

УДК 624.154.001.8

Мирсаяпов И.Т. – доктор технических наук, профессор

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Шакиров М.И. – аспирант

E-mail: jklnumb@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

Несущая способность и осадки плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении

Аннотация

Разработан метод расчета осадки плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении, рассматривающий совместные деформации грунтового основания, свай и плитного ростверка. В зависимости от цикла нагружения, циклическая нагрузка приводит к перераспределению нагрузки между элементами плитно-свайного фундамента, грунтом основания на различных уровнях от плиты ростверка и грунтового массива межсвайного пространства.

Данный метод расчета учитывает специфику изменения напряженно-деформированного состояния элементов плитно-свайного фундамента и показывает хорошую сходимость между расчетными и фактическими значениями исследуемых параметров.

Ключевые слова: плитно-свайный фундамент, слабый грунт, циклическое нагружение, осадки основания, напряжения, усилия, межсвайное пространство, расчетная модель.

В современных условиях при строительстве зданий и сооружений тенденция увеличения нагрузок на грунтовые основания и использование в качестве оснований слабых грунтов способствовали тому, что одним из распространенных способов увеличения несущей способности и уменьшения осадок, является применение плитно-свайных фундаментов. Такие фундаменты и их основания вместе со статическими, подвергаются воздействию циклических нагрузок, которые в ряде случаев являются основными определяющими при безопасной эксплуатации зданий и сооружений. При этом вопрос влияния циклических нагрузок на поведение комбинированно плитно-свайных фундаментов исследован недостаточно.

В связи с этим проведены экспериментально-теоретические исследования плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении.

Лабораторные исследования проводились в стальном лотке с одинаковой длиной, шириной и высотой равной 1,0 м. В качестве ростверка плитно-свайного фундамента использовалась армированная железобетонная плита с размерами 400х400х40 мм. Сваи моделировались из полых пластиковых трубок (прочность на сжатие $R_{сж}=92,0$ МПа; модуль деформации $E_{сж}=700$ Мпа) диаметром 7 мм, толщиной стенки 1 мм и длиной 400 мм. В качестве грунта основания использовалась супесь пластичная с плотностью $\rho=1,4$ т/м³ и влажностью $W=11$ %. Фиксировались значения осадок фундамента и грунта в различных точках от плиты ростверка, а также деформации в моделях свай и грунта основания в процессе циклического нагружения. В системе «плитно-свайный фундамент – грунтовое основание» при циклическом нагружении совместно деформируются материалы с различными прочностными и деформационными свойствами и условиями нагружения. При этом деформирование всех элементов системы происходит в связных условиях.

При приложении нагрузки на плиту ростверка, на начальных стадиях нагружения происходит уплотнение грунта по всей глубине сжимаемой толщи. Дальнейшее циклическое нагружение приводит к росту зон пластических деформаций, которые объединяются в области, захватывающие всю верхнюю часть основания.

При циклическом нагружении происходит изменение усилий в моделях сваях. Из эпюр усилий в сваях (рис. 1) видно, что с увеличением количества циклов происходит увеличение усилий по всей длине свай.

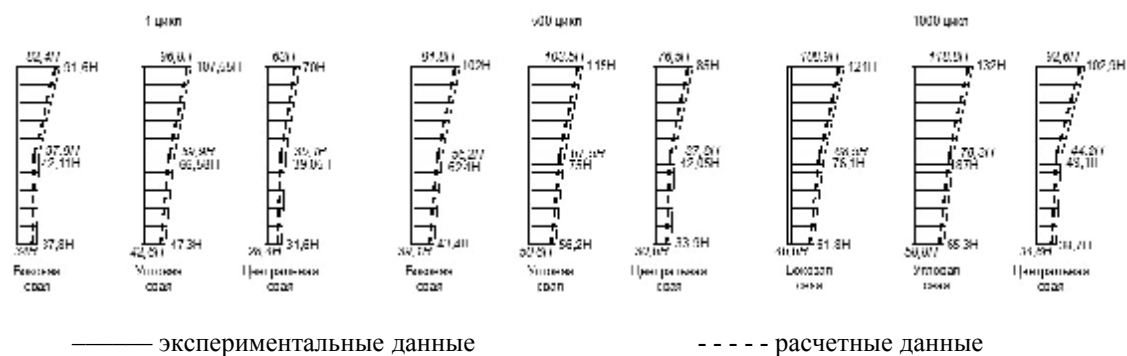


Рис. 1. Эпюры усилий в сваях при различных количествах циклов, Н ($P_{\max}=1000$ кг, $\rho_p=0,5$)

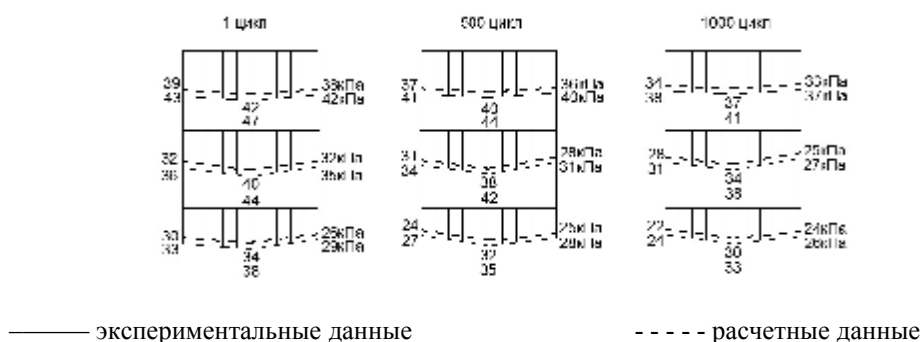


Рис. 2. Эпюры напряжений в грунте при различных количествах циклов, кПа ($P_{\max}=1000$ кг, $\rho_p=0,5$)

На рис. 2 приведены эпюры напряжений в различных зонах грунта межсвайного пространства. С увеличением количества циклов нагружения происходит уменьшение напряжений в грунте на разных уровнях от ростверка, при этом наибольшие напряжения фиксируются непосредственно под плитой.

Свободному деформированию грунтового основания плитного ростверка препятствуют сваи, а свободное деформирование свай ограничивается грунтовым основанием плитного ростверка. В результате такого совместного деформирования происходит перераспределение усилий между элементами плитно-свайного фундамента в процессе циклического нагружения.

Измеренные в процессе ступенчатых циклических нагружений осадки основания, изменяются аналогично деформациям грунта межсвайного пространства после различного количества повторной нагрузки.

После различного количества циклов анализ изменения осадок оснований показывает, что в основном приращение осадок происходит за счет увеличения их необратимой части и составляет до 30 % от первоначальной.

Предельная величина циклической нагрузки воспринимая плитно-свайным фундаментом зависит от условий совместного деформирования грунта, свай и плитного ростверка, и их прочностных и деформационных свойств.

Напряжено-деформированное состояние свайного основания плитно-свайного фундамента весьма сложное. В таком основании совместно деформируются материалы с различными прочностными и деформационными свойствами. Развитие деформаций свайного основания при циклическом нагружении будет происходить в условиях взаимодействия грунта и свай в связных условиях:

- а) свободные деформации грунта сдерживается сваями;
- б) свободному деформированию свай препятствует окружающий грунт.

В результате такого взаимодействия между элементами в свайном основании возникает дополнительное напряженное состояние и происходит перераспределение усилий между грунтом и сваями при циклическом нагружении. При этом напряжение в сваях увеличивается, а в грунте между армирующими элементами уменьшаются по сравнению с первым циклом.

Тогда текущие напряжения в свайном основании представляются в виде:

$$\begin{aligned}\sigma_p^{max}(N) &= \sigma_p^{max}(N_1) + \Delta\sigma_p(N), \\ \sigma_{gr}^{max}(N) &= \sigma_{gr}^{max}(N_1) - \Delta\sigma_{gr}(N),\end{aligned}$$

где $\sigma_p^{max}(N_1)$, $\sigma_{gr}^{max}(N_1)$ – максимальные напряжения цикла при первом цикле нагружения в сваях и грунте соответственно.

$\sigma_p^{max}(N)$, $\sigma_{gr}^{max}(N)$ – дополнительные напряжения, возникающие в свайном основании в процессе циклического напряжения в сваях и в грунте соответственно.

В свайном основании, свая вследствие его сцепления вдоль по боковой поверхности с окружающим грунтом, становится внутренней связью, препятствующей свободному деформированию грунта межсвайного пространства при циклическом нагружении. Стесненные деформации виброползучести грунта приводят к появлению в свайном основании дополнительных внутренне уравновешенных напряжений. При этом в грунте возникают напряжения растяжения, а в сваях – напряжения сжатия. Под влиянием разности деформаций свободной виброползучести грунта и свай, стесненная деформация виброползучести грунта межсвайного пространства представляется в виде:

$$\Delta\epsilon_{pl}(N) = \epsilon_{pl}^{gr}(N) - \epsilon_{pl}^p(N),$$

где $\Delta\epsilon_{pl}(N)$ – дополнительные (остаточные) деформации виброползучести свайного основания;

$\epsilon_{pl}^{gr}(N)$ – свободные деформации виброползучести грунта;

$\epsilon_{pl}^p(N)$ – свободные деформации виброползучести материала сваи;

Тогда осредненные дополнительные растягивающие напряжения в грунте:

$$\Delta\sigma_{gr}(N) = \Delta\epsilon_{pl}(N) \cdot E'_g(N),$$

где $E'_g(N)$ – модуль деформации грунта при циклическом нагружении.

Деформации $\Delta\epsilon_{pl}(N)$ для свай упругие, и поэтому возникают сжимающие напряжения:

$$\sigma_p(N) = \Delta\epsilon_{pl}(N) \cdot E_p(N),$$

где $E_p(N)$ – модуль упругости материала сваи.

Уравнения равновесия внутренних усилий от дополнительного напряженного состояния симметричного свайного основания имеет вид:

$$\Delta\sigma_p(N) \cdot A_p = \Delta\sigma_{gr}(N) \cdot A_{gr}, \quad (1)$$

где A_p – суммарная площадь поперечных сечений свай в пределах рассматриваемого свайного поля фундамента;

A_{gr} – площадь грунтового основания фундамента.

Исходя из (1) после ряда упрощений получаем аналитические выражения для определения дополнительных (остаточных) напряжений:

– в грунте межсвайного пространства:

$$\Delta\sigma_{gr}(N) = \frac{\epsilon_{pl}^{gr}(N) \cdot E_p(N) \cdot \frac{A_{pl} \cdot n}{A_{gr}}}{1 + \frac{E_p(N) \cdot \frac{A_{pl} \cdot n}{A_{gr}}}{E_{gr}(N)}};$$

– в сваях:

$$\Delta\sigma_p(N) = \frac{\epsilon_{pl}^{gr}(N) \cdot E_p(N)}{1 + \frac{E_p(N) \cdot \frac{A_{pl} \cdot n}{A_{gr}}}{E_{gr}(N)}},$$

где $\epsilon_{pl}^{gr}(N)$ – деформации виброползучести грунта;

A_{pl} – площадь поперечного сечения одной сваи;

n – общее количество свай в расчетной площади основания.

Для аналитического описания процесса несвободного деформирования элементов системы принята расчетная схема (рис. 3) разработаны уравнения механического состояния грунта и системы свая – грунт, а также уравнения равновесия усилий. Совместное решение этих уравнений позволяет получить искомые значения осадок и несущей способности плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении.

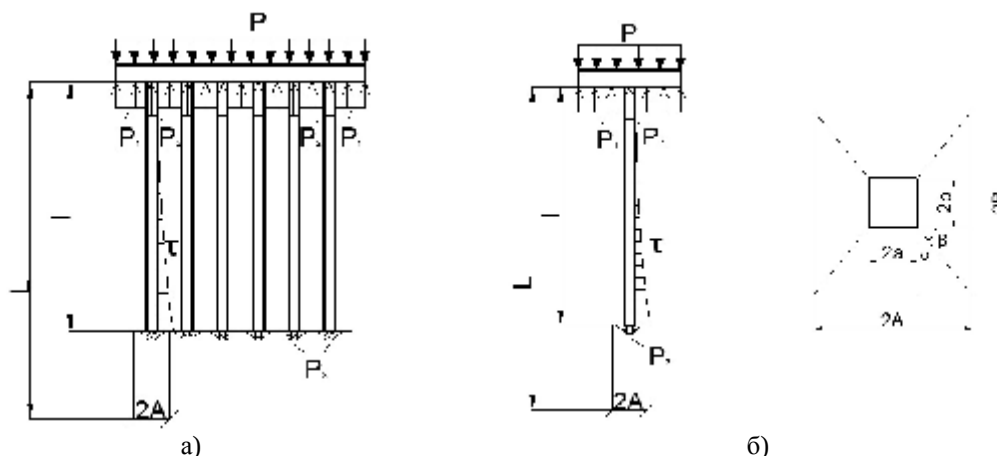


Рис. 3. а) Расчетная схема взаимодействия плитно-свайного фундамента с массивом грунта;
 б) Расчетная схема взаимодействия одиночной сваи с однородным массивом грунта с размером $2A \times 2B$

Для упрощения расчета принята расчетная схема состоит из сваи, окружающего ее грунта и части плиты ростверка, приходящуюся на одну сваю. Поведение основных компонентов НДС такой ячейки будет соответствовать поведению сваи в составе плитно-свайного фундамента (рис. 3).

Размеры рассматриваемой ячейки – $2A \times 2B \times L$, размеры сваи – $2a \times 2b \times l$. На границах ячейки приняты условия свободного вертикального перемещения. На дне рассматриваемой ячейки принято полное отсутствие перемещений.

Для решения задачи необходимо найти 4-ре неизвестных – p_1 , p_2 , p_3 и τ_0 (рис. 4). Используя уравнения равновесия сил по свае и всей ячейке, равенства перемещений грунта и сваи на уровне оголовка и пяты, получаем систему уравнений:

$$\begin{aligned} p \times AB &= p_2(N) \times ab + p_1(N)(AB - ab) \\ p_2(N) \times ab &= p_3(N) \times ab - 4(a+b) \times \frac{\tau_0(N)}{a} \times e^{-al} + (a+b) \times \frac{\tau_0(N)}{a} \\ \frac{p_1(N) \times b_{gr} \times L}{E_{gr}(N)} \times \frac{1}{6} - \frac{l}{L} \times \frac{k_1 \times \tau_0(N) \times (A-a)}{3G_{gr}(N)} + \frac{k_2 \times \tau_0(N) \times (B-b)}{3G_{gr}(N)} &= \frac{w \times a \times p_3(N) \times (1 - v_{gr}) \times k(l)}{G_{gr}(N)} \\ \frac{p_1(N) \times b_{gr} \times L}{E_{gr}(N)} + \frac{k_1 \times \tau_0(N) \times e^{-al} \times (A-a)}{3G_{gr}(N)} + \frac{k_2 \times \tau_0(N) \times e^{-al} \times (B-b)}{3G_{gr}(N)} &= \frac{\tau_0(N)(a+b)l}{aba \times E_p} + \frac{\tau_0(N)(a+b)e^{-al}}{aba^2 \times E_p} + \\ \frac{p_3(N) \times l}{E_p} + \frac{w \times a \times p_3(N) \times (1 - v_{gr}) \times k(l)}{G_{gr}(N)} - \frac{\tau_0(N)(a+b)}{aba^2 \times E_p} & \end{aligned}$$

Здесь:

$$p_1(N) = \sigma_{gr1}^{max}(N) - \Delta \sigma_{gr}(N), p_2(N) = \sigma_p^{max}(N) + \Delta \sigma_p(N), p_3(N) = \sigma_{gr3}^{max}(N) - \Delta \sigma_{gr}(N),$$

$$\tau(N) = \tau_0(N) \cdot e^{-az}, \tau(z) = \tau_0 \cdot e^{-az}, a = \frac{5}{l}.$$

Решение системы уравнений позволяет найти величину осадки, а также напряжения, возникающие в стволе сваи, в грунте под ростверком и под нижним концом свай при циклическом нагружении.

Зоны предельного равновесия, учитывая жесткость материала сваи, определяются точкой пересечения эпюр мобилизованного касательного напряжения ($\tau(N)$) и предельного касательного напряжения (рис. 5), которое можно вычислить по формуле:

$$\tau^*(z) = \gamma \cdot z \cdot \tan \varphi + c(N),$$

где $c(N)$ – удельное сцепление грунта при циклическом нагружении, принимается в соответствии [21]:

$$C(N) = C \times m(t_1) \times (t_1) \times \sqrt{\frac{k(t_1)}{k(t)} + \frac{1}{1+k(t_1)}} \times (t_1).$$

В зависимости от длины сваи на уровень пяты может приходиться различная доля нагрузки, т.к. в случае увеличения длины сваи, растет площадь боковой поверхности.

Напряжения возникающие в грунте под ростверком могут быть найдены по формуле:

$$p_1(N) = \frac{p \times AB - p_2(N) \times ab}{(AB - ab)}.$$

Напряжения возникающие на уровне оголовка в свае можно выразить следующим образом:

$$p_2(N) = \frac{P \times G_p(N) \times AB(AB - ab) \times L \times \frac{1}{G} \left(1 - \frac{1}{L} \right) + 0,33 \times t_0(N) \times E_{gr}(N) \times (A - a)(AB - ab) \times \omega + 0,33 \times t_0(N) \times E_{gr}(N) \times (B - b)(AB - ab) \times \omega - 4 \times \frac{t_0(N)}{a} \times E_{gr}(N) \times (AB - ab) \times \omega(1 - v_{gr}) \times k(l) + \frac{t_0(N)}{a} \times E_{gr}(N) \times \frac{a+b}{b} \times (AB - ab) \times e^{-\alpha l} \times \omega(1 - v_{gr}) \times k(l) + ab \times b_{gr} \times L \times \frac{1}{G} \left(1 - \frac{1}{L} \right) \times G_p(N)}{a \times \omega(1 - v_{gr}) \times k(l) \times (AB - ab) \times E_{gr}(N) +}$$

где $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – модуль сдвига грунта;

$k(l)$ – безразмерный коэффициент учитывающий влияния глубины приложения жесткого штампа на его длину;

ω – коэффициент учитывающий форму штампа;

ν – коэффициент Пуассона;

$\alpha = 5/l$, где l – длина сваи.

Напряжения под пятой сваи можно вычислить по формуле:

$$p_3(N) = \frac{p_2(N) \times 4ab + 4(a+b) \times \frac{t_0(N)}{a} - 4(a+b) \times \frac{t_0(N)}{a} \times e^{-\alpha l}}{4ab}.$$

Касательное напряжение $\tau_0(N)$ можно выразить следующим образом:

$$t_0(N) = \frac{a \times b(p_3(N) - p_2(N))}{(a+b) \times \frac{1}{a} \times (4e^{-\alpha l} - 1)}.$$

Осадку плитно-свайного фундамента можно вычислить по формуле:

$$S = \frac{p \times b_{gr}(N) \times L \times \frac{1}{G} \left(1 - \frac{1}{L} \right) + (p_2(N) - p_3(N)) \times b_{gr} \times L \times \frac{1}{G} + \frac{p_3(N) \times (1 - \nu) \times k(l)}{G_{gr}(N)}}{E_{gr}(N)}.$$

Несущая способность основания в зависимости от соотношения $\tau(N) \leq \tau^*(N)$ оценивается из условий:

$$\begin{aligned} p_2(N) &\leq \sigma_{1u}(N), \\ p_3(N) &\leq \sigma_{1u}(N). \end{aligned}$$

Функция $\sigma_{1u}(N)$ принимается:

$$\sigma_{1u}(N) = 4 \times \frac{1}{3} \times v(t, t_1, N) \times A_{sh} \times \cos \alpha_1 \times (t, t_1, N) + t_v(t, t_1, N) \times A_{sh} \times \sin \alpha_1 \times (t, t_1, N).$$

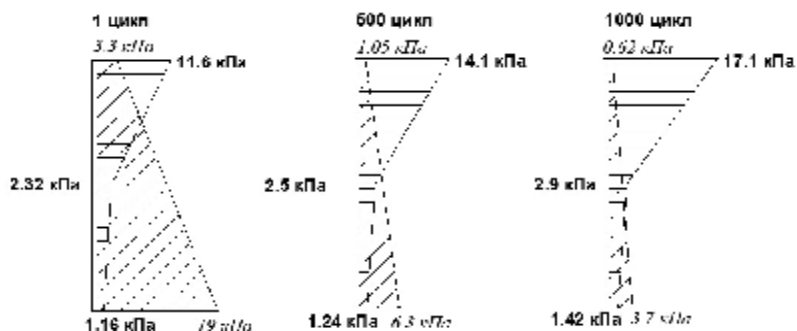


Рис. 4. Эпюры мобилизованного касательного напряжения и предельного касательного напряжения

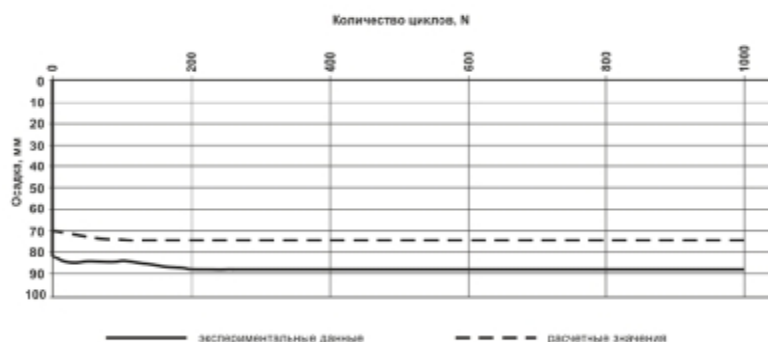


Рис. 5. Сравнение экспериментальных и расчетных значений осадки основания моделей плитно-свайного фундамента при циклическом нагружении ($P_{\max}=1000$ кг, $\rho=0,5$)

Сопоставления результатов расчета с данными экспериментальных исследований показаны на рис. 1, 2, 4, 5. Как видно из рисунков, наблюдается хорошая сходимость между расчетными и опытными значениями (отклонение не более 15 %).

Список библиографических ссылок

1. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. Особенности деформирования глинистых грунтов при циклическом трехосном сжатии // Международный журнал Геотехника, 2010. № 6. – С. 64-67.
2. Вознесенский Е.А. Поведение грунтов при динамических нагрузках. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 286 с
3. Зарецкий Ю.К. Лекции по современной механике грунтов. – Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. ун-та, 1989. – 607 с.
4. Мирсаяпов И.Т., Шакиров М.И. Плитно-свайные фундаменты при циклическом нагружении // Геотехника Беларуси: Наука и практика, 2013. – С. 314-320.
5. Мирсаяпов И.Т., Шакиров М.И. Экспериментальные исследования несущей способности и осадок оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении // Перспективные направления развития теории и практики в реологии и в механике грунтов. Материалы XIV Международного симпозиума по реологии. 8-11 октября, 2014. – С. 68-74.
6. Мирсаяпов И.Т., Шакиров И.Ф. Выбор типа фундаментов и оснований многофункционального комплекса «Фатих, Амир и Хан» по ул. Фатыха Амирхана г. Казани // Известия КГАСУ, 2015, № 3 (33). – С. 86-92.
7. Мирсаяпов И.Т., Шакиров М.И. Несущая способность и осадки моделей плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании. – М., 2012. – С. 528-531.
8. Мирсаяпов И.Т., Шакиров М.И. Исследование влияния циклической нагрузки на модели комбинированного плитно-свайного фундамента // Строительство – формирование среды жизнедеятельности. – М., 2014. – С. 423-429.
9. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. Прочность и деформируемость глинистых грунтов при режимном пространственном напряженном состоянии с учетом трещинообразования // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2016, № 1. – С. 16-23.

Mirsayapov I.T. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Shakirov M.I. – post-graduate student

E-mail: jklnumb@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

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

Bearing capacity and settlements of plate-pile foundations under cyclic loading

Resume

Under current conditions in the construction of buildings and structures trend of increasing loads on the foundation ground and the use of weak soils as a foundation contributed to the fact that one of the common ways to increase the load-carrying capacity and reduce sediment, is the use of plate-pile foundations. These foundations and basements are exposed to both static and cyclic loads, which in some cases are primarily determined during the safe operation of buildings and structures. The question of influence of cyclic loads on the behavior of combined plate-pile foundations is studied not enough.

In connection with this carried out experimental and theoretical studies of plate-pile foundations under cyclic loading.

Developed calculating method of the plate-pile foundation settlements under cyclic loading, considering joint deformation of ground base, piles and plate grillage. Depending on the loading cycle, cyclic loading leads to a redistribution of load between the elements of plate-pile foundation, the ground base at different levels of the plate grillage and the ground massive at space between piles.

This calculation method takes into account the changes in the stress-strain state of the plate-pile foundation elements and shows good agreement between the calculated and actual values of the researched parameters.

Keywords: plate-pile foundation, weak ground, cyclic loading, base settlement, tension, stress, ground space between piles, calculation model.

Reference list

1. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Features of the deformation of clayey soils under cyclic triaxial compression // International journal of Geotechnics, 2010, № 6. – P. 64-67.
2. Voznesensky E.A. The behavior of ground under dynamic loads. – M.: MGU, 1997. – 286 p.
3. Zaretsky J.K. Lectures on modern soil mechanics. – Rostov-na-Donu: University Press, 1989. – 607 p.
4. Mirsayapov I.T., Shakirov M.I. Plate-pile foundations under cyclic loading // Geotechnics Belarus: Science and Practice, 2013. – P. 314-320.
5. Mirsayapov I.T., Shakirov M.I. Experimental study of bearing capacity and the settlement of bases raft-pile foundations under cyclic loading // Perspective directions of development of the theory and practice of rheology and soil mechanics. Proceedings of the XIV International rheology Symposium. October 8-11, 2014. – P. 68-74.
6. Mirsayapov I.T., Shakirov I.F. Selecting the type of foundations and basements of multifunctional complex «Fatikh, Amir and Khan» in the Fatikh Amirhan street in Kazan. // Izvestiya KGASU, 2015, № 3 (33). – P. 86-92.
7. Mirsayapov I.T., Shakirov M.I. Bearing capacity and settlement patterns raft-pile foundations under cyclic loading // Integration, partnership and innovation in building science and education: scientific edition. – M., 2012. – P. 528-531.
8. Mirsayapov I.T., Shakirov M.I. Research of the cyclic loading effect on model combined raft-pile foundation construction // Building – forming environment of life. – M., 2014. – P. 423-429.
9. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. The strength and deformability of clay soils under the regime spatial stress state in view of cracking // Grounds, foundations and soil mechanics, 2016, № 1. – P. 16-23.