

Теория расчета строительных конструкций

УДК 624.131

DOI: 10.14529/build160201

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОСНОВАНИЯ БУРОВЫХ СВАЙ

Л.М. Борозенец, Е.А. Ушакова

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти

Представлены результаты комплексного экспериментально-теоретического исследования несущей способности основания по боковой поверхности ствола опытной буровой сваи, а также такой же сваи с грунтоуплотненным тангенсоидом вращения; рассмотрены особенности взаимодействия бетонной смеси в процессе укладки и твердения ее в скважине, а также бетонного ствола сваи под нагрузкой с окружающим сваю грунтом естественного состояния; показаны методологии определения несущей способности боковой поверхности ствола буровой сваи и расчета несущей способности сваи с грунтоуплотненным тангенсоидом вращения.

Ключевые слова: несущая способность, основание, буровая свая, ствол, боковая поверхность, ствол, тангенсоид вращения, нижний конец, грунтоуплотнение, мессдоза, нагрузка, давление, сопротивление, грунт.

Введение

Сваи, выполняемые в буровых скважинах, относятся к буровым, при этом грунт из объема скважины извлекается полностью. Несущая способность свай в значительной степени определяется сопротивлением грунта, действующим по боковым поверхностям их стволов и в меньшей мере – грунтоуплотненными основаниями их нижних концов. Однако отсутствие объективного научного обоснования расчетного исследования несущей способности свай, сравнимого по точности с результатами экспериментальных исследований, не позволяет разработать методологии достоверного определения их несущей способности. Поэтому создание объективного научного обоснования расчетного исследования и разработка методологий достоверного определения несущей способности оснований буровых свай являются актуальной проблемой и задачей настоящего исследования. Отсюда следует цель исследования – получение методик верных инженерных расчетов несущей способности только боковой поверхности ствола сваи и боковой поверхности ствола сваи с грунтоуплотненным тангенсоидом вращения. Экспериментальные исследования проводились на площадке с грунтовыми условиями, представленными мощным слоем элювиальных суглинков полутвердой консистенции. Испытывались опытные буровые сваи Б-3 длиной 3,14 м и Б-1 длиной 3 м с диаметрами 216 мм. Для исключения из работы нижнего конца сваи Б-3 под ним предусматривалась полость. После тщательного замера глубины скважины, в ней на стержень опускался жестко фиксируемый металлический диск диаметром 210 мм, поверх которого закреплялась резиновая диафрагма диаметром 240 мм. Такая конструкция исключала попадание бетонной смеси в полость

под нижним концом сваи. Радиальное давление по контуру сваи при ее изготовлении и загрузке измерялось с помощью тензорезисторных преобразователей давлений типа ПДП-70/II конструкции ЦНИИСК, тарировка которых выполнялась дважды – до установки в скважины и после откопки сваи по окончании испытаний. Фиксация по высоте и обеспечение контакта мессдоз с грунтом осуществлялась специальными приспособлениями, устанавливаемыми в штрабах, выполненных на противоположных сторонах скважин по длине свай путем срезки части грунта со стенок шаблоном в виде кольца с ножами. Установка мессдоз выполнялась в кондукторах, состоящих из металлических пластин – держателя и упора, соединенных между собой стержнями на шарнирах. Мессдозы были установлены на глубинах 1 м и 3 м. Скважина, после ее подготовки заполнялась свободным сбросом бетонной смесью с осадкой конуса 14 см. Статические испытания свай выполнялись по ГОСТ 5686-78* гидравлическим домкратом с упором в грузовую платформу, с построением графиков зависимости осадок от нагрузок буровых свай. Анализ результатов эксперимента позволяет заключить, что после твердения бетона в грунте ненарушенной структуры основания буровой сваи давление на ствол не передается, а при загрузке оно проявляется и возрастает.

Давление грунта на боковую поверхность ствола буровой сваи

В качестве опытной сваи выбрана буровая свая Б-3. Схема сваи показана на рис. 1. Давления зарегистрированные мессдозой на глубине одного метра сразу после бетонирования сваи составили 9,4 кПа, 7,1 кПа, 4,8 кПа [1]. Затем в течение одного часа давления снижались до значений 4,8 кПа,

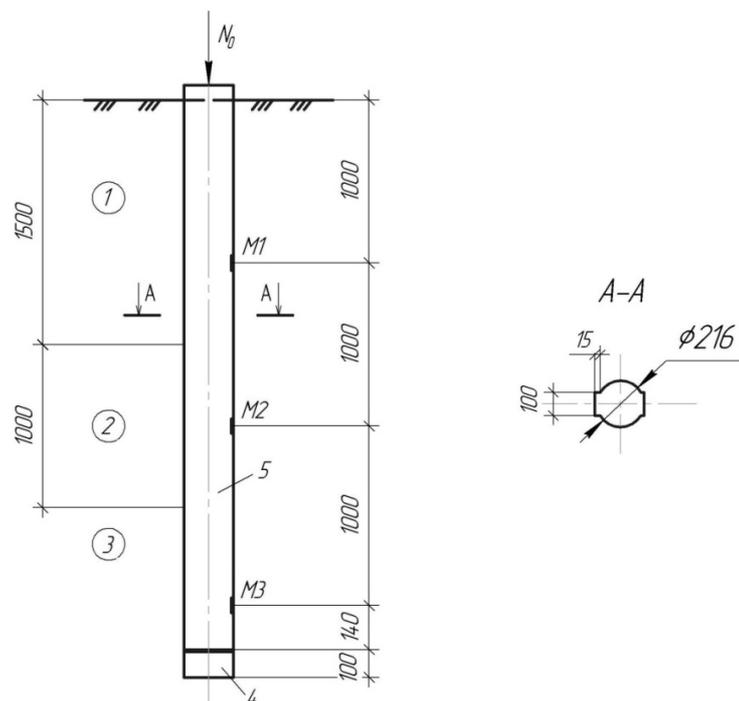


Рис. 1. Схема буровой сваи Б-3: 1, 2, 3 – слои грунтов; M1, M2, M3 – месдозы; 4 – полость; 5 – свая

3,5 кПа, 2,4 кПа от бокового удельного давления скелета инертного заполнителя бетона, что объясняется вовлечением воды в процесс гидратации и гелеобразования в частицах цемента.

От одного часа до двух часов изменения давления не наблюдалось. Через одни сутки давления опять повысились и составили 5,7 кПа, 4,8 кПа, 4,7 кПа от бокового удельного давления скелета инертного заполнителя набухающего бетона. На восьмые сутки давления упали от усадки бетона при твердении до нуля и больше не проявлялись. На рис. 2, а показан характерный график изменения давления грунта на боковую поверхность сваи наблюдаемого по месдозе на глубине одного метра. После набора прочности бетоном производи-

лось загрузке сваи нагрузкой. График статических испытаний буровой сваи Б-3 показан на рис. 2, б. Перед нагружением давление грунта составило 4,83 кПа, 3,72 кПа, 2,43 кПа. Возрастание давления от 2,43 кПа началось со ступени загрузки 40 кН и закончилось на ступени нагрузки 60 кН со значением 7,28 кПа. По всем месдозам при предельной несущей способности грунта по боковой поверхности сваи давления составили 10,53 кПа, 8,52 кПа, 7,28 кПа.

Удельное сцепление грунта по зонам расположения месдоз определялось следующими значениями: на глубине одного метра – 34,6 кПа, на глубине двух метров – 27,9 кПа, на глубине трех метров – 24,2 кПа. Угол внутреннего трения $\varphi = 22^\circ$.

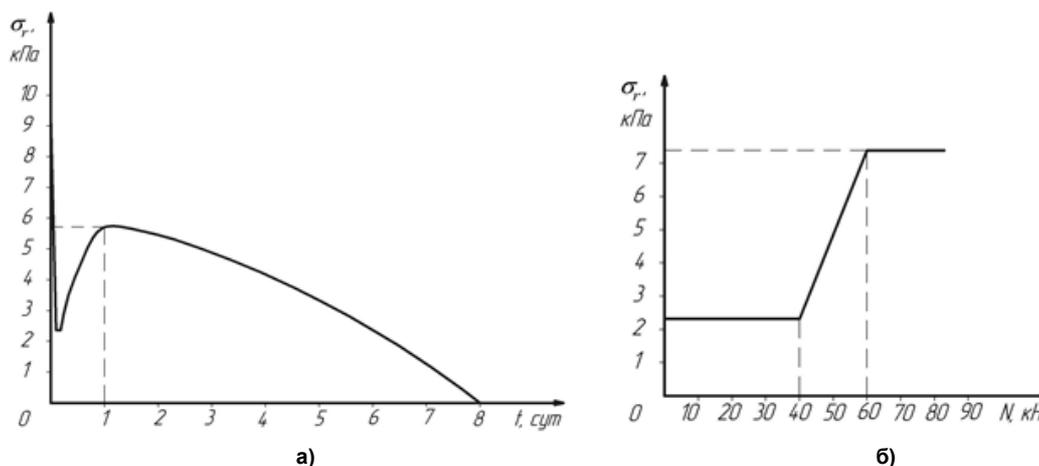


Рис. 2. Характерные графики изменения давлений на боковую поверхность опытной буровой сваи Б-3: а – на глубине одного метра, б – на глубине трех метров

Угол внутреннего трения упругости $\varphi_e = 17,9^\circ$. По уравнению для определения горизонтальной составляющей упругости структурного сцепления грунта получаются следующие значения: $\sigma_1 = c_1 \cdot \sin \varphi_e = 10,6$ кПа; $\sigma_2 = c_2 \cdot \sin \varphi_e = 8,6$ кПа; $\sigma_3 = c_3 \cdot \sin \varphi_e = 7,4$ кПа. Из сравнения полученных расчетных значений горизонтальной составляющей упругости структурного сцепления грунта с результатами замеров месдозами делается вывод об их адекватности. На основании этого можно заключить, что при критической нагрузке на сваю месдозы замеряют горизонтальную составляющую упругого отпора грунта. Совпадение расчетных значений и опытных данных свидетельствует о достоверности замеренных с помощью месдоз величин радиальных давлений грунта на сваю. Проведенная после испытаний откопка опытной сваи Б-3 подтвердила, что в работе участвовала только ее боковая поверхность, так как под нижним концом сваи сохранился зазор, устроенный при ее изготовлении. Предельные давления грунта на ствол сваи при критической нагрузке определяются последующим расчетным исследованием.

Методология определения несущей способности боковой поверхности ствола буровой сваи

Для расчетного определения несущей способности боковой поверхности буровой сваи Б-3 выбираются уравнения состояний предельных равновесий, в состав которых входят значения предельных сопротивлений грунта по боковой поверхности при критической нагрузке [2]. Критические нагрузки на сваи определены экспериментально и составили для буровой сваи Б-3 $N = 82$ кН при предельной осадке $S = 3$ мм (рис. 3).

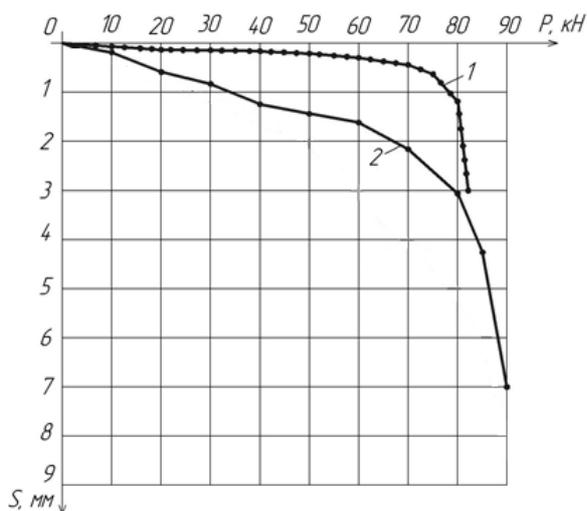


Рис. 3. Графики зависимости «нагрузка – осадка» буровых свай: 1 – свая Б-3 (по боковой поверхности ствола сваи); 2 – свая Б-1

Грунты – глины и суглинки, макропористые I типа просадочности, следующей литологии.

1-й слой: $h_1 = 1,5$ м; $c_1 = 34,6$ кПа; $\varphi_1 = 23^\circ$; $e_1 = 0,93$; $\gamma_1 = 17$ кН/м³; $\gamma_{d1} = 14,4$ кН/м³.

2-й слой: $h_2 = 1,0$ м; $c_2 = 27,9$ кПа; $\varphi_2 = 22^\circ$; $e_2 = 0,78$; $\gamma_2 = 18,5$ кН/м³; $\gamma_{d2} = 15,2$ кН/м³.

3-й слой: $h_3 = 0,64$ м; $c_3 = 24,2$ кПа; $\varphi_3 = 21^\circ$; $e_3 = 0,79$; $\gamma_3 = 18,8$ кН/м³; $\gamma_{d3} = 15,3$ кН/м³.

Схема буровой сваи Б-3 показана на рис. 1. Периметр сложного поперечного сечения ствола сваи $U = 712$ мм. Приведенный радиус ствола сваи $R = U / 2\pi = 114$ мм. Нагрузки на основание сваи: от массы сваи $N_c = \pi \cdot R^2 \cdot l \cdot \gamma_6 = 3,13$ кН; от массы домкрата $N_d = 0,5$ кН; дополнительная внешняя нагрузка $N_0 = 82$ кН. Общая нагрузка на основание сваи $N = N_0 + N_c + N_d = 85,6$ кН.

Несущая способность по расчету:

1-го слоя. $F_{d1} = A_1(\Delta\sigma_{d,1} + c_1) = 48,20$ кН.
 $A_1 = h_1 U = 1,068$ м². $\Delta\sigma_{d,1} = 10,53$ кПа.

2-го слоя. $F_{d2} = A_2(\Delta\sigma_{d,2} + c_2) = 25,93$ кН.
 $A_2 = h_2 U = 0,712$ м². $\Delta\sigma_{d,2} = 8,52$ кПа.

3-го слоя. $F_{d3} = A_3(\Delta\sigma_{d,3} + c_3) = 14,35$ кН.
 $A_3 = h_3 U = 0,456$ м². $\Delta\sigma_{d,3} = 7,28$ кПа.

Общая несущая способность $F_d = F_{d1} + F_{d2} + F_{d3} = 88,5$ кН, что превышает общую нагрузку на основание сваи $N = 85,6$ кН на 3,2%, т. е. результат исследования получился удовлетворительной. Следовательно, на боковую поверхность сваи Б-3 действует давление удельного сцепления грунта и частично боковое удельное давление веса скелета грунта, замеренные по слоям при критической нагрузке на сваю.

Предельная нелинейная сдвиговая деформация грунта по боковой поверхности цилиндрического ствола буровой сваи

На основании сделанного вывода о том, что на боковые поверхности стволов буровых свай действуют давления упругости грунтов, принимается положение о характере происхождения предельной нелинейной сдвиговой деформации грунта, действующей по боковым поверхностям свай, как нелинейных упругих объемно-сдвиговых. С использованием результатов исследований, находится значение коэффициента пропорциональности нелинейной упругой объемной деформации грунта, как отношение величины осадки $S_n^e = 22,9$ мм к полной осадке штампа $S_k^e = 75,0$ мм. $K_e = S_n^e / S_k^e = 0,3$. Нелинейная упругая объемно-сдвиговая осадка буровой сваи Б-3 с

учетом значения полных осадок буровой сваи Б-1 по рис. 3 $S = 7$ мм составит $S_e = K_e S = 2,1$ мм, что полностью соответствует значению осадки буровой сваи Б-3 по графику полевых исследований $S = 2,1$ мм (см. рис. 3).

Методология расчета несущей способности буровой сваи с грунтоуплотненным тангенсоидом вращения

Схема буровой сваи Б-1 изображена на рис. 4. В состав включено уплотненное ядро грунта в форме тангенсоида вращения, как жесткий конструктивный элемент в нижнем конце сваи с плоской подошвой [3].

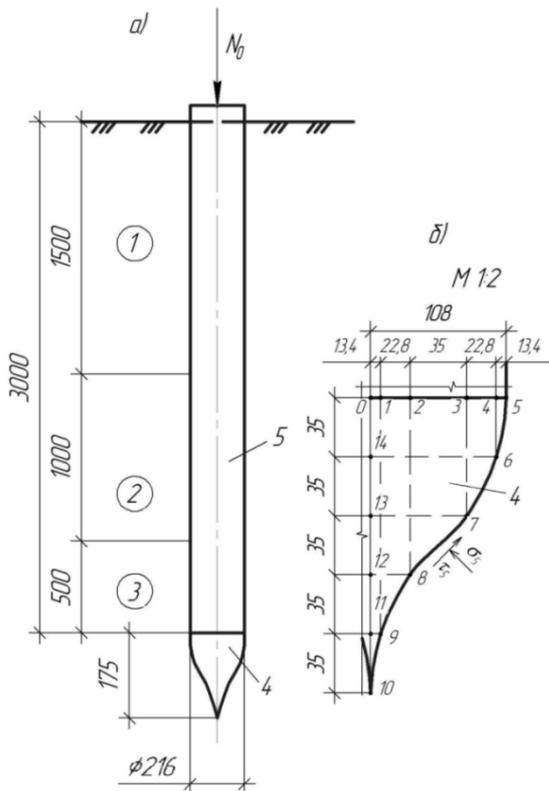


Рис. 4. Схема буровой сваи Б-1 (а): 1, 2, 3 – слои грунтов; 4 – уплотненное ядро грунта в форме тангенсоида вращения; 5 – свая; фрагмент уплотненного ядра в виде тангенсоида вращения (б)

Геометрические параметры для определения формы и размеров уплотненного ядра определяются с использованием углов внутренней связности и фрикционности по углу внутреннего трения φ [4]: $\theta_1 = \varphi = 21^\circ$; $\theta_2 = 22,5^\circ + \varphi / 2 = 33^\circ$; $\theta_3 = 45^\circ$; $\theta_4 = 67,5^\circ - \varphi / 2 = 57^\circ$; $\theta_5 = 90^\circ - \varphi = 69^\circ$. Коэффициенты внутренней связности и фрикционности $\text{tg}\theta_1 = 0,3839$; $\text{tg}\theta_2 = 0,6494$; $\text{tg}\theta_3 = 1$; $\text{tg}\theta_4 = 1,5399$; $\text{tg}\theta_5 = 2,605$. $\Sigma \text{tg}\theta_i = 6,1782$. Распределение радиуса основания тангенсоида вращения ядра пропорционально значениям коэффициентов $\Delta R_1 = 2R \text{tg}\theta_1 / \Sigma \text{tg}\theta_i = 13,4$ мм. $\Delta R_2 = 2R \text{tg}\theta_2 / \Sigma \text{tg}\theta_i = 22,8$ мм.

$\Delta R_3 = 2R \text{tg}\theta_3 / \Sigma \text{tg}\theta_i = 35$ мм. Отрезки радиусов откладываются от оси и от грани плоского нижнего конца сваи в точках 0–1, 4–5, 2–3, 1–2, 3–4. Из точки 5 под углом 69° от основания ядра проводится отрезок 5–6 в точку 6; из точки 6 – под углом 57° проводится отрезок 6–7 до пересечения с отрезком 3–7 и так далее для отрезка прямой 7–8; от оси ядра под углом 33° откладывается отрезок 8–9 и под углом 21° – отрезок 9–10. Через точки проводится тангенсоида боковой поверхности ядра.

Площадь боковой поверхности усеченного конуса

$$0-14 \quad A_1 = 0,5\pi l_1 (D_5 + D_6) = 27393 \text{ мм}^2.$$

$$l_1 = a_1 / \sin\theta_1 = 37,4 \text{ мм}.$$

$$13-14 \quad A_2 = 0,5\pi l_2 (D_6 + D_7) = 24274 \text{ мм}^2.$$

$$l_2 = a_2 / \sin\theta_2 = 41,9 \text{ мм}.$$

$$12-13 \quad A_3 = 0,5\pi l_3 (D_7 + D_8) = 19600 \text{ мм}^2.$$

$$l_3 = a_3 / \sin\theta_3 = 49,5 \text{ мм}.$$

$$11-12 \quad A_4 = 0,5\pi l_4 (D_8 + D_9) = 6526 \text{ мм}^2.$$

$$l_4 = l_2 = 41,9 \text{ мм}.$$

$$10-11 \quad A_5 = \pi D l / 2 = 1574 \text{ мм}^2. \quad l_5 = l_1 = 37,4 \text{ мм}.$$

Общая площадь боковой поверхности тангенсоида вращения $A = \Sigma A_i = 79367 \text{ мм}^2 = 0,0794 \text{ м}^2$.

Периметр ствола сваи $U = 2\pi R = 678,2$ мм. Нагрузки на основание сваи: от массы ствола сваи $N_c = \pi \cdot R^2 l \gamma_6 = 2,64$ кН; от массы домкрата $N_d = 0,5$ кН; дополнительная внешняя нагрузка $N_0 = 90$ кН. Общая нагрузка на основание $N = N_0 + N_c + N_d = 93,14$ кН.

Несущая способность боковой поверхности сваи:

$$1\text{-го слоя} \quad F_{d1} = A_1 (\Delta\sigma_{d,1} + c_1) = 45,9 \text{ кН}.$$

$$A_1 = h_1 U = 1,017 \text{ м}^2.$$

$$2\text{-го слоя} \quad F_{d2} = A_2 (\Delta\sigma_{d,2} + c_2) = 24,7 \text{ кН}.$$

$$A_2 = h_2 U = 0,68 \text{ м}^2.$$

$$3\text{-го слоя} \quad F_{d3} = A_3 (\Delta\sigma_{d,3} + c_3) = 10,7 \text{ кН}.$$

$$A_3 = h_3 U = 0,339 \text{ м}^2.$$

Суммарная несущая способность боковой поверхности сваи $F_{d,б.н.} = F_{d1} + F_{d2} + F_{d3} = 81,3$ кН.

Несущая способность нижнего конца сваи $F_{d,н.к} = N - F_{d,б.п} = 11,8$ кН. Удельное сопротивление по боковой поверхности тангенсоида вращения $\sigma_5 = \tau_5 = F_{d,н.к} / A_{б.п} = 148,6$ кПа. Выбор уравнения предельного равновесия грунта под нижним концом сваи $\sigma_5 = \tau_5 = (c + \sigma_d \Sigma \text{tg}\theta_i) k = 153,4$ кПа. $k = \sin\varphi + \cos\varphi = 1,292$. Разность значений между напряжениями $\sigma_5 = \tau_5 = 148,6$ кПа и расчетными $\sigma_5 = \tau_5 = 153,4$ кПа напряжениями является ре-

зультатом некоторого расхождения значений физико-механических характеристик грунтов в основаниях буровых свай Б-3 и Б-1. При значении угла внутреннего грунта $\varphi = 23^\circ$ в основании сваи Б-1 расчетные напряжения $\sigma_5 = \tau_5 = 148,6$ кПа.

Выводы

1. В основании с ненарушенной структурой грунта по боковой поверхности ствола буровой сваи его давление на ствол после твердения бетона не передается, а при загрузке сваи оно проявляется и возрастает до определенных пределов.

2. При критической нагрузке на сваю мессдозы замеряют горизонтальную составляющую упругого отпора грунта.

3. На боковую поверхность действует давление удельного сцепления грунта и частично боковое удельное давление веса скелета сухого грунта или его упругого отпора, замеренные по слоям при критической нагрузке на сваю.

4. По боковым поверхностям стволов буровых свай действуют исключительно нелинейные упругие объемно-сдвиговые деформации.

5. Впервые исследована несущая способность основания буровой сваи с грунтоуплотненным тангенсоидом вращения.

6. Произведен выбор уравнений предельных равновесий грунтов по боковой поверхности ствола и грунтоуплотненного тангенсоида вращения.

7. Приведена методика расчета размеров и построения формы тангенсоида вращения.

8. Создано объективное научное обоснование

достоверной несущей способности оснований буровых свай и разработаны методологии инженерного определения их несущей способности, сопоставимой по точности с результатами экспериментальных исследований.

Литература

1. Борозенец, Л.М. Анализ результатов натурного испытания буровых свай / Л.М. Борозенец // Проблемы свайного фундаментостроения: труды IV Междунар. конф. Ч. II. – Пермь: ПГТУ, 1994. – С. 19–24.

2. Борозенец, Л.М. Способ расчёта несущей способности буровой сваи / Л.М. Борозенец // Инф. листок ЦНТИ. – Владимир, 1991. – НТД № 91-1. – 4 с.

3. Борозенец, Л.М. Расчётное исследование и построение эпюры реактивного контактного давления грунта на плоскую подошву жёсткого фундамента / Л.М. Борозенец, Е.А. Будыльская, Р.И. Райченко // Градостроительство, реконструкция и инженерное обеспечение устойчивого развития городов Поволжья: сб. тр. III Всерос. науч.-практ. конф. – Тольятти: ТГУ, 2012. – С. 26–33.

4. Борозенец, Л.М. Геотехника устройства вишечей конструктивно-грунтовой буронабивной опоры-фундамента глубокого заложения / Л.М. Борозенец, Е.А. Будыльская Е.А. // Вестник Перм. нац. исследов. политехн. ун-та «Строительство и архитектура». – 2014. – № 2. – С. 136–157.

Борозенец Леонид Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство» Архитектурно-строительного института, Тольяттинский государственный университет (Тольятти), tsp@tltsu.ru

Ушакова Екатерина Андреевна, инженер кафедры «Промышленное и гражданское строительство», Архитектурно-строительного института, Тольяттинский государственный университет (Тольятти), katushka7777@mail.ru

Поступила в редакцию 28 октября 2015 г.

DOI: 10.14529/build160201

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY ON A BEARING CAPACITY OF THE BORED PILE FOUNDATION

L.M. Borozenets, tsp@tltsu.ru

E.A. Ushakova, katushka7777@mail.ru

Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation

The article presents the results of a comprehensive experimental and theoretical analysis of the lateral capacity of a bored pile shaft and the same pile with a soil compacted tangensoid of rotational motion. The features of interaction of concrete during its placing and hardening in a well and

the concrete pile shaft under load of subsoil are considered. The authors offer a methodology for determining the lateral capacity of the bored pile shaft and capacity rating of a pile with the soil compacted tangensoid of rotational motion.

Keywords: bearing capacity, foundation, bored pile, shaft, lateral area, tangensoid of rotational motion, tip of pile, soil compaction, pressure capsule, load, pressure, resistance, soil.

References

1. Borozenets L.M. [Analysis of the results of full-scale tests of bored piles]. *Problemy svaynogo fundamentostroeniya: trudy IV Mezhdunarodnoy konf. Ch.II.* [Problems pile foundation engineering: the works of the IV International Conf. Part II.]. Perm, 1994, pp. 19–24 (in Russ.).
2. Borozenets L.M. *Sposob rascheta nesushchey sposobnosti burovoy svai* [The method of calculation of the bearing capacity of bored piles]. Vladimir, 1991, no. 91-1. 4 p.
3. Borozenets L.M., Budył'skaya E.A., Raychenko R.I. [Estimated research and construction diagrams of reactive ground contact pressure on a flat, hard sole foundation]. *Gradostroitel'stvo, rekonstruktsiya i inzhenernoe obespechenie ustoychivogo razvitiya gorodov Povolzh'ya: sb. tr. III Vserossiyskoy nauch.-prakt. konf.* [The planning, engineering and reconstruction sustainable development cities of the Volga region. Coll. tr. III All-Russian scientific.-practical. conf.]. Tol'yatti, 2012, pp. 26–33 (in Russ.).
4. Borozenets L.M., Budył'skaya E.A. [Geotechnical design-hanging device of bored soil-foundation support deep foundation]. *PNRPU Construction and Architecture Bulletin*, 2014, no. 2, pp. 136–157 (in Russ.).

Received 28 October 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Борозенец, Л.М. Экспериментально-теоретическое исследование несущей способности основания буровых свай / Л.М. Борозенец, Е.А. Ушакова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 5–10. DOI: 10.14529/build160201

FOR CITATION

Borozenets L.M., Ushakova E.A. Experimental and Theoretical Study on a Bearing Capacity of the Bored Pile Foundation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2016, vol. 16, no. 2, pp. 5–10. (in Russ.). DOI: 10.14529/build160201