.

Принимая в (8) $z = l$, а в (10) $j = n$, с учетом граничных условий на нижнем конце сваи $Q_l = 0$ и $M_l = 0$, получим систему двух уравнений, из решения которой получим формулы для определения перемещения U_0 и угла поворота φ_0 сваи в уровне поверхности грунта

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= H_0 \cdot \delta_{nn} + M_0 \cdot \delta_{mn} \\ \varphi_0 &= H_0 \cdot \delta_{nm} + M_0 \cdot \delta_{mm} \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

где δ_{nn} и δ_{mn} – горизонтальное перемещение и угол поворота сваи в уровне поверхности грунта от $H_0 = 1$; δ_{nm} и δ_{mm} – горизонтальное перемещение и угол поворота сваи в уровне поверхности грунта от $M_0 = 1$.

Значения δ_{nn} , δ_{mn} , δ_{nm} и δ_{mm} определяются по формулам

$$\delta_{nn} = \frac{\Phi_4 - l\Phi_2}{\eta}; \quad \delta_{nm} = \delta_{mn} = -\frac{\Phi_2}{\eta}; \quad \delta_{mm} = \frac{\Phi_1}{\eta}, \quad (12)$$

где $\eta = \Phi_2 \cdot \Phi_3 - \Phi_1 \cdot \Phi_4$.

Значения Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 и Φ_4 определяются по формулам (9) и (10), причем в формулах (10) суммирование производится по всей длине сваи l .

Расчетный изгибающий момент M_z и поперечная сила Q_z в сечении сваи на глубине z вычисляются по формулам (8). При этом в формулах (10) суммирование производится от первого слоя до слоя, в котором находится сечение z .

По результатам выполненных расчетов получен график зависимости масштабного коэффициента ψ от диаметра сваи (рис. 4).

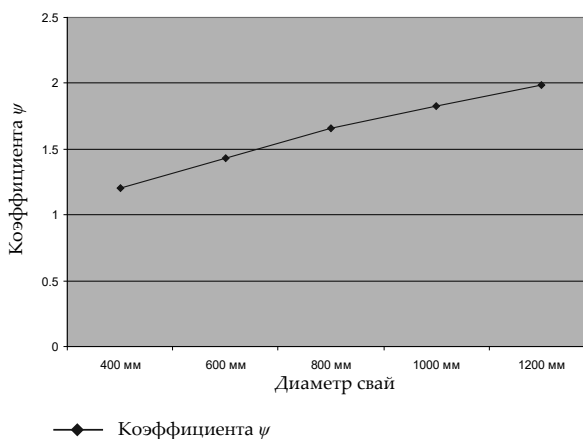


Рис. 4. Зависимость масштабного коэффициента от диаметра сваи

Как видно из полученного графика, наблюдается рост масштабного коэффициента ψ от 1,2 для сваи диаметром 400 мм до 2,0 для сваи 1200 мм. Следовательно, при расчете буронабивных свай, особенно большого диаметра, необходимо учитывать этот фактор.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шахирев В.Б. Новый метод расчета коротких жестких свай на горизонтальную нагрузку // Строительство и архитектура Белоруссии. 1987. № 1. С. 35–36.
2. Шахирев В.Б. Расчет пирамидальных свай на горизонтальную нагрузку // Вопросы строительства и архитектуры (Минск). 1989. № 17. С. 87–90.
3. Буслев А.С. Работа свай на горизонтальную нагрузку за пределами упругости в связных грунтах. Ташкент: Фан, 1979. 106 с.
4. Березанцев В.Г. Расчет одиночных свай и свайных кустов на действие горизонтальных сил // Сб. тр. ЛИИЖТа. Вып. 136. Теоретический. М.: Гострансжелдориздат, 1947. С. 62–78.

5. Горбунов-Посадов М.Н., Маликова Г.А., Соломин В.И. Расчет конструкций на упругом основании. М.: Стройиздат, 1984. 680 с.

6. Reese L.C., Van Impe W.F. Single piles and pile groups under lateral loading. Netherlands: A.A. Balkema Publishers, 2001. 507 с.

7. Davies T.G., Budhu M. Non-linear analysis of laterally load-ed piles in heavily overconsolidated clays // Geotechnique. 1986. Vol. 36 (4). P. 527–538.

8. Brown D.A., Morrison C., Reese L.C. Lateral load behavior of a pile group in sand // Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. 1988. Vol. 114 (11). P. 1261–1276.

9. Готман А.Л., Гайсин А.З. Исследование работы крупномасштабных буронабивных свай на горизонтальную нагрузку и их расчет // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2018. Т. 9, № 3. С. 14–27.

REFERENCES

1. Shahirev V.B. New method of calculation of short rigid piles for horizontal load. *Stroitel'stvo i arkhitektura Belorussii* [Construction and Architecture of Belarus], 1987, no. 1, pp. 35–36. (in Russian)

2. Shahirev V.B. Calculation of pyramidal piles on horizontal load. *Voprosi stroitel'stva i arkhitekturi* [Construction and Architecture Issues]. Minsk, 1989, no. 17, pp. 87–90. (in Russian)

3. Buslov A.S. *Rabota svai na gorizontaľnuyu nagruzku za predelami uprugosti v svyaznih gruntah* [Work of piles for horizontal load beyond the limits of elasticity in cohesive soils]. Tashkent, Fun, 1979. 106 p.

4. Berezantsev V.G. Calculation of single piles and pile bushes on the action of horizontal forces. *Trudy LIIZhT «Teoreticheskiy»* [Proc. of the LIRE “Theoretical”], 1947, no. 136, pp. 62–78. (in Russian)

5. Gorbunov-Posadov M.N., Malikova G.A., Solomin V.I. *Raschet konstruktсий na uprugom osnovanii* [Calculation of structures on an elastic base]. Moscow, Stroyizdat, 1984. 680 p.

6. Reese L.C., Van Impe W.F. Single piles and pile groups under lateral loading. Netherlands, A.A. Balkema Publishers, 2001. 507 p.

7. Davies T.G., Budhu M. Non-linear analysis of laterally load-ed piles in heavily overconsolidated clays. *Geotechnique*, 1986, vol. 36 (4), pp. 527–538.

8. Brown D.A., Morrison C., Reese L.C. Lateral load behavior of a pile group in sand. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1988, vol. 114 (11), pp. 1261–1276.

9. Gotman A.L., Gaisin A.Z. Study of the large-scale bored piles on the horizontal load and their calculation. *Vestnik PNIPU Stroitel'stvo i arkhitektura* [PNRPU Construction and Architecture Bulletin], 2018, no. 3, pp. 14–27. (in Russian)

Об авторах:

ГАЙСИН Айрат Закиевич

аспирант кафедры строительного производства и геотехники

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29

E-mail: ikafedraig@mail.ru

GAISIN Airat Z.

Postgraduate Student of the Construction Production and Geotechnics Chair

Perm National Research Polytechnic University

614990, Russia, Perm, Komsomolsky av., 29

E-mail: ikafedraig@mail.ru

КРУТЯЕВ Сергей Алексеевич

инженер

ООО НПП «ЭкспертГеоПроект»

450006, Республика Башкортостан, г. Уфа,

ул. Цюрупы, 151, корпус 1

E-mail: sergkrut22@gmail.com

KRUTYAEV Sergey A.

Engineer

Ltd. NPP «ExpertGeoProjekt»

450006, Russia, Ufa, Tsyurupy str., 151/1

E-mail: sergkrut22@gmail.com

ГЛАЗАЧЕВ Антон Олегович

кандидат технических наук, доцент кафедры

комплексного инжиниринга и компьютерной графики

Уфимский государственный нефтяной технический

университет

450080, Россия, г. Уфа, ул. Менделеева, 195

E-mail: anton.glazachev@mail.ru

GLAZACHEV Anton O.

PhD in Engineering Sciences, Associate Professor at

the Comprehensive Engineering and Computer

Graphics Chair

Ufa State Petroleum Technological University,

450080, Russia, Ufa, Mendeleev str., 195

E-mail: anton.glazachev@mail.ru

Для цитирования: Гайсин А.З., Крутяев С.А., Глазачев А.О. Исследование влияния диаметра буронабивной сваи на изменение коэффициента постели при расчете на горизонтальные нагрузки // Градостроительство и архитектура. 2019. Т. 9, № 4. С. 11–15. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.04.2.

For citation: Gaisin A.Z., Krutyaev S.A., Glazachev A.O. Study of the Influence of a Bored Pile Diameter on Change of Coefficient of Subgrade Reaction at Calculation for Horizontal Loads. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2019. Vol. 9, no. 4. Pp. 11–15. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2019.04.2.