

Технология и организация строительного производства

УДК 624.152.5 + 624.131

ГЕОТЕХНИКА УСТРОЙСТВА ВИСЯЧЕЙ БУРОНАБИВНОЙ ТРУБЧАТО-ЗАПОЛНЕННОЙ СВАИ-ОПОРЫ ГЛУБОКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

Л.М. Борозенец, Е.А. Ушакова

Тольяттинский государственный университет, г.Тольятти

Представлены результаты комплексного экспериментально-расчетного и теоретического исследования геотехники проектирования и строительства одиночных висячих буронабивных трубчато-заполненных свай-опор глубокого заложения. Разработка связана с проблемой глубинного освоения подземного пространства и отсутствием достоверных методов расчета несущей способности и деформируемости оснований таких опор. Исследование проводится новыми методами аналитической нелинейной механики грунтов. Результатом разработки является достижение высокой достоверности расчета, сопоставимой с экспериментальной действительностью.

Ключевые слова: геотехника, грунт, основание, скважина, буронабивная свая-опора, заполнитель, напряжение, деформация, несущая способность, осадка.

Введение

Проектирование и устройство одиночных висячих буронабивных трубчато-заполненных свай-опор глубокого заложения с несущей способностью более 10 МН неизбежно ставят научно-техническую задачу, для решения которой необходимо произвести требуемое экспериментально-теоретическое исследование. Проблема аналитической оценки предельной несущей способности и деформируемости оснований таких свай-опор как фундаментов, достоверной экспериментальным данным [1], востребовала проведения предлагаемого в настоящей работе исследования. Богатый мировой опыт исследовательских, проектных и производственных работ по геотехнике фундаментостроения, достигнутый в настоящее время, и проведенные авторами в последние годы теоретические исследования выявили возможность дальнейшего ее развития в различных грунтовых условиях. Одним из направлений геотехники фундаментостроения рассматривается геотехника буронабивного опоростроения, которая включает совокупность средств, созданных для осуществления теоретического обоснования и научно-технического сопровождения процессов проектирования, строительства и эксплуатации оснований буронабивных свай-опор глубокого заложения. Основную часть совокупности средств составляют нелинейные геотехнологии, которые представляют собой теорию, методы и практику познания техники, присущей созданной совокупности. Теория, методы и практика познания техники взаимодей-

ствия являются ее методологией. Усовершенствованные методологии техники базируются на положениях новой теории нелинейного упругопластическивязкого деформирования предельно-напряженных грунтов [2], и завершенной модели аналитической нелинейной механики вытеснения грунтов [3] и доведены до стадии, удобной для практического инженерного применения в аналитическом исполнении. На основе достигнутых теоретических положений разработаны на уровне изобретений способы технологий работ по устройству новых типов буронабивных свай с применением специального высокоэффективного взрывофугасного оборудования для частичного набивного грунтовытеснения оснований их буровых скважин и выполнения таким образом их рациональных трубчато-заполненных конструкций [4]. Разработаны следующие методологии научно-технического сопровождения нелинейных геотехнологий проектирования и строительства одиночных висячих буронабивных трубчато-заполненных свай-опор глубокого заложения: экспериментально-расчетного исследования несущей способности и осадки буронабивных свай; теоретического определения расчетного сопротивления грунтов основания по боковой поверхности ствола буронабивной опоры и ее предельной несущей способности; теоретическое обоснование предварительно предельно-напряженного состояния основания буровой скважины в процессе дополнительного набивного ее грунтовытеснения в буронабивную скважину.

Обзорное экспериментально-расчетное исследование условий формирования предельной несущей способности и деформации основания буронабивных свай

Перед началом проектирования и устройства свайных фундаментов под опоры водоводов Загорской гидроаккумулирующей электростанции были проведены опытные работы по отработке технологии изготовления и определению их несущей способности [1]. Проведены исследования оснований буронабивных свай № 4 и № 7. Размеры сваи № 4 – диаметр 1 м, длина 17 м без уширения; сваи № 7 – диаметр ствола 1 м, диаметр уширения 1,54 м, длина 18,3 м. По результатам экспериментального исследования значения предельных несущих способностей основания буронабивной сваи № 4 составили 7610 кН, а сваи № 7 – 7915,5 кН. Состав грунтового основания: с поверхности

до глубины 5 м залегают покровные и до глубины 35 м подстилающие моренные суглинки с включениями гравия, гальки, валунов, см. табл. 1.

Давление бетона σ_r на стенки скважины № 7 измерялось после бетонирования и при нагружении с помощью тензорезисторных мессдоз. Бетонирование проводилось через бункер с направляющим патрубком. Бетонная смесь с осадкой конуса 20–22 см подавалась в скважину прямым сбросом. Показания по мессдозам снимались после сброса в скважину бетона с удельным весом $\gamma_0 = 23,3 \text{ кН/м}^3$ из бадьи объемом 3 м³. Характер распределения горизонтальных давлений бетона σ_r , измеренных мессдозами по глубине сваи № 7 после бетонирования и при нагружении, показаны на рис. 1.

Буронабивные сваи через 2–6 месяцев после

Таблица 1

Физико-механические характеристики грунтов

Суглинки	Плотность естественная, ρ , г/см ³	Плотность скелета, ρ_s , г/см ³	Влажность естественная, W , %	Показатель текучести, I_L	Модуль деформации, E , МПа	Удельное сцепление, C , кПа	Угол внутреннего трения, ϕ , град.	Коэффициент пористости, e
Покровные	2,20	1,95	13,0	0,14	78	20	20	0,384
Моренные	2,25	2,01	11,7	0,05	78	25	24	0,343

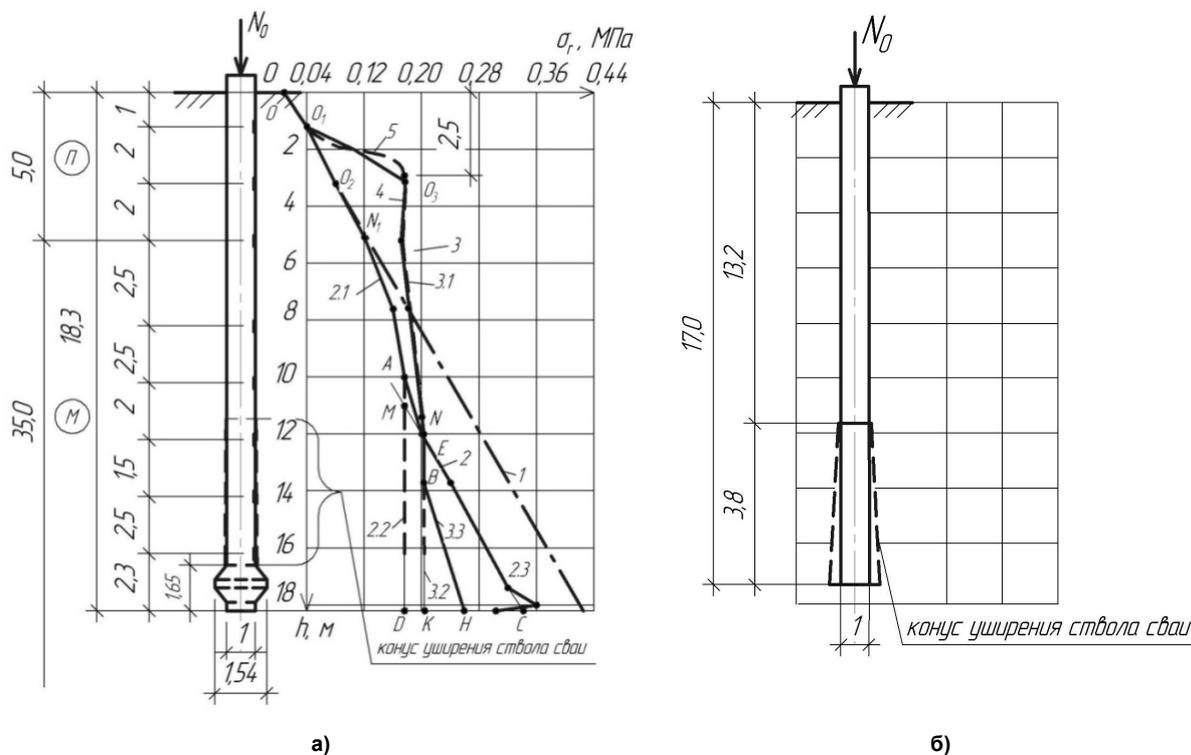


Рис. 1. Схема и эпюры радиального давления σ_r по длине сваи №7 после бетонирования и при нагружении (а): 1 – гидростатическое давление бетонной смеси; 2 – после заполнения скважины; 3 – при нагрузке 7600 кН; 4 – расчетная эпюра давления связности грунта; 5 – расчетный нелинейный график бокового давления связности грунта до глубины 2,5 м; схема сваи №4 (б); П – покровный суглинок; М – моренный суглинок

изготовления испытывались осевой вертикальной статической нагрузкой. График зависимости осадки от нагрузки сваи № 4 показан на рис. 2.

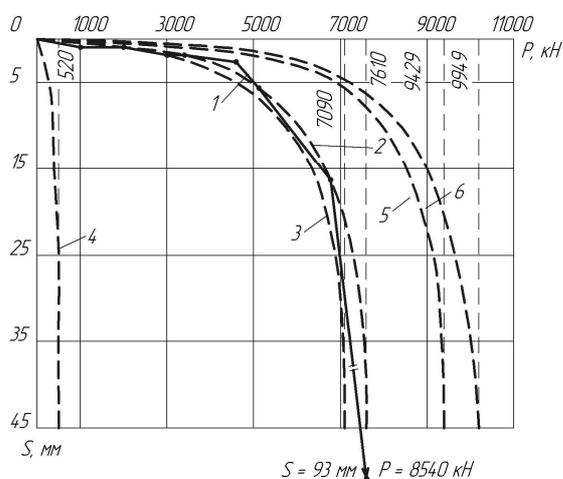


Рис. 2. Графики зависимости осадок от нагрузок буронабивной сваи № 4: 1 – экспериментальный; 2 – нелинейный по экспериментальным данным; 3 – расчетный по боковой поверхности ствола сваи по данным опыта; 4 – расчетный плоского нижнего конца сваи

Предельная несущая способность нижнего конца сваи № 4 определена по данным расчетного исследования несущей способности сваи № 7 [5] $F_{d,н.к.} = 520$ кН.

Предельная несущая способность боковой поверхности ствола сваи № 4

$$\Delta F_{d,б.п} = F_d - F_{d,н.к} = 7090 \text{ кН.} \quad (1)$$

Предельная несущая способность сваи № 4 принята по нелинейному экспериментальному графику 2, см. рис. 2, $F_d = 7610$ кН.

Установление глубины начала расширения скважины производится расчетом по предельной несущей способности боковой поверхности цилиндрической части ствола сваи № 7 с использованием экспериментальных значений давлений в точках графика эпюры 3 на глубинах 1 м – $\sigma_{r,1} = 40$ кПа; 3 м – $\sigma_{r,2} = 172$ кПа; 12 м и ниже – $\sigma_{r,4} = 210$ кПа.

$$h_{mc} = F_{d,б.п} - (\tau_{n.c.,1}A_1 + \tau_{n.c.,2}A_2 + \tau_{n.c.,3}A_3) / 2\pi R\tau_{mc} = 8,2 \text{ м.} \quad (2)$$

Глубина цилиндрической части ствола сваи

$$h_{ц} = h_{n.c.} + h_{mc} = 13,2 \text{ м.} \quad (3)$$

Потерянное значение несущей способности по боковой поверхности ствола сваи № 4 в результате технологического дефекта

$$F_{d,т.д} = 2\pi R(h - h_{ц})\tau_{mc} = 2339 \text{ кН.} \quad (4)$$

Физически возможная предельная несущая способность боковой поверхности по опытным данным без учета технологического дефекта

$$F_{d,б.п} = \Delta F_{d,б.п} + F_{d,т.д} = 9429 \text{ кН.} \quad (5)$$

Общая физически возможная предельная несущая способность сваи № 4 без учета технологического дефекта

$$F_d = F_{d,б.п} + F_{d,н.к} = 9949 \text{ кН.} \quad (6)$$

Таким образом, при устройстве буронабивных свай следует применять надежные проверенные технологии, гарантирующие качество производства работ, при набивке оснований буровых скважин и производить геотехнологический анализ несущей способности и деформации их оснований.

Геотехнология способа дополнительного набивного грунтовытеснения основания буровой скважины в буронабивную

Для устройства буронабивных свай-опор глубокого заложения применяются различные буровые технологии получения скважин. Устройство трубчато-заполненной конструкции ствола буронабивной сваи-опоры глубокого заложения производится с помощью взрывофугасного способа возведения набивной трубчатой сваи, на который получено авторское свидетельство [4]. Способ осуществляется с использованием взрывофугасного формователя буронабивной сваи, содержащего два полых трубчатых телескопически связанных и соосно подвижных между собой элемента: корпуса и рабочего органа. При этом рабочий орган снабжен камерой взрывания и раструбным коническим формирующим нижним концом и содержит затвор-зарядоноситель для герметизации камеры взрывания. Диаметр рабочего органа предусматривается меньше диаметра буронабивной скважины на толщину стенки трубчатой оболочки сваи. Способ возведения буронабивной трубчато-заполненной опоры включает образование буровой скважины. Установку в нее формователя соосно со скважиной. В пространство зазора между стенками скважины и формователя укладывается порция сухой бетонной смеси с одновременной укладкой порции дренирующей смеси заполнителя в полость рабочего органа формователя. Укладку бетонной смеси и дренирующего материала производят по высоте скважины порциями. После укладки каждой порции внутри рабочего органа в камере взрывания размещают заряд взрывчатого вещества и герметизируют ее с помощью затвора-зарядоносителя. Уплотнение сухой бетонной и дренирующей смеси, набивание основания буровой скважины путем дополнительного ее грунтовытеснения, создание зоны предварительно предельно-напряженного состояния основания вокруг буровой скважины в процессе дополнительного ее грунтовытеснения, подъем рабочего органа осуществляется путем энергии продуктов взрыва заряда взрывчатого вещества в камере взрывания. После завершения возведения ствола буронабивной опоры до устья скважины производится увлажнение сухой бетонной смеси путем подачи воды и полного водонасыщения объема дренирующей смеси заполнителя. Экспериментальные исследования способа уст-

ройства буронабивных свай проводились в лабораторных условиях с использованием бездымного пороха, фрагмент сваи в разрезе показан на рис. 3, и в полевых натуральных условиях с помощью взрывофугасного формователя, представленного на рис. 5, на рис. 4 показан оголовок буронабивной трубчато-заполненной сваи.

Важной задачей является определение значения сбега наружной поверхности раструбного конического рабочего органа формователя. Сбег должен учитывать значение сжимаемости сухой бетонной смеси в стенке трубчатой оболочки, которая будет зависеть от ее толщины; значение сжимаемости разрыхленного грунта в стенке буровой скважины, которое зависит от вида грунта и применяемого бурового оборудования; значение деформации грунта основания буровой скважины при его набивании путем дополнительного грунтовытеснения в процессе создания предварительно предельно-напряженной зоны основания вокруг трубчато-заполненного ствола буронабивной опоры.

Величина сбега будет зависеть от значения предельного-напряженного состояния основания по боковой поверхности буронабивной сваи-опоры. Значения сжимаемости сухой бетонной смеси при уплотнении и разрыхленного грунта в стенке буровой скважины должны определяться опытным путем. Сжимаемость основания буровой скважины при дополнительном ее грунтовытеснении в процессе набивания с образованием предварительно предельно-напряженной зоны вокруг скважины определяется по методологии техники нелинейной геотехнологии. Исследование проводится новыми методами аналитической нелинейной механики вытеснения грунтов. Напряженно-деформированное состояние основания вокруг ствола сваи определяется по следующей методике. Предельные нормальные давления связности и касательные сопротивления трения по боковой поверхности ствола сваи, определяются по уравнениям напряженного состояния грунтов

$$\sigma_{1-4} = \tau_{1-4} = \sigma_d \Sigma \operatorname{tg} \theta_{1-4} k, \quad (7)$$

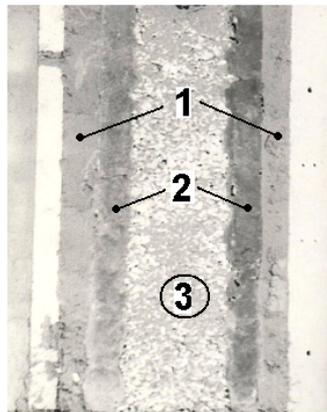


Рис. 3. Фрагмент разреза конструкции трубчато-заполненной буронабивной сваи, полученный в лотке: 1 – грунт, 2 – трубчатая оболочка, 3 – дренирующий наполнитель

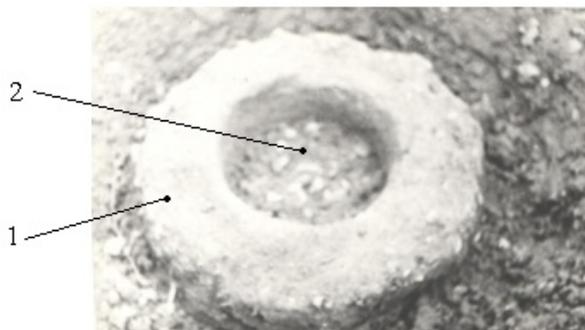


Рис. 4. Оголовок буронабивной трубчато-заполненной сваи: 1 – трубчатая оболочка; 2 – дренирующий наполнитель



Рис. 5. Взрывофугасный формователь ствола буронабивной трубчато-заполненной сваи

$$\sigma_5 = \tau_5 = (c + \sigma_d \Sigma \operatorname{tg} \theta_{1-5})k. \quad (8)$$

Углы внутренней связности и трения грунтов состояний предельных равновесий:

$$\theta_1 = \varphi, \quad (9)$$

$$\theta_2 = 22,5^\circ + \varphi / 2, \quad (10)$$

$$\theta_3 = 45^\circ, \quad (11)$$

$$\theta_4 = 67,5^\circ - \varphi / 2, \quad (12)$$

$$\theta_5 = 90^\circ - \varphi. \quad (13)$$

Коэффициент увеличения напряжений от удельного давления объемной силы тяжести скелета сухого грунта σ_d и удельного сцепления c

$$k = \sin \varphi + \cos \varphi. \quad (14)$$

Структурная прочность грунта

$$\sigma_{str} = \sigma_d \cos \varphi = 18,36 \text{ кПа}. \quad (15)$$

Начальное краевое напряжение упругости грунта по расчетному определению $\sigma_0 = 3,7 \text{ кПа}$.

Расчетные значения показателей напряженно-деформированного состояния предельных равновесий сведены в табл. 2.

После решения уравнений состояния с определением предельных значений напряжения вокруг ствола сваи-опоры, рассчитываются геометрические параметры и их соотношения для выбора физических уравнений.

Схема развития зон предельно напряженно-деформированного состояния буронабивного основания вокруг ствола сваи-опоры представлена на рис. 6.

Радиусы границ зон предельных напряжений в горизонтальной плоскости от боковой поверхности ствола сваи-опоры, численные значения см. табл. 3.

$$R_i = R_5 \sigma_5 / \sigma_i, \quad (16)$$

Мощность сжимаемых зон грунта между границами состояний предельных равновесий

$$\Delta h_4 = R_4 - R_5; \quad (17)$$

⋮

$$\Delta h_0 = R_0 - R_{str}. \quad (21)$$

Сжимаемость каждой зоны грунта:

$$\Delta S_4 = [0,5(\sigma_5 + \sigma_4)\Delta h_4] / E_5^0; \quad (22)$$

⋮

$$\Delta S_0 = [0,5(\sigma_{str} + \sigma_0)\Delta h_0] / E_5^0, \quad (27)$$

где E_5^0 – нелинейный модуль общей деформации.

$$E_5^0 = k_5^0 E = 64 \text{ МПа}, \quad (28)$$

где $k_5^0 = 0,8206$ – поступенчатый эталонный коэффициент пропорциональности нелинейного модуля общей деформации суглинка.

Таблица 2

Углы и коэффициенты внутренней связности и трения грунта

№ СПР*	Суглинки									
	покровные					моренные				
	θ_i , град.	$\operatorname{tg} \theta_i$	$\Sigma \operatorname{tg} \theta_i$	$\sigma_i = \tau_i$, кПа	$\Sigma \sigma_i = \Sigma \tau_i$, кПа	θ_i , град.	$\operatorname{tg} \theta_i$	$\Sigma \operatorname{tg} \theta_i$	$\sigma_i = \tau_i$, кПа	$\Sigma \sigma_i = \Sigma \tau_i$, кПа
1	20	0,364	0,364	9,10	9,10	24	0,445	0,445	11,81	11,81
2	32,5	0,637	1,001	15,92	25,02	34,5	0,687	1,132	18,23	30,04
3	45	1	2,001	24,99	50,01	45	1	2,132	26,54	59,58
4	57,5	1,570	3,571	39,24	89,25	55,5	1,455	3,587	38,61	98,19
5	70	2,747	6,318	94,19	183,44	66	2,246	5,833	92,65	190,81

* – состояние предельного равновесия

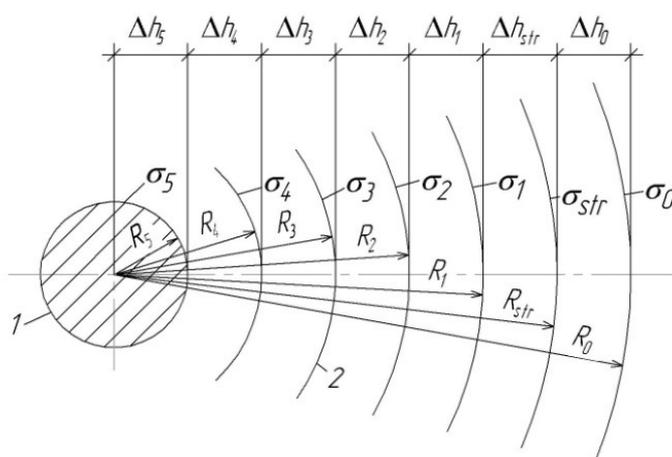


Рис. 6. Схема развития зон напряженно-деформированного состояния буронабивного основания вокруг ствола сваи-опоры: 1 – сваи-опора; 2 – границы зон состояний предельных равновесий

Таблица 3

Значения попредельно-равновесных деформаций моренного суглинка

№ СПР*	θ_i , град	$\text{tg } \theta_i$	$\Sigma \text{tg } \theta_i$	$\sigma_i = \tau_i$, кПа	$\Sigma \sigma_i = \Sigma \tau_i$, кПа	R_i , м	Δh_i , м	ΔS_i , мм
σ_0	–	–	–	3,7	–	25,78	20,86	3,58
σ_{str}	–	–	–	18,34	–	4,92	1,74	0,66
1	24	0,445	0,445	11,81	11,81	–	–	–
2	34,5	0,687	1,132	18,23	30,04	3,18	1,58	2,2
3	45	1	2,132	26,54	59,58	1,60	0,63	0,78
4	55,5	1,455	3,587	38,61	98,19	0,97	0,46	1,1
5	66	2,246	5,833	92,65	190,81	0,51	0,51	0
Суммарная								8,3

* – состояние предельного равновесия

Радиальная суммарная деформация расширения буровой скважины в буронабивную $S = \Sigma \Delta S_i = 8,3$ мм. Следовательно, в процессе набивки основания буровой скважины взрывофугасным формователем, её диаметр должен быть увеличен на 16,6 мм и для буронабивной скважины сваи-опоры может составить, например, 1020 мм. Расчетная несущая способность боковой поверхности ствола буронабивной трубчато-заполненной сваи-опоры:

$$F_{d,п.с} = A_1 \tau_1 + A_2 \tau_2 + A_3 \tau_3 = 2102,6 \text{ кН}, \quad (29)$$

$$F_{d,м.с} = A_{б.п.} \tau_5 = 7332,8 \text{ кН}, \quad (30)$$

$$F_{d,к.э} = F_{d,п.с} + F_{d,м.с} = 9435,4 \text{ кН}, \quad (31)$$

что получается несколько больше, чем по эксперименту при $F_{d,б.п} = 9429$ кН.

Выводы

1. Впервые обоснована геотехника буронабивного сваестроения глубокого заложения с использованием положений новой аналитической нелинейной механики вытеснения грунтов.

2. Разработана нелинейная геотехнология способа взрывофугасного набивания основания буровой скважины в процессе устройства трубчато-заполненного ствола буронабивной сваи-опоры глубокого заложения.

3. Показана нелинейная геотехнология теоретического определения напряженного состояния

грунтов основания по боковой поверхности несущего ствола сваи-опоры и его несущей способности по пяти состояниям предельных равновесий.

Литература

1. Мамонов, М.В. Исследование условий формирования несущей способности и прочности стволов буронабивных свай / М.В. Мамонов, П.М. Ермошкин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1982. – № 1. – С. 10–14.

2. Борозенец, Л.М. Модель теории нелинейного упругого и пластического деформирования дисперсных грунтов в основаниях фундаментов / Л.М. Борозенец // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: сб. мат. Всероссийской науч.-техн. конф. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2012. – С. 102–109.

3. Борозенец, Л.М. Нелинейная механика вытеснения дисперсных грунтов в основаниях фундаментов / Л.М. Борозенец // Геотехника Беларуси: наука и практика: мат. Междунар. науч.-техн. конф. (Ч. 1–2). – Минск: БНТУ, 2013. – С. 183–194.

4. А.с. № 1045652 СССР. Способ возведения набивной трубчатой сваи. МКЗ E02D27/10 / Л.М. Борозенец; Тольятт. политехн. ин-т. – № 3301603/29-33; заявл. 10.04.81.

5. Борозенец, Л.М. Расчётное исследование предельной несущей способности и нелинейной деформации основания опытной буронабивной сваи / Л.М. Борозенец // Геотехника Беларуси: наука и практика: мат. Междунар. науч.-техн. конф. (Ч. 1–2). – Минск: БНТУ, 2013. – С. 195–203.

Поступила в редакцию 22 апреля 2015 г.

Борозенец Леонид Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство», Архитектурно-строительный институт, Тольяттинский государственный университет, tsp@tltsu.ru

Ушакова Екатерина Андреевна, инженер, кафедра «Промышленное и гражданское строительство», Архитектурно-строительный институт, Тольяттинский государственный университет, katushka77777@mail.ru

GEOTECHNIQUE OF THE CONSTRUCTION OF THE HANGING BORED TUBULAR FILLED PLUMB PILE WITH DEEP CONTOUR INTERVAL

L.M. Borozenets, Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation, tsp@tltisu.ru

E.A. Ushakova, Togliatti State University, Togliatti, Russian Federation, katushka77777@mail.ru

The article presents the results of complex theoretical and experimental research on basic approaches in geotechnology for development and construction of single hanging bored tubular filled plumb piles with a deep contour interval. The development is connected with a problem of deep land development and the lack of real methods for calculation of the bearing capacity and deformation potential of such piles. The research is conducted on the basis of new methods of analytical non-linear soil mechanics. The development result is high accuracy of calculation, compatible with experimental reality.

Keywords: geotechnology, soil, foundation, hole, bored plumb pile, filler, pressure, deformation, bearing capacity, settlement.

References

1. Mamonov M.V. Ermoshkin P.M. [The study of formation conditions of the bearing capacity and strength of the shafts of bored piles]. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov* [The bases, foundations and soil mechanics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982, vol. 1, pp. 10–14 (in Russ).
2. Borozenets L.M. [Model theory of nonlinear elastic and plastic deformation of fine-grained soils in the foundations]. *Mekhanika gruntov v geotekhnike i fundamentostroenii: sb. mat. Vserossiyskoy nauch.-tehn. konf* [Soil mechanics in geotechnical engineering and Foundation engineering: proceedings of all-Russian scientific-technical conference]. Novocherkassk, YuRGU (NPI) Publ., 2012, pp. 102–109 (in Russ).
3. Borozenets L.M. [Nonlinear mechanics of displacement of fine-grained soils in the foundations]. *Geotekhnika Belarusi: nauka i praktika: mat. Mezhdunar. nauch.-tehn. konf* [Geotechnics in Belarus: science and practice: materials of International scientific-technical conference]. Minsk, BNTU Publ., 2013, vol. 1–2, pp. 183–194 (in Russ).
4. Borozenets L.M. *Sposob vozvedeniya nabivnoy trubchatoy svai* [The method of construction padded tubular piles]. A. S. no. 1045652 SSSR, MKZ E02D27/10, 1981.
5. Borozenets L.M. [Computational study of the ultimate bearing capacity and nonlinear deformation experienced Foundation bored piles]. *Geotekhnika Belarusi: nauka i praktika: mat. Mezhdunar. nauch.-tehn. konf* [Geotechnics in Belarus: science and practice: materials of International scientific-technical conference]. Minsk, BNTU Publ., 2013, vol. 1–2, pp. 195–203 (in Russ).

Received 22 April 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Борозенец, Л.М. Геотехника устройства висячей буронабивной трубчато-заполненной свай-опоры глубокого заложения / Л.М. Борозенец, Е.А. Ушакова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 38–44.

FOR CITATION

Borozenets L.M., Ushakova E.A. Geotechnique of the Construction of the Hanging Bored Tubular Filled Plumb Pile with Deep Contour Interval. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2015, vol. 15, no. 3, pp. 38–44. (in Russ.)