



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

Несущая способность плитно-свайных фундаментов с учетом перераспределения усилий между сваями при циклическом нагружении

Аннотация

Постановка задачи. Целью работы является исследование несущей способности плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении с учетом перераспределения усилий между сваями. Несущая способность плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении состоит из трех составляющих: свай, грунта под плитой и грунта под нижним концом свай. Осадка продавливания плитно-свайного фундамента существенно изменяет распределение нагрузок на сваи, особенно на крайние и угловые, которые перегружены. В данной статье этот процесс рассматривается в трехмерном режиме с учетом совместной деформации всех элементов системы «свайный ростверк – сваи – грунт между сваями – грунт ниже острия». Учитывается перераспределение усилий между элементами системы при циклическом нагружении за счет возникновения деформаций грунта, свайного ростверка и свай, в соответствующих условиях. Несущая способность плитно-свайного фундамента определяется на стадии, когда тангенциальные напряжения вдоль боковой поверхности отсутствуют в верхней и в средней части сваи в результате достижения предельного сопротивления сдвигу. Грунт продавливается под острием, когда напряжение под пятой сваи и под плитой превышает усталостную прочность и максимальные деформации грунта при трехосном циклическом сжатии.

Результаты. Проведены теоретические исследования. Рассмотрено перераспределение усилий между основными элементами плитно-свайного фундамента и изменение напряженно-деформированного состояния основания плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении вследствие перераспределения усилий между угловыми, крайними и рядовыми сваями.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что впервые предложенная методика позволяет оценить несущую способность плитно-свайного фундамента. Сравнение результатов расчетов для предложенной модели с экспериментальными исследованиями показало хорошую сходимость.

Ключевые слова: плитно-свайный фундамент, свая, осадка, грунт, циклическое нагружение.

Для цитирования: Мирсаяпов Илизар Т. Несущая способность плитно-свайных фундаментов с учетом перераспределения усилий между сваями при циклическом нагружении // Известия КГАСУ. 2021. № 2 (56). С. 5–12. DOI: 10.52409/20731523_2021_2_5.

1. Введение

В плитно-свайных фундаментах крайние и угловые сваи перегружены по сравнению со средними [1-5]. При этом усилия в угловых сваях до 4 раз больше, а в крайних – до 2 раз больше, чем в средних.

При циклическом нагружении происходит перераспределение усилий между сваями и окружающим грунтом межсвайного пространства [6-10]. Выполненные исследования показывают, что при нарастании циклов нагружения уменьшается предельное сопротивление грунта на сдвиг вдоль боковой поверхности свай, что приводит к увеличению напряжения в грунте под пятой сваи и, как следствие, к увеличению деформаций и уменьшению усталостной прочности грунта под пятой сваи [11-14]. В случае если напряжение в грунте превышает предельное сопротивление грунта в трехосном напряженном состоянии в случае циклического нагружения, происходит

продавливание грунта под нижней плоскостью сваи и перемещение сваи в пределах условного фундамента. Тогда первым предельное состояние достигается под угловыми сваями и часть усилий передается на остальные сваи, догружая их, и на грунт под плитным ростверком, 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). Затем предельное состояние достигается в крайних рядах свай, при этом происходит перераспределение усилий между угловыми и крайними сваями. После прокола крайними и угловыми сваями грунта условного фундамента под нижним концом эти сваи начинают перемещаться без увеличения нагрузки на них, что приводит к догрузке средних рядовых свай и увеличению их вертикальных перемещений (осадок). Такие сваи называют ползучими. Этот процесс продолжается до тех пор, пока усилия между всеми сваями не выравняются (не становятся одинаковыми).

Ползучесть крайних и угловых свай приводит к изменению распределения нагрузок на все сваи плитно-свайного фундамента. Для аналитического описания процесса перераспределения усилий между угловыми, крайними и рядовыми сваями плитно-свайного фундамента в процессе циклического нагружения, рассмотрим этот процесс в пространственной постановке с учетом совместного деформирования всех элементов системы за счет жесткого соединения сваи и плитного ростверка.

2. Материалы и методы

Ползучесть крайних и угловых свай существенно изменяет распределение нагрузок на все сваи плитно-свайного фундамента. 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).

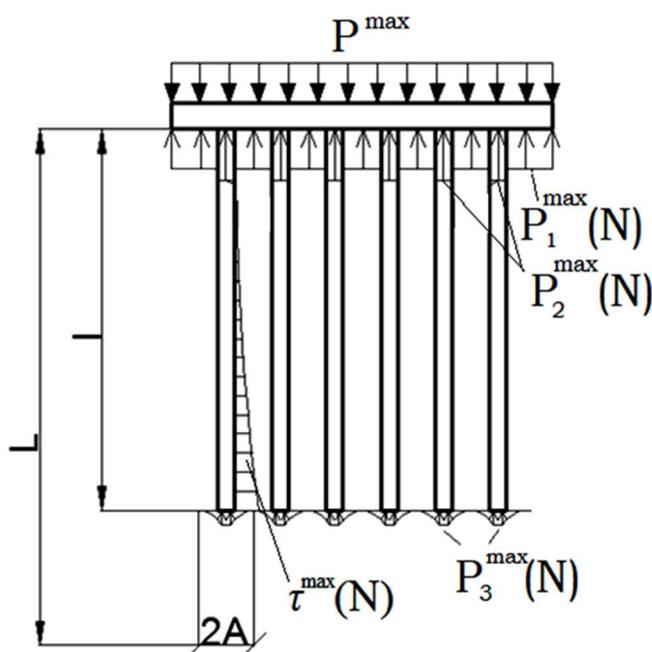


Рис. 1. Расчетная схема плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении (иллюстрация авторов)

Перераспределение усилий между сваями в пределах плитного ростверка учитывается путем совместного решения 4 уравнений квазистатики [15]. При этом за основу приняты предложения Тер-Мартirosяна [16] для статического нагружения. Эти уравнения автором были модифицированы для учета влияния изменения напряженно-деформированного состояния системы при циклическом нагружении, а также процесса

перераспределения усилий при продавливании краевых и угловых свай. При этом усилие в средних сваях увеличиваются в K раз:

$$K(F) = \frac{4F_1 + 2F_2(n_1 + n_2)}{n_3 F_3}, \quad (1)$$

где F_1 – усилия в угловых сваях;

F_2 – усилия в краевых сваях;

F_3 – усилия в средних (рядовых) сваях;

n_1, n_2 – количество краевых свай в сторонах плитно-свайного фундамента;

n_3 – количество средних (рядовых) свай в плитно-свайном фундаменте.

Напряжения в отдельных конкретных зонах системы «плитный ростверк – сваи – грунт межсвайного пространства – грунт ниже острия свай» определяют путем совместного решения четырех уравнений в зависимости от количества циклов нагружения и параметров циклического нагружения [15]. При решении вышеуказанных уравнений учитывается изменение напряженно-деформированного состояния и усилий в отдельных элементах плитно-свайного фундамента и зоны предельного равновесия грунта вдоль боковой поверхности свай (рис. 2).

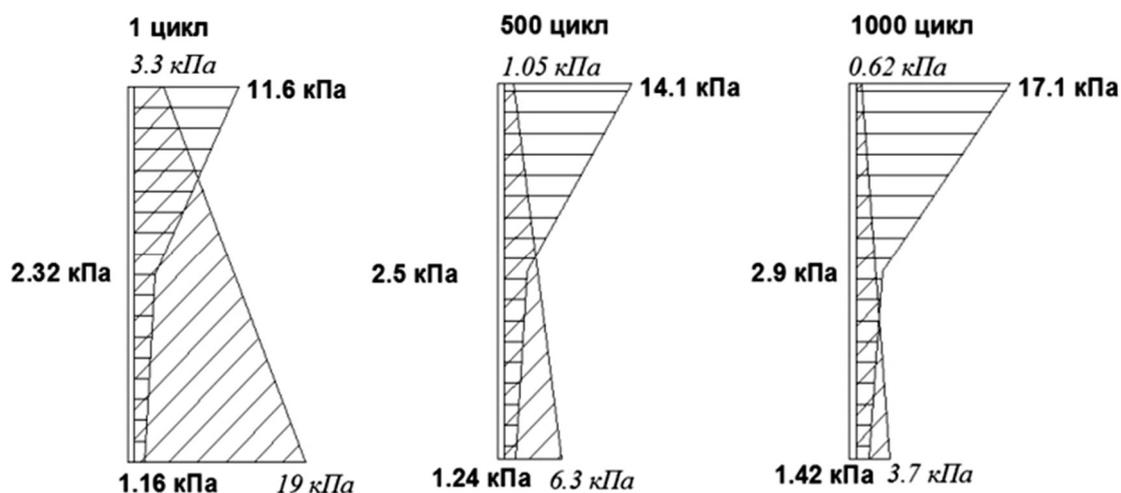


Рис. 2. Эпюры мобилизованного касательного напряжения и предельного касательного напряжения в грунте вдоль свай (иллюстрация авторов)

Прочность грунта на сдвиг между свайей и грунтом вычисляется исходя из закона Кулона-Мора:

$$\tau^*(N) = \gamma z \cdot \tan \varphi(N) + C(N) + \Delta\sigma_x^{don} \cdot \tan \varphi(N), \quad (2)$$

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

$\Delta\sigma_x^{don} = \sigma_{sp}$ – дополнительное горизонтальное давление на сваю от грунта вследствие совместного деформирования системы (влияние ростверка);

σ_{sp} – 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 (Мирсаяпов и др. 2012, Мирсаяпов и Шакиров 2016) по зависимости:

$$c(N) = c_0 \cdot m(t_1 \tau_1) \cdot \lambda(t_1 \tau_1) \cdot \sqrt{\frac{k(\tau_1)}{k(t)} + \frac{1}{1+k(\tau_1)}} \cdot c(t_1 \tau), \quad (3)$$

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

Касательные напряжения вычисляется следующим образом:

$$\tau_0^{\max}(N) = \frac{a \cdot b (p_3(N) - p_2(N)) \cdot K(F)}{(a+b) \cdot t \cdot \frac{1}{\alpha} (4e^{-at} - 1)}. \quad (4)$$

Система уравнений [1] решается для каждого рассматриваемого цикла с учетом изменения всех параметров системы вследствие перераспределения усилий между плитным ростверком, сваями, грунтом в процессе циклического нагружения, в том числе с учетом изменения зоны предельного равновесия в межсвайном пространстве.

Напряжения в грунте под ростверком вычисляются по формуле:

$$p_1^{max}(N) = \frac{p^{max, AB} - p_2^{max}(N) \cdot ab \cdot K(F)}{(AB - ab)} \tag{5}$$

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

$$p_2^{max}(N) = \left[P \cdot G_{zp}(N) \cdot AB(AB - ab) \cdot L \cdot \beta_{gr} \left(1 - \frac{l}{L} \right) + 0,33 \cdot \tau_0(N) \cdot E_{gr}(N) \cdot \right. \\ \cdot (A - a)(AB - ab) \cdot k_1 + 0,33 \cdot \tau_0(N) \cdot E_{gr}(B - b)(AB - ab) - 4 \cdot \\ \cdot \frac{K(F) \cdot \tau_0(N)}{\alpha} \cdot E_{gr}(N) \cdot l(AB - ab) \cdot \omega(1 - v_{gr}) \cdot k(l) \\ \left. + \frac{K(F) \cdot \tau_0(N)}{\alpha} \cdot E_{gr}(N) \cdot \frac{a + b}{b} \cdot l(AB - ab) \cdot e^{-\alpha} \cdot \omega(1 - v_{gr}) \right. \\ \left. \cdot k(l) \right] \cdot \left[a \cdot \omega \cdot (1 - v_{gr}) \cdot k(l) \cdot (AB - ab) \cdot E_{gr}(N) + \right. \\ \left. + ab \cdot \beta_{gr} \cdot L \cdot \left(1 - \frac{l}{L} \right) \cdot G_{gr}(N) \right]^{-1} \tag{6}$$

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:

$$p_3^{max}(N) = \frac{K(F) \cdot p_2(N) \cdot 4ab + 4(a+b) \cdot l \cdot \frac{\tau_0(N) \cdot K(F)}{\alpha}}{4ab} - \frac{4(a+b) \cdot l \cdot \frac{\tau_0(N)}{\alpha} \cdot e^{-\alpha l}}{4ab} \tag{7}$$

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:

$$p_1^{max}(N) \leq \sigma_{1u}(N); \tag{8}$$

- в грунте под нижним концом сваи:

$$p_3^{max}(N) \leq \sigma_{1u}(N); \tag{9}$$

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

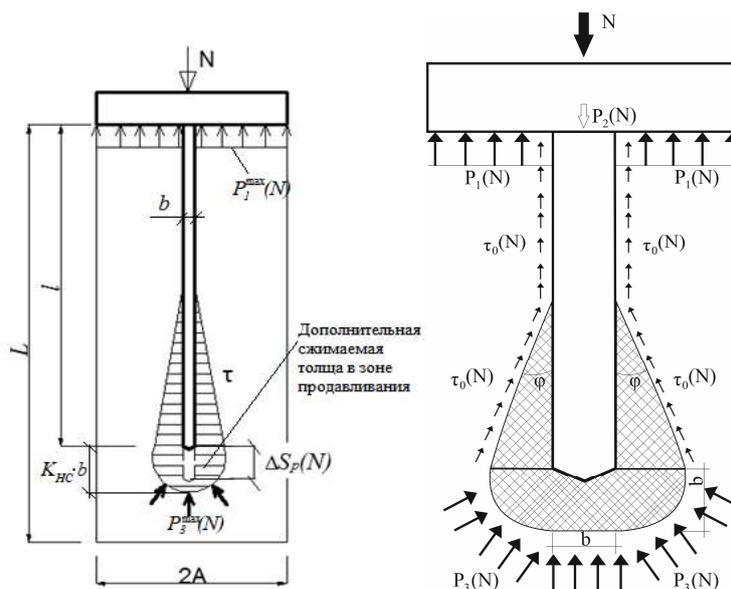


Рис. 3. Расчетная схема системы свая – грунт при расчете осадки продавливания (иллюстрация автора)

3. Результаты и обсуждение

Результаты имеющихся экспериментальных и теоретических исследований показывают, что в грунте под острием сваи реализуется трехосное сжатие, а разрушение (продавливание) происходит с образованием и развитием множества сдвиговых трещин в плоскостях предельного равновесия. Предельные напряжения в грунте дополнительной сжимаемой толщи в зоне продавливания сваей или под плитным ростверком при трехосном циклическом нагружении определяются с использованием расчетной модели грунта при режимном пространственном сжатии.

Циклическое нагружение приводит к уменьшению прочности и к увеличению деформируемости грунта за счет образования и развития микро- и макротрещин в структуре, а также к деградации структуры в локальных потенциально опасных площадках предельного равновесия. В расчетной модели эти процессы учитываются аналитическими уравнениями изменения удельного сцепления и угла внутреннего трения между частицами.

Циклическое нагружение в девиаторном режиме сопровождается образованием и развитием зон пластического сдвига и разрывов грунта в плоскостях предельного равновесия. Разрушение грунта в пространственном напряженном состоянии происходит тогда, когда количество и длина макротрещин усталости достигает критической величины в плоскостях предельного равновесия.

Положение плоскостей предельного равновесия в пространстве меняется в процессе циклического нагружения с увеличением количества циклов. Разрушение грунта в локальном объеме дополнительной сжимаемой толщи зоны продавливания происходит по площадке предельного равновесия, на которой будет минимальное значение потенциальной энергии разрушения.

Этот процесс будет скачкообразным в зависимости от выполнения условий (8) и (9), то есть будут чередоваться процессы развития и остановки трещин, и, как следствие, снижение прочности.

Согласно расчетной модели грунта (И.Т. Мирсаяпов, И.В. Королева, 2015), при неупругом трехосном циклическом деформировании силы Кулоновского трения не действуют по плоскостям предельного равновесия, а приложены к плоскости скольжения частиц грунта. Для определения ориентации этих плоскостей требуется установить деформированное состояние грунта при циклическом нагружении.

Учитывая, что разрушение грунта при циклическом нагружении происходит в пространстве главных напряжений (И.Т. Мирсаяпов, И.В. Королева, 2015), предполагается, что закон Кулона связывает проекцию сил, действующих на площадках предельного равновесия на нормаль к площадке скольжения. Тогда условие течения грунта в условиях трехосного сжатия при циклическом нагружении можно представить в виде:

$$|t| = S \cdot tg\phi(t, t_1, N, \tau) + c_0(t, t_1, N, \tau), \quad (10)$$

здесь $S = \sigma_1 \cdot l \cdot l' + \sigma_2 \cdot m \cdot m' + \sigma_3 \cdot n \cdot n'$;

$$t = ((\sigma_1 \cdot l \cdot m' - \sigma_2 \cdot m \cdot l')^2 + (\sigma_2 \cdot m \cdot n' - \sigma_3 \cdot n \cdot m')^2 + (\sigma_3 \cdot n \cdot l' - \sigma_1 \cdot l \cdot n')^2)^{1/2}.$$

Пространственная ориентация участка предельного равновесия определяется по формулам (И.Т. Мирсаяпов, И.В. Королева, 2011):

$$l^2 = \frac{\bar{I}_3}{\bar{I}_2 \cdot \bar{\sigma}_1}; \quad m^2 = \frac{\bar{I}_3}{\bar{I}_2 \cdot \bar{\sigma}_2}; \quad n^2 = \frac{\bar{I}_3}{\bar{I}_2 \cdot \bar{\sigma}_3}; \quad (11)$$

$$\sigma_{lu}(N) = \frac{4}{A_1} [\sigma_v(t, t_1, N) \cdot \cos \alpha_1(t, t_1, N) + \tau_v(t, t_1, N) \cdot A_{sh} \cdot \sin \alpha_1(t, t_1, N)]. \quad (12)$$

Были установлены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния элементов плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении, с учетом перераспределения усилий между крайними, угловыми и рядовыми сваями. В рассмотренной зоне реализуется объемное напряженно-деформированное состояние. Потеря несущей способности 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.

Установленные закономерности деформирования грунтов под плитным ростверком, вдоль боковой поверхности свай и под нижней плоскостью свай, касаются неводонасыщенных грунтов под действием циклических нагрузок, для которых не требуется учет инерционных сил.

В тех случаях, когда плитно-свайные фундаменты опираются на водонасыщенные грунты необходимо учитывать влияние деформаций виброползучести первичной консолидации, связанные с отжатием связанной и слабосвязанной воды из пор грунта. Кроме этого также необходимо будет уточнять влияние скорости приложения нагрузки на скорость протекания деформаций первичной консолидации.

4. Заключение

1. Выполненные аналитические исследования позволили установить основные закономерности деформирования с учетом перераспределения усилий между крайними, угловыми и рядовыми сваями. Согласно им, основной причиной перераспределения является осадка продавливания, которая определяется для стадии, когда касательные напряжения по боковой поверхности отсутствуют в верхней и в средней части сваи вследствие достижения предельного сопротивления на сдвиг. Продавливание грунта под острием сваи происходит тогда, когда напряжение под пятой сваи и под плитным ростверком превышает усталостную прочность грунта при трехосном циклическом сжатии.

2. Разработаны уравнения несущей способности 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 перераспределения усилий между угловыми, крайними и рядовыми сваями плитно-свайного фундамента. Сопоставление результатов расчета с данными экспериментальных исследований свайных фундаментов показало хорошую сходимость между расчетными и опытными значениями (отклонение не более чем на 15 %).

Список библиографических ссылок

1. 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.
2. 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.
4. 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.
5. 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.
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 проектированию оснований и фундаментов высотных зданий // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2016. № 6. С. 37–40.
9. 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.
10. 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., 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. P. 012069. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012069.
 13. 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.*
 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., Koroleva I. V. Bearing capacity of foundations under regime cyclic loading: 15th Asian Reg. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng. ARC. 2015. P. 1214–1217.
 16. Тер-Мартirosян З. Г., Сидоров В. В. Взаимодействие длинной барреты с однослойным и двухслойным основанием // *Жилищное строительство*. 2010. № 1. С. 36–39.

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

The load-bearing capacity of slab-pile foundations, taking into account the redistribution of forces between piles during cyclic loading

Abstract

Problem statement. The aim of the work is to study the load-bearing capacity of the raft-pile foundation under cyclic loading, taking into account the redistribution of forces between the piles. The load-bearing capacity of a raft-pile foundation under cyclic loading consists of three components: piles, the soil under the slab and soil under the lower end of the piles. The sediment of pushing through the raft-pile foundation significantly changes the distribution of loads on the piles, especially on the extreme and corner ones, which are overloaded. In this article, this process is considered in three-dimensional mode, taking into account the joint deformation of all elements of the system «pile cap – piles–soil between piles – soil below the toe». It takes into account the redistribution of forces between the elements of the system under cyclic loading due to the occurrence of deformations of the soil, pile grillage and piles in the appropriate conditions. The load-bearing capacity of the raft-pile foundation is determined for the stage when tangential stresses along the side surface are absent in the upper and middle part of the pile as a result of reaching the maximum shear resistance. The soil is forced under the tip when the stress under the fifth pile and under the plate exceeds the fatigue strength and maximum deformations of the soil under three-axis cyclic compression.

Results. Theoretical studies are carried out and the redistribution of forces between the main elements of the raft-pile foundation is considered. The change in the stress-strain state of the base of the raft-pile foundation under cyclic loading due to the redistribution of forces between the corner, extreme and ordinary piles is considered.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry is that for the first time the proposed method allows us to assess the load-bearing capacity of the slab-pile foundation. Comparison of the results of calculations for the proposed model with experimental studies showed good convergence.

Keywords: raft-pile foundation, pile, settlement, soil, cyclic loading.

For citation: Mirsayapov Ilizar T. Load-bearing capacity of slab-pile foundations, taking into account the redistribution of forces between piles during cyclic loading // *Izvestija KGASU*. 2021. № 1 (55). P. 5–12. DOI: 10.52409/20731523_2021_2_5.

References

1. 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.
2. 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.
4. 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.
5. 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.
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 part of groups // *Issues of design and construction of aboveground and underground structures of buildings and structures*. 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 // *Subgrades, foundations and soil mechanics*. 2019. № 2. P. 15–21.
8. Shulyatev O. A. New set of rules for designing foundations and foundations of high-rise buildings // *Subgrades, foundations, and soil mechanics*. 2016. № 6. P. 37–40.
9. 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.
10. 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., 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. P. 012069. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012069.
13. 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.*
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., Koroleva I. V. Bearing capacity of foundations under regime cyclic loading: 15th Asian Reg. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng. ARC. 2015. P. 1214–1217.
16. Ter-Martirosyan Z. G., Sidorov V. V. Interaction of a long barreta with a single-layer and double-layer base // *Housing construction*. 2010. № 1. P. 36–39.