УДК 624.131

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-3-63-71

© В. В. Конюшков, канд. техн. наук, доцент
© Л. Н. Кондратьева, д-р техн. наук, профессор
© В. М. Кириллов, д-р техн. наук, профессор
© Ле Ван Чонг, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: v.konyushkov@yandex.ru, kondratjevaln@yandex.ru,
lvtrong.xyz@yandex.ru

© V. V. Konyushkov, PhD in Sci. Tech, Associate Professor
© L. N. Kondratieva, Dr. Sci. Tech., Professor
© V. M. Kirillov, Dr. Sci. Tech., Professor
© Le Van Trong, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: v.konyushkov@yandex.ru, kondratjevaln@yandex.ru,
lvtrong.xyz@yandex.ru

УСКОРЕННЫЕ СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БУРОВЫХ СВАЙ

ACCELERATED METHODS FOR DETERMINING THE BEARING CAPACITY OF DRILL PILES

Несущая способность свай — главный параметр при проектировании фундаментов, от которого зависят конструктивно-технологические решения и стоимость свайного фундамента. Часто в проектной и строительной практике возникает необходимость в сжатые сроки определить несущую способность свай по материалу и по грунту. В этом случае может быть использована методика, рекомендованная авторами настоящей статьи. Дополнительно были построены сравнительные диаграммы фактических и рассчитанных значений несущей способности свай, которые показывают соотношение несущей способности буровых свай по результатам полевых испытаний при осадке 40 мм и расчетной несущей способности свай по требованиям норм СП 24.13330.2011, и в результате обработки и анализа полученных результатов выявлены распределения несущей способности грунта по боковой поверхности и по остриям свай.

Ключевые слова: несущая способность свай, проходной шнек, под защитой обсадной трубы, под защитой глинистого раствора, полевые испытания свай.

At the design of foundations, bearing capacity of the pile is the main parameter, it may be regarded as the decisive factor when developing design and technological solutions and determining the cost of the pile foundation. Often, in design and construction practice there comes need to determine the pile bearing capacity by material and soil in a short time. In this case, the method recommended by the authors of this article can be used. In addition, there were constructed comparative diagrams of the actual and calculated values of the bearing capacity of the piles, which show the ratio of the bearing capacity of the drill piles according to the results of field tests at 40 mm subsidence and the calculated bearing capacity of the pile according to the requirements of the norms SP 24.13330.2011, and as a result of processing and analysis of the results, there was revealed the distribution of the bearing capacity of the soil on the side surface and on the edges of the piles.

Keywords: bearing capacity of the pile, auger passage, under protection of the casing, under protection of clay solution, field testing of piles.

1. Актуальность исследования темы

В исследовании проанализированы буровые сваи, выполняемые по следующим технологиям:

- с помощью проходного полового шнека;
- под защитой обсадной трубы;
- под защитой глинистого раствора.

Ниже представлена таблица некоторых геометрических параметров свай, а также интервалы вдавливающих нагрузок при испытаниях.

Целью настоящего исследования является разработка ускоренного способа определения несущей способности буровых свай по материа-

Таблица 1

Геометрические параметры свай и значения нагрузки при испытаниях

Наименование технологии \ Параметр	Диаметр свай D , м	Длина свай L , м	Максимальная нагрузка при испытаниях N , кН
Проходной шнек	До 0,67	До 28	До 3500
Под защитой обсадной трубы	До 0,88	До 35	До 4000
Под защитой глинистого раствора	До 0,62	До 35	До 3500

лу и по грунту, а также получение сравнительных диаграмм фактических и рассчитанных значений несущей способности свай, показывающих соотношение несущей способности буровых свай по результатам полевых испытаний при осадке 40 мм (F_u) и расчетной несущей способности свай по требованиям норм (СП 24.13330.2011). Дополнительно в результате обработки и анализа полученных результатов были выявлены распределения несущей способности грунта по боковой поверхности и по остриям свай.

2. Краткое описание технологий изготовления буровых свай

Технология проходного полого шнека проявила себя с положительной стороны при применении в среднедеформируемых грунтах и эффективно зарекомендовала себя при работах, проводимых в больших толщах песков, тугопластичных и полутвердых суглинков — в условиях, когда применение технологии изготовления набивных свай уплотнения ограничивается [1–3].

При прохождении шнека в массиве грунта происходит частичное разуплотнение контактной зоны «грунт — свая» вследствие процесса бурения скважины.

К достоинствам данной технологии можно отнести:

- высокую производительность, которая значительно выше технологий устройства свай с обсадной трубой или под защитой глинистого раствора;
- относительную экономичность по сравнению с другими технологиями буровых свай.

К недостаткам технологии можно отнести следующее:

- при работе в слабых водонасыщенных грунтах на поверхность может извлекаться объем грунта, значительно превышающий геометриче-

ский объем скважины (эффект налипания грунта на шнек);

- высокая вероятность образования дефектов в теле свай в сильнодеформируемых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтах.

Технология обсадной трубы состоит в погружении инвентарной трубы с одновременным вращением и вдавливанием. Как правило, толщина стенки трубы составляет до 4 мм. Колонна обсадной трубы состоит из жестко закрепленных между собой отдельных секций. Данная технология устройства свай применима в грунтах, имеющих низкие физико-механические показатели, а также в водонасыщенных грунтах. Обсадная труба предотвращает неизбежное обрушение стенок пробуриваемой скважины, тем самым формируя четкие границы будущей свай [4–6].

К достоинствам данной технологии можно отнести:

- возможность устройства свай больших геометрических параметров: длины и диаметра;
- высокую несущую способность свай по грунту и по материалу по сравнению с полым шнеком и глинистым раствором.

Недостатки технологии:

- возможность перебора грунта из скважины в результате эффекта подсоса;
- высокая стоимость по сравнению с другими технологиями буровых свай.

Технология изготовления свай под защитой глинистого раствора максимально эффективна в неустойчивых и водонасыщенных грунтах.

В тело пробуренной скважины непрерывно происходит подача глинистого раствора, который предотвращает обрушение стенок скважины за счет большого объемного веса, которым обладает раствор. С помощью глинистого раствора создается избыточное давление на любой

глубине, вследствие чего грунтовый массив удерживается на стенках скважины.

Плотность глинистого раствора находится в диапазоне от 1,05 до 1,25 г/см³. При таком значении плотности глинистый раствор удерживает стенки скважины, дополнительно создавая тонкую, но довольно устойчивую корку. При циркуляции поток раствора вымывает разрыхленные породы на поверхность. Бетонирование свай производится методом вертикально перемещающейся трубы. При заполнении скважины бетонной смесью глинистый раствор вытесняется восходящей бетонной смесью. В процессе бетонирования глинистый раствор вытесняется по затрубному пространству в зону устья скважины, после чего отводится в отстойник по направляющим лоткам для очистки и вторичного использования [7, 8].

К достоинствам данной технологии можно отнести:

- наиболее щадящую технологию производства работ в условиях стесненной городской застройки.

К недостаткам технологии относятся:

- необходимость устройства на строительной площадке мини-завода с хранением, обработкой и подачей бентонитовой глины;
- загрязненность площадки бентонитовым шламом;
- высокая стоимость по сравнению с полым шнеком.

3. Краткая характеристика инженерно-геологических условий с полевыми испытаниями свай

Приведем краткую характеристику инженерно-геологических условий, в которых проводились полевые испытания свай в Санкт-Петербурге. Согласно сравнительной статисти-

ческой обработке, по боковой поверхности свай преимущественно расположены грунты с модулем деформации до 10 МПа (до 60 %). Под острием свай преимущественно расположены грунты с модулем деформации от 10 до 20 МПа (до 59 %). Ниже представлена таблица распределения модуля деформации грунтов по боковой поверхности и под острием свай.

4. Несущая способность свай по материалу

Несущая способность свай по материалу определяется по формуле

$$F_{dm} = \gamma_c \varphi (\gamma_{cb} b \gamma_{cb}' R_b A_b + \gamma_s R_{sc} A_s), \quad (1)$$

где γ_c — коэффициент условий работы свай (при $D > 0,2$ м $\gamma_c = 1$); φ — коэффициент продольного изгиба, для низкого ростверка $\varphi = 1$; A_b , A_s — площадь поперечного сечения бетона и арматуры соответственно, м²; далее согласно п. 7.1.9 СП 24.13330.2011: γ_{cb} — понижающий коэффициент условий работы бетона, $\gamma_{cb} = 0,85$; γ_{cb}' — дополнительный понижающий коэффициент, $\gamma_{cb}' = 0,8(0,7)$; γ_s — коэффициент условия работы арматуры, $\gamma_s = 1$; R_b — расчетное сопротивление бетона В35 сжатию, $R_b = 19\,500$ кПа; R_{sc} — расчетное сопротивление арматуры А500 сжатию, $R_{sc} = 400\,000$ кПа.

Ниже на рис. 1 представлен график несущей способности свай по материалу в зависимости от диаметров свай, изготавливаемых по различным технологиям.

По графику на рис. 1 можно определить несущую способность свай по материалу железобетонного сечения.

5. Несущая способность свай по грунту

Несущая способность свай по грунту рассчитывается по формуле п. 7.2.6 СП 24.13330.2011 с учетом примечания табл. 7.8 СП 24.13330.2011:

$$F_d = \gamma_c (\gamma_{cr} R A + u \sum \gamma_{cf} f_i h_i), \quad (2)$$

Таблица 2

Распределение модуля деформации грунтов по боковой поверхности и под острием свай

Модуль деформации E , МПа	Процент распределения грунта по боковой поверхности, %	Процент распределения грунта под острием свай, %
≤ 10	60	6
$10 < E \leq 20$	30	59
$20 < E \leq 30$	7	24
$30 < E \leq 40$	3	11

где γ_c — коэффициент условий работы свай, $\gamma_c = 1$; γ_{cr} — коэффициент условий работы грунта под нижним концом, $\gamma_{cr} = 1$; R — расчетное сопротивление грунта под нижним концом свай, кПа; A — площадь опирания свай на грунт, м²; u — периметр поперечного сечения ствола свай, м; γ_{cf} — коэффициент условий работы грунта по боковой поверхности свай по табл. 7.6 СП 24.13330.2011; f_i — расчетное сопротивление грунта по боковой поверхности свай, кПа; h_i — толщина i -го слоя грунта, расположенного вдоль боковой поверхности свай, м.

В исследовании была вычислена несущая способность свай по формуле СП 24.13330.2011, проведена статистическая обработка результатов полевых испытаний свай на вдавливающую нагрузку¹ и сравнены значения несущей способности свай, изготовленных по различным технологиям. Кроме этого, были вычислены расчетные сопротивления грунта по боковой поверхности и под пятой свай.

На рис. 2–7 приведены результаты определения несущей способности свай с помощью расчетов и при полевых испытаниях. Как видно на рис. 2–7, фактическая несущая способность свай

выше расчетной в 1,4–1,7 раза. При этом расчетные сопротивления грунта по боковой поверхности свай составляют 20 % от сопротивления грунта под пятой свай.

На рис. 8 можно увидеть, что несущая способность грунта по боковой поверхности свай почти в два раза превышает несущую способность грунта под пятой свай.

На основе статистической обработки результатов полевых испытаний получена формула для ускоренного определения несущей способности свай по грунту:

$$F_d = R(A + 0,2\gamma_{cf}uL), \quad (3)$$

где R , A , u , γ_{cf} — обозначения из формулы (2); L — расстояние от планировочной отметки рельефа до острия свай, м.

Заключение

В настоящем исследовании была проведена полномасштабная статистическая обработка полевых испытаний 590 свай. Согласно результатам исследования, по боковой поверхности свай преимущественно расположены сильно-деформируемые грунты с модулем деформации до 10 МПа (60 %). Под острием свай преимущественно расположены среднедеформируемые грунты с модулем деформации от 10 до 20 МПа (59 %).

Рис. 1. Несущая способность свай по материалу в зависимости от диаметров свай, выполненных по различным технологиям

¹ Результаты статических полевых испытаний свай предоставлены генеральным директором ООО «ПКТИ Фундамент-тест» Г. В. Левинтовым.

Рис. 2. Сравнительная диаграмма фактических и рассчитанных значений несущей способности свай при помощи проходного шнека

Рис. 3. Распределение сопротивления по боковой поверхности свай и под ее острием для технологии проходного шнека

Рис. 4. Сравнительная диаграмма фактических и рассчитанных значений несущей способности свай под защитой обсадной трубы

Рис. 5. Распределение сопротивления по боковой поверхности свай и под ее острием под защитой обсадной трубы

Рис. 6. Сравнительная диаграмма фактических и рассчитанных значений несущей способности свай под защитой глинистого раствора

Рис. 7. Распределение сопротивления по боковой поверхности свай и под ее острием под защитой глинистого раствора

Рис. 8. Сравнительная диаграмма несущей способности грунта по боковой поверхности и под острием свай

Несущая способность буровых свай по материалу в зависимости от сечения и классов бетона и арматуры составляет от 800 до 11 000 кН.

Несущая способность буровых свай по грунту в зависимости от диаметра, длины, инженерно-геологических условий площадки и технологии изготовления может составлять от 500 кН до 4000 кН и более.

Несущая способность буровых свай по результатам полевых статических испытаний (F_u) значительно превышает расчетную несущую способность (F_d) по СП 24.13330.2011. Соотношение фактической несущей способности к расчетной составляет $F_u / F_d = 1,4 \dots 1,7$.

Сопротивление грунта по боковой поверхности свай составляет порядка 20 % от сопротивления грунта под острием свай. Однако при этом основной вклад в несущую способность буровых свай по грунту вносит несущая способность грунта по боковой поверхности. Это объясняется тем фактом, что буровые сваи имеют достаточно большие длины (до 35 м) и их несущая способность по грунту обеспечивается преимущественно боковой поверхностью свай. Таким образом, несмотря на наличие сильнодеформируемых грунтов по боковой поверхности свай (модуль деформации до 10 МПа у 60 % свай), площадь боковой поверхности свай значительно превышает площадь острия ($ul \gg A$), тем самым внося основной вклад в несущую способность свай по грунту.

На основе анализа и статистической обработки результатов полевых испытаний предлагается ускоренная методика определения несущей способности свай по материалу и по грунту, которая может применяться в качестве предварительной оценки при проектировании и полевых испытаниях на строительных площадках.

Библиографический список

1. Еришов А. В., Нутрихин В. В. Оценка несущей способности набивных свай с использованием данных статического зондирования // Инженерные изыскания. 2011. № 7. С. 42–52.
2. Конюшков В. В. Несущая способность буроинъекционных свай на вертикальную и горизонтальную нагрузки с учетом технологии их изготовления: дис. ... канд. техн. наук. Л., 2007. 217 с.
3. Конюшков В. В. К определению несущей способности буроинъекционных свай усиления // Межвуз. темат. сб. тр. Санкт-Петербургского гос. архит.-строит. ун-та. СПб.: СПбГАСУ, 2006. С. 106–110.
4. Конюшков В. В., Улицкий В. М. Оценка несущей способности буроинъекционных свай // Вестник гражданских инженеров. 2007. № 2 (11). С. 52–57.
5. Конюшков В. В., Улицкий В. М. Исследование несущей способности буроинъекционных свай с учетом технологии их изготовления // Известия Орловского гос. техн. ун-та. 2007. № 2-14. С. 68–74.
6. Мангушев Р. А., Кошман А. В. Об определении несущей способности буронабивных и буроинъекционных свай // Материалы 54-й науч. конф. профессоров, преподавателей, научных работников, инжене-

ров и аспирантов университета. СПб.: СПбГАСУ, 1997. С. 23–24.

7. Дьяконов И. П., Веселов А. А., Кондратьева Л. Н. Теоретические предпосылки оценки величины трения по боковой поверхности свай «Фундекс» // Жилищное строительство. 2017. № 11. С. 30–33.

8. Конюшков В. В., Веселов А. А., Кондратьева Л. Н. Комплексный анализ результатов инженерных изысканий для проектирования, строительства и эксплуатации сооружений на территориях со склоновыми процессами // Известия Томского политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 11. С. 111–125.

9. Верстов В. В., Гайдо А. Н. Технология устройства свай и свайных фундаментов. СПб.: СПбГАСУ, 2010. 180 с.

10. Мангушев Р. А., Ершов А. В., Осокин А. И. Современные свайные технологии. 2-е изд., перераб. и доп. М.: АСВ, 2010. 240 с.

11. Далматов Б. И., Лапшин Ф. К., Россихин Ю. В. Проектирование свайных фундаментов в условиях слабых грунтов / под ред. Б. И. Далматова. Л.: Стройиздат, 1975. 240 с.

12. Мангушев Р. А., Карлов В. Д., Сахаров И. И., Осокин А. И. Основания и фундаменты. М.: АСВ, 2011. 392 с.

13. Мангушев Р. А., Конюшков В. В., Дьяконов И. П. Анализ практического применения завинчиваемых набивных свай // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2014. № 5. С. 11–16.

14. Мангушев Р. А., Готман А. Л., Знаменский В. В., Пономарев А. Б. Свай и свайные фундаменты. Конструирование, проектирование и технологии / под ред. Р. А. Мангушева. М.: АСВ, 2015. 320 с.

15. Мангушев Р. А., Карлов В. Д., Сахаров И. И. Механика грунтов. М.: АСВ, 2009. 264 с.

References

1. Ershov A. V., Nutrikhin V. V. *Otsenka nesushchey sposobnosti nabivnykh svay s ispol'zovaniem dannykh staticheskogo zondirovaniya* [Estimation of the bearing capacity of piles using data from the static sensing]. *Inzhenernye izyskaniya – Engineering surveys*, 2011, no. 7, pp. 42–52.

2. Konyushkov V. V. *Nesushchaya sposobnost' buroin'ektsionnykh svay na vertikal'nyu i gorizonta'lnuyu nagruzku s uchetom tekhnologii ikh izgotovleniya. Diss. kand.tekhn. nauk* [Bearing capacity of drill-injection piles on vertical and horizontal loads taking into account the technology of their manufacture. PhD in Sci. Tech. diss.]. Leningrad, 2007, 217 p.

3. Konyushkov V. V. *K opredeleniyu nesushchey sposobnosti buroin'ektsionnykh svay usileniya* [About

assessing the bearing capacity of drill-injection piles]. *Mezhvuz. temat. sb. tr. Sankt-Peterburgskogo gos. arkhitekt.-stroit.un-ta* [Inter-university thematic coll. works of St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2006, pp. 106–110.

4. Konyushkov V. V., Ulitskiy V. M. *Otsenka nesushchey sposobnosti buroin'ektsionnykh svay* [Assessing the bearing capacity of drill-injection piles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2007, no. 2 (11), pp. 52–57.

5. Konyushkov V. V., Ulitskiy V. M. *Issledovanie nesushchey sposobnosti buroin'ektsionnykh svay s uchetom tekhnologii ikh izgotovleniya* [Study of the bearing capacity of drilling injection piles taking into account their production technology]. *Izvestiya Orlovskogo gos.tekhn.un-ta – Bulletin of Orel State Technical University*, 2007, no. 2(14), pp. 68–74.

6. Mangushev R. A., Koshman A. V. *Ob opredelenii nesushchey sposobnosti buronabivnykh i buroin'ektsionnykh svay* [On the determination of the bearing capacity of bored and drill-injection piles]. *Trudy 54-y nauch. konf. rofessorov, prepodavateley, nauchnykh rabotnikov, inzhenerov i aspirantov universiteta* [Proc. of the 54-th sci. conf. of professors, teachers, researchers, engineers and graduate students of the university]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 1997, pp. 23–24.

7. D'yakonov I. P., Veselov A. A., Kondrat'eva L. N. *Teoreticheskie predposylki otsenki velichiny treniya po bokovoy poverkhnosti svai «Fundeks»* [Theoretical background estimation of the magnitude of friction on the lateral surface of the “Fundex” piles]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing construction*, 2017, no. 11, pp. 30–33.

8. Konyushkov V. V., Veselov A. A., Kondrat'eva L. N. *Kompleksnyy analiz rezul'tatov inzhenernykh izyskaniy dlya proektirovaniya, stroitel'stva i ehkspluatatsii sooruzheniy na territoriyakh so sklonovymi protsessami* [Comprehensive analysis of the results of engineering surveys for the design, construction and operation of facilities in areas with slope processes]. *Izvestiya Tomskogo politekhn. un-ta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Engineering resources*, 2017, vol. 328, no. 11, pp. 111–125.

9. Verstov V. V., Gaydo A. N. *Tekhnologiya ustroystva svay i svaynykh fundamentov* [The technology of piling and pile foundation designs]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2010, 180 p.

10. Mangushev R. A., Ershov A. V., Osokin A. I. *Sovremennye svaynye tekhnologii* [Modern pile technologies]. 2-nd ed., revised. Moscow, ASV Publ., 2010, 240 p.

11. Dalmatov B. I., Lapshin F. K., Rossikhin Yu. V. *Proektirovanie svaynykh fundamentov v usloviyakh slabyykh gruntov* [Design of pile foundations in conditions of weak

soils]. Ed. by Dalmatov B. I. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1975, 240 p.

12. Mangushev R. A., Karlov V. D., Sakharov I. I., Osokin A. I. *Osnovaniya i fundamenty* [Bases and foundations]. Moscow, ASV Publ., 2011, 392 p.

13. Mangushev R. A., Konyushkov V. V., D'yakonov I. P. *Analiz prakticheskogo primeneniya zavinchivaemykh nabivnykh svay* [Analysis of practical application of screwed stuffed piles]. *Osnovaniya,*

fundamenty i mekhanika gruntov – *Bases, foundations and soil mechanics*, 2014, no. 5, pp. 11–16.

14. Mangushev R. A., Gotman A. L., Znamenskiy V. V., Ponomarev A. B. *Svai i svaynye fundamenty. Konstruirovanie, projektirovanie i tekhnologii* [Piles and pile foundations. Engineering, design and technology]. Ed. by Mangushev R. A. Moscow, ASV Publ., 2015, 320 p.

15. Mangushev R. A., Karlov V. D., Sakharov I. I. *Mekhanika gruntov* [Mechanics of soil]. Moscow, ASV Publ., 2009, 264 p.