

Эффективность свай различных форм поперечного сечения

*К.т.н., доцент Г.Я. Булатов;
доцент Н.Б. Колосова,*

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Ключевые слова: эффективность свай; свайные фундаменты; типы свай; поперечное сечение свай; забивные свай

Санкт-Петербург расположен на территории, известной своими сложными инженерно-геологическими условиями, и сегодня это обстоятельство оказывает существенное влияние на выбор типа фундамента проектируемых сооружений. В городе и области существует значительное количество компаний, специализирующихся на проектировании и возведении фундаментов различных типов. Многие из них занимаются устройством свайных фундаментов. Зачастую перед ними стоит нелегкий выбор оптимальной конструкции свай, который невозможен без численной оценки ее эффективности.

В данной статье предлагаем методику определения эффективности работы забивной свайной конструкции различной формы поперечного сечения.

Обзор литературы

Анализ литературы показывает, что в настоящее время выбор основных параметров и конструирование свайных фундаментов основываются, как правило, на инженерном опыте либо на экспериментальных данных [1–14]. В основном, описываются различные исследования несущей способности в зависимости от вида и величины нагрузки [1, 2, 4, 7, 9, 10, 16, 13–28], а также от вида материала и технологии изготовления свай [2, 7, 8, 11–14, 17, 19, 25, 27, 29–31]. Кроме перечисленных исследований, в литературе встречаются публикации об эффективности применения свай различных конструкций либо для усиления грунтового основания [1, 6, 12], либо для преодоления сил трения грунта в процессе погружения [8, 11, 17].

Практически отсутствуют работы, в которых описываются теоретические основы и количественные оценки, определяющие эффективность работы свай. Единственная попытка количественно определить эффективность работы свай была выполнена в работе [7]. Здесь для количественной оценки эффективности стальной трубчатой свай диаметром 1,02 м было введено первичное понятие коэффициента эффективности свай.

Как показывает опыт общения с производителями строительных работ, в строительных организациях присутствует большой интерес к зависимости эффективности работы свай от формы ее поперечного сечения.

Постановка задачи

По мнению авторов, отсутствие теоретической базы по оценке эффективности работы непосредственно свай приводит к значительному перерасходу строительного материала и, как следствие, к удорожанию фундамента и удлинению сроков работ по его возведению.

Учитывая явную недостаточность материалов по описанию такой важной, на наш взгляд, задачи как оптимизация выбора параметров свай на основе оценки ее эффективности, авторами впервые в данной статье предпринята попытка представить ряд критериев и методов такой оценки.

Критерии оценки эффективности работы свай

В качестве критериев оценки эффективности работы свай приняты следующие.

1. Критерий **V-1** оценки эффективности свай по **несущей способности свай по грунту**:

$$\mathfrak{E}_{gp} = \frac{F_d}{G}, \quad (1)$$

где F_d – несущая способность свай по грунту, G – вес свай.

2. Критерий **V-2** – оценка эффективности свай по **несущей способности по материалу свай**:

$$\mathfrak{E}_m = \frac{F_{dm}}{G}, \quad (2)$$

где F_{dm} – несущая способность свай по прочности ее материала.

3. Критерий **V-3** – оценка эффективности свай по **коэффициенту использования материала свай** (в данном случае по критерию равнопрочности изделия – свай):

$$K_{эм} = \frac{F_d}{F_{dm}}. \quad (3)$$

4. Критерий **IV-1** – оценка эффективности свай по **удельной трудоемкости погружения свай** (трудоемкость погружения свай, отнесенная к одной тонне ее несущей способности):

$$t_{y\partial} = \frac{Tp}{F_d}, \quad (4)$$

где Tp – трудоемкость погружения свай.

5. Критерий **X-1** – оценка эффективности свай по **удельной стоимости свай** (стоимость, отнесенная к 1 т ее несущей способности):

$$c_{y\partial} = \frac{C_c}{F_d}, \quad (5)$$

где C_c – стоимость устройства одной свай.

6. Критерий **X-2** – оценка **удельной эффективности свайного поля**, которую представим в виде:

$$\mathfrak{E}_{y\partial} = \frac{F_d}{A_p}, \quad (6)$$

где A_p – площадь ростверка в плане, отнесенная к одной свае и определяемая по формуле:

$$A_p = a \cdot b, \quad (7)$$

где a и b представляют собой шаги расстановки свай в поле по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Их минимальное значение составляют $3d$ (d – диаметр свай или сторона поперечного сечения).

7. Критерий **X-3** – оценка **полезного использования свай в течение эксплуатационного периода**, представленная в виде формулы:

$$\eta_{экс} = \frac{N_{экс}}{[N]}, \quad (8)$$

где $N_{экс}$ – максимальная нагрузка на сваю во время эксплуатации, $[N]$ – допустимая нагрузка на сваю, определяемая по формуле:

$$[N] = \frac{F_p}{\gamma_n}, \quad (9)$$

где F_p – расчетная несущая способность сваи, определяемая по формуле:

$$F_p = \min\{F_d; F_m\}; \quad (10)$$

γ_n – коэффициент надежности.

Исследование данной проблемы проходило по двум направлениям. Первое – по критерию **V-1**, второе – по критериям **V-1** и **V-3**.

Исследование по критерию V-1

Эффективность работы сваи здесь определяли критерием оценки по несущей способности сваи по грунту.

В качестве объекта исследования были приняты сваи одинаковой длины L , равной 16 м, но с различной формой поперечного сечения. Грунт – песок среднезернистый.

Для изучения были выбраны пять форм поперечного сечения свай:

- 1) круглое (I);
- 2) квадратное (II);
- 3) крестообразное (III);
- 4) тавровое (IV);
- 5) двутавровое (V).

Для всех типов поперечных сечений при расчетах несущей способности по грунту были приняты одинаковые габариты параметра a , равного 0,4 метра по ширине и высоте поперечного сечения сваи (таблица 1).

Для каждого типа поперечного сечения были определены:

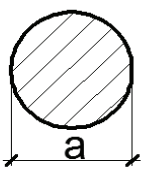
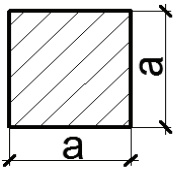
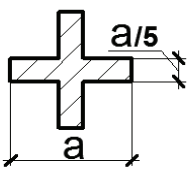
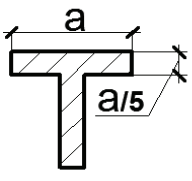
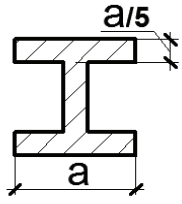
- 1) периметр поперечного сечения – U ;
- 2) площадь поперечного сечения – A ;
- 3) коэффициент развитости (ветвистости) сечения – K_c , определяемый по формуле:

$$K_c = \frac{U}{A}; \quad (11)$$

- 4) показатель геометрии сваи – K_z , определяемый по формуле:

$$K_z = K_c L. \quad (12)$$

Таблица 1. Типы поперечных сечений

I	II	III	IV	V
				

Результаты расчетов периметров поперечных сечений и других геометрических характеристик представлены в таблице 2.

Таблица 2. Геометрические характеристики свай

Номер сечения Характеристики	I	II	III	IV	V
U , м	1,257	1,6	1,6	1,6	2,24
A , м ²	0,126	0,16	0,058	0,058	0,083
K_c	9,98	10,0	27,59	27,59	26,99
K_z	159,7	160,0	441,4	441,4	431,8

Несущую способность сваи по грунту предлагаем записать в виде:

$$F_d = F_{df} + F_{dR}, \quad (13)$$

где F_{df} – несущая способность на боковой поверхности сваи, F_{dR} – несущая способность под концом сваи.

В свою очередь,

$$F_{df} = u \sum \gamma_{cf} \cdot f_i \cdot h_i, \quad (14)$$

$$F_{dr} = \gamma_{cR} \cdot R \cdot A, \quad (15)$$

где γ_{cR} , γ_{cf} – коэффициенты условий работы грунта соответственно под нижним концом и на боковой поверхности сваи, учитывающие влияние способа погружения свай на расчетные сопротивления грунта;

u – наружный периметр поперечного сечения сваи, м;

f_i – расчетное сопротивление i -го слоя грунта основания на боковой поверхности сваи, принимаемое по [33], кПа;

h_i – мощность i -го слоя грунта основания, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м;

R – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи, принимаемое по [32], кПа;

A – площадь опирания сваи на грунт, принимается по площади поперечного сечения брутто или по наибольшему диаметру, м².

Все необходимые расчеты выполнены по методикам нормативных документов [22, 32–35]. По полученным результатам построены графические зависимости эффективности работы сваи $\mathcal{E}_{гр}$ от глубины ее погружения h_n (рис. 1).

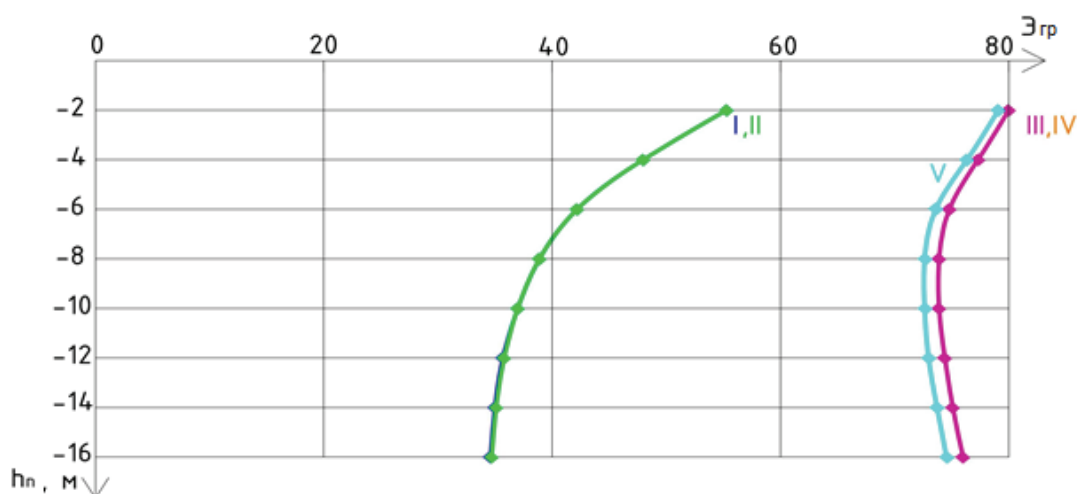


Рисунок 1. Зависимость эффективности сваи $\mathcal{E}_{гр}$ от глубины погружения h_n

Пример расчета эффективности свай по несущей способности по грунту $\mathcal{E}_{гр}$ представлен в таблице 3.

Таблица 3. Определение эффективности свай $\mathcal{E}_{гр}$ круглого поперечного сечения (I)

№	h_i , м	Отметка подошвы слоя, м	h_n , м	$h_{ср}$, м	Характеристика грунта	f_i , кН/м ²	$f_i \cdot h_i$, кН/м	$\sum f_i \cdot h_i$, кН/м	R , кПа	F_{df} , кН	F_{dR} , кН	F_d , кН	G , кН	$\mathcal{E}_{гр}$
1	2	-2	2	1	песок средней круп- ности	35	70	70	2067	88	260	348	6,3	55,3
2	2	-4	4	3		48	96	166	3200	209	403	612	12,6	48,6
3	2	-6	6	5		56	112	278	3550	349	447	797	18,9	42,2
4	2	-8	8	7		60	120	398	3800	500	479	979	25,2	38,9
5	2	-10	10	9		64	127	525	4000	660	504	1164	31,5	37,0
6	2	-12	12	11		66	133	658	4160	827	524	1351	37,8	35,7
7	2	-14	14	13		69	138	796	4320	1001	544	1545	44,1	35,0
8	2	-16	16	15		72	144	940	4480	1182	564	1746	50,4	34,6

Выводы по критерию V-1:

- 1) наибольшая эффективность соответствует минимальным глубинам погружения, а сечения III, IV и V дают слабовыраженный минимум;
- 2) сечения III, IV и V дают наибольшие значения эффективности;
- 3) эффективность сечений I и II примерно в два раза ниже эффективности сечений III и IV.

Исследование по критериям V-1 и V-3

Здесь объектом исследования были выбраны забивные железобетонные сваи квадратного (с размером стороны 0,35 м, 0,40 м и 0,45 м) и круглого (диаметром 0,35 м, 0,45 м) сечений. Длина свай составляла 14 м. Грунтовое основание – многослойное.

Эффективность работы свай определяли по двум критериям: эффективность работы свай по несущей способности по грунту и коэффициент использования материала свай.

Расчеты несущей способности свай приведены выше, а также в работе [16].

В качестве примера для свай квадратного сечения со стороной 0,4 метра приведем таблицу полученных результатов эффективности работы свай по грунту и коэффициента использования материала свай (таблица 4).

Таблица 4. Определение эффективности сваи квадратного сечения со стороной 0,4 м

№ слоя	h_n , м	F_d , тс	F_{dm} , тс	G , тс	критерий V-1 $\mathcal{E}_{гр}$	критерий V-3 $K_{эм}$
1	1	51,53	560	0,4	128,81	0,092
2	2	57,0		0,8	71,27	0,102
3	3	59,25		1,2	49,38	0,106
4	4	71,33		1,6	44,58	0,127
5	5	83,35		2,0	41,68	0,149
6	6	95,73		2,4	39,89	0,171
7	7	116,61		2,8	41,65	0,208
8	8	129,89		3,2	40,59	0,232
9	9	158,94		3,6	44,15	0,284
10	10	181,24		4,0	45,31	0,324
11	11	191,04		4,4	43,42	0,341
12	12	225,26		4,8	46,93	0,402
13	13	255,25		5,2	49,09	0,456
14	14	322,01		5,6	57,50	0,575

По результатам расчетов также были построены следующие графические зависимости, в которых по оси абсцисс отложены значения коэффициента использования материала сваи ($K_{эм}$) и эффективности сваи по несущей способности сваи по грунту ($\mathcal{E}_{гр}$); по оси ординат отложена глубина погружения сваи (h_n).

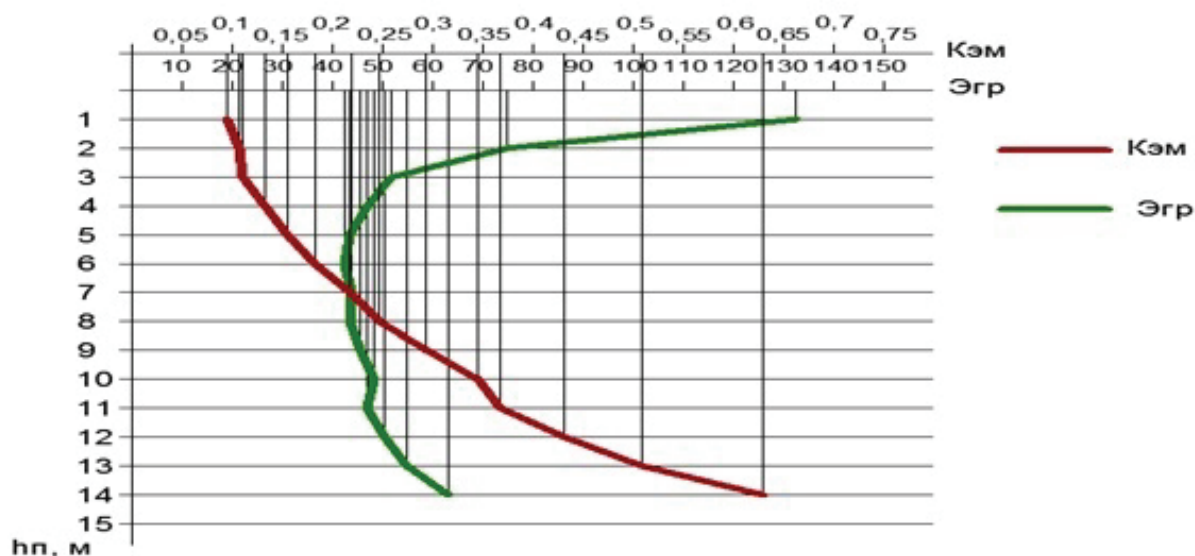


Рисунок 2. Зависимости эффективности сваи по несущей способности по грунту и коэффициента использования материала сваи от глубины погружения (квадратное сечение с размером 0,35 м)

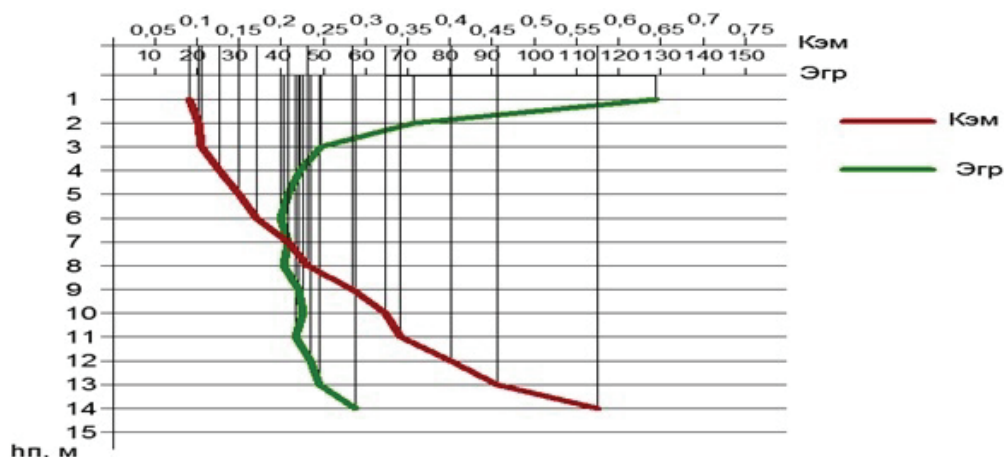


Рисунок 3. Зависимости эффективности сваи по несущей способности по грунту и коэффициента использования материала сваи от глубины погружения (квадратное сечение с размером 0,4 м)

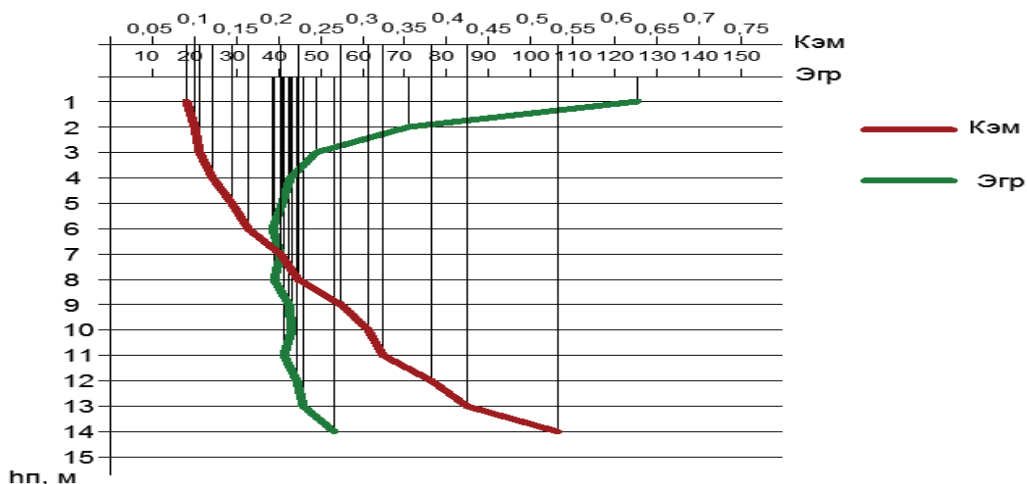


Рисунок 4. Зависимости эффективности сваи по несущей способности по грунту и коэффициента использования материала сваи от глубины погружения (квадратное сечение с размером 0,45 м)

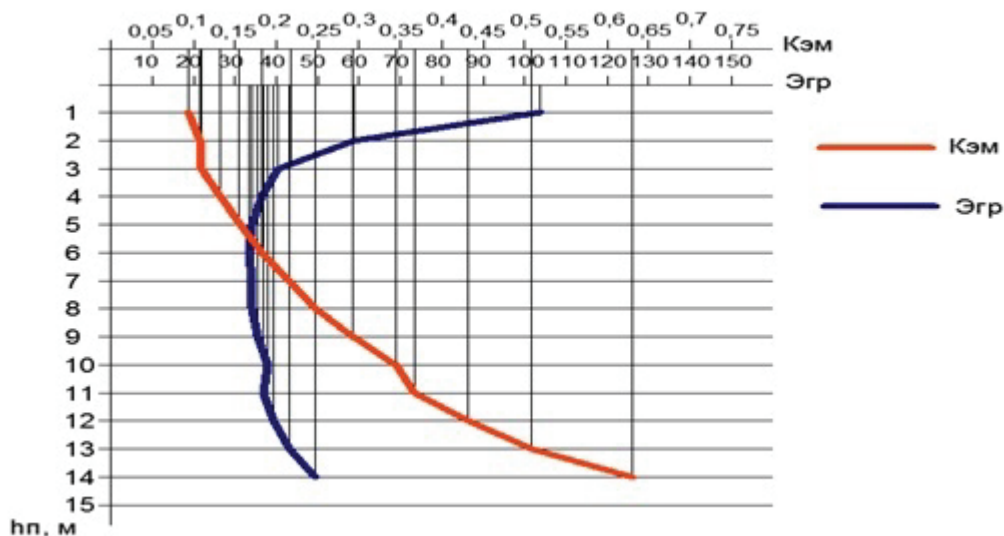


Рисунок 5. Зависимости эффективности сваи по несущей способности по грунту и коэффициента использования материала сваи от глубины погружения (круглое сечение диаметром 0,35 м)

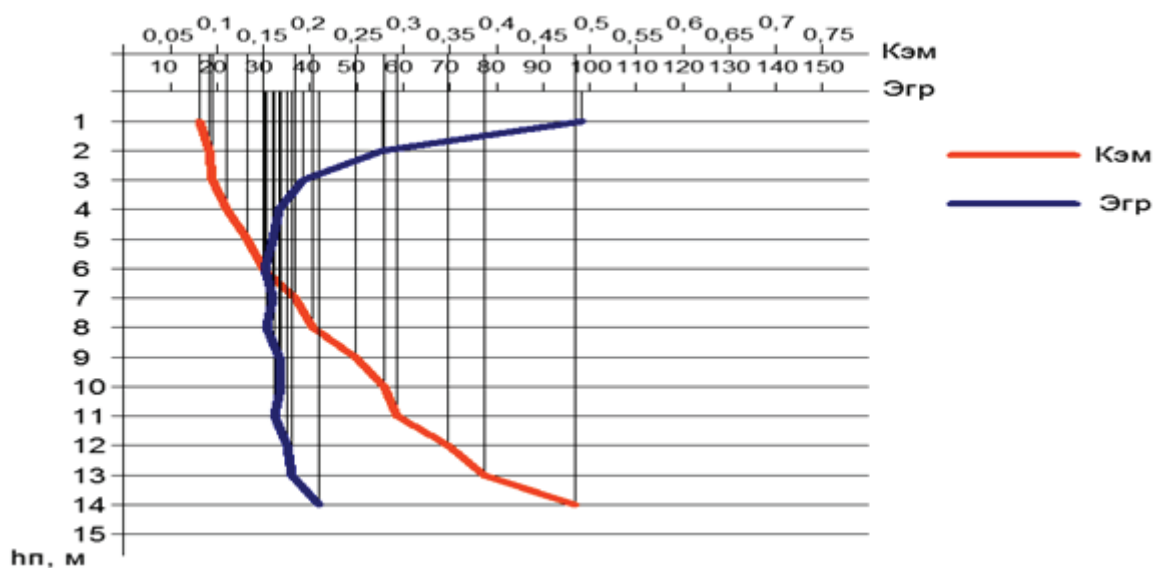


Рисунок 6. Зависимости эффективности свай по несущей способности по грунту и коэффициента использования материала свай от глубины погружения (круглое сечение диаметром 0,45 м)

Выводы по критериям V-1 и V-3:

- 1) графики эффективности свай по несущей способности по грунту для свай квадратных и круглых сечений аналогичны по форме и близки по содержанию;
- 2) значения коэффициента использования материала свай возрастают с глубиной погружения с некоторым ускорением;
- 3) неплавность кривых, а также их перегибы объясняем многослойностью грунтовой толщи свайного основания.

Заключение

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Впервые представлены аналитические зависимости и количественные оценки эффективности свай забивного типа.
2. Введение критериев оценки работы свай, таких как критерий оценки эффективности свай по несущей способности свай по грунту и критерий эффективности свай по коэффициенту использования материала свай, по мнению авторов, существенно облегчает проблему решения задач оптимизации выбора длины свай и формы ее поперечного сечения.
3. Анализ полученных результатов с точки зрения критерия эффективности работы свай по несущей способности по грунту показал:
 - а) оптимальными являются поперечные сечения в виде двутавра и близкие к нему тавровое и крестообразное сечения,
 - б) для исследованных условий оптимальной глубиной погружения является минимальная глубина. Однако следование этому выводу приводит к снижению несущей способности свайного основания, что не всегда приемлемо в строительстве. Возможно, при других грунтовых условиях и других поперечных сечениях графические зависимости изменятся.
4. Анализ полученных результатов с точки зрения критерия коэффициента использования материала свай показал существенное возрастание коэффициента использования материала свай с глубиной погружения свай, причем с некоторым ускорением. Таким образом, следует выбирать свай с максимальным отношением периметра поперечного сечения к его площади и с максимальной длиной.
5. Для дальнейшего уточнения оптимальной формы поперечного сечения свай целесообразно проведение дополнительных исследований в лабораторных условиях.

Авторы выражают искреннюю благодарность выпускнице инженерно-строительного института СПбГПУ А.В. Тимофеевой и студенту 3 курса ИСИ СПбГПУ А.Б. Теплому, принявшим активное участие в подготовке данной статьи.

Литература

1. Булатов Г.Я., Костюкова А.Ю. Новая технология – «фундамент на трубогрунте» // Инженерно-строительный журнал. 2008. №2. С. 32–37.
2. Булатов Г.Я., Колосова Н.Б. Критерии выбора вибропогружателя // Инженерно-строительный журнал. 2011. №7(25). С. 32–39.
3. Баданин А.Н., Колосов Е.С. Определение несущей способности армированного георешеткой грунтового основания // Инженерно-строительный журнал. 2012. №4(30). С. 25–32.
4. Голубков В.Н. Несущая способность свайных оснований. М.: Машстройиздат, 1950. С. 77–143.
5. Калачук Т.Г. Модульные сваи таврового сечения и составные на их основе в глинистых грунтах: дисс. ... кан. тех. наук. Белгород, 2004. 136 с.
6. Накопия М.С. Свайные фундаменты в условиях слабых грунтов в сейсмических районах // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2007. №2. С. 40–43.
7. Булатов Г. Я., Ножнов А. П. Численное моделирование влияния грунтового ядра на несущую способность трубосваи // Инженерно-строительный журнал. 2010. №2(12). С. 27–35.
8. Нуждин Л.В., Полинкевич Д.А. Прогнозирование колебаний и оптимизация конструкции свайных фундаментов, эксплуатируемых при динамическом нагружении // Свайные фундаменты. Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2004. №8. С. 113–118.
9. Проектирование свайных полей [Электронный ресурс]. URL: <http://revvork.ru/proektirovanie-svajnyix-polej1.html> (дата обращения: 25.10.13).
10. Проектирование фундаментов зданий и подземных сооружений. Учебное пособие / Под ред. Далматова Б.И. СПб.: Изд-во АСВ, 2006. 428 с.
11. Румянцев С.А., Астанков К.Ю. Повышение эффективности преодоления лобового сопротивления связных грунтов при вибропогружении свай // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2012. №4. С. 82–90.
12. Шенкман Р.И., Пономарёв А.Б. Исследование эффективности применения грунтовых свай для улучшения свайных грунтов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2011. №1. С. 89–94.
13. Rajapakse R. Pile Design and Construction Rules of Thumb. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, 2008. 444 p.
14. Dheerendra Babu M.R., Sitaram Nayak, Shivashanka R. A Critical Review of Construction, Analysis and Behaviour of Stone Columns // Geotechnical and Geological Engineering. 2013. Vol.31. Issue 1. Pp. 1–22.
15. Бахолдин Б.В., Игонькин Н. Т. К вопросу о сопротивлении грунта по боковой поверхности свай // Основания, фундаменты и подземные сооружения. М.: Стройиздат, 1969. №58. С. 9–13.
16. Булатов Г.Я., Колосова Н. Б., Теплов А.Б. Несущая способность забивных свай различных форм поперечного сечения // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. №1(6). С. 22–27.
17. Верстов В.В., Фрейдман Б.Г., Гайдо А.Н. Критерии сравнительной эффективности технологии устройства свайных фундаментов // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2004. №8/2204. URL: <http://stroim.mos.ru/nauka/d26dr2665m5.html> (дата обращения: 25.10.13).
18. Вертынский О.С. Определение несущей способности набивных конических свай // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. Т. 4. №1. С. 78–82.
19. Гуткин Ю.М. Определение коэффициента постели свайного основания подкрановых балок // Транспортное строительство. 1981. №2. С. 49.
20. Колосова Н.Б. Проблемы современного бетона и железобетона // Инженерно-строительный журнал. 2011. №8. С. 4.
21. Сафонов А. П. Несущая способность свай в глинистых грунтах при действии горизонтальной нагрузки: дисс. ... канд. тех. наук: 05. 23. 02. Свердловск, 1984. 167 с.

22. СП 50-102-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов.
23. FOREVER (Fondation RENforcees VERTicalement). Synthese des rezultates et recommandation du Projet national sur les MICROPIEUX. Paris: Ponts et chaussées, 2004. 347 p.
24. Philipponnat G., Hubert B. Fondation et ouvrages en terre. Paris: Eyrolles, 2008. 548 p.
25. Van Impe W.F. Deformations of deep foundations // Proceedings of the 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Florence, Italy, 26–30 May 1991. Florence, 1991. London: Taylor & Francis, 1991. Pp. 2638–2640.
26. Van Impe W.F. Developments in pile design // Deep Foundation Institute. 4th International Conference on Piling and Deep Foundations.. Stresa, Italy, 7–12 April 1991. Pp. 2217–2234.
27. Castro J., Sagaseta C. Deformation and consolidation around encased stone columns // Geotextiles and Geomembranes. 2011. Vol. 29. No.3. Pp. 268–276.
28. Sayed S.M., Sunna H.N., Moore P.R. Load rating of pile-supported bridges susceptible to scour // Journal of Bridge Engineering. 2013. Vol. 18. No.5. Pp. 439–449.
29. Tsinker G.P. Port engineering: planning, construction, maintenance and security. New Jersey: Harbors. Design and Construction, 2004. 881 p.
30. Joergensen H.B., Hoang L.C. Tests and limit analysis of loop connections between precast concrete elements loaded in tension // Engineering Structures. 2013. Vol. 52. Pp. 558–569.
31. Chudley R., Greeno R. Building construction handbook. Amsterdam; London: Butterworth-Heinemann, 2008. Pp. 212–229.
32. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85.
33. ГОСТ 27751-88. Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчёту.
34. СНиП 3.02.01-87. Земляные сооружения, основания и фундаменты.
35. СП 50-101-2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений.

*Георгий Яковлевич Булатов, Санкт-Петербург, Россия
Тел. раб.: +7(812)736-44-55; эл. почта: bulatov.spbgpu@gmail.com*

*Наталья Борисовна Колосова, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)932-33-51; эл. почта: po.isf@cef.spbstu.ru*

© Булатов Г.Я., Колосова Н.Б., 2013

Efficiency of piles of various cross-sectional forms

G.Ya. Bulatov

Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia
+7(812)736-44-55; e-mail: bulatov.spbgpu@gmail.com

N.B. Kolosova

Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia
+7(921)932-33-51; e-mail: po.isf@cef.spbstu.ru

Key words

efficiency of the pile; pile foundation; types of piles; pile cross-section ;driven piles

Abstract

According to the authors the lack of evaluation methods for efficiency of pile behavior leads to an increased degree of randomness in the selection of type, material, shape and placement of piles, and, as a consequence, to overspending the material, energy, labor costs and, respectively, to more expensive construction.

The work is devoted to the determination of the efficiency of piles of various cross-sectional forms (round, square, cross- shaped, T-shaped and double tee forms). A number of methods and criteria for quantitative evaluation of the efficiency of piles were proposed. Furthermore, the results of studies of the pile efficiency depending on the driving depth at the above-mentioned forms of cross-sections were given.

Researches have shown that quantitative values of pile efficiency are approximately the same for the following forms for round and square cross-section; for T-shaped and double tee; and the are exactly the same for cross-shaped and T-shaped cross-section. Analysis of considered piles forms showed that maximum efficiency was achieved under the minimum depth of 2 meters, and then it gradually decreased. Also there was found an anomaly: at a depth of 10 meters the efficiency of cross sections with the tabs (III, IV, and V-shaped branchy) again begins to rise slowly. The results allow us to optimize more accurately the selection of the pile component in the foundation design.

References

1. Bulatov G.Ya., Kostiukova A.Yu. *Magazine of Civil Engineering*. 2008. No.2. Pp. 32–37. (rus)
2. Bulatov G.Ya., Kolosova N.B. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No.7. Pp. 32–39. (rus)
3. Badanin A.N., Kolosov E.S. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No.4. Pp. 25–32. (rus)
4. Golubkov V.N. *Nesushchaya sposobnost svaynykh osnovaniy* [Bearing capacity of pile foundation]. Moscow: Mashstroyizdat, 1950. Pp. 77–143. (rus)
5. Kalachuk T.G. *Modulnye svai tavrovogo secheniya i sostavnye na ikh osnove v glinistykh gruntakh* [Module T-section piles and sectional piles based on it in clay soils]. PhD dissertation. Belgorod: 2004. 136 p. (rus)
6. Nakopiya M.S. *Earthquake engineering. Safety of structures*. 2007. No.2. Pp. 40–43. (rus)
7. Bulatov G.Ya., Nozhnov A.P. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No 2. Pp. 27–35. (rus)
8. Nuzhdin L.V., Polinkevich D.A. *Svaynye fundamenty. Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitelstvo*. 2004. No.8. Pp. 113–118. (rus)
9. *Proektirovaniye svaynykh poley* [Design of piling fields] [Online resource]. URL: <http://revvork.ru/proektirovanie-svajnyx-polej1.html> (accessed: October 25, 2013).
10. *Proektirovaniye fundamentov zdaniy i podzemnykh sooruzheniy. Uchebnoe posobiye. Pod red. Dalmatova B.I.* [Design of building foundations and underground structures. Textbook. Edited by Dalmatov B.I.]. Saint-Petersburg: ASV, 2006. 428 p. (rus)
11. Rumyantsev S.A., Astankov K.Yu. *Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2012. No.4. Pp. 82–90. (rus)
12. Shenkman R.I., Ponomarev A.B. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitelstvo i arkhitektura*. 2011. No.1. Pp. 89–94. (rus)
13. Rajapakse R. *Pile Design and Construction Rules of Thumb*. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, 2008. 444 p.

14. Dheerendra Babu, M.R., Nayak S., Shivashanka R. A Critical Review of Construction, Analysis and Behaviour of Stone Columns. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2013. Vol. 31. Issue 1. Pp. 1–22.
15. Bakholdin B.V., Igonkin N.T. *Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya*. Moscow: Stroyizdat, 1969. Vol. 58. Pp. 9–13. (rus)
16. Bulatov G. Ya., Kolosova N. B., Teplov A.B. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2013. No.1(6). Pp. 23–26. (rus)
17. Verstov V.V., Freydmann B.G., Gaydo A.N. *Montazhnye i spetsialnyye raboty v stroitelstve* [Fitter's works in construction]. 2004. No.8/2204. URL: <http://stroim.mos.ru/nauka/d26dr2665m5.html> (accessed: October 25, 2013). (rus)
18. Vertynskiy O.S. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2006. Vol. 4. No.1. Pp. 78–82. (rus)
19. Gutkin Yu.M. *Transport Construction*. 1981. No.2. P. 49. (rus)
20. Kolosova N.B. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No.8. P. 4. (rus)
21. Safonov A.P. *Nesushchaya sposobnost svay v glinistyykh gruntakh pri deystvii gorizontальной nagruzki* [Bearing capacity piles in clay soils under the action of horizontal loads]. PhD dissertation. Sverdlovsk, 1984. 167 p. (rus)
22. *SP 50-102-2003. Proektirovaniye i ustroystvo svainykh fundamentov* [Set of rules 50-102-2003. Design and installation of pile foundations]. (rus)
23. *FOREVER (FOnation REnforcees VERTicalement). Synthese des resultates et recommandation du Projet national sur les MICROPIEUX*. Paris: Ponts et chaussées, 2004. 347 p.
24. Philipponnat G., Hubert B. *Fondation et ouvrages en terre*. Paris: Eyrolles. 2008. 548 p.
25. Van Impe W.F. Deformations of deep foundation. *Proceedings of the 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Florence, Italy, 26–30 May 1991. London: Taylor & Francis, 1991. Pp. 2638–2640.
26. Van Impe W.F. Developments in pile design. *Deep Foundation Institute. 4th International Conference on Piling and Deep Foundations*. Stresa, Italy, 7–12 April 1991. Pp. 2217–2234.
27. Castro J., Sagaseta C. Deformation and consolidation around encased stone columns. *Geotextiles and Geomembranes*. 2011. No.29(3). Pp. 268–276.
28. Sayed S.M., Sunna H.N., Moore P.R. Load rating of pile-supported bridges susceptible to scour. *Journal of Bridge Engineering*. 2013. No.18(5). Pp. 439–449.
29. Tsinker G.P. *Port engineering: planning, construction, maintenance and security*. New Jersey: Harbors. Design and Construction. 2004. 881 p.
30. Joergensen H.B., Hoang L.C. Tests and limit analysis of loop connections between precast concrete elements loaded in tension. *Engineering Structures*. 2013. No.52. Pp. 558–569.
31. Chudley R., Greeno R. *Building construction handbook*. Amsterdam; London: Butterworth-Heinemann, 2008. 763 p.
32. *SP 24.13330.2011. Svaynye fundamenty. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIP 2.02.03-85* [Set of rules 24.13330.2011. Pile foundations. Updated edition of Building code 2.02.03-85]. (rus)
33. GOST 27751-88. *Nadezhnost stroitelnykh konstruksiy i osnovaniy. Osnovnye polozeniya po raschetu* [Reliability of structures and foundations. The main provisions on the calculation]. (rus)
34. *SNIP 3.02.01-87. Zemlianyye sooruzheniya, osnovaniya i fundamenty* [Building code 3.02.01-87. Earthworks, bases and foundations]. (rus)
35. *SP 50-101-2004. Proektirovaniye i ustroystvo osnovaniy i fundamentov zdaniy i sooruzheniy* [Set of rules 50-101-2004. Design and installation of the foundations of buildings and structures]. (rus)

Full text of this article in English: pp. 67–76