



УДК 624.154 **Мирсаяпов Илизар Талгатович** доктор технических наук, профессор Email: mirsayapov1@mail.ru **Казанский государственный архитектурно-строительный университет** Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Влияние виброползучести бетона на осадки свай плитно-свайного фундамента

Аннотация

Постановка задачи. Целью работы является исследование дополнительной осадки плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении вследствие деформирования материала в условиях перераспределения усилий сжатия ствола железобетонной сваи, с учетом их распределения между арматурой и бетоном, а также сваей и окружающим грунтом. В литературе отсутствуют результаты исследований по данной проблеме.

Результаты. Проведены теоретические исследования, рассмотрено перераспределение усилий между основными элементами плитно-свайного фундамента. напряженно-деформированного Рассмотрено изменение состояния сжатого железобетонного элемента вследствие проявления деформаций виброползучести бетона и арматуры в связных условиях. На основании проведенных исследований предложено уравнение изменения напряжений и стесненных деформаций бетона и арматуры железобетонной сваи при циклическом нагружении для разработки методики расчета осадки плитно-свайного фундамента.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что впервые предложенная методика позволяет оценить осадку плитно-свайного фундамента с учетом деформирования сжатия железобетонного ствола сваи при циклическом нагружении, что является существенным вкладом в теорию расчета свайных фундаментов и обеспечивает экономию бетона до 15 % по сравнению с нормативным методом.

Ключевые слова: плитно-свайный фундамент, железобетонная свая, бетон, арматура, виброползучесть, стесненные деформации, осадка, грунт, циклическое нагружение.

Для цитирования: Мирсаяпов Илизар Т. Влияние виброползучести бетона на осадки свай плитно-свайного фундамента // Известия КГАСУ. 2021. № 1 (55). С. 5–12. DOI: 10.52409/20731523_2021_1_5.

1. Введение

В общем случае осадка плитно-свайного фундамента представляется в виде суммы осадка условного фундамента и продавливания идеформированное сжатие железобетонной сваи сжатия ствола сваи [1-5]. Осадка за счет сжатия ствола сваи зависит от условий совместного деформирования всех элементов системы «плитный ростверк – сваи – грунт межсвайного пространства – грунт ниже острия свай», прочностных и деформационных свойств бетона и арматуры сваи, параметров циклического нагружения. В случае циклического нагружения закономерности проявления и развития осадки плитно-свайного фундамента за счет сжатия ствола железобетонной сваи не изучены [6-10]. В связи с этим целью исследования является разработка методики расчета осадки плитно-свайного фундамента вследствие деформирования сваи в условиях циклического нагружения [11]. При этом задачами исследования являются:

- установка закономерсноти развития осадки плитно-свайного фундамента при сжатии ствола сваи при циклическом нагружении;

- разработка уравнения совместного деформирования бетона и арматуры сваи и окружающего грунта; разработка расчетной модели; сваи в составе плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении.

5

2. Материалы и методы

При решении поставленных задач использовались метод предельного равновесия для плитно-свайных фундаментов, методы теории ползучести грунтов, методы предельного равновесия для сжатых железобетонных элементов и метод теории ползучести и виброползучести бетона и железобетона.

Действие циклических нагрузок деформирования ствола сваи приводит к возникновению и развитию дополнительных осадок плитно-свайного фундамента, вызванных деформациями бетона при первом цикле нагружения и деформациями виброползучести бетона при последующих циклах нагружения.

Этот процесс рассматривается в пространственной постановке с учетом совместного деформирования всех элементов системы «плитный ростверк – сваи – грунт межсвайного пространства – грунт ниже острия свай» при жестком соединении свай и плитного ростверка. При определении напряжений в сваях учитывается перераспределение усилий между элементами системы в процессе циклического нагружения, совместное деформирование плитного ростверка, свай, грунта межсвайного пространства и грунта ниже острия свай, а также проявления деформаций виброползучести грунта и бетона свай в стесненных условиях (рис. 1).



Рис. 1. Напряженное состояние железобетонной сваи при первом нагружении (иллюстрация авторов)

Напряжение, возникающие на уровне оголовка свай $p_2(N)$, определяется из решения четырех уравнений квазистатики [12].

При этом учитываются различные стадии работы сваи в зависимости от распределения касательных напряжений на боковой поверхности, т.е. когда касательные напряжения имеются по всей длине сваи и когда касательные напряжения отсутствуют в верхней и средней части боковой поверхности [13].

Эти случаи автоматически учитываются при решении системы уравнений [12] для разных уровней нагрузки и количества циклов нагружения.

Для этого напряженно-деформированное состояние сваи рассматривается как для железобетонного сжатого элемента, армированного симметричной продольной арматурой по углам сечения.

3. Результаты и обсуждение

При этом рассматриваются две стадии. Первая стадия соответствует первому циклу нагружения до максимальной нагрузки цикла и расчеты производятся как для статического нагружения. Продольные деформации арматуры и бетона свай в условиях близких к центральному сжатию благодаря сцеплению материалов будут одинаковы:

$$\varepsilon_s^{max}(N=1) = \varepsilon_b^{max}(N=1) = \frac{\sigma_b^{max}(t,t_0)}{E_b}.$$
 (1)

Отсюда сжимающие напряжения в продольной арматуре:

$$\sigma_s^{max}(N=1) = \varepsilon_s^{max}(N=1) \cdot E_s = \sigma_b^{max}(N=1) \cdot \frac{\alpha}{V'}$$
(2)

где $\alpha = \frac{E_s}{E_h};$

 E_{S} – модуль упругости арматурной стали;

E – модуль упругости бетона;

v – коэффициент упругости бетона.

Роль поперечных стержней сводится к обеспечению устойчивости продольных сжатых стержней и поэтому не влияет на развитие вертикальных деформаций сваи.

Уравнение равновесия внешних нагрузок и внутренних усилий в бетоне и продольной арматуре сваи:

$$N_{2}^{max}(N=1) = \sigma_{b}^{max}(N=1) \cdot A_{\rm CB} + \sigma_{s}^{max}(N=1) \cdot A_{s} = \sigma_{b}^{max}(N=1) \cdot A_{\rm CB}\left(1 + \frac{\mu\alpha}{V}\right), \tag{3}$$

где *µ* – коэффициент продольного армирования сваи.

Отсюда сжимающее напряжение в бетоне сваи при первом нагружении до максимальной нагрузки цикла:

$$\sigma_{(N=1)}^{max} = \frac{P_2^{
(4)$$

На второй стадии рассматривается влияние деформаций виброползучести железобетонной сваи на увеличение общих деформаций ствола сваи и как следствие дополнительных осадок плитно-свайного фундамента за сжатие ствола сваи (рис. 2).



Рис. 2. Остаточное напряженное состояние в сечении сваи при циклическом нагружении (иллюстрация автора)

Деформации железобетонной сваи являются следствием виброползучести бетона. Стальная арматура становится внутренней связью, препятствующей свободным деформациям виброползучести бетона. В железобетонной свае под нагрузкой перераспределение усилий между арматурой и бетоном является следствием стесненной виброползучести бетона.

Стесненные деформации виброползучести бетона приводят к появлению в железобетонной свае внутрение уравновешенных напряжений, растягивающих в бетоне и сжимающих в арматуре. Под влиянием разности деформаций свободной виброползучести бетона $\varepsilon_{bn}^{\text{виб}}(N)$ и стесненной виброползучести армированного элемента $\varepsilon_{bn}^{\text{виб}}(N)$

$$\varepsilon_{b\ pl}^{\text{oct}}(N) = \varepsilon_{b\ pl}^{\text{виб}}(N) - \varepsilon_{pl}^{\text{виб}}(N)_{bs},\tag{5}$$

возникают растягивающие напряжения в бетоне:

$$\sigma_{bt}^{\text{AOII}}(N) = \varepsilon_{b \, pl}^{\text{OCT}}(N) \cdot E_b(N), \tag{6}$$

где *E_b* (*N*) – модуль упругопластичности бетона при циклическом нагружении.

Наибольшие значения напряжений находятся в зоне контакта с арматурой. Деформации $\varepsilon_{pl}^{\text{виб}}(N)_{bs}$ для арматуры являются упругими и поэтому в ней возникают сжимающие напряжения:

$$\sigma_s^{\text{oct}}(N) = \varepsilon_{pl}^{\text{BHG}}(N)_{bs} \cdot E_s.$$
⁽⁷⁾

Уравнения равновесия внутренних усилий железобетонной сваи, армированной двухсторонней симметричной арматурой, имеет вид:

$$\sigma_s^{\text{ocr}}(N) * A_s = \sigma_{bt}^{\text{AOII}}(N) \cdot A_{\text{CB}}, \qquad (8)$$

где A_{cB} – площадь поперечного сечения сваи.

Из (8) определяются дополнительные (остаточные) напряжения в арматуре:

$$\sigma_s^{\text{OCT}}(N) = \sigma_{bt}^{\text{AOT}}(N) \frac{A_b}{A_s} = \frac{\sigma_{bt}^{\text{AOT}}(N)}{\mu},\tag{9}$$

где $\mu = \frac{A_s}{A_{CB}}$ – коэффициент продольного армирования сваи. Подставляя в (9) деформации, выраженные через напряжение по (6)-(8):

$$\frac{\sigma_{bt}^{\text{don}}(N)}{E_b(N)} = \varepsilon_{b\ pl}^{\text{BMG}}(N) - \frac{\sigma_{bt}^{\text{don}}(N)}{\mu E_s}.$$
(10)

После преобразований из (10) определяем значение дополнительных растягивающих напряжений в бетоне:

$$\sigma_{bt}^{\text{gon}}(N) = \frac{\varepsilon_{b \ pl}^{\text{BMG}}(N) \cdot E_s}{\frac{1}{\mu} + \frac{\alpha}{V_p}},\tag{11}$$

где V_p – коэффициент упруго пластичности бетона при циклическом нагружении.

Исходя из уравнения (5) определяем стесненные деформации виброползучести бетона сваи при циклическом нагружении: лоп

$$\varepsilon_{pl\,bs}^{\text{виб}}(N) = \varepsilon_{b\,pl}^{\text{виб}}(N) - \varepsilon_{b\,pl}^{\text{ост}}(N) = \varepsilon_{b\,pl}^{\text{виб}}(N) - \frac{\sigma_{bt}^{\text{моп}}(N)}{E_b(N)}.$$
(12)

Деформации свободной виброползучести бетона сваи определяются по методике, предложенной автором [14-16]:

$$\varepsilon_{b\ pl}^{\text{виб}}(N) = \sigma_{b}^{max}(t,t_{0}) \cdot C_{\infty}(t,\tau) \cdot \langle \left[1 - e^{-\gamma(t-t_{0})}\right] \cdot \rho_{b} + \left[1 - (1-a)^{N}\right] \cdot (1-\rho_{b}) \rangle \\ \cdot S_{k}\left(\frac{\sigma_{b}^{max}}{R_{b}}\right) \cdot f(N),$$
(13)

где $\sigma_b^{max}(t, t_0)$ – максимальные напряжения сжатия в бетоне сваи при циклическом нагружении;

 $C_{\infty}(t,\tau)$ – предельная мера ползучести бетона, в практических расчетах можно принимать $C_{\infty}(t,\tau) = (1,66 - 0,0332R_b);$

$$\rho_b = \frac{\sigma_b^{max}}{\sigma_b^{max}}$$
 – коэффициент асимметрии цикла напряжений в бетоне сваи;

a, γ – параметры ползучести, в практических расчетах $a = 0, 6, \gamma = 0, 04;$ $S_k\left(\frac{\sigma_b^{max}}{R_b}\right) = 1 + \eta_n \left(\frac{\sigma_b^{max}}{R_b}\right)^{m_n} - \phi$ ункции нелинейности деформаций ползучести бетона;

 $m_n = 5 - 0,07R_b, \eta_n = \frac{45}{R_b}$ параметры нелинейности; $f(N) = \frac{1}{30} \left\{ 2,5 + \frac{1}{1 - 0,41[0,0847(N_i - N_1) * 10^{-5}]^2} + e^{k * 0,095(N_i - N_1)^{10^{-5}}} \right\} - \varphi$ ункция роста нелинейной части леформаций виброползучести:

$$\begin{split} &N_1 = N_i \left[\left(\frac{\sigma_b^{max}}{R_{b,rep}} - 1 \right) \frac{\sigma_b^{max}}{R_{b,rep}} \right], \text{ если } \frac{\sigma_b^{max}}{R_{b,rep}} > 1,1 ; \\ &N_1 = 0, 1 N_i, \text{ если } \frac{\sigma_b^{max}}{R_{b,rep}} \le 1,1; \end{split}$$

*N*_i – долговечность бетона при заданном уровне нагружении;

 $k = 1, 8 \cdot 10^{6 \cdot m(1 - N_1)}$, коэффициент;

$$m = 6,33 \left(\frac{k_{\partial b}R_b - \sigma_b^{max}}{k_{\partial b}R_b - R_{b,rep}} \right);$$

 $R_{b,rep}$ – абсолютный предел выносливости бетона на базы 2×10⁶ циклов, $R_{b,rep} = 0.5R_b$; $k_{\partial b}$ – коэффициент динамического упрочнения бетона, принимается равным $k_{\partial b} = 1,16$. Модуль деформации бетона при циклическом нагружении определяется согласно методике, предложенной автором, по формуле (14):

$$E_b(t,\tau) = \frac{\sigma_b^{max}(t,\tau)}{\varepsilon_{be} + \varepsilon_{b\ pl}^{\text{BMG}}(N)},\tag{14}$$

где $\sigma_b^{max}(t,\tau)$ – максимальное напряжение в бетоне сваи к моменту времени t = N (где N – количество циклов нагружения);

 ε_{be} , $\varepsilon_{b \ pl}^{\text{виб}}(N)$ — упругие и пластические деформации бетона сваи к тому же моменту времени соответственно.

Учитывая (13) и, что $\varepsilon_{be} = \frac{\sigma_b^{max}(t,\tau)}{E_b(t_o)}$, выражение (14), после некоторых преобразований приводим к виду:

$$E_{b}(t,\tau) = E_{b}(t_{0}) \cdot \left\{ 1 + C_{\infty}(t,\tau) \cdot E_{b}(t_{0}) \cdot \langle \left[1 - e^{-\gamma(t-t_{0})}\right] \rho_{b} + \left[1 - (1-a)^{N_{i}}\right](1-\rho_{b}) \rangle \cdot S_{k}\left(\frac{\sigma_{b}^{max}}{R_{b}}\right) \cdot f(N) \right\}^{-1}, \quad (15)$$

где $E_b(t_0)$ – начальный модуль упругости бетона.

Учитывая вышеизложенное, получаем уравнение дополнительной осадки за счет сжатия ствола сваи при циклическом нагружении $\Delta S_C(N)$. При этом дополнительная осадка $\Delta S_C(N)$ представлена в виде суммы:

$$\Delta S_C(N) = \Delta S_{C1} + \Delta S_{C2}(N), \tag{16}$$

где ΔS_{CI} – дополнительная осадка сваи при первом нагружении до максимальной нагрузки;

 $\Delta S_{C2}(N)$ – дополнительная осадка сваи при циклическом нагружении вследствие развития и накопления стесненных деформаций виброползучести бетона.

В общем случае дополнительная осадка $\Delta S_C(N)$ представляется в виде (рассматривается значение дополнительной осадки при максимальной нагрузке цикла):

$$\Delta S_c(N) = \left[\varepsilon_b^{max}(N=1) + \varepsilon_{pl\,bs}^{max}(N)\right](l-a_c),\tag{17}$$

где *l* – длина сваи, *a*_c – размер поперечного сечения сваи.

Тогда с учетом (1), (4), (11)-(13) выражение (17) приводим к виду:

$$\Delta S_{c}(N) = \left\{ \frac{P_{2}^{max}}{A_{cB}\left(1 + \frac{\mu\alpha}{V}\right) \cdot E_{b}(t_{0})} + \frac{P_{2}^{max}(N)}{A_{cB}(1 + \frac{\mu\alpha}{V})} \cdot c_{\infty}(t,\tau) \cdot f(N) \cdot S_{k}\left(\frac{\sigma_{b}^{max}}{R_{b}}\right) \right.$$

$$\left. \cdot \left\{ \left[1 - e^{-\gamma(t-t_{0})}\right] \cdot \rho_{b} + \left[1 - (1-a)^{N}\right] \cdot (1-\rho_{b})\right\} \cdot \left[1 - \frac{E_{s}}{\left(\frac{1}{\mu} + \frac{\alpha}{V}\right) \cdot E_{b}(N)}\right] \right\}$$

$$\left. \cdot (l-a_{c}), \qquad (18)$$

где P_2^{max} – продольное усилие в стволе сваи при первом нагружении до максимальной нагрузки цикла;

 $P_2^{max}(N)$ – продольное усилие в стволе сваи при циклическом нагружении, при N>1 цикла.

4. Заключение

1. Выполненные теоретические исследования напряженно-деформированного состояния железобетонной сваи в составе плитно-свайного фундамента позволили определить основные закономерности развития осадки ствола свайного фундамента в условиях циклического нагружения, согласно которым осадка из-за деформирования ствола сваи происходит вследствие циклического деформирования сжатия бетона и арматуры сваи в стесненных условиях. При этом происходит перераспределение усилий между бетоном и арматурой сваи.

2. Разработаны уравнения развития осадок плитно-свайного фундамента с учетом сжатия ствола сваи при циклическом нагружении. Полученное уравнение развития осадок плитно-свайного фундамента описывает основные характерные особенности поведения таких фундаментов, наблюдаемые в лабораторных и полевых экспериментальных исследованиях, и позволяет достоверно оценить осадки плитно-свайного фундамента за счет сжатия ствола сваи при циклическом нагружении.

Список библиографических ссылок

- Katzenbach R., Leppla S. Environment-friendly and economically optimized foundation systems for sustainable high-rise buildings: ICSMGE 2017 – 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering / 19th ICSMGE Secretariat. Seoul, 2017. P. 3381–3384.
- Katzenbach R., Leppla S. Optimised design of foundation systems for high-rise structures: Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation - Proceedings of the 6th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation / CRC Press, Balkema. Cape Town, 2016. P. 2042–2047. DOI: 10.1201/9781315641645-338.
- 3. Bokov I. A., Fedorovskii V. G. On the Calculation of Groups of Piles Using Mutual Influence Coefficients in the Elastic Half-Space Model // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2018. V. 54. Iss. 6. P. 363–370. DOI: 10.1007/s11204-018-9482-8.
- Bokov I. A., Fedorovskii V. G. On the Applicability of the Influence Function Obtained from Single-Pile Calculations for the Calculation of Pile Groups // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2019. V. 55. Iss. 6. P. 359–365. DOI: 10.1007/s11204-019-09549-y.
- Hirai H. Assessment of cyclic response to suction caisson in clay using a threedimensional displacement approach // Mar. Georesources Geotechnol. 2018. Vol. 36. Iss. 7. P. 805–817. DOI: 10.1080/1064119X.2017.1386743.
- 6. Харичкин А. И., Шулятьев О. А., Курилло С. В., Федоровский В. Г. Особенности взаимодействия свай между собой и с грунтом в составе групп // Вопросы проектирования и устройства надземных и подземных конструкций зданий и сооружений. 2018. С. 56–67.
- 7. Травуш В. И., Шулятьев О. А., Шулятьев С. О., Шахраманьян А. М., Колотовичев Ю. А. Анализ результатов геотехнического мониторинга башни «Лахта центр» // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2019. № 2. С. 15–21.
- 8. Шулятьев О. А. Новый свод правил по проектирванию оснований и фундментов высотных зданий // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2016. № 6. С. 37–40.
- Kayumov R. A., Tazyukov B. F., Mukhamedova I. Z. Identification of Mechanical Characteristics of a Nonlinear-Viscoelastic Composite by Results of Tests on Shells of Revolution // Mechanics of Composite Materials. 2019. Vol. 55. P. 171–180. DOI: 10.1007/s11029-019-09802-3.
- Ren X.-W., Xu Q., Teng J., Zhao N., Lv L. A novel model for the cumulative plastic strain of soft marine clay under long-term low cyclic loads // Ocean Eng. 2018. Vol. 149. P. 194–204. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.12.028.
- Ni J., Indraratna B., Geng X.Y., Carter J. P., and Chen Y.L. Model of soft soils under cyclic loading. Int. J. Geomech. 2015. Vol. 15. Iss. 4. P. 212. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000411.
- 12. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Combined Plate-Pile Foundations Settlement Calculation under Cyclic Loading // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 890. № 012069. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012069.
- 13. Тер-Мартиросян З. Г., Сидоров В. В. Взаимодействие длинной барреты с однослойным и двухслойным основанием // Жилищное строительство. 2010. № 1. С. 36–39.
- Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlement of raft-pile foundations under cyclic loading: Energy Geotechnics – Proceedings of the 1st International Conference on Energy Geotechnics / CRC Press, Balkema. Kiel, 2016. P. 423–428.
- 15. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V., Ivanova O. A. Low-Cycle endurance and deformation of clay soils under three-axis cyclic loading // Housing construction in Moscow. 2012. Iss. 9. P. 6–8. DOI: 18083643/0044-4472.
- Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V. Bearing capacity of foundations under regime cyclic loading: 15th Asian Reg. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng. ARC. 2015. P. 1214–1217.

Mirsayapov Ilizar Talgatovich

doctor of technical sciences, professor Email: mirsayapov1@mail.ru Kazan State University of Architecture and Engineering The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Influence of concrete vibrocreep on pile settlements of slab-pile foundation

Abstract

Problem statement. The aim of this work is to study the additional settlement of slab-pile foundation under cyclic loading due to the compression of the reinforced concrete piles taking into account the redistribution of efforts between the reinforcement, concrete, piles and the surrounding soil. There are no research results on this issue in the literature.

Results. We carried out theoretical studies, considered the redistribution of efforts between the main elements of the slab-pile foundation. The article considers the change in the stress-strain state of a compressed reinforced concrete element due to the appearance of deformations of concrete and reinforcement vibrocreep in coherent conditions. Based on the research, we proposed the equation of changes in stresses and constrained deformations of concrete pile reinforcement under cyclic loading to develop the method for calculating the settlement of a slab-pile foundation.

Conclusions. The significance of the results for the construction industry is that for the first time the proposed method allows us to estimate the settlements of the slab-pile foundation due to compression of the pile under cyclic loading. It is a significant contribution to the theory of pile foundations calculation and provides concrete saving of up to 15 % compared to the standard method.

Keywords: slab-pile foundation, reinforced concrete pile, concrete, reinforcement, vibrocreep, constrained deformations, settlement, soil, cyclic loading.

For citation: Mirsayapov Ilizar T. Influence of concrete vibrocreep on pile settlements of slab-pile foundation // Izvestija KGASU. 2021. № 1 (55). P. 5–12. DOI: 10.52409/20731523_2021_1_5.

References

- Katzenbach R., Leppla S. Environment-friendly and economically optimized foundation systems for sustainable high-rise buildings: ICSMGE 2017 – 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering / 19th ICSMGE Secretariat. Seoul, 2017. P. 3381–3384.
- Katzenbach R., Leppla, S. Optimised design of foundation systems for high-rise structures: Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation – Proceedings of the 6th International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation / CRC Press, Balkema. Cape Town, 2016. P. 2042–2047. DOI: 10.1201/9781315641645-338.
- Bokov I. A., Fedorovskii V. G. On the Calculation of Groups of Piles Using Mutual Influence Coefficients in the Elastic Half-Space Model // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2018. V. 54. Iss. 6. P. 363–370. DOI: 10.1007/s11204-018-9482-8.
- Bokov I. A., Fedorovskii V. G. On the Applicability of the Influence Function Obtained from Single-Pile Calculations for the Calculation of Pile Groups // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2019. V. 55. Iss. 6. P. 359–365. DOI: 10.1007/s11204-019-09549-y.
- Hirai H. Assessment of cyclic response to suction caisson in clay using a threedimensional displacement approach // Mar. Georesources Geotechnol. 2018. Vol. 36. Iss. 7. P. 805–817. DOI: 10.1080/1064119X.2017.1386743.
- 6. Harichkin A. I., Shulyatev O. A., Kurillo S. V., Fedorovsky V. G. Features of interaction of piles with each other and with the ground as a part of groups // Voprosy

proyektirovaniya i ustroystva nadzemnykh i podzemnykh konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy. 2018. P. 56-67.

- 7. Travush V. I., Shulyatev O. A., Shulyatev S. O., Shakhramanyan A. M., Kolotovichev Yu. A. Analysis of the results of geotechnical monitoring of the «Lakhta center» tower // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 2019. № 2. P. 15–21.
- 8. Shulyatev O. A. New set of rules for designing foundations and foundations of high-rise buildings // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 2016. № 6. P. 37–40.
- Kayumov R. A., Tazyukov B. F., Mukhamedova I. Z. Identification of Mechanical Characteristics of a Nonlinear-Viscoelastic Composite by Results of Tests on Shells of Revolution // Mechanics of Composite Materials. 2019. Vol. 55. P. 171–180. DOI: 10.1007/s11029-019-09802-3.
- Ren X.-W., Xu Q., Teng J., Zhao N., Lv L. A novel model for the cumulative plastic strain of soft marine clay under long-term low cyclic loads // Ocean Eng. 2018. Vol.149. P. 194–204. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.12.028.
- 11. Ni J., Indraratna B., Geng X.Y., Carter J. P., and Chen Y.L. Model of soft soils under cyclic loading. Int. J. Geomech. 2015. Vol. 15. Iss. 4. P. 212. DOI: 10.1061/ (ASCE)GM.1943-5622.0000411.
- 12. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Combined Plate-Pile Foundations Settlement Calculation under Cyclic Loading // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 890. 012069. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012069.
- 13. Ter-Martirosyan Z. G., Sidorov V. V. Interaction of a long barreta with a single-layer and double-layer base // Zhilishchnoye stroitel'stvo. 2010. № 1. P. 36–39.
- Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlement of raft-pile foundations under cyclic loading: Energy Geotechnics – Proceedings of the 1st International Conference on Energy Geotechnics / CRC Press, Balkema. Kiel, 2016. P. 423–428.
- 15. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V., Ivanova O. A. Low-Cycle endurance and deformation of clay soils under three-axis cyclic loading // Housing construction in Moscow. 2012. Iss. 9. P. 6–8. DOI: 18083643/0044-4472.
- Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V. Bearing capacity of foundations under regime cyclic loading: 15th Asian Reg. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng. ARC. 2015. P. 1214–1217.