



УДК: 624.152

DOI: 10.52409/20731523_2023_3_18

EDN: BOODTM



Осадка оснований фундаментов глинистых грунтов при блочных циклических нагрузениях

Илизар Т. Мирсаяпов¹, Х. М.Шараф¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* В натуральных условиях строительства и эксплуатации нагрузки на грунтовые основания прикладываются поэтапно по мере возведения зданий и сооружений, при этом периоды активного нагружения при строительстве переходят в промежутки выдержки при различных эксплуатационных значениях нагрузок. Цель работы заключается в разработке метода расчета осадки оснований фундаментов на глинистых грунтах при блочном циклическом нагружении. Задачами исследования являются: проанализировать существующие методы расчета осадки фундаментов на глинистых грунтах при различных режимных циклических нагрузках и провести экспериментальные и теоретические исследования осадки оснований фундаментов при блочной циклической нагрузке на глинистых грунтах.

Результаты: разработан и внедрен инженерный метод расчета осадки фундамента на основе применения методики послойного суммирования, который учитывает одновременное изменение пространственного напряженно-деформированного состояния и механических характеристик глинистых грунтов при режимах блочных циклических нагружениях.

Выводы: Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что предложенный метод расчета осадки оснований фундамента позволяет более точно оценить поведение глинистых грунтов при проектировании фундаментов зданий и сооружений, которые подвергаются блочным циклическим нагрузкам.

Ключевые слова: глинистый грунт, осадка основания фундамента, блочное циклическое нагружение.

Для цитирования: Мирсаяпов И.Т., Шараф Х. М. Осадка оснований фундаментов глинистых грунтов при блочных циклических нагружениях // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с. 18-25, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_18, EDN: BOODTM

Settlement of clay soils foundations under block cyclic loading

Iizar T. Mirsayapov¹, H. M. Sharaf¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* In full-scale conditions of construction and exploitation, loads on soil bases are applied in stages as buildings and structures are constructed, with periods of active loading during construction passing into periods of endurance at different values of loads during exploitation.

The purpose of the study is to develop a method for calculating the settlement of foundations on clay soils under block cyclic loading. The objectives of the study are: to analyze the existing methods of calculating the settlement of foundations on clayey soils under different mode cyclic loads and to conduct experimental and theoretical studies of foundation settlement under block cyclic loading on clayey soils.

Results: we propose and implement an engineering calculation method of foundation settlement based on the application of the layer-by-layer summation method that takes into account the parallel change in the spatial stress-strain state and the mechanical properties of clay soils under the regime block cyclic loading.

Conclusions: The significance of the obtained results for the construction industry consists in the fact that the proposed method for calculating foundation settlement makes it possible to assess more accurately the behavior of clay soils in the design of foundations of buildings and structures that are subjected to block cyclic loading.

Keywords: clay soil, foundation settlement, block cyclic loading.

For citation: Mirsayapov I.T., Sharaf H.M. Settlement of foundations of clay soils under block cyclic loading // News KSUAE, 2023, № 3(65), p. 18-25, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_18, EDN: BOODTM

1. Введение

В наши дни существует множество различных эмпирических уравнений и различных методов для прогнозирования деформации грунтового массива под действием нагрузки. Во многих научных исследованиях задача решается экспериментальным или теоретическим путем на основе анализа результатов физического или математического моделирования. При этом точность экспериментальных и расчётных зависимостей определяется путём измерения соответствия заданным исходным условиям [1-3, 4]. В настоящее время расчет фундаментов по осадкам согласно нормативными документами основан на следующих условиях:

$$S = S_i + S_c + S_s \leq S_u \quad (1)$$

где S – полная или общая осадка основания фундамента; S_i – мгновенная или упругая осадка основания фундамента; S_c – первичная консолидационная и стабилизирующая осадка основания фундамента; S_s – осадка основания фундамента при вторичном рассмотрении; S_u – допустимое значение величины осадки основания фундамента согласно нормативными документами в зависимости от типа здания и сооружения [5-7].

При статическом нагружении основным методом расчета для определения абсолютной величины осадки фундамента остается метод послойного суммирования, который был разработан для одноосного деформированного сжатия грунта [8-10]. В реальных условиях грунт под зданием сжимается с ограниченными боковыми перемещениями. Профессор Н.А. Цытович предлагал учитывать влияние размеров формы фундамента и свойств грунта при расчете осадки по эквивалентному слою. К. Е. Егоров разработал метод расчета осадки фундамента прямоугольной формы с учетом всех трех составляющих нормальных напряжений P_x , P_y и P_z [11]. Тер-Мартirosян З. Г и Тураев Х. Ш. предлагали уравнение для вычисления осадки различных вариантов фундаментов с ограниченной толщиной в зависимости от реологических характеристик грунта, представленных законом деформационной ползучести [12]. При условии режима длительного нагружения. И.Т. Мирсаяповым и И.В. Королевой предложен метод расчета осадки фундаментов с учётом объемного напряженно-деформированного состояния и длительной деформации глинистых грунтов [13]. При циклическом режиме нагружения. Жустарева Е. В. [14], Коныгина С. Ю. [15], Горячев М.Г.[16], Мирсаяпов И.Т. и Сабирзянов Д.Д. [17], предложили формулы для расчета неупругих деформаций на основе гипотезы о сходстве деформаций ползучести при длительно-статическом и циклическом нагружении. Мирсаяпов И.Т. и Сабирзянов Д.Д, предложили способ расчета осадки фундамента при совместном длительно-статическом циклическом нагружении с постоянным уровнем вертикального напряжения [17,18]. Приведенные выше методы не позволяют учесть и оценить осадку фундамента под действием блочной циклической нагрузки, поэтому необходимо разработать метод расчета, учитывающий такие режимы нагружения при эксплуатации во время строительства.

Цель работы заключается в разработке метод расчета осадок оснований фундаментов на глинистых грунтах при блочном циклическом нагружении. Для достижения поставленной цели рассмотрены следующие задачи:

- 1) проанализировать существующие методы расчета осадки фундаментов на глинистых грунтах при различных режимных циклических нагрузках;
- 2) провести экспериментальные и теоретические исследования осадки оснований фундаментов при блочной циклической нагрузке на глинистых грунтах.

2. Материалы и методы

Лабораторные экспериментальные исследования проводились в объемном лотке с размерами $1 \times 1 \times 1$ м. В лотковых исследованиях использовался глинистый грунт со следующими физико-механическими свойствами: $P=1,9 \text{ кН/м}^3$; $W=23\%$; $W_L=38\%$; $W_P=21\%$; $J_P=17\%$; $J_L=0,117$. Подробное описание сути испытания можно найти в работах [5-7].

Натурные исследования проводились как наблюдения развития осадки фундаментов двух резервуаров, которые были построены в городе Жупанье, Хорватия.

Фундаменты резервуаров спроектированы из железобетонных плит, построенных на многослойных грунтах со следующими характеристиками:

Первый слой грунта: насыпной грунт, мощность слоя $h=3-5$ м; удельное сцепление $C=17$ кПа; угол внутреннего трения $\Phi=23^\circ$; одометрический модуль деформации $E_{oed}=5,5$ МПа; число пластичности $P_I=9\%$;

Второй слой грунта: глинистый грунт, мощность слоя $h=2-4$ м; удельное сцепление $C=19$ кПа; угол внутреннего трения $\Phi=18^\circ$; одометрический модуль деформации $E_{oed}=1,9-3,6$ МПа; число пластичности $P_I=32\%$;

Третий слой грунта: глинистый песок, обнаруженный на глубине приблизительно 10 м, состоящий из 59% песка, 41% ила и глины, представляет собой мелкозернистый песок с плотностью от рыхлой до очень рыхлой. Глина, обнаруженная в слое на глубине 12,6 м, имеет пластичность от низкой до средней, консистенцию от мягкой до средней.

Четвертый слой грунта: песок глинистый грунт, в основном мелкозернистый, с некоторыми средними и крупными зёрнами. В некоторых местах грунт явно глинистый в тонких прослойках. Данный слой прослеживается на глубине от 12,3 до 30,7 м и ниже слоя плотного песка до песчаного гравия, от 39,2 м до забоя скважины [19].

3. Результаты и обсуждение

На основе полученных результатов лабораторных и натурных исследований авторами [5-7, 19] был разработан метод расчета осадки оснований фундаментов на глинистых грунтах при режиме блочном циклическом нагружении, для расчета осадки фундаментов, подверженных реалистичным нагружением, предлагается метод расчета, основанный на методе послойного суммирования, учитывающий пространственное напряженное состояние фундаментов при реалистичных нагрузках.

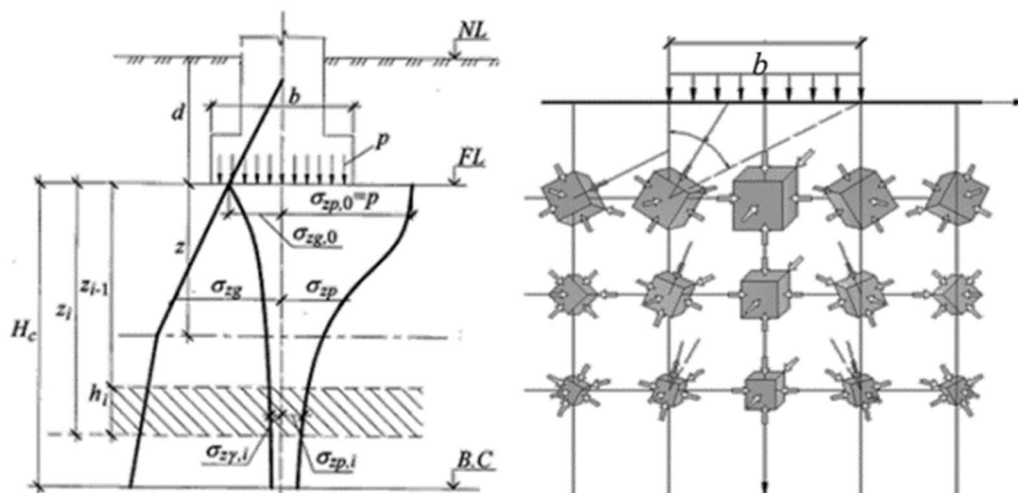


Рис.1. Расчетная схема к определению осадки фундамента при режимном нагружении (иллюстрация авторов)

Fig.1. Calculation scheme for determining the foundation settlement under the regime loading (illustration by the authors)

Расчет по деформациям (осадкам) фундаментов производится на основе схемы напряженного состояния фундаментов при режимном нагружении (рис. 1) по следующей методике:

- Определяется величина естественного давления σ_{zg} от действия собственного веса грунта;
- Внешняя нагрузка на фундамент P делится на несколько этапов с учетом времени, продолжительности и режима ее приложения;
- Высота сжимаемой толщи основания фундамента (зона активного сжатия) определяется исходя из условий:

$$H_s = Z; \sigma_{zp} = 0,5 \cdot \sigma_{zg} \quad (2)$$

где H_s - глубина ("толщина") сжимаемой толщи, принимаемой на уровне нижней границы на расстоянии Z ;

σ_{zp} - вертикальное девиаторное на высоте Z от дополнительных нагрузок на фундамент.

- Сжимающаяся толща основания фундамента разделяется на несколько элементарных слоев;
- Определяется естественное напряженное состояние от само веса грунта. Вычисляются вертикальные σ_{zgi} и горизонтальные σ_{xgi} , σ_{ygi} давления от веса собственного веса грунта в подстилающем слое фундамента и в центре каждого слоя под подстилающим слоем фундамента.;
- Определяются дополнительные вертикальные давления σ_{zp} , для всех режимов нагружения, используя модель фундамента как линейно деформируемого равномерного изотропного полупространства;

$$\sigma_{z\rho i} = \rho_0 \cdot \alpha \quad (3)$$

где α - коэффициент распределения напряжений; $P_0 = P \cdot \sigma_{zgi}$;

- Определяются дополнительные горизонтальные давления σ_{xgi} , σ_{xygi} при одномерном сжатии с учетом коэффициента горизонтального давления $\xi = 0,25 \div 1,0$, в соответствии с конкретными условиями и плотности грунта.

Берется объемное напряженное состояние фундамента в каждом слое, в рамках сжимаемой толщины на основе девиатора напряжения устанавливаются деформации, которые соответствуют значению вертикального напряжения, и суммируются величины нарастания осевых деформаций в рамках сжимаемой толщины.

Величина нарастания осевой деформации $\Delta \varepsilon_{zi}$ i -го слоя в момент нагружения определяется по следующей формуле:

$$\Delta \varepsilon_{zi} = \frac{\Delta \sigma_{zi}}{\Delta G_{vi}} - \Delta G \cdot \frac{3k_{vi} - G_{vi}}{3k_{vi} \cdot G_{vi}} \quad (4)$$

где $\Delta \sigma_{zi}$ - вертикальное напряжение в момент нагрузки; G_{vi} - модуль сдвига в момент нагрузки;

k_{vi} - модуль объема в момент нагрузки.

Величина нарастания осевой деформации при циклических нагружениях определяется по следующей формуле:

$$\varepsilon_{pli}^v(N, t, t_0) = \sum_{i=1}^n \left[\sigma_i^{max}(N, t, t_0) \cdot k_R \left\{ \left[\frac{f_{UP}(N)}{\sigma(N, t, t_0)} \right] \cdot f_{UP}(N) \cdot \rho_{cyc} \cdot + \left[\frac{f_{dow}(N)}{\sigma(N, t, t_0)} \right] \cdot f_{dow}(N) \cdot \rho_{cyc} + \left[\frac{f(t)}{\sigma(N, t, t_0)} \right] \cdot f(t) + \left[\frac{f_{UP}(t_0)}{\sigma(N, t, t_0)} \right] \cdot f_{UP}(t_0) + \left[\frac{f_{dow}(t_0)}{\sigma(N, t, t_0)} \right] \cdot f_{dow}(t_0) \cdot \right\} \right] \quad (5)$$

где $\sigma_i^{max}(N, t, t_0)$ - максимальное вертикальное напряжение в блоках повышающегося и понижающегося циклического нагружения, время выдержки и в момент изменения нагрузки;

$\sigma(N, t)$ - допускаемое вертикальное напряжение при циклическом нагружении;

k_R - фактор, определяющийся соотношением параметров ползучести и циклической ползучести грунта, его прочности и вертикального давления в исследуемом блоке нагружения;

ρ_{cyc} - асимметричность циклов вертикальных напряжений грунта;

$f_{UP(N)}$, $f_{down(N)}$, $f(t)$, $f_{UP(t)}$, $f_{down(t)}$ - функции роста деформации циклической ползучести грунта в возрастающих и убывающих блоках циклического нагружения, время выдержки и в момент изменения величины нагрузки.

Тогда осадка фундамента при режимном блочном циклическом нагружении вычисляется по следующей формуле:

$$S(N, t, t_0) = \sum_i^n [\Delta \varepsilon_{zi} + \varepsilon_{pli}^v(N, t, t_0)] \cdot h_i \tag{6}$$

где h_i - толщина i -го слоя;

$\Delta \varepsilon_{zi}$ - приращение осевой деформации i -го слоя в момент приложения нагрузки;

$\Delta \varepsilon_{pliv(N,t,t_0)}$ - приращение осевой деформации i -го слоя при циклическом нагружении;

n - количество слоев;

h_i - толщина i -го слоя.

По результатам полученных лабораторных, натурных и теоретических исследований были построены графики развития осадки оснований фундаментов при режимных нагружениях, которые представлены на рис. 2 и рис. 3.

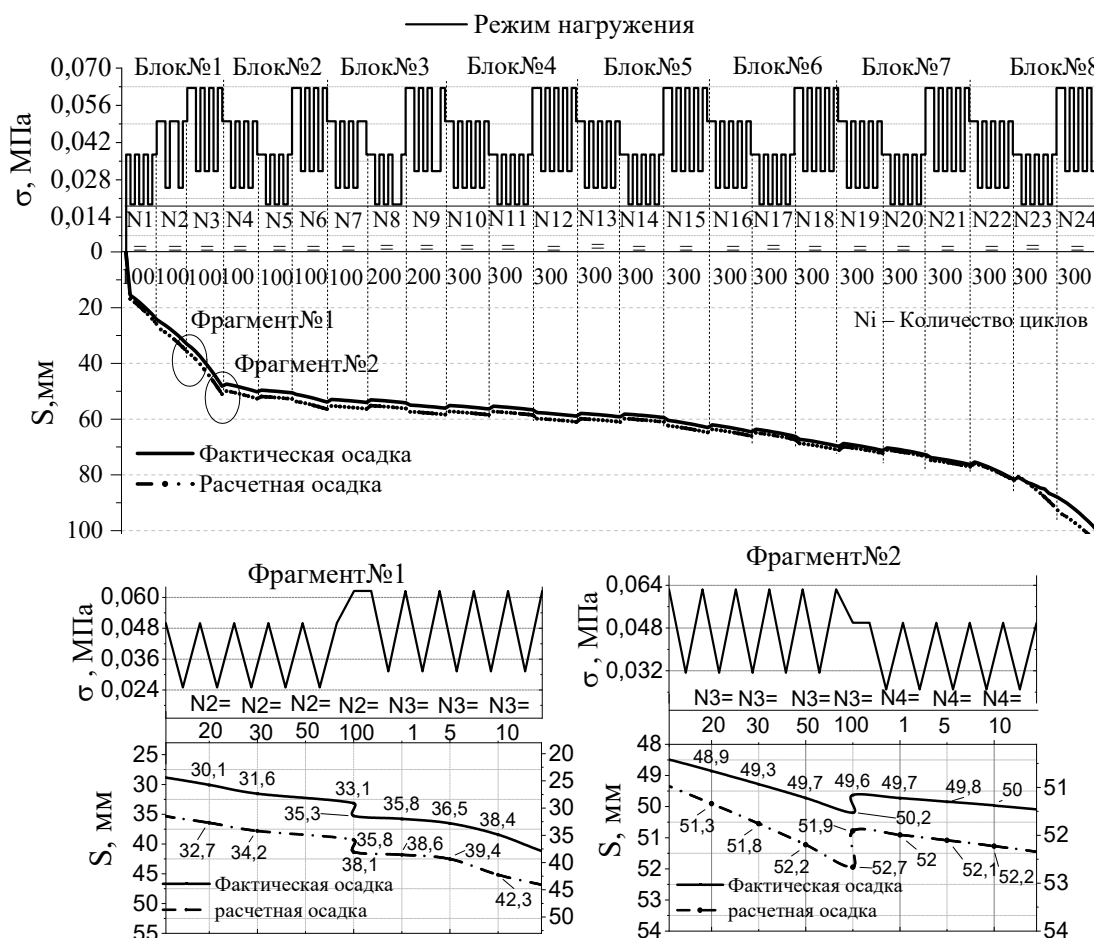


Рис.2. Сопоставление осадки модели плитного фундамента в лабораторных исследованиях и предложенного метода расчета при режимном блочном циклическом нагружении.

(иллюстрация авторов)

Fig. 2. Comparison settlement of the plate foundation model in laboratory studies and the method of the proposed calculation under mode block cyclic loading. (Illustration by the authors).

Сравнение полученных результатов измерений по развитию осадок модели плитного фундамента в лабораторных испытаниях и мониторинга развития осадки плитного фундамента резервуаров при режимном блочном циклическом нагружении показывает, что изменение развития осадки фундамента происходит весь период испытания, но это развитие можно условно разделить на три стадии.

На первой стадии осадка фундамента развивается с увеличением максимальных нагрузок и количества циклов нагружения, при этом величина осадки составляет 50-54% от величины предельной осадки.

На второй стадии, видно, что скорость развития осадок фундаментов уменьшается или происходит их полная стабилизация в повышающемся блочном циклическом режиме, а осадка фундаментов уменьшается в понижающемся блочном циклическом режиме.

На третьем этапе наблюдается увеличение развития осадки фундамента при увеличении количества циклов нагружения по сравнению с предыдущими стадиями нагружения. Скорость развития осадки увеличивается без стабилизации, пока не достигнет предельного значения осадки.

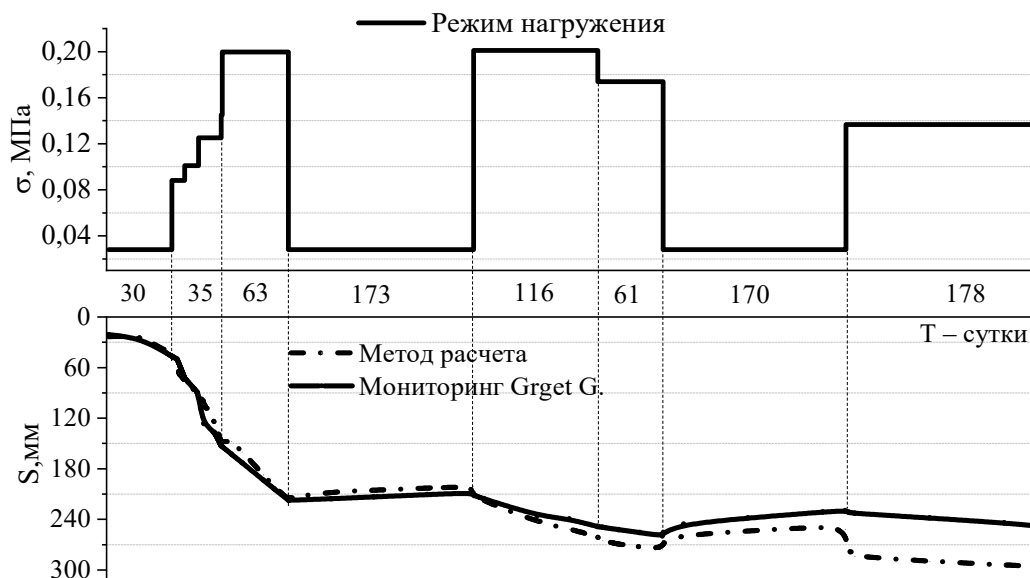


Рис. 3. Сопоставление осадки плитного фундамента резервуаров и предложенного метода расчета при блочном циклическом нагружении. (иллюстрация авторов) [19].

Fig. 3. Comparison settlement of mat foundation of tanks and the method of the proposed calculation under block cyclic loading. (Illustration by the authors) [19].

При действии блочного циклического нагружения, в случае последовательно возрастающего режима, происходит наибольшее изменение осадки в первом блоке в начальный период нагружения. При переходе к более высоким уровням нагружения наблюдалось скачкообразное увеличение суммарных осадок в момент перехода к другому блоку. В дальнейшем по мере увеличения периода нагружения наблюдалось плавное развитие осадки, аналогично развитию осадки во второй фазе в рамках первого блока нагружения. В то же самое время скорость развития этих осадок была меньше, чем в первом блоке.

При переходе к более низким уровням нагрузки происходит ступенчатое уменьшение осадки за счет упругой составляющей и осадки после нагрузки в момент снижения нагрузки. В дальнейшем в течение некоторого времени по мере увеличения числа циклов нагрузки осадка становится еще более незначительной или полностью стабилизируется.

4. Заключение

На основании исследования данной работы в целом можно сформулировать следующие основные выводы:

1. Разработан и представлен инженерный метод расчета осадки фундаментов на основе методики послойного суммирования с учетом последовательного изменения пространственного напряженно-деформированного состояния и механических характеристик глинистых грунтов при режимных блочных циклических нагружениях, что адекватно отражает их характер поведения при режимных блочных циклических нагрузках и обеспечивает надежное и одновременно экономичное проектирование фундаментов зданий и сооружений при режимных блочных циклических нагрузках;

2. При использовании предложенного метода расчета были получены соответствующие результаты, хорошо совпадают с данными лабораторных и натурных исследований. Отклонения составляют от 10 до 20%.

Список литературы / References

1. Kim G., Loreto G., Kim J.-Y., Kurtis K. E., Wall J. J., Jacobs L. J. In situ nonlinear ultrasonic technique for monitoring microcracking in concrete subjected to creep and cyclic loading // *Ultrasonics*. 2018. №88. P. 64–71. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.03.006.
2. Li Q., Liu M., Lu Z., Deng X. Creep Model of High-Strength High-Performance Concrete Under Cyclic Loading // *J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed.* 2019. №3 (34). P. 622–629. DOI: 10.1007/s11595-019-2096-9.
3. Bouziadi F., Boulekbache B., Haddi A., Hamrat M., Djelal C. Finite element modeling of creep behavior of FRP-externally strengthened reinforced concrete beams // *Eng. Struct.* 2020. №204. P. 109908. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109908.
4. Augeard E., Ferrier E., Michel L. Mechanical behavior of timber-concrete composite members under cyclic loading and creep // *Eng. Struct.* 2020. №210. P. 110289. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110289.
5. Mirsayapov I. T., Sharaf H. M. A. Experimental studies of bearing capacity and settlement of foundations on clays under regime block cyclic loading // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. №890. P. 1-10. DOI:10.1088/1757-899X/890/1/012134.
6. Mirsayapov I. T., Sharaf H. M. A. Features of clay soil deformation under triaxial block regime cyclic loading, taking into account the formation of micro and macro-cracks // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. №1928. P. 1-11. DOI:10.1088/1742-6596/1928/1/012038.
7. Mirsayapov, I., Sharaf, H.M.A. (2023). Studies of Clay Soils Under Triaxial Block Cyclic Loading // *XV International Scientific Conference. interagromash 2022.vol 574*. DOI:org/10.1007/978-3-031-21432-5_259.
8. Karim, H.H., Samuel, Z.W., Jassem, A.H.: Behaviour of soft clayey soil improved by fly ash and geogrid under cyclic loading // *Civ. Eng. J.* 6(2), 225–237 (2020). DOI: 10.28991/cej-2020-03091466.
9. Wichtmann, T., Triantafyllidis, T. Monotonic and cyclic tests on kaolin: a database for the development, calibration and verification of constitutive models for cohesive soils with focus to cyclic loading // *Acta Geotechnica* 2018. V.13(5), P. 1103–1128. DOI:10.1007/s11440-017-0588-3.
10. Wang, Y., Wan, Y., Wan, E., Zhang, X., Zhang, B., Zhong, Y. The pore pressure and deformation behavior of natural soft clay caused by long-term cyclic loads subjected to traffic loads // *Marine Georesources and Geotechnology* 2021. V.39(4). P.398–407. DOI:10.1080/1064119X.2019.1707915.
11. Егоров К.Е. Распределение напряжений и перемещений в основании конечной толщины. *Механика грунтов: Научн. тр. НИИОСП им. Н.М.Герсеванова. М.: Госстройиздат. - 1961. - №43. - С.42-63.* [Egorov K.E. Distribution of stresses and displacements in a base of finite thickness. *Soil mechanics: Scientific. tr. NIIOSP named after. N.M. Gersevanova. M.: Gosstroyizdat. - 1961. - No. 43. - P.42-63.*]
12. Ter-Martirosyan Z. G., Ter-Martirosyan A. Z., Sidorov V. V. Creep and long-term bearing capacity of a long pile in clay // *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris. 2013. P. 2882-2884.*
13. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Прогнозирование деформаций оснований фундаментов с учетом длительного нелинейного деформирования грунтов // *Научно-технический журнал «Основания, фундаменты и механика грунтов»*. 2011. №4. С. 16-23. [Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Prediction of deformations of foundations taking into account long-term nonlinear deformation of soils // *Scientific and technical journal “Foundations, foundations and soil mechanics”*. 2011. No. 4. P. 16-23.]
14. Xianzhang L. Permanent deformation characteristics of coarse-grained subgrade soils

- under train-induced repeated load // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017. № 7. P. 1-15. DOI: 10.1155/2017/6241479.
15. Guo, L., Cai, Y., Jardine, R. J., Yang, Z., Wang, J. Undrained behaviour of intact soft clay under cyclic paths that match vehicle loading conditions // *Canadian Geotechnical Journal* 2018. V.55(1). P.90–106. DOI:10.1139/cgj-2016-0636.
 16. Hirai, H. Analysis of pullout load capacity of suction caissons in clay by a three-dimensional displacement approach // *Marine Georesources and Geotechnology* 2018. V. 36(4). P.425–437. DOI:10.1080/1064119X.2017.1326070.
 17. Mirsayapov I. T., Sabirzyanov D. D. Bearing capacity of foundations base under combined alternating long-term static and cyclic loading // *IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 2018. №365. P.1-11. DOI:10.1088/1757-899X/365/4/042082
 18. Siraziev L. F. The stressed-stained state experimental researches of multilayered soilbases under the stamp center at short term tests // *Innovatsii*. 2018. № 11. P. 225–228.
 19. Grget G., Ravnjak K., Szavits-Nossan A. Analysis of results of molasses tanks settlement testing // *Japanese Geotechnical Society, Soils and Foundations*. October 2018. Vol. 58. №5. P. 1260-1271.

Информация об авторах

Мирсаяпов Илизар Талгатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: mirsayapov1@mail.ru

Шараф Хани Мохаммед Абдо, Кандидат технической наук, старший преподаватель, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: sharafhani03@gmail.com

Information about the authors

Iizar T. Mirsayapov, Doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Hani M. A. Sharaf, Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer. Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: sharafhani03@gmail.com