УДК 624.154

© В. О. Ефимов, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: efimovvo@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-2-95-99

© V. O. Efimov, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)
E-mail: efimovvo@yandex.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СДВИГОВОЙ ОСАДКИ БУРОВЫХ И ЗАБИВНЫХ СВАЙ

EXPERIMENTAL EVALUATION OF PILE DISTORTION SETTLEMENT OF BORING AND DRIVEN PILES

Предложен метод экспериментальной оценки величины сдвиговой осадки по результатам испытания грунтов натурной сваей. Оценена сдвиговая осадка для наиболее распространенных типоразмеров свай, выполненных по различным технологиям в различных грунтовых условиях (в общей сложности 157 свай). Выявлена эмпирическая зависимость величины сдвиговой осадки от геометрических параметров свай и технологии изготовления.

Ключевые слова: свая, проскальзывание, сдвиговая осадка, испытания грунтов сваями.

The article proposes a new method for experimental evaluating of the pile distortion settlement value based on the results of static soil tests with a production pile. Evaluation of the pile distortion settlement value has been carried out for the most common dimensions and types of piles which were made using various technologies in different soil conditions (the total number of 157 piles). There has been revealed an empirical equation of the value of pile distortion settlement in dependence on the geometric parameters of piles and manufacturing technology.

Keywords: pile, slip, distortion settlement, static pile test.

Введение

Понятие «сдвиговая осадка» (СО) широко используется как в научной, так и в учебной литературе, посвященной работе свай в грунте [1–8 и др.]. В работе [2] дано следующее его определение: «перемещение сваи относительно окружающего грунта, при котором начинается продавливание сваи, а сопротивление грунта по боковой поверхности сваи достигает максимального значения».

По результатам определения, а также на основании анализа источников Ф. К. Лапшин заключил, что величины СО зависят от вида грунта, его консистенции и меняются от 5 мм для песков до 25 мм для пластичных глин. Однако стоит отметить, что данные результаты в работе [9] и в других были получены преимущественно для за-

бивных свай наиболее распространенных размеров поперечного сечения — 300–400 мм, длиной до 20 м и сведены к эмпирической формуле (1) для определения СО:

$$s_{slip} = 5 \text{ мм} + 100 \text{ мм} \cdot I_L I_p, \quad (1)$$

где I_L — показатель текучести глинистого грунта;
 I_p — показатель пластичности.

Ф. К. Лапшин не указывает на зависимость величины СО от размера поперечного сечения сваи и ее длины, а о влиянии технологии замечает, что для буронабивных свай СО «будут несколько меньше, чем для забивных» [2]. В более поздней отечественной литературе термин СО использован преимущественно качественно — для описания процесса работы сваи при нагружении вертикальной нагрузкой [3, 4, 6 и др.].

В зарубежных источниках вместо термина СО применяется *displacement at full mobilization of shaft friction* (осадка в момент полной мобилизации сопротивления по боковой поверхности). Ее величину определяют ориентировочно в размере 1 % диаметра сваи [10] (не отмечены зависимости от свойств грунта, глубины залегания его слоев, технологических особенностей устройства свай). Можно предположить из контекста, что указанная величина — это верхняя оценка СО.

Цель настоящей работы — оценить величину СО в зависимости от технологии устройства, длины сваи и размера ее поперечного сечения, а также грунтовых условий на основании анализа 157 испытаний грунтов сваями при статическом нагружении.

1. Методика анализа испытаний

Для проведения анализа испытаний грунтов сваями использован метод *Chin-Kondner'a*, описанный в работах [11, 12]. Метод предполагает гиперболическую зависимость осадки сваи от приложенной вертикальной статической нагрузки в две фазы: до и после проскальзывания (независимые параметры гиперболы для каждой фазы). Этот метод был предложен для того, чтобы оценить предельную нагрузку на сваю (*ultimate force*). График испытания, построенный в осях $s/F(s) — s$, имеет точку перелома: в этот момент происходит проскальзывание.

Однако анализ испытаний показывает, что при билинейной аппроксимации графика, построенного в осях $s/F(s) — s$, часто эксперимен-

тальные точки оказываются ниже аппроксимирующих кривых (пример — см. рис. 1).

Автором настоящей статьи сделано предположение, что это связано с тем, что проскальзывание происходит неодновременно по всей длине сваи в связи с изменением с глубиной свойств грунтов и их НДС. По этой причине предлагается плавно сопрягать две прямые, а в точках касания могут быть установлены величины осадки в момент начала и завершения проскальзывания (рис. 2). Для определенности сопрягающий участок был принят параболой, что добавило к четырем независимым параметрам (по два на каждый прямой участок) еще один независимый параметр.

Все испытания разделены по способу изготовления испытываемых свай (призматические без уширений) (табл. 1). Для каждого испытания программным кодом был выполнен подбор пяти независимых параметров, определяющих положение аппроксимирующей кривой (см. рис. 2), с поиском глобального минимума среднеквадратичного отклонения. Были отброшены испытания, отвечающие следующим критериям: 1) менее пяти точек с осадкой, отличной от 0 мм; 2) отсутствовали выраженные прямолинейные участки до или после перелома; 3) аномальные графики, описанные в [13], которые плохо описываются методом *Chin-Kondner'a*.

С целью выявления зависимости СО от D , L и $I_L I_p$ была проведена трехфакторная регрессия для поиска коэффициентов в следующей модели:

$$s_{slip} = s_0 + k_D D + k_L L + k_I I_p I_L, \quad (2)$$

Рис. 1. Аппроксимация прямыми графика испытания буровой сваи длиной 18,3 м, Ø350 мм

Рис. 2. Аппроксимация прямыми с сопряжением графика испытания буровой сваи длиной 18,3 м, Ø350 мм

Таблица 1

Параметры модели

Технология изготовления свай	D , мм	L , м	s_0 , мм	$k_D \cdot 10^{-3}$ мм/мм	k_L , мм/м	k_P , мм	N	R^2
Забивная/вдавливаемая	350	8,0–23	12,7	0,0	–0,46	48	22	0,53
Непрерывного проходного шнека (НППШ, CFA)	250–550	6,0–26	1,96	11,6	–0,078	41	67	0,55
Глинистый раствор	300–620	6,7–35	4,5	0,57	–0,064	24	53	0,56
Обсадная труба	520–1180	7,0–40	3,5	–1,35	0,118	51	15	0,70

где s_0 — свободный член; k_D , k_L , k_P — коэффициенты регрессии.

Для забивных/вдавливаемых свай все сваи были квадратными со стороной 350 мм, по этой причине в модели для таких свай зависимость от размера поперечного сечения не могла быть выявлена.

2. Анализ испытаний

На сводном графике (рис. 3) приведено распределение оценок сдвиговой осадки, предлагаемых формулами (1) и (2): они дают оценки одного порядка, следовательно, модели согласуются друг с другом. Однако разброс значений от главной диагонали по формуле (2) существенно меньше.

Сравнение результата с формулой (1) показывает, что для забивных (вдавливаемых) свай длиной 6–20 м слагаемое, независимое от $I_L I_P$, составляет 3,6–10,0 мм, что согласуется с 5 мм. Однако коэффициент k_P , полученный в ходе анализа, вдвое меньше аналогичного в формуле (1).

Зависимость от размера поперечного сечения у буровых свай слаба, но у свай CFA выражен рост величины СО с ростом D . Наблюдается сни-

жение величины СО с увеличением L для всех рассмотренных видов свай, кроме выполненных под защитой обсадной трубы. Множитель перед $I_L I_P$ меняется в пределах от 25 до 50 мм. Отличие коэффициента от 100 мм в модели [2] может

Рис. 3. Сравнение моделей по формулам (1) (формула Лапшина) и (2) (предлагаемая модель)

Таблица 2

Характерные величины СО для $I_p/I_L = 0...0,15$, мм

Технология изготовления	Размеры свай	$D = 300$ мм $L = 10$ м	$D = 300$ мм $L = 20$ м	$D = 600$ мм $L = 20$ м
Забивная/вдавливаемая		8,1–15,2	3,5–10,6	–
Непрерывного проходного шнека (НПШ, CFA)		4,6–10,7	3,9–10,0	7,3–13,5
Глинистый раствор		4,1–7,7	3,4–7,0	3,6–7,2
Обсадная труба		4,2–11,9	5,4–13,1	5,0–12,0

быть объяснено тем, что большие величины I_p/I_L чаще встречаются на меньших глубинах, что в формуле (2) выделено в отдельный параметр k_L . Для всех технологий R^2 находится в пределах от 0,5 до 0,8, что позволяет считать модель удовлетворительно объясняющей изменчивость СО в зависимости от трех выделенных параметров.

Характерные значения величины сдвиговой осадки для свай в зависимости от длины (столбцы 2 и 3) и размера поперечного сечения (столбцы 3 и 4) для сравнения представлены в табл. 2.

Выводы

1. Предложен метод экспериментальной оценки величины сдвиговой осадки (СО) по результатам испытания грунтов натурной свайей.

2. Оценена СО для наиболее распространенных типоразмеров свай, выполненных по различным технологиям в различных грунтовых условиях (в общей сложности 157 свай).

3. Выявлена эмпирическая зависимость величины СО от геометрических параметров свай и технологии изготовления, которая согласуется с известными ранее оценками, но при этом дает возможность оценки величины СО в зависимости от размера поперечного сечения свай, ее длины и технологии устройства.

Библиографический список

1. Лапшин Ф. К. Определение несущей способности свай в условиях слабых грунтов Ленинграда: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1966. 180 с.
2. Лапшин Ф. К. Расчет свай по предельным состояниям. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1979. 152 с.
3. Бартоломей А. А., Омельчак И. М., Юшков Б. С. Прогноз осадки свайных фундаментов. М.: Стройиздат, 1994. 384 с.
4. Сернов В. А. Расчет осадки свайного фундамента с учетом сопротивления грунта в основании ростверка // Строительная наука и техника. 2011. № 4. С. 27–33.

5. Пронозин Я. А., Ашихмин О. В., Соловьев А. В., Степанов М. А. Сдвиговая осадка свай для некоторых характерных для юга Тюменской области грунтов // Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири: сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. Тюмень, 2014. С. 56–59.

6. Вьет Ч. Т. Взаимодействие буронабивных длинных свай конечной жесткости с окружающим и подстилающим грунтами и ростверком: дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 114 с.

7. Тер-Мартirosян А. З., Тер-Мартirosян З. Г., Вьет Ч. Т. Взаимодействие длинной сваи конечной жесткости с уширенной пятой и окружающего грунта // Инженерная геология. 2015. № 6. С. 44–51.

8. Степанов М. А. Взаимодействие комбинированных ленточно-свайных фундаментов с предварительно опрессованным грунтовым основанием: дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2015. 189 с.

9. Далматов Б. И., Лапшин Ф. К. Несущая способность висячих свай в грунтовых условиях Ленинграда // Несущая способность свай в слабых грунтах: сб. тр. Ч. 2. Л.: ЛДНТП, 1966. С. 3–12.

10. Randolph M. F. Design methods for pile groups and piled rafts // Proceedings of State of the Art Report at XIII ICSM FE. New Delhi. 1994. Vol. 5. Pp. 61–82.

11. Chin F. K. Estimation of ultimate load of piles from tests not carried to failure // Proc. 2nd Southeast Asia Conference on Soil Engineering. Singapore. 1970. Pp. 81–92.

12. Kondner R. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE. 1963. Vol. 89, Issue 1. Pp. 115–143.

13. Borel S., Bustamante M., Ganeselli L. An appraisal of the Chin method based on 50 instrumented pile tests // Ground Engineering. 2004. January. Pp. 22–26.

References

1. Lapshin F. K. *Opredelenie nesushchey sposobnosti svai v usloviyakh slabyykh gruntov Leningrada*. Diss. kand. tekhn. nauk [Determination of the bearing capacity of the

pile in the conditions of weak soils of Leningrad. PhD in Sci. Tech. diss.]. Leningrad, 1966, 180 p.

2. Lapshin F. K. *Raschet svay po predel'nyam sostoyaniyam* [Calculation of the pile ultimate boundary states]. Saratov, Saratov State University Publ., 1979, 152 p.

3. Bartolomey A. A., Omel'chak I. M., Yushkov B. S. *Prognoz osadki svaynykh fundamentov* [Forecasting of pile foundation settlement]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1994, 384 p.

4. Sernov V. A. *Raschet osadki svaynogo fundamenta s uchetom soprotivleniya grunta v osnovanii rostverka* [Calculation of pile foundation settlement with consideration of soil resistance at the base of the grillage]. *Stroitel'naya nauka i tekhnika – Construction science and engineering*, 2011, no. 4, pp. 27–33.

5. Pronozin Ya. A., Ashikhmin O. V., Solov'ev A. V. *Sdvigovaya osadka svay dlya nekotorykh kharakternykh dlya yuga Tyumenskoy oblasti gruntov* [Pile distortion settlement characteristic for some soils in the South of the Tyumen region]. *Trudy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Aktual'nye problemy stroitel'stva, ekologii i energosberezheniya v usloviyakh Zapadnoy Sibiri»* [Proc. of the Int. sci.-pract. conf. "Actual problems of construction, ecology and energy saving in the conditions of Western Siberia"]. Tyumen, 2014, pp. 56–59.

6. V'et Ch. T. *Vzaimodeystvie buronabivnykh dlinnykh svay konechnoy zhestkosti s okruzhayushchim i podstilayushchim gruntami i rostverkom*. Diss. kand. tekhn. nauk [Interaction of long bored piles of finite stiffness with the surrounding and underlying soils and foundation cap. PhD in Sci. Tech. diss.]. Moscow, 2015, 114 p.

7. Ter-Martirosyan A. Z., Ter-Martirosyan Z. G., V'et Ch. T. *Vzaimodeystvie dlinnoy svai konechnoy zhestkosti s ushirennoy pyatoy i okruzhayushchego grunta* [Interaction of a long pile of finite stiffness with a widened pile toe bulband and the surrounding soil]. *Inzhenernaya geologiya – Engineering geology*, 2015, no. 6, pp. 44–51.

8. Stepanov M. A. *Vzaimodeystvie kombinirovannykh lentochno-svaynykh fundamentov s predvaritel'no opressovannym gruntovym osnovaniem*. Diss. kand. tekhn. nauk [Interaction of combined tape-pile foundations with pre-pressed soil base. PhD in Sci. Tech. diss.]. Tyumen, 2015, 189 p.

9. Dalmatov B. I., Lapshin F. K. *Nesushchaya sposobnost' visyachikh svay v gruntovykh usloviyakh Leningrada* [Bearing capacity of friction piles in conditions of Leningrad soils]. *Sb. tr. «Nesushchaya sposobnost' svay v slabyykh gruntakh»* [Coll. works "Bearing capacity of piles in weak soils"]. Pt. 2. Leningrad, LDNTP Publ., 1966, pp. 3–12.

10. Randolph M. F. Design methods for pile groups and piled rafts. *XIII ICSM FE*, 1994, no. 5, pp. 61–82.

11. Chin F. K. *Estimation of ultimate load of piles not carried to failure*. Proc. 2nd Southeast Asia Conference on Soil Engineering, 1970, pp. 81–92.

12. Kondner R. Hyperbolic stress-strain response of cohesive soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 1963, vol. 89, iss. 1, pp. 115–143.

13. Borel S., Bustamante M., Ganeselli L. An appraisal of the Chin method based on 50 instrumented pile tests. *Ground Engineering*, 2004, pp. 22–26.