

УДК 624.154.001.8

Мирсаяпов Илизар Талгатович

доктор технических наук, профессор

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Шакиров Марат Илдусович

ассистент

E-mail: jklnumb@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

Расчет осадки основания комбинированных плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – разработка метода расчета осадки комбинированного плитно-свайного фундамента, учитывающего влияние многократно повторяющихся циклических нагружений в процессе строительства и эксплуатации зданий и сооружений.

Результаты. Разработан метод расчета осадки основания плитно-свайного фундамента, учитывающий сложное напряженно-деформированное состояние его элементов при циклическом нагружении.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что усовершенствованный метод расчета осадок плитно-свайных фундаментов при действии циклической нагрузки позволяет повысить надежность, расчетную несущую способность, уменьшить осадку, и вследствие этого получить более выгодные проектные решения при возведении фундаментов данного типа.

Ключевые слова: циклические нагрузки, плитно-свайный фундамент, межсвайное пространство, слабый грунт, осадки основания, усилия, деформации, напряжения.

Введение

В современном мире, уплотняющаяся застройка городов, сформировала тренд к возведению зданий и сооружений повышенной этажности и освоению участков со слабыми физико-механическими характеристиками грунтов, ранее непригодных для строительства. В таких случаях применение комбинированных плитно-свайных фундаментов является одним из наиболее эффективных способов для повышения несущей способности и уменьшения осадки основания фундаментов зданий и сооружений [1-7].

Исходя из этого, возникает необходимость разработки метода расчета осадки и несущей способности комбинированных плитно-свайных фундаментов, учитывающее возникающее сложное напряженно-деформированное состояние между элементами фундамента и грунтового основания в процессе циклического нагружения.

Существующие методы расчета осадки основания и несущей способности плитно-свайных фундаментов в основном разработаны для кратковременных статических нагружений. При этом влияние циклических нагружений на плитно-свайные фундаменты в процессе строительства и эксплуатации зданий и сооружений малоизучено.

Экспериментальные исследования

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить основные закономерности изменения усилий и деформаций в системе «плитный ростверк – грунт межсвайного пространства – грунтовое основание».

При проведении исследований увеличение осадки основания при действии циклических нагружений наблюдалось на всем протяжении испытаний. На приведенных графиках осадки S от нагрузки F и осадки S от количества циклов N , наблюдается интенсивное развитие осадок в течение первых 500 циклов циклических нагружений, после чего рост осадки существенно уменьшился. Анализ изменения осадки основания показывает,

что после различного количества циклов нагружения увеличение осадки происходит за счет увеличения их остаточной части (рис. 1а). При этом в течение одного цикла величина осадки меняется незначительно. Однако, по мере увеличения количества циклов нагружения, во время испытаний зафиксированы изменения этих («упругих») осадок. Эти осадки в течение первых 20-50 циклов несколько уменьшаются. Снижение значения «упругих» осадок обуславливается тем, что за счет уменьшения объема пор происходит уплотнение грунта, которое по скорости развития опережает уменьшение сдвиговых деформаций, модуль сдвига между сваями и грунтом межсвайного пространства.

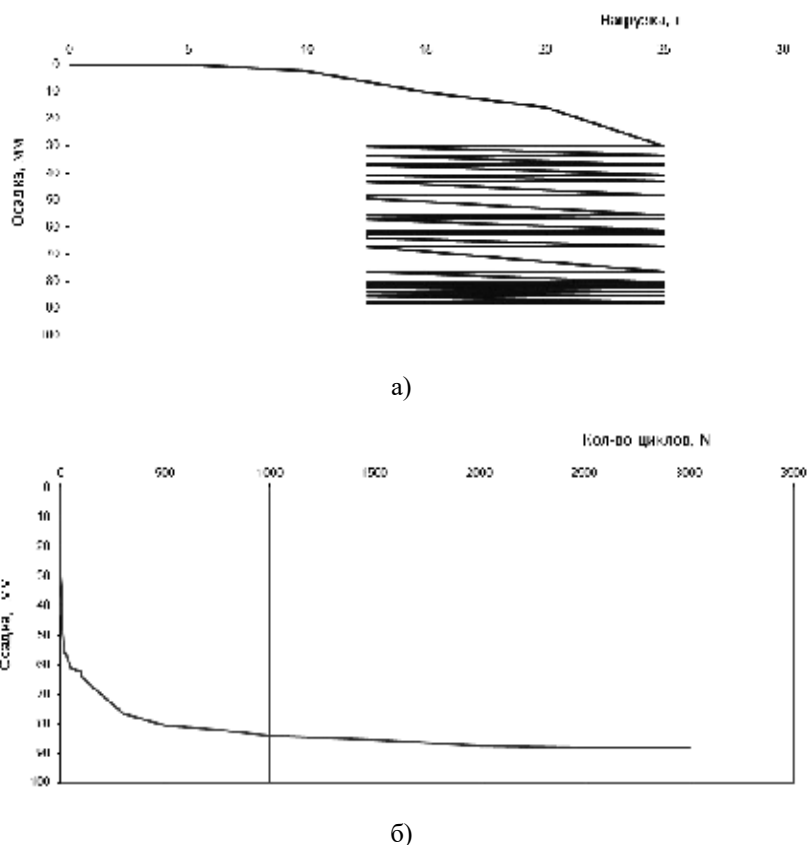


Рис. 1. Развитие осадки фундамента (иллюстрация авторов):

а) осадка от нагрузки при циклическом; б) осадка от количества циклов нагружения

Из результатов экспериментальных исследований видно, что в начальный период циклических нагружений происходит наибольшее уплотнение грунта, далее «упругие» осадки оснований начинают увеличиваться уже после первых 50-100 циклов нагружений. В случае если предельного состояния основания не достигается, к моменту 1000 циклов нагружения наступает относительная стабилизация (рис. 1а).

Осадки основания изменяются в процессе циклических нагружений, подобно тому, как изменяются деформации грунта межсвайного пространства. В то же время увеличение осадок основания по сравнению с первым циклом нагружения может составлять до 30 %.

На рис. 2 показаны изменения усилий в сваях. По мере увеличения количества циклов увеличиваются усилия в сваях в связи с тем, что происходит перераспределения деформаций и напряжений из грунта межсвайного пространства в сваи. Необходимо отметить, что наибольшие усилия возникают в рядовых и угловых сваях, а наименьшие – в центральных. Объясняется это тем, что в средней зоне условного фундамента, центральные сваи обжимает наиболее уплотненный грунт, а угловые и рядовые сваи взаимодействуют с участками менее уплотненного грунта за пределами плиты ростверка.

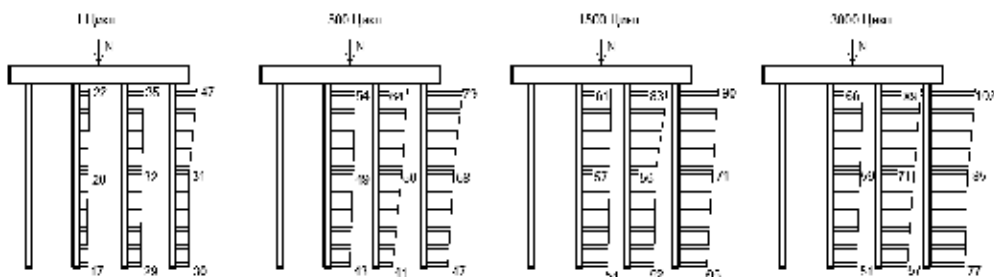


Рис. 2. Усилия в сваях после различного количества циклов, N ($P_{\min}=12,5$ т, $P_{\max}=25$ т) (иллюстрация авторов)

При циклическом нагружении плитно-свайного фундамента деформации в грунте межсвайного пространства уменьшаются во всем протяжении испытания (рис. 3). Таким образом, существенное уменьшение общих деформаций наблюдается под плитной частью плитно-свайного фундамента (до 2-х раз).

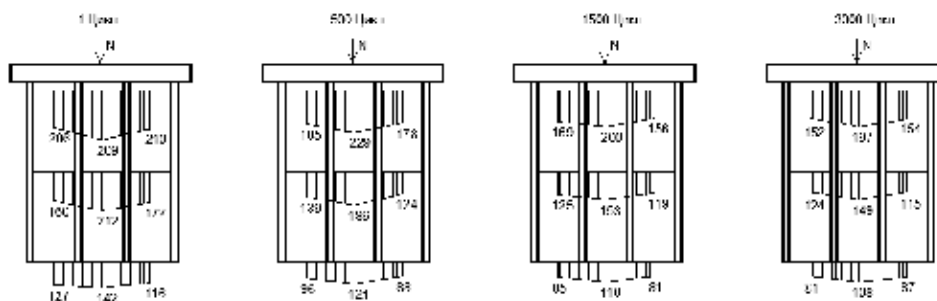


Рис. 3. Развитие деформаций грунта межсвайного пространства при различных количествах циклов, кПа ($P_{\min}=12,5$ т, $P_{\max}=25$ т) (иллюстрация авторов)

Для аналитического описания влияния деформаций виброползучести грунта на увеличение осадок плитно-свайного фундамента определяются дополнительные напряжения в грунте и в сваях [8].

Принята расчетная схема, которая состоит из сваи, окружающей ее грунта и части плитного ростверка, приходящуюся на одну сваю. Поведение основных компонентов напряженно-деформированного состояния такой ячейки будет соответствовать поведению сваи в составе плитно-свайного фундамента (рис. 4 а-б).

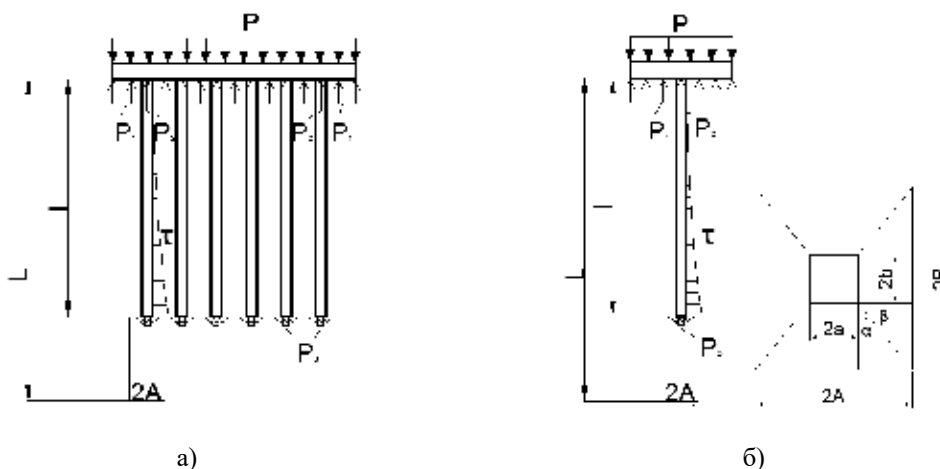


Рис. 4. а) Схема взаимодействия плитно-свайного фундамента с грунтовым основанием; б) Схема взаимодействия одиночной сваи с однородным массивом грунта $2A \times 2B$ (иллюстрация авторов)

Размеры ячейки – $2A \times 2B \times L$, размеры свай – $2a \times 2b \times l$.

Для решения задачи используем систему уравнений равновесия сил (1) необходимых для определения 4-х неизвестных – p_1, p_2, p_3 и τ_0 :

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

Здесь

$$p_1(N) = \sigma_{gr1}^{\max}(N) - \sigma_{gr}(N), \quad (2)$$

$$p_2(N) = \sigma_p^{\max}(N) + \sigma_p(N), \quad (3)$$

$$p_3(N) = \sigma_{gr3}^{\max}(N) - \sigma_{gr}(N), \quad (4)$$

$$\tau(N) = \tau_0(N) \cdot e^{-\alpha z}, \quad (5)$$

$$\tau(z) = \tau_0 \cdot e^{-\alpha z}, \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{5}{l}. \quad (7)$$

Зоны предельного равновесия определяются точкой пересечения эпюры мобилизованного касательного напряжения ($\tau(N)$) с эпюрой предельного касательного напряжения (рис. 5), при этом учитывается жесткость материала свай:

$$\tau^*(z) = \gamma \cdot z \cdot tg\varphi + c(N), \quad (8)$$

где, $c(N)$ – удельное сцепление грунта при циклическом нагружении [9]:

$$c(N) = C \cdot m(t_1\tau_1) \cdot \lambda(t_1\tau_1) \cdot \sqrt{\frac{k(\tau_1)}{k(t)} + \frac{1}{1+k(\tau_1)}} \cdot c(t_1\tau). \quad (9)$$

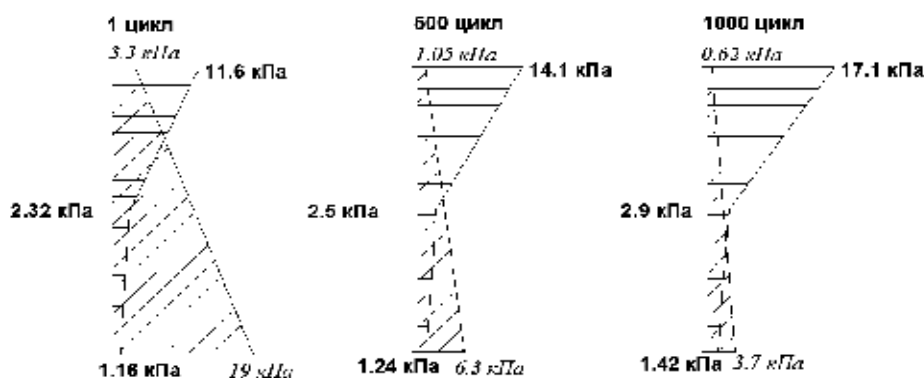


Рис. 5. Эпюры предельного касательного напряжения и мобилизованного касательного напряжения по мере увеличения количества циклов (иллюстрация авторов)

В случае увеличения длины свай, увеличивается ее площадь боковой поверхности и меняется доля нагрузки приходящаяся на уровень пяты свай.

Напряжения в грунте под ростверком определяются по формуле:

$$p_1(N) = \frac{p \cdot AB - p_2(N) \cdot ab}{(AB - ab)}. \quad (10)$$

Напряжения верхней плоскости оголовка в свае представляются в виде:

$$p_2(N) = \frac{P \cdot G_{гр}(N) \cdot AB(AB-ab) \cdot L \cdot \beta_{гр} \left(1 - \frac{l}{L}\right) + 0,33 \cdot \tau_0(N) \cdot E_{гр}(N) \cdot (A-a)(AB-ab) \cdot k_1 + 0,33 \cdot \tau_0(N) \cdot E_{гр}(N) \cdot (B-b)(AB-ab) \cdot k_2 - 4 \cdot \frac{\tau_0(N)}{\alpha} \cdot E_{гр}(N) \cdot l(AB-ab) \cdot \omega(1-v_{гр}) \cdot k(l) + \frac{\tau_0(N)}{\alpha} \cdot E_{гр}(N) \cdot \frac{a+b}{b} \cdot l(AB-ab) \cdot e^{-\alpha l} \cdot \omega(1-v_{гр}) \cdot k(l)}{a \cdot \omega(1-v_{гр}) \cdot k(l) \cdot (AB-ab) \cdot E_{гр}(N) + ab \cdot \beta_{гр} \cdot L \cdot \left(1 - \frac{l}{L}\right) \cdot G_{гр}(N)} \quad (11)$$

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

Напряжения, возникающие под нижним концом сваи, можно вычислить по формуле:

$$p_3(N) = \frac{p_2(N) \cdot 4ab + 4(a+b) \cdot l \cdot \frac{\tau_0(N)}{\alpha} - 4(a+b) \cdot l \cdot \frac{\tau_0(N)}{\alpha} \cdot e^{-\alpha l}}{4ab} \quad (12)$$

Касательное напряжение по боковой поверхности свай $\tau_0(N)$ можно определить исходя из выражения:

$$\tau_0(N) = \frac{a \cdot b(p_3(N) - p_2(N))}{(a+b) \cdot l \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot (4e^{-\alpha l} - 1)} \quad (13)$$

После определения напряжений вычисляются осадки. Осадка плитно-свайного фундамента вычисляется по формуле:

$$S(N) = S_{ef}(N) + \Delta S_p(N) + \Delta S_c(N) \quad (14)$$

Осадка условного фундамента вычисляется исходя из расчетной схемы (рис. 6).

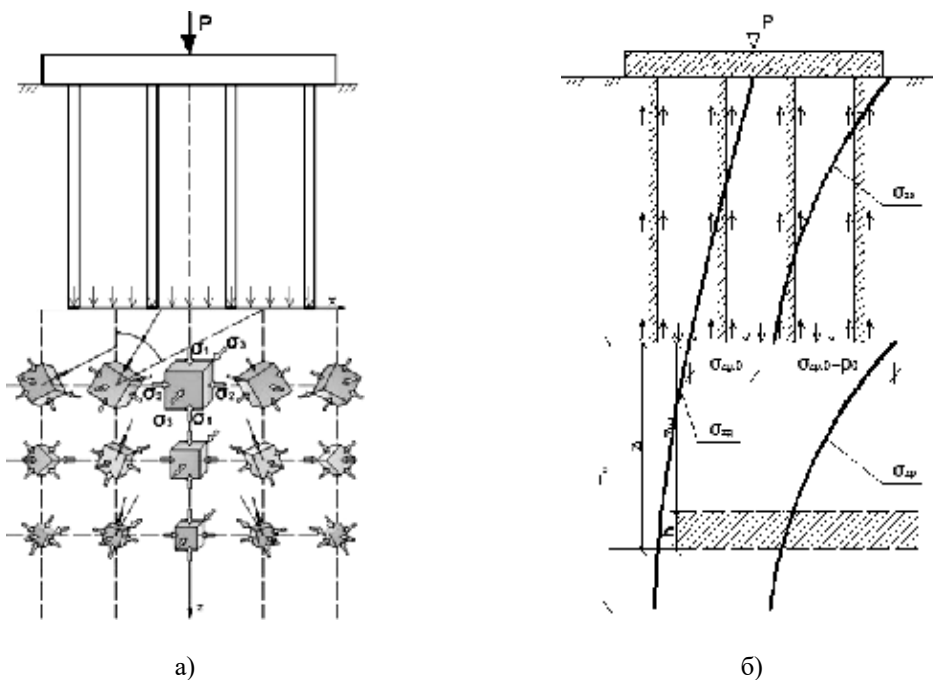


Рис. 6. а) Схема напряженного состояния основания условного фундамента при циклическом нагружении; б) Расчетная схема к определению осадки основания фундамента при циклическом нагружении (иллюстрация авторов)

При этом принимается объемное напряженное состояние грунта основания условного фундамента (рис. 6а). Разбивая сжимаемую толщу основания на слои, для каждого слоя, исходя из (рис. 6 а-б), определяем деформации, соответствующие значению вертикального давления, а затем значения деформации в пределах сжимаемой толщи суммируются.

Осадку условного фундамента при циклическом нагружении с учетом объемного напряженно-деформированного состояния грунта можно определить по формуле:

$$S(N) = \sum_{i=1}^n [\varepsilon_{z,i}(t, t_0)] \cdot h_i, \quad (15)$$

где $\varepsilon_{z,i}(t, \tau)$ – приращение осевой деформации i -го слоя при действии циклической нагрузки t [10];

n – количество слоев сжимаемой толщи грунтового основания [11];

t – время, соответствующее моменту наблюдения и количеству циклов нагружения N ;

t_0 – время приложения нагрузки соответствующее первому циклу;

h_i – мощность i -го слоя.

Величина дополнительной осадки за счет сжатия ствола сваи и за счет продавливания сваи на подошву условного фундамента зависит от выполнения условий (16)-(18). Эти осадки происходят скачками по мере нарушения условий:

$$\tau(N) \leq \tau^*(N), \quad (16)$$

$$p_2(N) \leq \sigma_{1u}(N), \quad (17)$$

$$p_3(N) \leq \sigma_{1u}(N). \quad (18)$$

Функция $\sigma_{1u}(N)$ принимается:

$$\sigma_{1u}(N) = 4[\sigma_v(t, t_1, N) \cdot A_{sh} \cdot \cos \alpha_1(t, t_1, N) + \tau_v(t, t_1, N) \cdot A_{sh} \cdot \sin \alpha_1(t, t_1, N)]. \quad (19)$$

Осадка за счет сжатия ствола сваи определяется по формуле:

$$\Delta S_c(N) = \frac{\sigma_c^{\max}(N_1)(l-a)}{E_b(N_1)} + \frac{\varepsilon_{pl}^{cp}(N) \cdot (l-a)}{\left[1 + \frac{E_b(N)}{E_{cp}(N)} \cdot \frac{A_{ce}}{A_{cp}}\right]}. \quad (20)$$

Величина дополнительной осадки ΔS_p за счет продавливания сваи определяется по формуле:

$$\Delta S_p(N) = a_{ce} \left[\frac{P_3(N)}{G_v(N)} - \left(\frac{P_3(N) + 2P_3(N) \cos B}{3} \right) \frac{3K_v(N) - G_v(N)}{3K_v(N) - G_v(N)} \right], \quad (21)$$

$E_b(N)$ – модуль деформации бетона сваи при циклических нагружениях;

$E_{cp}(N)$ – модуль деформации грунта при циклических нагружениях;

$\varepsilon_{pe}^{cp}(N)$ – деформации виброползучести грунта;

$K_v(N)$ – объемный модуль деформации грунта при циклическом нагружении;

$G(N)$ – модуль сдвига грунта при циклическом нагружении;

$\sigma_i^{\max}(N)$ – максимальные напряжения в сечении сваи;

a_{ce} – размер поперечного сечения сваи.

Заключение

Усовершенствованные методы расчета осадки основания и несущей способности, учитывают изменение напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента, увеличение деформаций, напряжений и усилий, а также их перераспределение между грунтом и сваями при циклическом нагружении. Определение влияния циклического нагружения на плитно-свайные фундаменты в будущем позволит получить более выгодные проектные решения при возведении зданий и сооружений на фундаментах данного типа.

Список библиографических ссылок

1. Мирсаяпов Илизар Т., Шакиров М. И. Плитно-свайные фундаменты при циклическом нагружении : сб. ст. Геотехника Беларуси: Наука и практика – Международной научно-технической конференции / БНТУ. Минск, 2013. С. 314–320.
2. Katzenbach R. Soil-structure-interaction of Tunnels and Superstructures During Construction and Service Time // Procedia Engineering. 2013. Vol. 57. P. 35–44.
3. Мирсаяпов Илизар Т., Шакиров М. И. Экспериментальные исследования несущей способности и осадок оснований плитно-свайных фундаментов при циклическом

- нагрузении : сб. ст. Перспективные направления развития теории и практики в реологии и в механике грунтов – XIV Международного симпозиума по реологии / КГАСУ. Казань, 2014. С. 68–74.
4. Мирсаяпов Илизар Т., Шакиров М. И. Несущая способность и осадки моделей плитно-свайных фундаментов при циклическом нагружении : сб. ст. Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании – Международной научной конференции / МГСУ. М. 2012. С. 528–531.
 5. Мирсаяпов Илизар Т., Шакиров М. И. Исследование влияния циклической нагрузки на модели комбинированного плитно-свайного фундамента : сб. ст. Строительство – формирование среды жизнедеятельности – XVII Международной научной конференции / МГСУ. М., 2014. С. 423–429.
 6. Мирсаяпов Илизар 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.
 7. Шакиров И. Ф., Гайфуллина В. А. Исследование влияния добавок на инъекционные свойства цементных растворов, применяемых при укреплении грунтов напорной цементацией : сб. ст. Технические науки – от теории к практике – XXI Международной научно-практической конференции / СПбГАСУ. СПб. 2017. С. 37–41.
 8. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlement of raft-pile foundations under cyclic loading : dig. of art. 1 st International conference on energy geotechnics / ICEGT. Kiel. Germany, 2016. P. 423–428.
 9. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Behaviour of pile-plate foundations under cyclic loading : dig. of art. Baltic Piling Days – Proceedings of the baltic piling days conference / Estonian Geotechnical Society ISSMGE. Tallin, 2012. P. 31–34.
 10. Mirsayapov Ilizar T., Sabirzyanov D. D. Bearing capacity of foundations base under combined alternating long-term static and cyclic loading : dig. of art. Materials Science and Engineering 365 – IOP Conferense Series / M. 2018. P. 1–10.
 11. Сиразиев Л. Ф. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния слоистых грунтовых оснований под центром штампа при кратковременных испытаниях // Инновации и инвестиции. 2018. № 11. С. 225–228.

Mirsayapov Ilizar Talgatovich

doctor of technical sciences, professor

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Shakirov Marat Ildusovich

assistant

E-mail: jklnumb@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

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

Combined plate-pile foundations settlement calculation during cyclic loading**Abstract**

Problem statement. The purpose of the study is to develop a method for calculating the settlement of a combined plate-pile foundation, taking into account the effect of repeatedly repeated cyclic loads in the process of construction and operation of buildings and structures.

Results. A method for calculating the settlement of the basement of a slab-pile foundation has been developed, taking into account the complex stress-strain state of its elements under cyclic loading.

Conclusions. An improved method for calculating the sediment of slab-pile foundations under the action of a cyclic load allows to increase reliability, calculated bearing capacity, reduce settlement, and as a result to obtain more cost-effective solutions when designing foundations of this type.

Keywords: cyclic loads, plate-pile foundation, between-pile space, weak soil, base settlement, efforts, deformations, stress.

References

1. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Plate-pile foundations under cyclic loading : dig. of art. Geotechnics Belarus: Science and Practice – International scientific-technical conference / BNTU. Minsk, 2013. P. 314–320.
2. Katzenbach R. et al. Soil-structure-interaction of Tunnels and Superstructures During Construction and Service Time // Procedia Engineering. 2013. Vol. 57. P. 35–44.
3. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Experimental study of bearing capacity and the settlement of bases raft-pile foundations under cyclic loading : dig. of art. Perspective development directions of the theory and practice in rheology and soil mechanics – Proceedings of the XIV International rheology Symposium / KGASU. Kazan, 2014. P. 68–74.
4. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlement patterns raft-pile foundations under cyclic loading : dig. of art. Integration, partnership and innovation in building science and education – International scientific conference / MGSU. M. 2012. P. 528–531.
5. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Research of the cyclic loading effect on model combined raft-pile foundation construction : dig. of art. Forming environment of life – XVII International scientific conference / MGSU. M., 2014. P. 423–429.
6. Mirsayapov Ilizar T., Koroleva I. V. The strength and deformability of clay soils under the regime spatial stress state in view of cracking // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 2016. № 1. P. 16–23.
7. Shakirov I. F., Gayfullina V. A. Researches of the effect from additives on the cement mortars injection properties used in strengthening soil pressure cementation : dig. of art. Technical sciences – from theory to practice – XXI international scientific-practical conference / SPbGASU. SPb., 2017. P. 37–41.
8. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Bearing capacity and settlement of raft-pile foundations under cyclic loading : dig. of art. 1 st International conference on energy geotechnics / ICEGT. Kiel. Germany, 2016. P. 423–428.
9. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M. I. Behaviour of pile-plate foundations under cyclic loading : dig. of art. Baltic Piling Days – Proceedings of the baltic piling days conference / Estonian Geotechnical Society ISSMGE. Tallin, 2012. P. 31–34.
10. Mirsayapov Ilizar T., Sabirzyanov D. D. Bearing capacity of foundations base under combined alternating long-term static and cyclic loading : dig. of art. Materials Science and Engineering 365 – IOP Conferense Series. M., 2018. P. 1–10.
11. Siraziev L. F. Experimental studies of the stress-strain state of layered soil bases under the center of the stamp during short-term tests // Innovatsii i investitsii. 2018. № 11. P. 225–228.