УДК 624.131

З.Г. Тер-Мартиросян, Чинь Туан Вьет
ФГБОУ ВПО «МГСУ»

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОДИНОЧНОЙ ДЛИННОЙ СВАИ С ДВУХСЛОЙНЫМ ОСНОВАНИЕМ С УЧЕТОМ СЖИМАЕМОСТИ СТВОЛА СВАИ

Изложены решения задачи о взаимодействии длинной сжимаемой сваи с двухслойным линейно-деформируемым основанием. Показано, что учет сжимаемости материала сваи приводит к качественно новому распределению касательных напряжений вдоль поверхности цилиндрических свай. Отмечено, что с ростом длины сваи и жесткости верхней части основания увеличивается доля нагрузки воспринимаемая боковой поверхностью сваи, и что при определенных условиях окружающей грунтовой среды нагрузка, воспринимаемая нижней частью основания, может составить 20…30 % от общей нагрузки.

Ключевые слова: грунт, фундамент, основание, свая, нагрузка, сжимаемость, двухслойное основание, осадка.

При строительстве на слабых глинистых грунтах часто используют длинные буронабивные сваи диаметром до 2 м и длиной до 100 м. Несущая способность таких свай достигает нескольких тысяч тонн, что обусловлено большим сопротивлением боковой поверхности и сопротивлением на уровне нижнего конца сваи, опирающегося на сравнительно твердые грунты. Результаты натурных испытаний длинных буронабивных свай, оснащенных специальными датчиками напряжений и деформаций по всей длине сваи, показывают, что при больших нагрузках до нескольких тысяч тонн на распределение напряжений между поверхностью и нижним ее концом существенное влияние оказывают длина и диаметр сваи, сжимаемость материала сваи. С ростом длины сваи растет и доля сопротивления на боковой ее поверхности, которая достигает до 80 % и более от общего сопротивления. Следовательно, осадка сваи будет складываться за счет сдвиговых деформаций грунта вокруг сваи и сжимаемости грунтов под нижним ее концом, а также сжимаемости материала сваи. Очевидно, что при определенном соотношении длины сваи к диаметру l/d и свойств грунтов, окружающих сваю и под ее нижним концом E_1/E_2, может возникнуть ситуация, когда несущая способность грунтов нижнего слоя под нижним концом сваи будет реализована не полностью. В настоящей работе на основе анализа результатов решения поставленной задачи аналитическим и численным методами дается оценка возникновения такой ситуации, в т.ч. распределение касательных напряжений по боковой поверхности сваи.

Постановка задачи. Пусть свая диаметром $d = 2a$, длиной l находится внутри двухслойного массива грунта цилиндрической формы длиной $L > 1$ и диаметром $D = 2b$ (рис. 1).

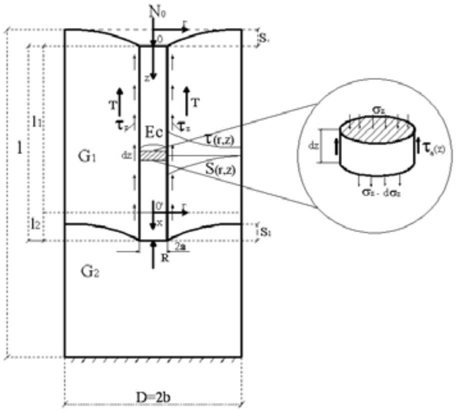

Рис. 1. Расчетная схема взаимодействия сжимаемой сваи с двухслойным массивом грунта: G_1, G_2 и E_c — модули сдвига 1 и 2-го слоев грунта и жесткости сваи соответственно

Из рассмотрения взаимодействия элементарного слоя этой системы толщиной dz следует, что приращение напряжений в стволе сваи $d\sigma_z$ связано с касательными напряженными τ_z по поверхности сваи зависимостью вида [1] $\pi a^2 \sigma_z - \pi a^2(\sigma_z - d\sigma_z) = 2\pi a \tau_a(z)dz$, следовательно, можем записать, что

$$\frac{d\sigma_z}{dz} = \frac{2}{a}\tau_a(z). \tag{1}$$

Известно [2], что касательные напряжения на поверхности сваи связаны с перемещением сваи зависимостью вида

$$S(a,z) = \frac{\tau_a(z)a}{G}\ln\left(b/a\right), \tag{2}$$

где G — модуль сдвига окружающего грунта.

Из условия линейной деформируемости ствола сваи получаем следующую зависимость:

$$\sigma_z = \varepsilon_z E_c = \left(d\sigma_z/dz\right)E_c, \tag{3}$$

где E_c — модуль деформации сваи.

Подставляя значения $\tau_a(z)$ из (2) в (1), с учетом (3) после дифференцирования по z получаем

$$\frac{d^2\sigma_z}{dz^2} - \lambda^2\sigma_z = 0, \tag{4}$$

где $\lambda^2 = \dfrac{2G}{a^2 E_c \ln(b/a)}$. $\quad$ (5)

Это дифференциальное уравнение справедливо как для верхней части основания, так и для нижней его части системы «свая — двухслойное основание».

Рассмотрим решение (4) для верхней части основания ($0 < z < l_1$) и для нижней части ($l_1 < z < l$), полагая, что начало координат находится на уровне оголовки сваи. Очевидно, что для получения общего решения ($0 < z < l$) необходимо использовать условия неразрывности напряжений и деформаций на уровне $z = l_1$.

Решение задачи для верхней части сводится к рассмотрению дифференциального уравнения вида

$$\frac{d^2\sigma_z}{dz^2} - \lambda_1^2\sigma_z = 0, \tag{6}$$

где $\lambda_1^2 = \dfrac{2G_1}{a^2 E_c \ln(b/a)}$. $\quad$ (7)

Решение дифференциального уравнения (6) можно записать в виде

$$\sigma_z = C_1 e^{\lambda_1 z} + C_2 e^{-\lambda_1 z}, \tag{8}$$

где C_1 и C_2 — постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий,

$$\sigma_z\big|_{z=0} = \sigma_0,\ \sigma_z\big|_{z=l_1} = \sigma_{l_1} = C_1 e^{\lambda_1 l_1} + C_2 e^{-\lambda_1 l_1}.$$

Отсюда следует, что

$$C_1 = \frac{\sigma_{l_1} - \sigma_0 e^{-\lambda_1 l_1}}{e^{\lambda_1 l_1} - e^{-\lambda_1 l_1}};\ C_2 = \frac{\sigma_0 e^{\lambda_1 l_1} - \sigma_{l_1}}{e^{\lambda_1 l_1} - e^{-\lambda_1 l_1}}. \tag{9}$$

Неизвестным является σ_{l_1}, который можно определить из условия равенства напряжений и перемещений сваи на уровне $z = l_1$ [3].

Определим осадку сваи в интервале $0 < z < l_1$ от действия напряжений σ_z (8), полагая, что $\varepsilon_z = \sigma_z/E_c$, т.е. получаем

$$S_z = \int\frac{\sigma_z}{E_c}dz = \frac{1}{\lambda_1 E_c}\left(C_1 e^{\lambda_1 z} - C_2 e^{-\lambda_1 z}\right) + C, \tag{10}$$

где C — постоянное интегрирования, определяемое из граничного условия $z = l_1$, $S_{z=l_1} = S_{l_1}$, тогда

$$C = S_{l_1} - \frac{1}{\lambda E_c}\left(C_1 e^{\lambda_1 l_1} - C_2 e^{-\lambda_1 l_1}\right).$$

Подставляя это значение C в (10), получаем

$$S_c(z) = S(l_1) + \frac{1}{\lambda_1 E_c}\left[C_1\left(e^{\lambda_1 z} - e^{\lambda_1 l_1}\right) - C_2\left(e^{-\lambda_1 z} - e^{-\lambda_1 l_1}\right)\right]. \tag{11}$$

Отсюда можно определить осадку сваи на уровне $z = 0$ [4], т.е. получаем

$$S_c(0) = S(l_1) + \frac{1}{\lambda_1 E_c}\left[C_1\left(1 - e^{\lambda_1 l_1}\right) - C_2\left(1 - e^{-\lambda_1 l_1}\right)\right];$$

$$S_c(0) = S(l_1) + \frac{1}{\lambda_1 E_c}\frac{\left(\sigma_0 + \sigma_{l_1}\right)\left(2 - e^{\lambda_1 l_1} - e^{-\lambda_1 l_1}\right)}{e^{\lambda_1 l_1} - e^{-\lambda_1 l_1}}. \tag{12}$$

Осадку сваи в интервале $l_1 < z < l$ можно определить, рассматривая решение уравнения (4) в этом интервале. Для этого введем новую переменную $x = z - l_1$, причем $0 < x < l_2$. Тогда дифференциальное уравнение сжатия сваи в этом случае имеет вид

$$\frac{d^2\sigma_x}{dx^2} - \lambda_2{}^2\sigma_x = 0, \tag{13}$$

где $$\lambda_2{}^2 = \frac{2G_2}{a^2 E_c \ln(b/a)}. \tag{14}$$

Решение дифференциального уравнения (14) можно записать в виде

$$\sigma_x = C_1^{'} e^{\lambda_2 x} + C_2^{'} e^{-\lambda_2 x}, \tag{15}$$

где $C_1^{'}$ и $C_2^{'}$ — постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий

$$\sigma_x\big|_{x=0} = \sigma_0^{'},\ \sigma_x\big|_{x=l_2} = \sigma_{l_2} = C_1^{'} e^{\lambda_2 l_2} + C_2^{'} e^{-\lambda_2 l_2}.$$

Отсюда следует, что

$$C_1^{'} = \frac{\sigma_{l_2} - \sigma_0^{'} e^{-\lambda_2 l_2}}{e^{\lambda_2 l_2} - e^{-\lambda_2 l_2}};\ C_2^{'} = \frac{\sigma_0^{'} e^{\lambda_2 l_2} - \sigma_{l_2}}{e^{\lambda_2 l_2} - e^{-\lambda_2 l_2}}. \tag{16}$$

Неизвестными являются $\sigma_0^{'}$ и σ_{l_2}, которые могут быть определены из условия равенства $\sigma_0^{'} = \sigma_{l_1}$ и $S(0^{'}) = S(l_1)$.

Определим осадку сваи в интервале $0 < x < l_2$ от действия напряжений внутри сваи σ_x (15), полагая, что $\varepsilon_x = \sigma_x / E_c$, т.е. получаем

$$S_x = \int \frac{\sigma_x}{E_c} dx = \frac{1}{\lambda_2 E_c}\left(C_1^{'} e^{\lambda_2 x} - C_2^{'} e^{-\lambda_2 x}\right) + C^{'}, \tag{17}$$

где $C^{'}$ — постоянное интегрирования, определяемое из граничного условия $x = l_2$, $S_{x=l_2} = S_{l_2}$,

тогда

$$C^{'} = S_{l_2} - \frac{1}{\lambda_2 E_c}\left(C_1^{'} e^{\lambda_2 l_2} - C_2^{'} e^{-\lambda_2 l_2}\right).$$

Подставляя это значение $C^{'}$ в (10), получаем:

$$S_c(x) = S(l_2) + \frac{1}{\lambda_2 E_c}\left[C_1^{'}\left(e^{\lambda_2 x} - e^{\lambda_2 l_2}\right) - C_2^{'}\left(e^{-\lambda_2 x} - e^{-\lambda_2 l_2}\right)\right]; \tag{18}$$

$$S(x = 0^{'}) = S(l_2) + \frac{1}{\lambda_2 E_c}\left[C_1^{'}\left(1 - e^{\lambda_2 l_2}\right) - C_2^{'}\left(1 - e^{-\lambda_2 l_2}\right)\right];$$

$$S_c(0^{'}) = S(l_2) + \frac{1}{\lambda_2 E_c}\frac{\left(\sigma_0^{'} + \sigma_{l_2}\right)\left(2 - e^{\lambda_2 l_2} - e^{-\lambda_2 l_2}\right)}{e^{\lambda_2 l_2} - e^{-\lambda_2 l_2}}. \tag{19}$$

Осадку сваи на уровне $x = l_2$ можно определить из условия вдавливания ее на грунты нижнего слоя на основе решения задачи о жестком круглом штампе на глубине l, т.е. имеем

$$S(l_2) = \frac{\sigma_{l_2} \pi a(1-\nu) K_l}{4G_2}, \tag{20}$$

где $K_l \leq 1$ — коэффициент, учитывающий глубину приложения нагрузки [5].

Подставляя (20) в (19), получаем

$$S_c(0') = \frac{1}{\lambda_2 E_c} \frac{\left(\sigma_0' + \sigma_{l_2}\right)\left(2 - e^{\lambda_2 l_2} - e^{-\lambda_2 l_2}\right)}{e^{\lambda_2 l_2} - e^{-\lambda_2 l_2}} + \frac{\sigma_{l_2} \pi a(1-\nu) K_l}{4G_2}. \tag{21}$$

Подставляя $S(0')$ в (12), полагая, что $\sigma(0') = \sigma(l_1)$ и $S(0') = S(l_1)$, получаем

$$S_c(0) = \frac{1}{\lambda_2 E_c} \frac{\left(\sigma_{l_1} + \sigma_{l_2}\right)\left(2 - e^{\lambda_2 l_2} - e^{-\lambda_2 l_2}\right)}{e^{\lambda_2 l_2} - e^{-\lambda_2 l_2}} + \frac{\sigma_{l_2} \pi a(1-\nu) K_l}{4G_2} + \frac{1}{\lambda_1 E_c} \frac{\left(\sigma_0 + \sigma_{l_1}\right)\left(2 - e^{\lambda_1 l_1} - e^{-\lambda_1 l_1}\right)}{e^{\lambda_1 l_1} - e^{-\lambda_1 l_1}}. \tag{22}$$

Определим осадку сваи в интервале от $x = l_2$ до $x = 0'$, полагая $\varepsilon_x = \sigma_x / E_c$, т.е. получаем

$$S_{l_2} = \frac{1}{E_c} \int_{l_2}^{0'} \left(C_1' e^{\lambda_2 x} + C_2' e^{-\lambda_2 x}\right) dx = \frac{1}{\lambda_2 E_c} \left(C_1' e^{\lambda_2 x} - C_2' e^{-\lambda_2 x}\right)\Big|_{l_2}^{0'};$$

$$S_{l_2} = \frac{1}{\lambda_2 E_c} \frac{\left(\sigma_0' + \sigma_{l_2}\right)\left(2 - e^{\lambda_2 l_2} - e^{-\lambda_2 l_2}\right)}{e^{\lambda_2 l_2} - e^{-\lambda_2 l_2}}. \tag{23}$$

Сравнивая (23) с (20), с учетом того, что $\sigma_{l_2} / \sigma_0' = \beta'$, находим

$$\beta' = \frac{\left(2 - e^{\lambda_2 l_2} - e^{-\lambda_2 l_2}\right) 4G_2}{\lambda_2 E_c (1-\nu) \pi K_l \left(e^{\lambda_2 l_2} - e^{-\lambda_2 l_2}\right) - 4G_2 \left(2 - e^{\lambda_2 l_2} - e^{-\lambda_2 l_2}\right)}. \tag{24}$$

Осадку сваи только от действия σ_z в интервале от $z = l_1$ до $z = 0$ можем определить на основе интегрирования (8) с учетом того, что $\varepsilon_x = \sigma_x / E_c$, т.е. имеем

$$S_c(l_1) = \frac{1}{\lambda_1 E_c} \frac{\left(\sigma_0 + \sigma_{l_1}\right)\left(2 - e^{\lambda_1 l_1} - e^{-\lambda_1 l_1}\right)}{e^{\lambda_1 l_1} - e^{-\lambda_1 l_1}}. \tag{25}$$

Аналогично определим осадку сваи только от действия σ_x в интервале от $x = l_2$ до $x = 0'$, т.е. получаем

$$S_c\left(0'\right) = \frac{1}{\lambda_2 E_c} \frac{\left(\sigma_0' + \sigma_{l_2}\right)\left(2 - e^{\lambda_2 l_2} - e^{-\lambda_2 l_2}\right)}{e^{\lambda_2 l_2} - e^{-\lambda_2 l_2}}. \tag{26}$$

Сравнивая (26) и (25) и полагая, что $\beta = \sigma_{l_1} / \sigma_0$, получаем

$$\beta = \frac{A}{(1-\beta')B + A}, \tag{27}$$

где $A = \dfrac{2 - e^{\lambda_1 l_1} - e^{-\lambda_1 l_1}}{\lambda_1 \left(e^{\lambda_1 l_1} - e^{-\lambda_1 l_1}\right)}$; $B = \dfrac{2 - e^{\lambda_2 l_2} - e^{-\lambda_2 l_2}}{\lambda_2 \left(e^{\lambda_2 l_2} - e^{-\lambda_2 l_2}\right)}$, (28)

где β' — по-прежнему определяется по зависимости (24), $\beta' < 1$.

Таким образом, поставленная задача полностью решена. По известным коэффициентам β и β' можем определить значения $\sigma_{l_1} = \beta\sigma_0$; $\sigma_{l_2} = \beta'\sigma_{l_1} = \beta'\beta\sigma_0$, а с их помощью все компоненты НДС сваи σ_z, σ_x, τ_z, τ_x, $S_c(0)$, $S_c(0')$.

Осадку сваи на уровне $z = 0$ можем определить по формуле (12). Напряжения σ_z в теле сваи в интервале $0 < z < l_1$ можно определить по формуле (8), а напряжения τ_z на основе зависимости (1), т.е. получаем

$$\tau_z = \frac{a}{2}\frac{d\sigma_z}{dz} = \frac{\lambda_1 a}{2}\left(C_1 e^{\lambda_1 z} - C_2 e^{-\lambda_1 z}\right). \tag{29}$$

Осадку сваи на уровне $z = l_1$ можем определить по формуле (19) с учетом (24) и (27). Напряжения σ_x в интервале $0' < x < l_2$ можем определить по формуле (15), где $C_1^{'}, C_2^{'}$ определяются по формулам (16), т.е. получаем

$$\tau_x = \frac{a}{2}\frac{d\sigma_z}{dz} = \frac{\lambda_2 a}{2}\left(C_1^{'} e^{\lambda_2 l_2} - C_2^{'} e^{-\lambda_2 l_2}\right). \tag{30}$$

Рассмотрим пример на основании следующих данных:

l_1 = 30 м; l_2 = 5 м; d = 1 м; G_1 = 20 МПа; G_2 = 50 МПа; N = 5000 т = 500 кН, $\nu_г = 0,33$; $b = 6a = 6m$; $E_c = 10^6$ кПа.

Получаем S_l = 5,0 см, σ_0 = 2546 т/м^2 = 254,6 кг/см^2; σ_{l_2} =91 т/м^2 = 9,1 кг/см^2, $\tau_z(0)$ =190 т/м^2 = 19 кг/см^2; $\tau_z(l)$ = 21 т/м^2 = 2,1 кг/см^2.

По формулам (8), (15), (29) и (30) с учетом и без учета сжимаемости сваи были построены графики зависимости σ_z и τ_z от глубины (рис. 2, 3).

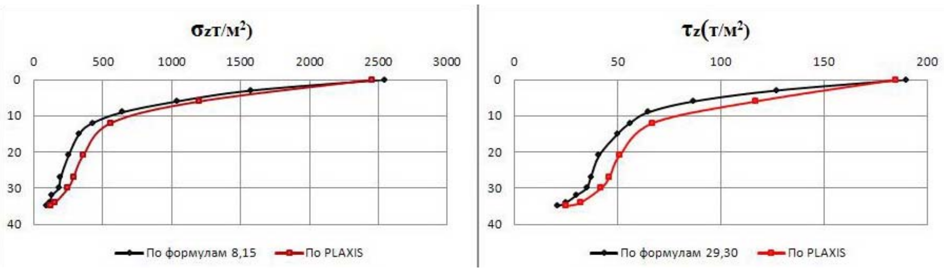

Рис. 2. Графики изменения вертикального $\sigma_z(a)$ и касательного $\tau_a(z)$ напряжения по глубине сваи с учетом сжимаемости сваи, построенные на основе аналитического и численного решения поставленной задачи

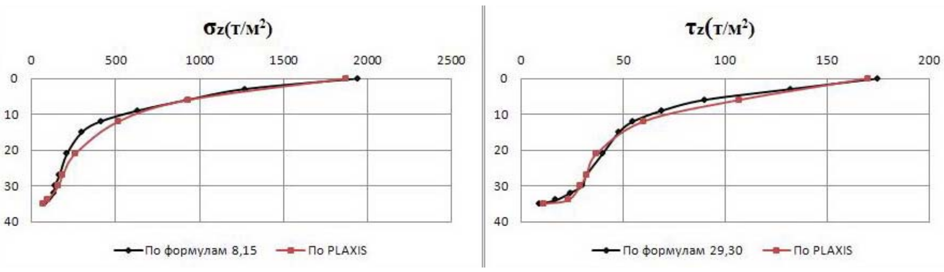

Рис. 3. Графики изменения вертикального $\sigma_z(a)$ и касательного $\tau_a(z)$ напряжения по глубине сваи без учета сжимаемости сваи, построенные на основе аналитического и численного решения поставленной задачи

Сравним эти результаты с помощью решения поставленной задачи численным методом (МКЭ) с помощью программного комплекса Plaxis в линейно упруго-пластической постановке. Результаты решения приведены на рис. 4.

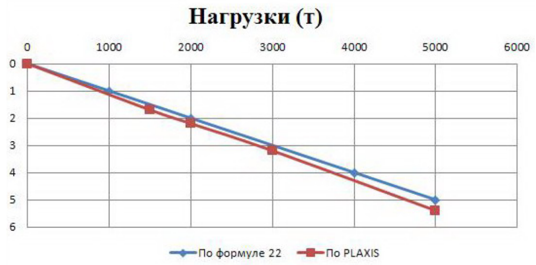

Рис. 4. Графики зависимости осадка-нагрузка, построенные по формуле (22) и результатам численного решения задачи (МКЭ) по программе Plaxis

Таким образом, при взаимодействии сваи с многослойным основанием метод, представленный авторами, способствует определению осадки сваи от действия σ_x, а также напряжений σ_z, τ_z в стволе сваи.

Библиографический список

1. *Тер-Мартиросян З.Г.* Механика грунтов. М. : Изд-во АСВ, 2009. 550 с.
2. *Тер-Мартиросян З.Г., Нгуен Занг Нам.* Взаимодействие свай большой длины с неоднородным массивом с учетом нелинейных и реологических свойств грунтов // Вестник МГСУ. 2008. № 2. С. 3—14.
3. Механика грунтов, основания и фундаменты / С.Б. Ухов, В.В. Семенов, В.В. Знаменский, З.Г. Тер-Мартиросян, С.Н. Чернышев. М. : Изд-во АСВ, 2004. 566 с.
4. *Тер-Мартиросян З.Г., Чинь Туан Вьет.* Взаимодействие одиночной длинной сваи с основанием с учетом сжимаемости ствола сваи // Вестник МГСУ. 2011. № 8. С. 104—111.
5. *Нгуен Занг Нам.* Определение осадки круглого штампа с учетом его заглубления // Сб. тр. 4-й междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и докторантов «Строительство-формирование среды жизнедеятельности». МГСУ. М., 2006.

Поступила в редакцию в январе 2012 г.

Об авторах: **Тер-Мартиросян Завен Григорьевич** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механики грунтов, оснований и фундаментов, **ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет»**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 8 (499) 261-59-88, mgroif@mail.ru;

Чинь Туан Вьет — аспирант кафедры механики грунтов, оснований и фундаментов, **ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет»**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, tr_tviet@yahoo.com.

Для цитирования: *Тер-Мартиросян З.Г., Чинь Туан Вьет.* Взаимодействие одиночной длинной сваи с двухслойным основанием с учетом сжимаемости ствола сваи // Вестник МГСУ. 2012. № 4. С. 28—34.

Z.G. Ter-Martirosyan, Trinh Tuan Viet

INTERACTION OF A LONG SINGLE PILE THAT HAS A DOUBLE-LAYER BASE WITH ACCOUNT FOR COMPRESSIBILITY OF THE PILE SHAFT

The authors provide their solution to the problem of interaction of a long compressible pile that has a double-layer linear deformable base. The paper demonstrates that taking account of compressible properties of the pile material leads to qualitatively new distribution of shearing stresses over the surface of a cylindrical pile. It is noteworthy that increase of the pile length and stiffness of the upper section of the base raise the share of the load perceived by the surface of the pile. Besides, in particular conditions of the soil environment, the load perceived by the lower section of the base may reach approximately 20—30 % of the total load.

Key words: soil, foundation, base, pile, stress, load, compressibility, single-layer, double-layer, distribution of stresses.

References

1. Ter-Martirosyan Z.G. *Mekhanika gruntov* [Soil Mechanics]. Moscow, ASV Publ., 2009, 550 p.

2. Ter-Martirosyan Z.G, Nguyen Giang Nam. *Vzaimodeystvie svay bol'shoy dliny s neodnorodnym massivom s uchetom nelineynykh i reologicheskikh svoystv gruntov* [Interaction between Long Piles and Heterogeneous Soil Body with the Account for Nonlinear and Rheological Properties of Soils]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2008, no. 2, pp. 3—14.

3. Ukhov S.B., Semenov V.V., Znamenskiy V.V., Ter-Martirosyan Z.G., Chernyshev S.N. *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty* [Soil Mechanics, Bases and Foundations]. Moscow, ASV Publ., 2004, 566 p.

4. Ter-Martirosyan Z.G., Trinh Tuan Viet. *Vzaimodeystvie odinochnoy dlinoy svai s osnovaniem s uchetom szhimaemosti stvola svai* [Interaction between a Single Long Pile and the Bedding with Account for Compressibility of the Pile Shaft]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011, no. 8, pp. 104—111.

5. Nguyen Giang Nam. Identification of the Settlement of the Round Die with Allowance of Its Embedding. Collected papers of the 4th International Scientific Conference of Young Scientists, Postgraduates, and Doctoral Students. Construction as Formation of the Living Environment. Moscow, MSUCE, 2006.

About the authors: **Ter-Martirosyan Zaven Grigor'evich, Moscow State University of Civil Engineering (MSUCE)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; mgroif@mail.ru;

Trinh Tuan Viet, Moscow State University of Civil Engineering (MSUCE), 26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; viettt20012007@gmail.com.

For citation: Ter-Martirosyan Z.G., Trinh Tuan Viet. *Vzaimodeystvie odinochnoy dlinnoy svai s dvuhsloynym osnovaniem s uchetom szhimaemosti stvola svai* [Interaction of a Long Single Pile That Has a Double-Layer Base with Account for Compressibility of the Pile Shaft]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2012, no. 4, pp. 28—34.