

Несущая способность и осадки глинистых оснований
при блочных циклических нагружениях

Илизар Талгатович Мирсаяпов, Хани Мохаммед Абдо Шараф
Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ); г. Казань, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Имеющиеся методики оценки несущей способности по деформациям оснований в основном учитывают единичные статические нагрузки небольшой длительности или циклические нагрузки с неизменными значениями на протяжении всего периода эксплуатации. Практически не изучено влияние нестационарных циклических нагрузок на поведение грунтов глинистого основания. Исследования выполнены для разработки метода расчета осадки несущей способности глинистых оснований при блочных циклических нагружениях.

Материалы и методы. Проведены экспериментальные исследования глинистых оснований в устройствах трехосного сжатия кубической и призматической формы и лотковых испытаний, а также теоретические исследования по определению осадки и несущей способности глинистых оснований при воздействии различных режимов нагружения.

Результаты. На основе существующего расчета базовой несущей способности и осадок, а также изучения поведения глинистого грунта при циклических нагрузках получено уравнение в компактной форме, которое позволяет учитывать характеристики деформации глинистого грунта, значительно снижая сложность и точность расчета. Используемая разработка методов расчета несущей способности и осадки глинистых оснований при блочных циклических нагрузках находится на достаточно высоком уровне.

Выводы. Предложен новый подход к оценке несущей способности глинистых оснований при блочных циклических нагрузках, разработан инженерный метод расчета осадок глинистых оснований. Этот метод основан на использовании метода послойного суммирования и учитывает изменение пространственного напряженно-деформированного состояния и механических свойств грунтов в процессе блочного циклического нагружения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: несущая способность глинистых грунтов, осадка, блочное циклическое нагружение, режим нагружения

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мирсаяпов И.Т., Шараф Х.М.А. Несущая способность и осадки глинистых оснований при блочных циклических нагружениях // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 5. С. 789–799. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.789-799

Автор, ответственный за переписку: Хани Мохаммед Абдо Шараф, hani_2012@mail.ru.

Bearing capacity and settlement of clay foundations
under block cyclic loading

Ilizar T. Mirsayapov, Hani Mohammed Abdo Sharaf
Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE); Kazan, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The available methods of assessment of bearing capacity by deformations of foundations mainly take into account single static loads of short duration or cyclic loads with unchanged values during the whole period of operation. The effect of cyclic loading of non-stationary regimes on the behavior of soil bases is practically not studied. In this connection, the research was carried out to develop a method for calculating the settlement of the bearing capacity of clay foundations under block cyclic loading.

Materials and methods. To achieve the purpose of this paper, experimental studies of clay foundations in triaxial compression and tray test devices, as well as theoretical studies to determine the bearing capacity and settlement of clay foundations under different loading regimes were carried out.

Results. On the basis of existing calculations of bearing capacity and settlement of foundations and the study of the behavior of clay soils under cyclic loads, the equations in compact form are obtained, which make it possible to take into account the peculiarities of deformation of clay soils significantly reducing the complexity and accuracy of the calculations. The development of methods for calculating the bearing capacity and settlement of clay foundations under block cyclic loads is at a sufficiently high level.

Conclusions. A method for calculating the bearing capacity of clay foundations under block cyclic loading is proposed and an engineering method for calculating the settlement of clay foundations is developed, based on the method of layer-by-layer summation, which takes into account the simultaneous change in the spatial stress-strain state and mechanical characteristics of soils in the process of mode block cyclic loading.

KEYWORDS: bearing capacity, clay soils, settlement, block cyclic loading, loading regime**FOR CITATION:** Mirsayapov I.T., Sharaf H.M.A. Bearing capacity and settlement of clay foundations under block cyclic loading. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(5):789-799. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.789-799 (rus.).*Corresponding author:* Hani Mohammed Abdo Sharaf, hani_2012@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Циклические нагрузки имеют практическое значение для решения многих задач инженерной геотехники. Некоторые примеры циклических нагрузок не эндогенного характера [1, 2]. Циклическая нагрузка может быть вызвана движением транспорта (скоростные поезда, поезда с магнитной левитацией), промышленными источниками (рельсы кранов, фундаменты машин), ветром и волнами (береговые и вне береговые ветрогенераторы, береговые сооружения) или повторяющимися процессами наполнения и опорожнения (шлюзы, резервуары и силосные ямы) [3–5]. Кроме того, циклические нагрузки в грунте вызывают строительные процессы (например, вибрация шпунтовых свай) и механическое уплотнение (например, виброуплотнение) [6, 7]. Циклическая нагрузка может быть обусловлена и эндогенными источниками. К примеру, землетрясения приводят к распространению сдвиговых волн в грунте, вызывающих циклическое поведение [8–10]. Основная тема инженерной геотехники — поведение грунта, связанное с фундаментом. Предельная несущая способность, связанная с фундаментом, рассматривается инженерами-геотехниками и исследователями как сложная задача. Собственный вес конструкции, а также приложенная нагрузка, включая циклическую, должны быть экономично и безопасно переданы на грунт [11–13]. Предельная несущая способность фундамента может быть определена как нагрузка, при которой происходит разрушение сдвига, связанное с грунтом под фундаментом. До настоящего времени было проведено большое количество численных и экспериментальных исследований для установления несущей способности фундаментов на глинистых грунтах [14–16]. В большинстве случаев расчеты несущей способности оснований фундаментов оценивались с помощью традиционной теории, в которой использовались коэффициенты несущей способности. Также в анализе применялась теория упругости, в которой грунт считался жестким, однородным и изотропным для упрощения инженерно-геологической практики [17–19]. Однако грунты имеют различные пласты в земле, они не являются слоистыми грунтами с различной глубиной залегания и обладают разными свойствами. Следовательно, учет воздействия режимного блочного циклического нагружения и его последствий играет важную роль в геотехнических проектах, где поведение глинистых грунтов при циклическом нагружении — главная проблема [20, 21]. Таким образом, возникает вопрос

о необходимости разработки метода расчета осадки и несущей способности глинистых оснований при режимном блочном циклическом нагружении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для определения механических свойств грунтов выполняется ряд испытаний. Известные методики связаны с работами профессора И.Т. Мирсаяпова, его учеников и др. Анализ возможностей известных устройств для циклических испытаний привел к идее разработки устройства, позволяющего определять механические свойства в зависимости от циклической нагрузки. Выбор вида нагрузки был сделан на основе анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) грунта при циклическом воздействии. Грунты в природе подвергаются многокомпонентному воздействию, причем направление главных напряжений в процессе нагружения непостоянно. Для изучения влияния режима нагружения и вида напряженного состояния на прочностные и деформационные свойства глинистых оснований проведены экспериментальные исследования в устройствах трехосного сжатия и лотковых испытаний в режиме блочного циклического нагружения [22, 23]. Экспериментальные исследования выполнены по программе, представленной на рис. 1.

Для учета влияния режимного нагружения на глинистые основания были приняты режимы нагружения, приведенные на рис. 2.

В качестве грунта для испытаний использовалась полутвердая глина. Этот материал обладает следующими характеристиками: $\rho = 1,9 \text{ г/см}^3$; $W = 23 \%$; $W_L = 38 \%$; $W_p = 21 \%$; число пластичности $J_p = 0,17$ д. ед.; $J_L = 0,117$ д. ед.; $j = 20$ град.; $C = 63 \text{ кПа}$.

Методика проведения экспериментальных исследований и процедура подготовки грунтового основания разработаны на кафедре оснований фундаментов динамики и инженерной геологии КГАСУ профессором И.Т. Мирсаяповым и его учениками [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Реакция грунтов на циклические нагрузки в значительной степени определяется механическими свойствами грунта, при этом уровень реакции на деформацию зависит от прочности и демпфирования. Более того, при высоких уровнях деформации, помимо уровня деформации, необходимо учитывать и другие параметры, такие как скорость и количество циклов, скорость и количество циклов

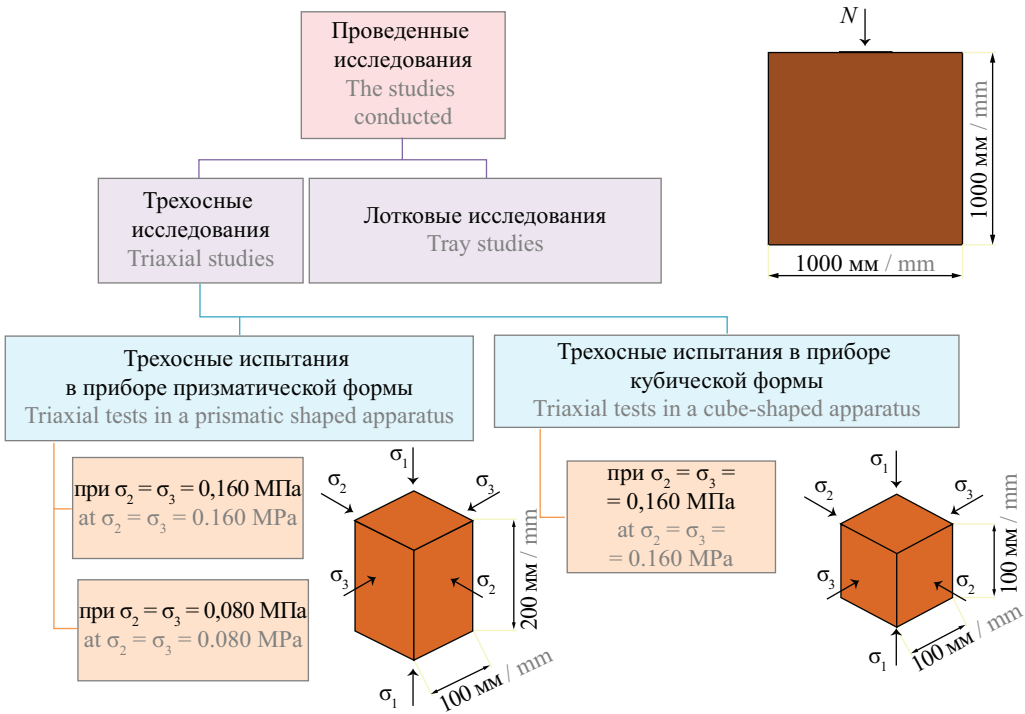


Рис. 1. Схема программы экспериментальных исследований
Fig. 1. Scheme of the experimental research programme

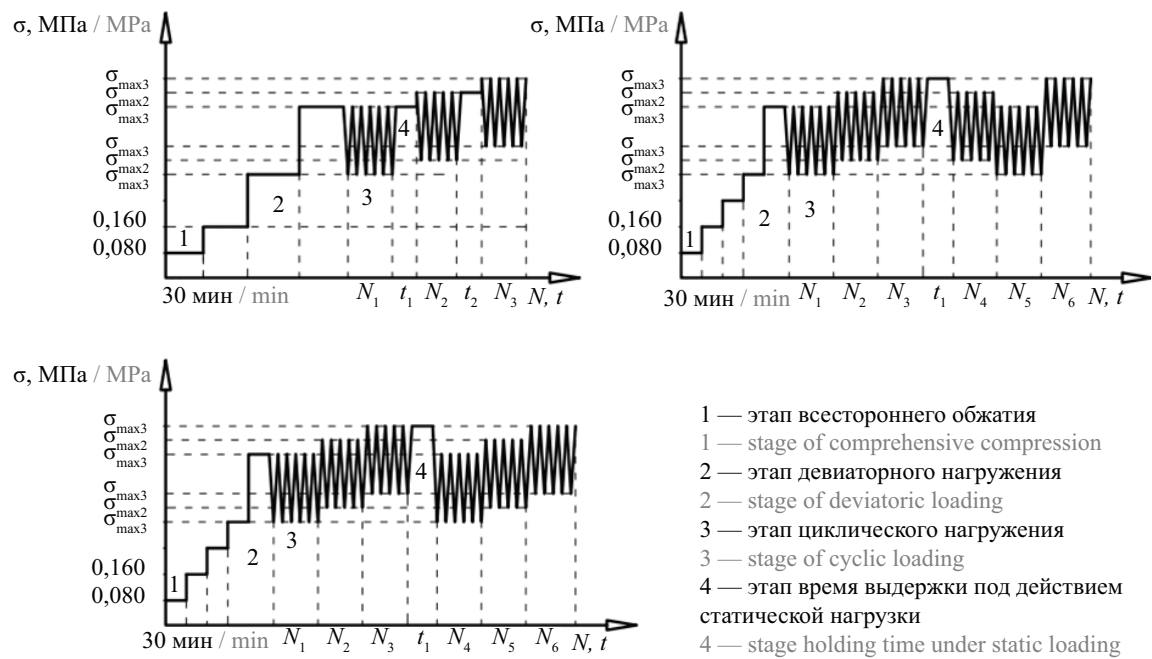


Рис. 2. Режимы нагружения: N — количество циклов; t — время выдержки
Fig. 2. Loading regimes: N — number of cycles; t — holding time

циклического нагружения; также оказывает существенное влияние на прочность грунта скорость деформации грунтов под действием циклической нагрузки (в основном для глинистых грунтов) [25].
В ходе испытаний в режиме трехосного блочно-го циклического нагружения выявлены особенности закономерности, строения и характера разрушения образцов грунтов, состоящие из следующих компо-

нентов: при увеличении и уменьшении величины нагрузки, числа циклов нагружения на протяжении выдержки образуются замкнутые зоны пирамидальной формы в верхней части образца и его боковых поверхностях (рис. 3).
Размеры этих сжатых пирамидок могут быть разными в зависимости от режима нагружения. Поскольку эти пирамидки перемещаются как твер-

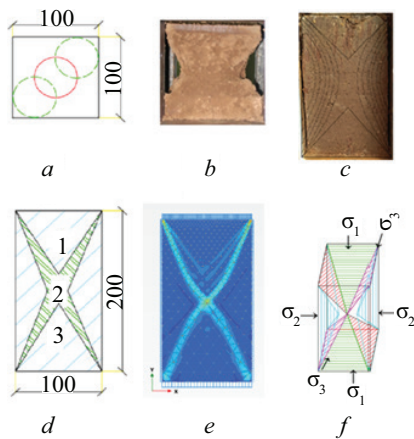


Рис. 3. Вид схемы разрушения образцов испытаний: *a, b* — схема зон разной плотности в образце при трехосном испытании; *c* — при длительно статической нагрузке кубической формы согласно И.В. Королевой [26]; *d* — при режимной блочной циклической нагрузке призматической формы; *e* — при статической нагрузке призматической формы Plaxis 20v; *f* — схема напряженного состояния призматической формы; 1 — верхняя зона упрочнения; 2 — зона разупрочнения; 3 — нижняя зона упрочнения

Fig. 3. Fracture pattern of a soil specimen after tests; *a, b* — scheme of a local zone of different density in a specimen under triaxial testing; *c* — under long-term static loading of a cubic form according to I.V. Koroleva [26]; *d* — under block-cyclic loading of a prismatic form; *e* — under static loading of a Plaxis 20v prismatic form; *f* — scheme of a stressed state of a prismatic form); 1 — upper hardening zone; 2 — unstrengthening zone; 3 — lower hardening zone

дое тело, то происходит деформация образца. При этом массивные пирамиды формируют грунт с более плотной структурой, в межпирамидных зонах происходит сдвиг и образование отрывов, что сопровождается появлением мелких трещин. Факт образования отрыва и сдвига подтвержда-

ется резким возрастанием величины деформаций и возникновением характера звука растрескивания. При исследовании влияния напряженного пространственного состояния на физические свойства грунта из характеризующей зоны после разрушения образца были отобраны пробы [27].

Полученные характерные признаки разрушения образца в наблюдаемых зонах отбора образцов грунта различных плотностей отличаются от начальных значений. Это свидетельствует о различной степени разрушения грунта в этих зонах. На 6–10 % возросла плотность грунта в зоне № 1, в зоне № 2 на 1–3 % и в зоне № 3 на 3–5 %, а также во всех трех случаях при циклическом нагружении. Согласно результатам исследований, после проведения испытаний плотность образца снизилась на 3–6 % по сравнению с первоначальной плотностью. В условиях повторяющегося циклического нагружения снижается влажность до 7 %.

При рассмотрении циклических деформаций ползучести и прочностных характеристик грунта при режимном последовательном нагружении следует учитывать влияние вертикального давления предыдущего блока σ_1 на прочностные и деформационные характеристики каждого последующего цикла (рис. 4).

Несущая способность глинистого грунта при блочном циклическом нагружении

Фундаменты являются важнейшим элементом конструкций, поскольку они надежно передают нагрузку с поверхности на подстилающую грунтовую среду, не допуская разрушения ни грунтовой среды, ни фундамента. Поэтому важно оценить несущую способность грунтового массива. Многие геотехнические исследователи проявляли интерес к теме разрушения несущей способности как в прошлом, так и в настоящее время [28]. Чрезмерная осадка

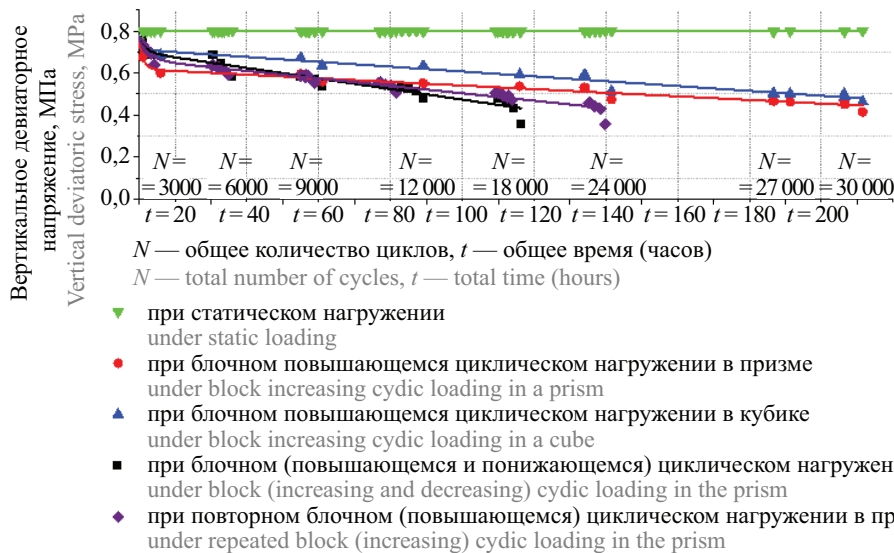


Рис. 4. Изменение предельно допустимого вертикального девиаторного давления грунта при блочном циклическом нагружении

Fig. 4. Variation of maximum allowable vertical deviatoric soil pressure under block cyclic loading

и недостаточная несущая способность — общие проблемы фундаментов на глинистых грунтах. При расчете несущей способности фундаментов необходимо учесть, что фундамент должен быть устойчивым и иметь возможность выдержать смещение или опрокидывание [29]. Характер разрушения фундамента при достижении им предельного состояния должен быть статически и кинематически возможным для данного воздействия (рис. 5).

Несущая способность фундамента считается обеспеченной в случае, если будет выполнено условие по СП 22.13330:

$$F \leq \frac{\gamma_c \cdot F_n}{\gamma_n}, \quad (1)$$

где F — расчетная нагрузка на основание; γ_c — коэффициент условий работы; F_n — сила предельного сопротивления основания; γ_n — коэффициент надежности по ответственности.

В соответствии с нормами проектирования фундаментов расчетное сопротивление грунта (несущая способность) под основанием фундамента определяется соотношением:

$$N_u = b' \cdot l' \cdot (N_y \xi_y b' \gamma_1 + N_a \xi_a \gamma_1' + N_c \xi_c C_1), \quad (2)$$

где b' и l' — ширина и длина фундамента, м; N_γ , N_q и N_c — безразмерные коэффициенты несущей способности грунта под подошвой фундамента, зависящие от угла внутреннего трения φ_i ; ξ_g , ξ_q , ξ_c — коэффициенты, зависящие от соотношения длины и ширины сечения; g_1 и γ'_1 — удельный вес грунта над и под подошвой фундамента.

Прочностные характеристики $C(N, t, \tau)$ и $\varphi(N)$ при стационарном и нестационарном циклическом нагружении определяют по формулам (3), (4), тогда значение удельного сцепления при блочном циклическом режиме нагружения представляют следующим образом:

$$C(N, t, \tau) = C_0 + \sum_{i=1}^n \Delta C_{dpl}(t, \tau) - \sum_{i=1}^n \Delta C(N, t), \quad (3)$$

где C_0 — начальное значение удельного сцепления грунта; $\Delta C_{dpl}(t, \tau)$ — изменение удельного сцепления на этапах всесторонних и девиаторных нагружений; $\Delta C(N, t)$ — изменение удельного сцепления под действием блочной циклической нагрузки.

Таким образом, уравнение удельного сцепления при циклическом нагружении блочного режима выглядит так:

$$\begin{aligned}
C(N, t, \tau) &= C_0 + \sum_{i=1}^n \Delta C_{dpl}(t, \tau) - \sum_{j=1}^m \Delta C(N, t) = \\
&= \left[\left[C_0 + \left[C_0 \cdot \sum_{i=1}^n \left(2 \cdot \left(\Delta \varepsilon_{ij}^{pl}(t, \tau) - \frac{1}{3} \Delta \varepsilon_{vi}^{pl}(t, \tau) \cdot \delta_{ij} \right) \times \right. \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \left. \times \Delta \varepsilon_{vi}^{pl}(t, \tau) \right)^{1/2} \right] \right] - \\
&\quad - \sum_{j=1}^m \left(K_{epi}^v(N, t, t_0) \cdot \Delta \varepsilon_{pli}^v(N, t, t_0) + \right. \\
&\quad \left. + K_{vpli}^v(N, t, t_0) \cdot \Delta \gamma_{pli}^v(N, t, t_0) \right) \Big],
\end{aligned}
\tag{4}$$

где $\Delta \varepsilon_{ij}^{pl}(t, \tau)$ — прирост величины тензора деформаций ползучести на соответствующих ступенях нагружения; $\Delta \varepsilon_{vi}^{pl}(t, \tau)$ — прирост величины объемных деформаций ползучести на соответствующих ступенях нагружения; δ_{ij} — дельта Кронекера; $\Delta \varepsilon_{pli}^v(N, t, t_0)$ и $\Delta \gamma_{pli}^v(N, t, t_0)$ — прирост вертикальных и сдвиговых деформаций циклической ползучести в возрастающих и убывающих блоках циклической нагрузки; $K_{spli}^v(N, t, t_0)$ и $K_{ppli}^v(N, t, t_0)$ — параметры пропорциональности отношения между $\Delta C(N, t, t_0)$ и $\Delta \varepsilon_{pli}^v(N, t, t_0)$ и $\Delta \gamma_{pli}^v(N, t, t_0)$, определенные на основе экспериментальных исследований.

При этом величина изменения угла внутреннего трения φ грунта оценивается по уравнению:

$$\varphi(N, t, \tau) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\tau_{ulgrt}(N, t) - C(N, t, \tau)}{(N, t)} \right), \quad (5)$$

где $\phi(N, t, \tau)$ и $C(N, t, \tau)$ — характеристики прочности грунта при циклической нагрузке блочного режима; $\tau_{\text{норм}}(N, t) = \sigma(N, t) \cdot \operatorname{tg} \phi(N, t, \tau) + C(N, t, \tau)$ —

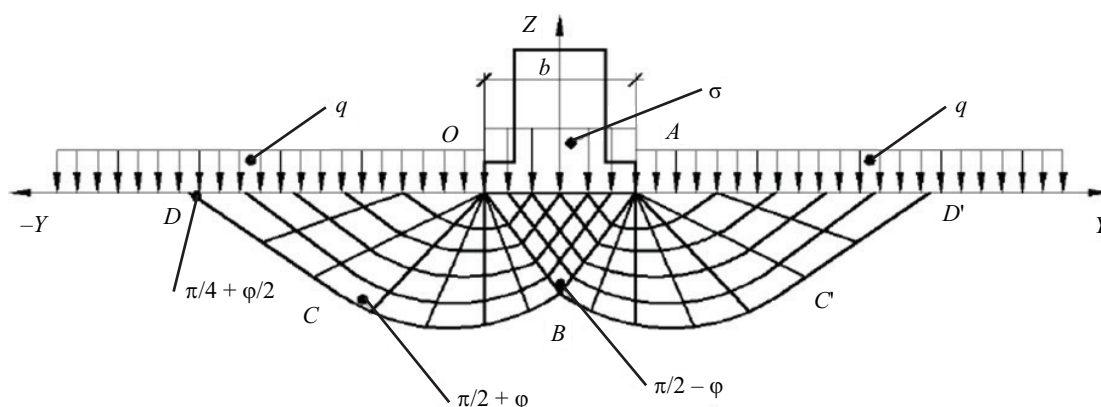


Рис. 5. Схема расчета несущей способности фундамента

Fig. 5. Scheme for calculating the bearing capacity of the foundation

условие прочности Кулона – Мора при циклическом нагружении блочного режима; $\sigma(N, t)$ — максимальное нормальное напряжение при циклической нагрузке блочного режима.

В таком случае уравнение предельной несущей способности фундамента после трансформации записывается следующим образом:

$$N_u = b' \cdot l' \cdot \left[(N_\gamma \xi_\gamma b'_\gamma \gamma'_1 + N_q \xi_q \gamma'_1 + N_c \xi_c \times \right. \\ \times \left. \left(\left[C_0 + C_0 \cdot \sum_{i=1}^n \left(2 \cdot \left(\Delta \varepsilon_{ij}^{pl}(t, \tau) - \frac{1}{3} \Delta \varepsilon_{vi}^{pl}(t, \tau) \cdot \delta_{ij} \right) \times \right. \right. \right. \right. \\ \times \left. \left. \left. \Delta \varepsilon_{vi}^{pl}(t, \tau) \right)^{1/2} \right] - \right. \\ \left. - \sum_{j=1}^m K_{epli}^v(N, t, t_0) \cdot \Delta \varepsilon_{pli}^v(N, t, t_0) + \right. \\ \left. + K_{ypli}^v(N, t, t_0) \cdot \Delta \gamma_{pli}^v(N, t, t_0) \right]. \quad (6)$$

После преобразования функция несущей способности грунта при стационарном и нестационарном циклическом нагружении принимают следующий вид:

$$N_\gamma = (N_q - 1) \cdot \left(\arctg \left(\frac{\tau_{ulgrt}(N, t) - C(N, t, \tau)}{(N, t)} \right) \right); \\ N_q = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\Phi_1}{2} \right) \cdot e^{\pi \cdot \arctg \left(\frac{\tau_{ulgrt}(N, t) - C(N, t, \tau)}{\sigma(N, t)} \right)}; \quad (7) \\ N_c = \frac{N_q - 1}{\arctg \left(\frac{\tau_{ulgrt}(N, t) - C(N, t, \tau)}{(N, t)} \right)}.$$

Осадка глинистых оснований при блочном циклическом нагружении

Общий процесс геотехнического осадконакопления состоит из трех основных компонентов, происходящих на разных стадиях: мгновенная осадка (также известная как упругая осадка); консолидационная осадка (или первичная); осадка ползучести (или вторичная). Как следует из названия, мгновенная осадка происходит сразу после приложения нагрузки к грунту. При приложении нагрузки

напряжения в грунте изменяются, частицы грунта перестраиваются, что приводит к уменьшению объема свободного пространства грунта. Консолидационная осадка появляется из-за того, что вода с течением времени постепенно вытесняется из промежутков между частицами грунта. В результате уменьшается свободное пространство грунта, разделяющее частицы грунта, и грунт смещается вниз.

После завершения фазы консолидирующей осадки начинается осадка ползучести. Эта часть осадки грунта продолжается в течение длительного времени под действием давления от внешней нагрузки — величина ползучести зависит от типа грунта и его анизотропии, а также от истории напряжений и уровня напряжений в грунте [30]. Расчетный метод основан на понятии послойного суммирования, учитывает объемное напряженное состояние грунта и механическое изменение его состояния в режимном нагружении. В результате расчетом производится осадка фундаментов при действительном режимном нагружении (рис. 6).

Воспринимается объемное напряженное состояние, при этом состояние грунта основания сжимаемой толщи разделяется на несколько слоев, в каждом слое по девиатору напряжений определяются деформации, соответствующие величине вертикального давления, а затем значения деформаций в пределах сжимаемой толщи суммируются [10, 11].

Прирост величины деформации в момент нагружения определяется по уравнению:

$$\Delta \varepsilon_{zi} = \frac{\Delta \sigma_z}{G_v} - \Delta G \cdot \frac{3k_v - G_v}{3k_v \cdot G_v}. \quad (8)$$

Прирост величины осевых деформаций при циклическом нагружении блочного режима устанавливается следующим образом:

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

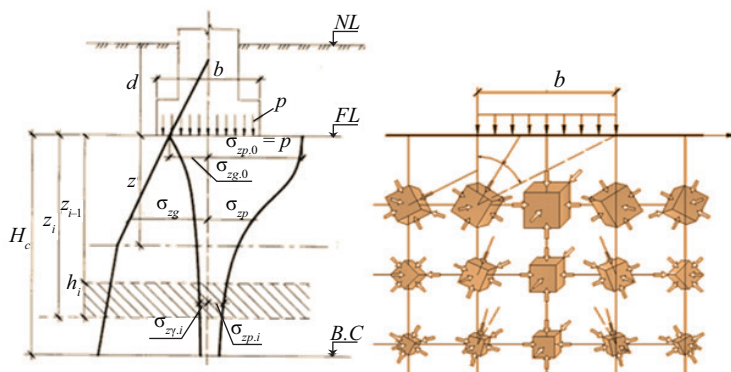


Рис. 6. Схема расчета осадки фундамента при режимном нагружении

Fig. 6. Schematic diagram for calculation of foundation settlement under mode loading

$$+ \left[\frac{f(t)}{\sigma(N, t, t_0)} \right] \times \\ \times f(t) + \left[\frac{f_{UP}(t_0)}{\sigma(N, t, t_0)} \right] \cdot f_{UP}(t_0) + \\ + \left[\frac{f_{dow}(t_0)}{\sigma(N, t, t_0)} \right] \cdot f_{dow}(t_0) \Bigg\}, \quad (9)$$

где $\sigma_i^{\max}(N, t, t_0)$ — максимальные вертикальные напряжения в блоках блочного режима нагружения; k_R — фактор, определяющий соотношение параметров ползучести грунта блочного режима нагружения; $\sigma(N, t, t_0)$ — допустимые вертикальные напряжения при режиме блочного циклического нагружения; $\rho_{\text{сис}}$ — асимметричность цикла вертикального напряжения; $f_{UP}(N), f_{dow}(N), f(t), f_{UP}(t_0), f_{dow}(t_0)$ — функции циклических деформаций ползучести грунта в повышающих и понижающих блоках режимного блочного циклического нагружения.

При этом осадка фундамента при циклическом нагружении блочного режима выявляется по уравнению:

$$S(N, t, t_0) = \sum_i^n [\Delta \varepsilon_{zi} + \varepsilon_{pli}^v(N, t, t_0)] \cdot h_i, \quad (10)$$

где n — количество слоев; ε_{zi} — прирост осевых деформаций i -го слоя в момент прикладывания нагрузки; $\varepsilon_{pli}^v(N, t, t_0)$ — прирост осевых деформаций при циклическом нагружении блочного режима; h_i — толщина i -го слоя.

С целью оценки предложенных уравнений для расчета осадки фундаментов проведены штамповые исследования глинистых фундаментов (модели плитных фундаментов в лотках размером $1,0 \times 1,0 \times 1,0$ м). На основе анализа полученных результатов испытаний за развитием осадок плиточного фундамента в лотках при циклическом нагружении блочного режима можно сделать вывод, что представленная зависимость изменения осадочной величины при режиме блочного циклического нагружения является полной аналогией результатам

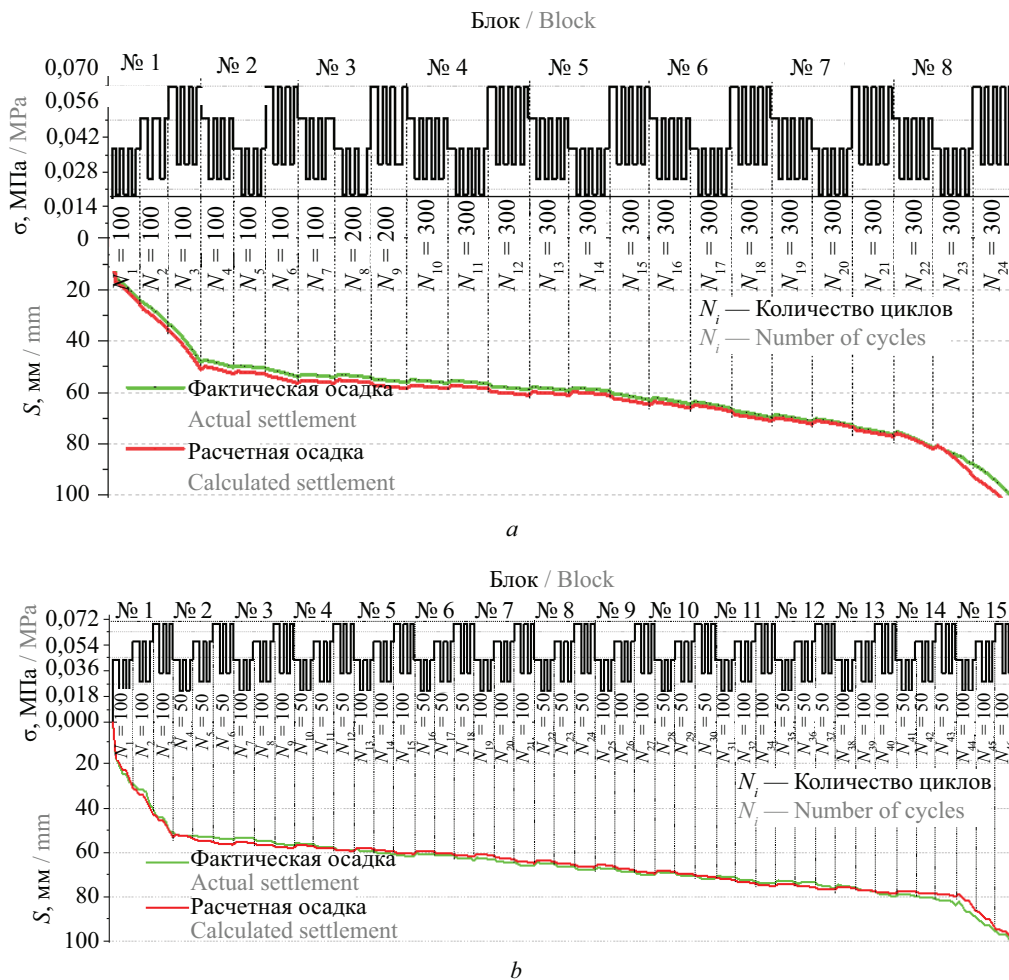


Рис. 7. Оценка осадки моделей плитных фундаментов при циклическом нагружении блочного режима в объемном лотке: *a* — при повышающемся и понижающемся блочном нагружении; *b* — при повторно повышающемся блочном нагружении
Fig. 7. Settlement estimation of slab foundation models under cyclic block regime loading in volumetric trough: *a* — under increasing and decreasing block loading; *b* — under repeatedly increasing block loading

данных исследований. Расчетные значения имеют расхождения с экспериментальными в пределах 10–20 % (рис. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- в результате анализа и обобщений были составлены уравнения предельной несущей способности глинистого основания при циклическом нагружении блочного режима, учитывающие одновременно изменение не только реологических, но и прочностных характеристик глинистых грунтов;

- разработан новый метод расчета осадки глинистого основания, в основу которого положен метод послойного суммирования, учитывающий одновременно изменение НДС и механических характеристик грунта при циклическом нагружении в условиях блочного режима;

- анализ полученных результатов расчетов по предлагаемой инженерной методике оценки несущей способности и осадки глинистых оснований при циклическом нагружении блочного режима соответствует экспериментальным данным по лоткам. При этом расчетные значения имеют расхождения с экспериментальными в пределах 10–20 %.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Augeard E., Ferrier E., Michel L. Mechanical behavior of timber-concrete composite members under cyclic loading and creep // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 210. P. 110289. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110289

2. Karim H.H., Samueel Z.W., Jassem A.H. Behaviour of soft clayey soil improved by fly ash and geogrid under cyclic loading // *Civil Engineering Journal*. 2020. Vol. 6. Issue 2. Pp. 225–237. DOI: 10.28991/cej-2020-03091466

3. 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. Vol. 39. Issue 4. Pp. 398–407. DOI: 10.1080/1064119X.2019.1707915

4. Fu Z., Wang G., Song W., Yu Y., Wei P., Wu T. Deformation behavior of saturated soft clay under cyclic loading with principal stress rotation // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Issue 19. P. 8987. DOI: 10.3390/app11198987

5. Wichtmann T., Tafili M., Staubach P., Macháček J. Soil behaviour under cyclic loading-experiments, constitutive modelling and numerical applications // 10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering. 2023. DOI: 10.53243/NUMGE2023-435

6. Shah S.A., Asif A.R., Ahmed W., Islam I., Waseem M., Janjuhah H.T. et al. Determination of dynamic properties of fine-grained soils at high cyclic strains // *Geosciences*. 2023. Vol. 13. Issue 7. P. 204. DOI: 10.3390/geosciences13070204

7. Civelekler E. Using GIS for the allowable soil bearing capacity estimation according to the Terzaghi (1943) equation in Eskişehir city center, Türkiye // *International Journal of Engineering and Geosciences*. 2023. Vol. 8. Issue 3. Pp. 310–317. DOI: 10.26833/ijeg.1212584

8. Karkush M.O., Ahmed M.D., Sheikha A.A.H., Al-Rumaihi A. Thematic maps for the variation of bearing capacity of soil using SPTs and MATLAB // *Geo-*

sciences. 2020. Vol. 10. Issue 9. P. 329. DOI: 10.3390/geosciences10090329

9. Cheng H., Zhang H., Liu Z., Wu Y. Prediction of undrained bearing capacity of skirted foundation in spatially variable soils based on convolutional neural network // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. Issue 11. P. 6624. DOI: 10.3390/app13116624

10. Adunoye G.O., Kareem S.P., Odetola H.M. Experimental investigation on the bearing capacity of selected soils in ayedaade local government Area, Osun State, Nigeria // *International Journal of Civil Engineering, Construction and Estate Management*. 2023. Vol. 11. Issue 1. Pp. 45–57. DOI: 10.37745/ijcecem.14/vol11n14557

11. Dasho D.K., Aga B.B. Comprehensive characterization of soils with analytical and numerical simulation for bearing capacity and settlement requirements of the footing // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2023. Vol. 2023. Pp. 1–15. DOI: 10.1155/2023/2290515

12. Sychkina E.N., Ofrikhter I.V., Ponomarev A.B. Bearing capacity equations of piles in weathered claystone and sandstone // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. № 5 (97). P. 9704. DOI: 10.18720/MCE.97.4. EDN GTXKVR.

13. Xia H., Zhou M., Niu F., Zhang X., Tian Y. Combined bearing capacity of bucket foundations in soft-over-stiff clay // *Applied Ocean Research*. 2022. Vol. 126. P. 103299. DOI: 10.1016/j.apor.2022.103299

14. Yang C., Zhu Z., Xiao Y. Bearing capacity of ring foundations on sand overlying clay // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. Issue 13. P. 4675. DOI: 10.3390/app10134675

15. Zhao X., Fu Z., Yang Q., Geng D., Wang Z. Study on bearing capacity performance and influence factors of phyllite soil blended with red clay // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1637. Issue 1. P. 012033. DOI: 10.1088/1742-6596/1637/1/012033

16. Benmoussa S., Benmehbarek S., Benmehbarek N. Bearing capacity factor of circular footings on two-

layered clay soils // Civil Engineering Journal. 2021. Vol. 7. Issue 5. Pp. 775–785. DOI: 10.28991/cej-2021-03091689

17. *Hataf N., Nabipour N., Sadr A.* Experimental and numerical study on the bearing capacity of encased stone columns // International Journal of Geo-Engineering. 2020. Vol. 11. Issue 1. DOI: 10.1186/s40703-020-00111-6

18. *Bhardwaj A., Sharma R.K.* Bearing capacity evaluation of shallow foundations on stabilized layered soil using ABAQUS // Studia Geotechnica et Mechanica. 2023. Vol. 45. Issue 1. Pp. 55–71. DOI: 10.2478/sgem-2022-0026

19. *He P., Newson T.* Undrained capacity of circular shallow foundations on two-layer clays under combined VHMT loading // Wind Engineering. 2023. Vol. 47. Issue 3. Pp. 579–596. DOI: 10.1177/0309524x-221142276

20. *Fadhil A., Mandeel S.A.H., Mekkiyah H.M.* Bearing capacity of square footing resting on layered soil // Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences. 2020. DOI: 10.30772/qjes.v13i4.700

21. *Samy M., Abdelfattah A., Fayed A., Sorour T., Elshawaf M.* Prediction of the settlement associated with construction on soft clay improved using rigid inclusions considering the installation effect // Engineering Research Express. 2023. Vol. 5. Issue 1. P. 015071. DOI: 10.1088/2631-8695/acc3de

22. *Мирсаяпов И.Т., Шараф Хани Х.М.* Экспериментальные исследования несущей способности и осадки оснований фундаментов глинистых грунтов при блочных режимных циклических нагружениях // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 1 (47). С. 175–182. EDN ZCTFHN.

23. *Мирсаяпов И.Т., Шараф Х.М.А.* Осадка оснований фундаментов глинистых грунтов при блочных циклических нагружениях // Известия Казан-

ского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. № 3 (65). С. 18–25. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_18. EDN BOODTM.

24. *Mirsayapov I.T.* Method of Calculating the Strength of Clay Soils Under Triaxial Regime Loading // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Pp. 150–159. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_16

25. *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. Vol. 890. P. 012134. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012134

26. *Koroleva I.* Assessment of clay soils strengthening under triaxial cyclic loading // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 274. P. 03025. DOI: 10.1051/e3sconf/202127403025

27. *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. Vol. 1928. Issue 1. P. 012038. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012038

28. *Mirsayapov I., Sharaf H.M.A.* Studies of clay soils under triaxial block cyclic loading // XV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2022”. 2023. Pp. 2378–2386. DOI: 10.1007/978-3-031-21432-5_259

29. *Mirsayapov I.T., Sharaf H.M.A.* Bearing capacity and settlement of foundations on clayey soils under regime block cyclic loading // Smart Geotechnics for Smart Societies. 2023. Pp. 1345–1350. DOI: 10.1201/9781003299127-197

30. *Al-Saidi A., Al-Juari K.H., Fattah M.Y.* Reducing settlement of soft clay using different grouting materials // Journal of the Mechanical Behavior of Materials. 2022. Vol. 31. Issue 1. Pp. 240–247. DOI: 10.1515/jmbm-2022-0033

Поступила в редакцию 16 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 17 ноября 2023 г.

Одобрена для публикации 13 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Илизар Талгатович Мирсаяпов** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой оснований фундаментов динамики сооружений и инженерной геологии, член-корреспондент РААСН; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ);** 420043, г. Казань, Зеленая, д. 1; Scopus: 54403302600, ResearcherID: K-6143-2018, ORCID: 0000-0002-6193-0928; mirsayapov1@mail.ru;

Шараф Хани Мохаммед Абдо — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры оснований фундаментов динамики сооружений и инженерной геологии; **Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ);** 420043, г. Казань, Зеленая, д. 1; SPIN-код: 4993-7539, Scopus: 57218824686, ORCID: 0000-0001-9755-965X; hani_2012@mail.ru.

Вклад авторов:

Мирсаяпов И.Т. — научное руководство, идея, доработка текста, итоговые выводы.

Шараф Х.М.А. — сбор материалов и их обработка, вычисления, написание исходного текста.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Augeard E., Ferrier E., Michel L. Mechanical behavior of timber-concrete composite members under cyclic loading and creep. *Engineering Structures*. 2020; 210:110289. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110289
2. Karim H.H., Samuel Z.W., Jassem A.H. Behaviour of soft clayey soil improved by fly ash and geogrid under cyclic loading. *Civil Engineering Journal*. 2020; 6(2):225-237. DOI: 10.28991/cej-2020-03091466
3. 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; 39(4):398-407. DOI: 10.1080/1064119X.2019.1707915
4. Fu Z., Wang G., Song W., Yu Y., Wei P., Wu T. Deformation behavior of saturated soft clay under cyclic loading with principal stress rotation. *Applied Sciences*. 2021; 11(19):8987. DOI: 10.3390/app11198987
5. Wichtmann T., Tafili M., Staubach P., Macháček J. Soil behaviour under cyclic loading-experiments, constitutive modelling and numerical applications. *10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*. 2023. DOI: 10.53243/NUMGE2023-435
6. Shah S.A., Asif A.R., Ahmed W., Islam I., Waseem M., Janjuhah H.T. et al. Determination of dynamic properties of fine-grained soils at high cyclic strains. *Geosciences*. 2023; 13(7):204. DOI: 10.3390/geosciences13070204
7. Civelekler E. Using GIS for the allowable soil bearing capacity estimation according to the Terzaghi (1943) equation in Eskişehir city center, Türkiye. *International Journal of Engineering and Geosciences*. 2023; 8(3):310-317. DOI: 10.26833/ijeg.1212584
8. Karkush M.O., Ahmed M.D., Sheikha A.A.H., Al-Rumaithi A. Thematic maps for the variation of bearing capacity of soil using SPTs and MATLAB. *Geosciences*. 2020; 10(9):329. DOI: 10.3390/geosciences10090329
9. Cheng H., Zhang H., Liu Z., Wu Y. Prediction of undrained bearing capacity of skirted foundation in spatially variable soils based on convolutional neural network. *Applied Sciences*. 2023; 13(11):6624. DOI: 10.3390/app13116624
10. Adunoye G.O., Kareem S.P., Odetola H.M. Experimental investigation on the bearing capacity of selected soils in ayedaade local government area, Osun State, Nigeria. *International Journal of Civil Engineering, Construction and Estate Management*. 2023; 11(1):45-57. DOI: 10.37745/ijcecm.14/vol11n14557
11. Dasho D.K., Aga B.B. Comprehensive characterization of soils with analytical and numerical simulation for bearing capacity and settlement requirements of the footing. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2023; 2023:1-15. DOI: 10.1155/2023/2290515
12. Sychkina E.N., Ofrikhter I.V., Ponomayrov A.B. Bearing capacity equations of piles in weathered claystone and sandstone. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 5(97):9704. DOI: 10.18720/MCE.97.4. EDN GTXKVR
13. Xia H., Zhou M., Niu F., Zhang X., Tian Y. Combined bearing capacity of bucket foundations in soft-over-stiff clay. *Applied Ocean Research*. 2022; 126:103299. DOI: 10.1016/j.apor.2022.103299
14. Yang C., Zhu Z., Xiao Y. Bearing capacity of ring foundations on sand overlying clay. *Applied Sciences*. 2020; 10(13):4675. DOI: 10.3390/app10134675
15. Zhao X., Fu Z., Yang Q., Geng D., Wang Z. Study on bearing capacity performance and influence factors of phyllite soil blended with red clay. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1637(1):012033. DOI: 10.1088/1742-6596/1637/1/012033
16. Benmoussa S., Benmebarek S., Benmebarek N. Bearing capacity factor of circular footings on two-layered clay soils. *Civil Engineering Journal*. 2021; 7(5):775-785. DOI: 10.28991/cej-2021-03091689
17. Hataf N., Nabipour N., Sadr A. Experimental and numerical study on the bearing capacity of encased stone columns. *International Journal of Geo-Engineering*. 2020; 11(1). DOI: 10.1186/s40703-020-00111-6
18. Bhardwaj A., Sharma R.K. Bearing capacity evaluation of shallow foundations on stabilized layered soil using ABAQUS. *Studia Geotechnica et Mechanica*. 2023; 45(1):55-71. DOI: 10.2478/sgem-2022-0026
19. He P., Newson T. Undrained capacity of circular shallow foundations on two-layer clays under combined VHMT loading. *Wind Engineering*. 2023; 47(3):579-596. DOI: 10.1177/0309524x221142276
20. Fadhil A., Mandeel S.A.H., Mekkiyah H.M. Bearing capacity of square footing resting on layered soil. *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences*. 2020. DOI: 10.30772/qjes.v13i4.700
21. Samy M., Abdelfattah A., Fayed A., Sorour T., Elshawaf M. Prediction of the settlement associated with construction on soft clay improved using rigid inclusions considering the installation effect. *Engineering Research Express*. 2023; 5(1):015071. DOI: 10.1088/2631-8695/acc3de
22. Mirsayapov I.T., Sharaf H.M. Experimental studies of bearing capacity and settlement of foundations of clay soils under block regime cyclic loading. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2019; 1(47):175-182. EDN ZCTFHN. (rus.).
23. Mirsayapov I.T., Sharaf H.M. Settlement of clay soils foundations under block cyclic loading. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2023; 3(65):18-25. DOI: 10.52409/20731523_2023_3_18. EDN BOODTM. (rus.).

24. Mirsayapov I.T. Method of calculating the strength of clay soils under triaxial regime loading. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021; 150-159. DOI: 10.1007/978-3-030-80103-8_16

25. 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; 890:012134. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012134

26. Koroleva I. Assessment of clay soils strengthening under triaxial cyclic loading. *E3S Web of Conferences*. 2021; 274:03025. DOI: 10.1051/e3sconf/202127403025

27. 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(1):012038. DOI: 10.1088/1742-6596/1928/1/012038

28. Mirsayapov I., Sharaf H.M.A. Studies of clay soils under triaxial block cyclic loading. *XV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2022"*. 2023; 2378-2386. DOI: 10.1007/978-3-031-21432-5_259

29. Mirsayapov I.T., Sharaf H.M.A. Bearing capacity and settlement of foundations on clayey soils under regime block cyclic loading. *Smart Geotechnics for Smart Societies*. 2023; 1345-1350. DOI: 10.1201/9781003299127-197

30. Al-Saidi A., Al-Juari K.H., Fattah M.Y. Reducing settlement of soft clay using different grouting materials. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2022; 31(1):240-247. DOI: 10.1515/jmbm-2022-0033

Received October 16, 2023.

Adopted in revised form on November 17, 2023.

Approved for publication on December 13, 2023.

B I O N O T E S: **Ilizar T. Mirsayapov** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Foundations of Structural Dynamics and Engineering Geology, Corresponding Member of RAASN; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; Scopus: 54403302600, ResearcherID: K-6143-2018, ORCID: 0000-0002-6193-0928; mirsayapov1@mail.ru;

Sharaf Hani Mohammed Abdo — Candidate of Technical Sciences, senior lecturer of the Department of Foundations of Structural Dynamics and Engineering Geology; **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**; 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation; SPIN-code: 4993-7539, Scopus: 57218824686, ORCID: 0000-0001-9755-965X; hani_2012@mail.ru.

Contribution of the authors:

Ilizar T. Mirsayapov — scientific guidance of the idea, finalization of the text, final conclusions.

Sharaf Hani Mohammed Abdo — collection of materials and their processing, calculations, writing the original text.

The authors declare no conflict of interest.