



УДК 624.131

Мирсаяпов Илизар Талгатович

доктор технических наук, профессор

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Осадка продавливания плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – выявление закономерности проявления осадки продавливания плитно-свайных фундаментов. При циклическом нагружении осадка плитно-свайного фундамента складывается из трех составляющих: осадки условного фундамента, осадки за счет сжатия ствола сваи и осадки продавливания. Осадка продавливания плитно-свайного фундамента существенно изменяет распределение нагрузок на сваи в составе плитно-свайного фундамента. При циклическом нагружении закономерности развития осадки продавливания плитно-свайных фундаментов исследованы недостаточно.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в том, что автором была создана методика определения осадки продавливания плитно-свайного фундамента при циклических нагрузках. Данный процесс рассматривается в пространственной постановке с учетом совместного деформирования всех элементов системы «плитный ростверк – сваи – грунт межсвайного пространства – грунт ниже острия сваи». Учитывается перераспределение усилий между элементами системы в процессе циклического нагружения за счет проявления деформации грунта, плитного ростверка и свай в связанных условиях. Напряжения в отдельных конкретных зонах системы определяют путем совместного решения 4 уравнений квазистатики. Осадка продавливания плитно-свайного фундамента происходит, когда напряжение под пятой сваи превышает усталостную прочность грунта при трехосном циклическом сжатии.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что предложенная методика позволяет наиболее точно оценить напряженно-деформированное состояние отдельных элементов и осадку продавливания плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении с учетом перераспределения усилий между элементами системы «плитный ростверк – сваи – грунт межсвайного пространства – грунт ниже острия сваи», что является существенным вкладом в теорию расчета плитно-свайных фундаментов и обеспечивает экономию бетона до 15 % по сравнению с существующими методами.

Ключевые слова: плитно-свайный фундамент, циклическая нагрузка, сваи, ростверк, грунт, напряжение, трехосное нагружение, продавливание, осадка, удельное сцепление, касательное напряжение.

Для цитирования: Мирсаяпов Илизар Т. Осадка продавливания плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении // Известия КГАСУ. 2020. № 4 (54). С. 6–14.

1. Введение

Осадка продавливания плитно-свайного фундамента существенно изменяет распределение нагрузок на сваи в составе плитно-свайного фундамента, особенно на крайние и угловые, которые перегружены, и поэтому могут оседать без увеличения на них нагрузки, то есть перейти в предельное состояние по грунту ниже острия (если не жесткое соединение сваи с ростверком) и под плитным ростверком одновременно (если соединение сваи с плитным ростверком жесткое) [1-5]. Такие сваи называют «ползучими». Фундаменты, в которых часть или все сваи «ползучие» могут служить оптимальным решением, позволяющим максимально уменьшить количество свай. При циклическом нагружении закономерности проявления осадки продавливания свайного фундамента практически не исследовано [6-10].

Целью исследования является разработка методики расчета осадки продавливания плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении.

Задачи исследования:

- установление закономерности развития осадки продавливания плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении;
- разработка уравнения несущей способности и осадки продавливания плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении;
- разработка расчетной модели деформирования плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении.

2. Материалы и методы

Ползучесть крайних и угловых свай существенно изменяет распределение нагрузок на все сваи плитно-свайного фундамента [11-12]. Этот процесс рассматривается в пространственной постановке с учетом совместного деформирования всех элементов системы «плитный ростверк – сваи – грунт межсвайного пространства – грунт ниже острия сваи» за счет жесткого соединения сваи и плитного ростверка (рис. 1).

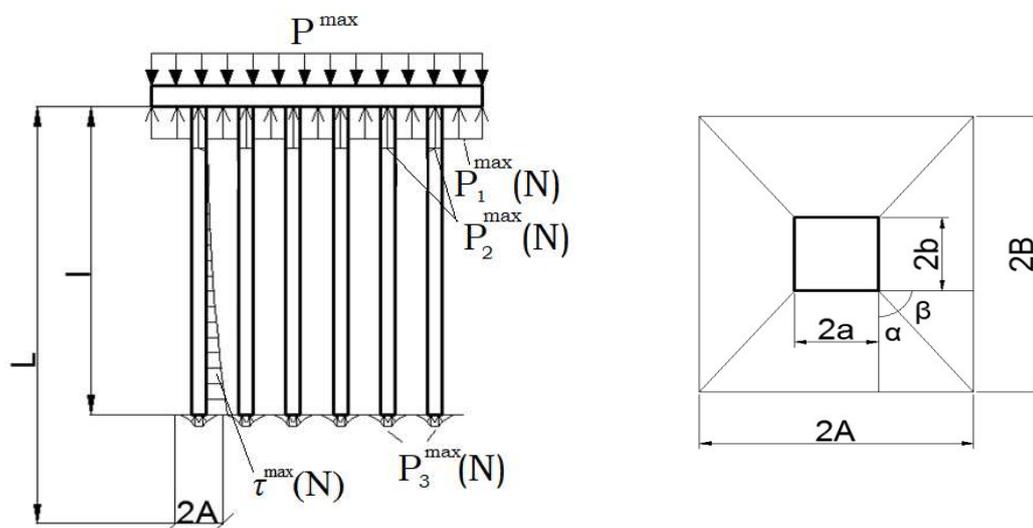


Рис. 1. Расчетная схема плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении (иллюстрация автора)

Учитывается перераспределение усилий между элементами системы в процессе циклического нагружения за счёт совместного деформирования плитного ростверка, свай, грунта межсвайного пространства и грунта ниже острия сваи. Напряжения в отдельных конкретных зонах системы определяют путем совместного решения 4 уравнений квазистатики, при этом за основу приняты результаты исследования З.Г. Тер-Мартirosяна для случая статического нагружения [13]:

$$\begin{cases}
 p \cdot AB = p_2(N) \cdot ab + p_1(N)(AB - ab); \\
 p_2(N) \cdot ab = p_3(N) \cdot ab - 4(a + b) \cdot l \cdot \frac{\tau_0(N)}{\alpha} \cdot e^{-\alpha l} + (a + b) \cdot l \cdot \frac{\tau_0(N)}{\alpha}; \\
 \frac{p_1(N) \cdot \beta_{gr} \cdot L \left(1 - \frac{l}{L}\right) + \frac{k_1 \cdot \tau_0(N) \cdot (A - a)}{3G_{gr}(N)} + \frac{k_2 \cdot \tau_0(N) \cdot (B - b)}{3G_{gr}(N)}}{E_{gr}(N)} = \frac{\omega \cdot a \cdot p_3(N) \cdot (1 - \nu_{gr}) \cdot k(l)}{G_{gr}(N)}; \\
 \frac{p_1(N) \cdot \beta_{gr} \cdot L + \frac{k_1 \cdot \tau_0(N) \cdot e^{-\alpha l} \cdot (A - a)}{3G_{gr}(N)} + \frac{k_2 \cdot \tau_0(N) \cdot e^{-\alpha l} \cdot (B - b)}{3G_{gr}(N)}}{E_{gr}(N)} = \frac{\tau_0(N)(a + b)l}{ab\alpha \cdot E_p} + \frac{\tau_0(N)(a + b)e^{-\alpha l}}{ab\alpha^2 \cdot E_p} + \\
 \frac{p_3(N) \cdot l + \frac{\omega \cdot a \cdot p_3(N) \cdot (1 - \nu_{gr}) \cdot k(l)}{G_{gr}(N)} - \frac{\tau_0(N)(a + b)}{ab\alpha^2 \cdot E_p}}{E_p}
 \end{cases} \quad (1)$$

здесь

$$\begin{aligned}
 p_1^{\max}(N) &= \delta_{gr1}^{\max}(N) - \Delta\sigma_{gr}(N), \\
 p_2^{\max}(N) &= \sigma_p^{\max}(N) + \Delta\sigma_p(N),
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 p_3^{\max}(N) &= \sigma_{gr3}^{\max}(N) - \Delta\sigma_{gr}(N), \\
 \tau^{\max}(N) &= \tau_0(N) \cdot e^{-\alpha z},
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\tau(z) = \tau_0 \cdot e^{-\alpha z}, \tag{4}$$

$$\alpha = \frac{5}{l}. \tag{5}$$

Напряжения в элементах системы «плитный ростверк – сваи – грунт межсвайного пространства – грунт ниже острия свай» определяют путем совместного решения вышеприведенных четырех уравнений в зависимости от количества циклов нагружения, параметров циклического нагружения и грунтовых условий для конкретного цикла нагружения N . При этом учитывается изменение зоны предельного равновесия по боковой поверхности свай в зависимости от координаты точки пересечения эпюр мобилизованного касательного напряжения – $\tau^{max}(N)$ и предельного касательного напряжения – $\tau^*(N)$ (рис. 2).

Предельные значения касательных напряжений в грунте вдоль свай вычисляются исходя из закона Кулона-Мора:

$$\tau^*(N) = \gamma z \cdot \tan \varphi(N) + C(N) + \Delta\sigma_x^{доп} \cdot \tan \varphi(N), \tag{6}$$

где $C(N)$ – удельное сцепление между частицами грунта в условиях циклического нагружения;

$\Delta\sigma_x^{доп} = \sigma_{zp} \cdot \text{tg} \varphi(N)$ – дополнительное горизонтальное давление на сваю от грунта вследствие совместного деформирования системы (влияние ростверка);

σ_{zp} – напряжения в грунте межсвайного пространства от действия ростверка;

$\varphi(N)$ – угол внутреннего трения грунта при циклическом нагружении.

Удельное сцепление между частицами грунта в условиях циклического нагружения вычисляется исходя из результатов исследования автора [14] по зависимости:

$$c(N) = c_0 \cdot m(t_1 \tau_1) \cdot \lambda(t_1 \tau_1) \cdot \sqrt{\frac{k(\tau_1)}{k(t)} + \frac{1}{1+k(\tau_1)} \cdot c(t_1 \tau)}, \tag{7}$$

где c_0 – удельное сцепление между частицами грунта при кратковременном статическом нагружении.

Система уравнений (1-4) решается для каждого рассматриваемого цикла с учетом изменения всех параметров системы вследствие перераспределения усилий между плитным ростверком, сваями, грунтом в процессе циклического нагружения, в т. ч. с учетом изменения зоны предельного равновесия в межсвайном пространстве (рис. 2) [15].

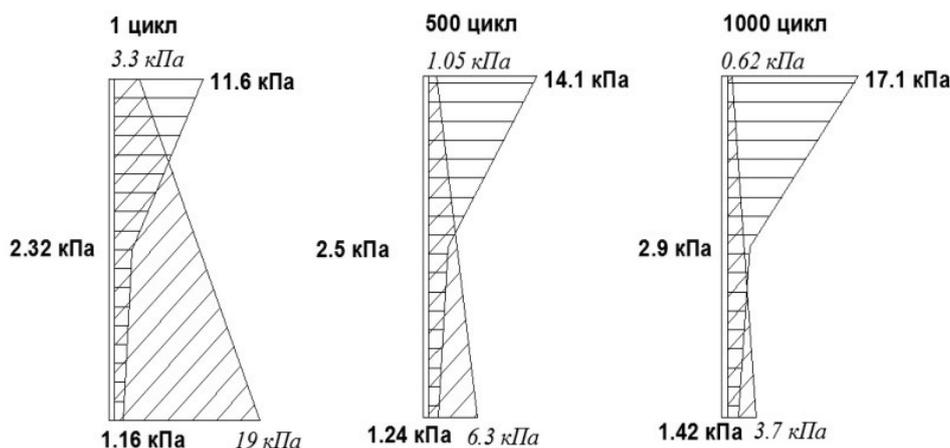


Рис. 2. Эпюры мобилизованного касательного напряжения и предельного касательного напряжения в грунте вдоль свай при различных циклах нагружения (иллюстрация автора)

Касательные напряжения вычисляется следующим образом:

$$\tau_0^{max}(N) = \frac{a \cdot b (p_3(N) - p_2(N))}{(a+b) \cdot l \cdot \frac{1}{\alpha} (4e^{-\alpha l} - 1)}. \tag{8}$$

Напряжения в грунте под ростверком вычисляются по формуле:

$$p_1^{max}(N) = \frac{p^{max, AB} - p_2^{max}(N) \cdot ab}{(AB - ab)}. \tag{9}$$

Напряжение в сечении сваи на уровне оголовка при циклическом нагружении определяется по формуле:

$$p_2^{max}(N) = \left[P \cdot G_{гр}(N) \cdot AB(AB - ab) \cdot L \cdot \beta_{гр} \left(1 - \frac{1}{L} \right) + 0,33 \cdot \tau_0(N) \cdot E_{гр}(N) \cdot (A - a)(AB - ab) \cdot k_1 + 0,33 \cdot \tau_0(N) \cdot E_{гр}(B - b)(AB - ab) - 4 \cdot \frac{\tau_0(N)}{\alpha} \cdot E_{гр}(N) \cdot l(AB - ab) \cdot \omega(1 - v_{гр}) \cdot k(l) + \frac{\tau_0(N)}{\alpha} \cdot E_{гр}(N) \cdot \frac{a+b}{b} \cdot l(AB - ab) \cdot e^{-\alpha l} \cdot \omega(1 - v_{гр}) \cdot k(l) \right] \cdot \left[a \cdot \omega \cdot (1 - v_{гр}) \cdot k(l) \cdot (AB - ab) \cdot E_{гр}(N) + ab \cdot \beta_{гр} \cdot L \cdot \left(1 - \frac{1}{L} \right) \cdot G_{гр}(N) \right]^{-1} \quad (10)$$

где G – модуль сдвига грунта при циклическом нагружении;
 $k(l)$ – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние глубины приложения жесткого штампа;

l – длина сваи.

Напряжения в грунте под нижним концом сваи можно вычислить по формуле:

$$p_3^{max}(N) = \frac{p_2(N) \cdot 4ab + 4(a + b) \cdot l \cdot \frac{\tau_0(N)}{\alpha}}{4ab} - \frac{4(a + b) \cdot l \cdot \frac{\tau_0(N)}{\alpha} \cdot e^{-\alpha l}}{4ab} \quad (11)$$

Несущая способность грунтового основания плитно-свайного фундамента в условиях циклического нагружения в расчетный момент времени ($t = N$) в зависимости от соотношения $\tau_0(N) \leq \tau^*(N)$ оценивается исходя из условий для двух зон (рис. 3):

- в грунте под плитным ростверком:

$$p_1^{max}(N) \leq \sigma_{1u}(N); \quad (12)$$

- в грунте под нижним концом сваи:

$$p_3^{max}(N) \leq \sigma_{1u}(N); \quad (13)$$

где $\sigma_{1u}(N)$ – предельные напряжения на сжатие в грунте при трехосном циклическом нагружении.

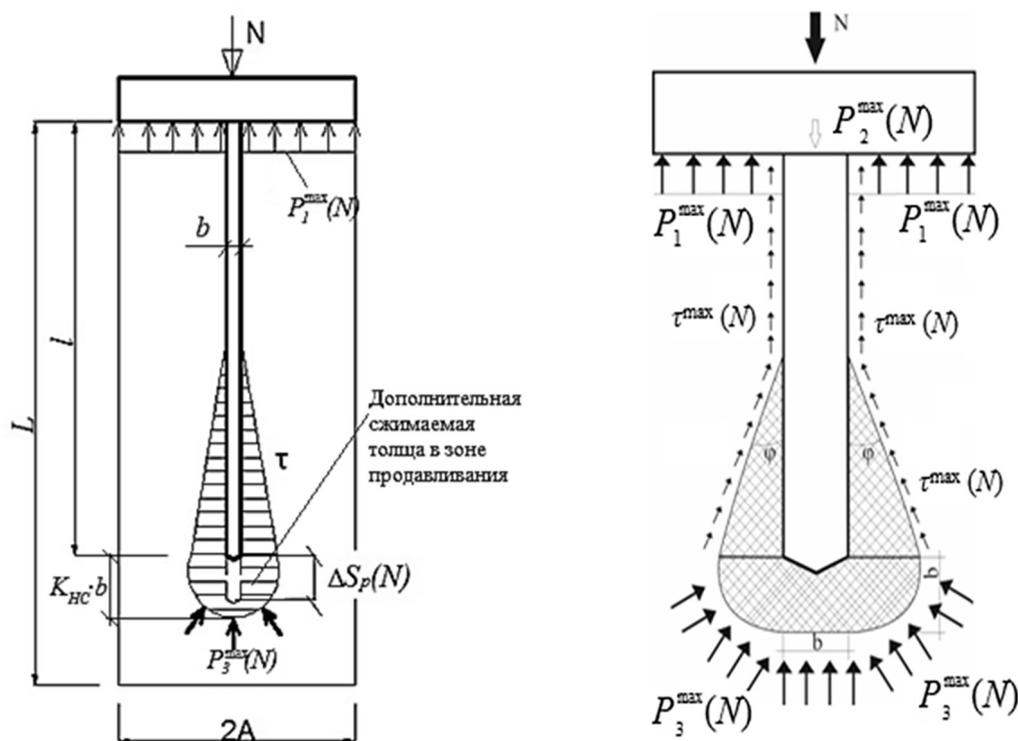


Рис. 3. Расчетная схема системы свая – грунт при расчете осадки продавливания (иллюстрация автора)

Предельные напряжения в грунте основания плитно-свайного фундамента при трехосном циклическом нагружении определяются исходя из расчетной модели грунта при пространственном режимном нагружении, разработанной Илизаром Т. Мирсаяповым и И.В. Королевой [16] и представляются в виде:

$$\sigma_{1u}(N) = \frac{4}{A_1} [\sigma_v(t, t_1, N) \cdot A_{sh} \cdot \cos \alpha_1 \cdot (t, t_1, N) + \tau_v(t, t_1, N) \cdot A_{sh} \cdot \sin \alpha_1 \cdot (t, t_1, N)]. \quad (14)$$

Нормальное напряжение к плоскости предельного равновесия:

$$\sigma_v(t, t_1, N) = \sigma_1 \cdot l(t, t_1, N) \cdot l'(t, t_1, N) + \sigma_2 \cdot m(t, t_1, N) \cdot m'(t, t_1, N) + \sigma_3 \cdot n(t, t_1, N) \cdot n'(t, t_1, N) + \sigma_d(t, t_1, N). \quad (15)$$

Дилатантные напряжения:

$$\sigma_d(t, t_1, N) = \frac{E \cdot \Delta \delta_d}{(1 + \nu) \cdot r}. \quad (16)$$

Сдвиговые напряжения на участке предельного равновесия:

$$\tau_v(t, t_1, N) = \sigma_v(t, t_1, N) \cdot \operatorname{tg} \varphi(t, t_1, N) + c(t, t_1, N). \quad (17)$$

где $\sigma_v(t, t_1, N)$ – нормальное напряжение к плоскости предельного равновесия;

$\varphi(t, t_1, N)$ – угол внутреннего трения с учетом фактора времени;

$c(t, t_1, N)$ – удельное сцепление с учетом фактора времени.

3. Результаты

Таким образом, рассматривается предельное напряженно-деформированное состояние системы «плитный ростверк – свая – грунт межсвайного пространства – грунт ниже острия сваи». При жестком соединении сваи с плитным ростверком все элементы системы деформируются совместно в процессе циклического нагружения и происходит перераспределение усилий между ними.

Осадка продавливания плитно-свайного фундамента определяется для стадии, когда касательные напряжения по боковой поверхности отсутствуют в верхней и средней части свай вследствие достижения предельного сопротивления на сдвиг. Принимается, что в грунте под подошвой плитного ростверка и под острием сваи реализуется пространственное напряженное состояние. Продавливание грунта под острием сваи происходит, когда напряжения под пятой сваей и под плитным ростверком превышают усталостную прочность и предельные деформации грунта при трехосном циклическом сжатии.

После определенного количества циклов нагружения напряжения в грунте достигают предела выносливости в каком-то из элементов:

- под плитным ростверком, а затем после некоторого количества циклов под нижним концом сваи;
- под нижним концом сваи;
- одновременное достижение под плитным ростверком и под нижним концом сваи.

Затем происходит продавливание тонкого слоя грунта под нижним концом сваи и, как следствие, происходит приращение перемещения (осадка) плитно-свайного фундамента, этот процесс периодически повторяется пока общая суммарная осадка свайного фундамента не достигнет предельного значения для конкретного здания или сооружения.

Исходя из вышеизложенного и принятой расчетной схемы системы «свая – грунт», функция осадки продавливания плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении определяется методом послойного суммирования деформаций слоев при разделении условной глубины дополнительной сжимаемой толщи в зоне продавливания на равные слои:

$$\Delta S_p(N) = \sum_{i=1}^n K_{HC} \cdot b \cdot \varepsilon_{zi}(N), \quad (18)$$

где $K_{HC}(N)$ – коэффициент, учитывающий размеры зоны продавливания при максимальной нагрузке цикла;

$\varepsilon_z(N)$ – относительная вертикальная деформация грунта в зоне продавливания сваи в условиях пространственного напряженного состояния в i -том слое грунта.

Относительная осевая вертикальная деформация в грунте в зоне продавливания сваи представляется в виде:

$$\varepsilon_z(N) = \Delta \varepsilon_z = \frac{\Delta \sigma_z(N)}{G_v(N)} - \Delta \sigma_i(N) \frac{3K_v(N) - G_v(N)}{3K_v(N) \cdot G_v(N)}, \quad (19)$$

где $\Delta \sigma_z(N) = p_3^{ma}(N)$ – приращение вертикальных напряжений в грунте при циклическом нагружении.

Интенсивность напряжений в грунте в зоне продавливания сваи:

$$\Delta \sigma_i^{max} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\Delta \sigma_x - \Delta \sigma_y)^2 + (\Delta \sigma_y - \Delta \sigma_z)^2 + (\Delta \sigma_z - \Delta \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}, \quad (20)$$

где $\Delta \sigma_x = \Delta \sigma_y = P_3^{max}(N) \cdot \cos \varphi$; $\Delta \sigma_z(N) = P_3^{max}(N)$;

$K_v(N) = \frac{\Delta\sigma^{max}(N)}{\Delta\varepsilon_v + \Delta\varepsilon_v(N)}$ – условный модуль объемных деформаций;

$G_v(N) = \frac{\Delta\sigma_i^{ma}(N)}{3[\Delta\varepsilon_i + \Delta\varepsilon_i(N)]}$ – условный модуль сдвига грунта при трехосном сжатии;

$\Delta\varepsilon_i(N)$, $\Delta\varepsilon_i(N)$ – приращение объемных деформаций и интенсивности деформаций при циклическом нагружении.

4. Обсуждение

Были установлены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния грунта под нижним концом сваи плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении. В рассмотренной зоне реализуется объемное напряженно-деформированное состояние.

Осадка продавливания плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении происходит при условии достижения предельного напряженного состояния в 2 зонах: в грунте под плитным ростверком, и в грунте под нижним концом сваи.

5. Заключение

1. Выполненные аналитические исследования позволили установить основные закономерности проявления осадки продавливания свайного фундамента при циклическом нагружении. Согласно выявленным закономерностям, осадка продавливания определяется для стадии, на которой касательные напряжения по боковой поверхности в верхней и средней части сваи отсутствуют из-за достижения предельного сопротивления на сдвиг. Продавливание грунта под острием сваи происходит в том случае, когда напряжение под пятой сваи и под плитным ростверком превышает усталостную прочность грунта при трехосном циклическом сжатии.

2. Разработаны уравнения несущей способности и осадок продавливания плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении. Полученное уравнение механического состояния плитно-свайного фундамента описывает основные закономерности поведения таких фундаментов, наблюдаемые в экспериментах на различных стадиях нагружения, и позволяет достоверно оценивать осадки продавливания плитно-свайных фундаментов при циклических нагружениях.

3. Разработана расчетная модель, описывающая развитие осадки продавливания на свайном фундаменте. При сопоставлении результатов расчета с данными экспериментальных исследований модели плитно-свайных ростверков в лабораторных и полевых испытаниях, наблюдается хорошая сходимость между расчетными и опытными значениями (отклонение не более 15 %).

Список библиографических ссылок

1. 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.
2. 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.
3. Hirai H. Assessment of cyclic response to suction caisson in clay using a three-dimensional displacement approach // *Mar. Georesources Geotechnol.* 2018. Vol. 36. Iss. 7. P. 805–817. DOI: 10.1080/1064119X.2017.1386743.
4. 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.
5. 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.
6. Шулятьев О. А. Новый свод правил по проектированию оснований и фундаментов

- высотных зданий // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2016. № 6. С. 37–40.
7. Mirsayapov Ilizar T., Sharaf H. M. A. Experimental studies of bearing capacity and settlement of foundations on clays under regime block cyclic loading 2020 International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering / KSUAE. Kazan, 2020. 012134. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012134.
 8. 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.
 9. Ni J., Indraratna B., Geng X.Y., Carter J. P., 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.
 10. 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.
 11. Lei H., Li B., Lu H., and Ren Q. Dynamic deformation behavior and cyclic degradation of ultrasoft soil under cyclic loading // J. Mater. Civ. Eng. 2016. Vol. 28. Iss. 11. P. 450. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001641.
 12. Khan I., Nakai K., Noda T. Undrained cyclic shear behavior of clay under drastically changed loading rate // Int. J. Geomech. 2020. Vol. 66. Iss. 18. P. 16–23. DOI: 10.21660/2020.66.07893.
 13. Тер-Мартirosян З. Г., Сидоров В. В. Взаимодействие длинной барреты с однослойным и двучслонным основанием // Жилищное строительство. 2010. № 1. С. 36–39.
 14. 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.
 15. Mirsayapov Ilizar T., Shakirom M. I. Combined Plate-Pile Foundations Settlement Calculation under Cyclic Loading: 2020 International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering / KSUAE. Kazan, 2020. 012069. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012069.
 16. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V. Bearing capacity of foundations under regime cyclic loading : dig. of art. 15th Asian Reg. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng. ARC. 2015. P. 1214–1217.

Mirsayapov Ilizar Talgatovich

doctor of technical sciences, professor

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Punching settlement of raft-pile foundation under cyclic loading**Abstract**

Problem statement. The purpose of the study is to identify the patterns of development of punching settlement of raft-pile foundations. During cyclic loading, the raft-pile foundation settlement consists of three components: the conditional foundation settlement, the settlement due to compression of the pile and the pile punching settlement. The draft of the raft-pile foundation significantly changes the load distribution on the piles in the raft-pile foundation. Under cyclic loading, the regularities of the precipitation of raft-pile foundations are insufficiently studied.

Results. The main results of the study include the fact that the author established a method for determining punching settlement of raft-pile foundation under cyclic loading. This process is considered in a spatial formulation, taking into account the joint deformation of all elements of the

system «pile cap – piles – soil of inter-pile space – soil below the toe of the pile». The redistribution of forces between the system elements in the process of cyclic loading due to the development of deformation of the soil, pile cap and piles in the associated conditions is considered. The stresses in certain specific zones of the system are determined by solving 4 quasistatic equations together. The precipitation of the raft-pile foundation punching occurs when the stress under the fifth pile exceeds the fatigue strength of the soil during triaxial cyclic compression.

Conclusions. The significance of the results for the construction industry is that the proposed method allows more accurate assessment of the stress-strain state of individual elements and the draught of the punching plate-pile foundations under cyclic loading with account of redistribution of efforts between the elements of the system «slab raft foundation – pile – soil mismanage space and the soil below the pile toe», which is a significant contribution to the theory of calculation of piled raft foundations and provides saving of concrete up to 15 % compared to existing methods.

Keywords: raft-pile foundation, cyclic loading, piles, pile cap, soil, stress, triaxial loading, punching, settlement, adhesion, tangential stress.

For citation: Mirsayapov Ilizar T. Punching settlement of raft-pile foundation under cyclic loading // *Izvestija KGASU*. 2020. № 4 (54). P. 6–14.

References

1. 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. Issue 6. P. 363–370. DOI: 10.1007/s11204-018-9482-8.
2. 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. Issue 6. P. 359–365. DOI: 10.1007/s11204-019-09549-y.
3. Hirai H. Assessment of cyclic response to suction caisson in clay using a three-dimensional displacement approach // *Mar. Georesources Geotechnol.* 2018. Vol. 36. Iss. 7. P. 805–817. DOI: 10.1080/1064119X.2017.1386743.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Mirsayapov Ilizar T., Sharaf H. M. A. Experimental studies of bearing capacity and settlement of foundations on clays under regime block cyclic loading 2020 International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering KSUAE. Kazan, 2020. 012134. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012134.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Lei H., Li B., Lu H., and Ren Q. Dynamic deformation behavior and cyclic degradation

- of ultrasoft soil under cyclic loading // *J. Mater. Civ. Eng.* 2016. Vol. 28. Iss. 11. P. 450. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001641.
12. Khan I., Nakai K., Noda T. Undrained cyclic shear behavior of clay under drastically changed loading rate // *Int. J. Geomate.* 2020. Vol. 66. Iss. 18. P. 16–23. DOI: 10.21660/2020.66.07893.
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.
14. 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.
15. Mirsayapov Ilizar T., Shakirom M. I. Combined Plate-Pile Foundations Settlement Calculation under Cyclic Loading: 2020 International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering / KSUAE. Kazan, 2020. 012069. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012069.
16. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V. Bearing capacity of foundations under regime cyclic loading : dig. of art. 15th Asian Reg. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng. ARC. 2015. P. 1214–1217.