

УДК: 624.152
DOI: 10.52409/20731523_2023_4_53
EDN: EPCSQR



Исследование влияния фактора времени на прочность глин

И.В. Королева¹

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

Аннотация. *Постановка задачи.* При проектировании оснований фундаментов возникает вопрос о механических характеристиках грунтов, используемых в расчетах по предельным состояниям, особенно, если в качестве внешнего воздействия рассматривается циклическое нагружение. При этом не учитывается фактор «время», что сооружение возводится и эксплуатируется длительный период. Одним из путей решения данного вопроса может быть изучение изменения свойств грунтов во времени. Основной целью данного исследования является выявление особенностей изменения прочности образцов глинистого грунта в условиях трехосного циклического нагружения при разных значениях времени выдержки в эксикаторе до и в процессе нагружения. Задачи исследования – выявление графических зависимостей и закономерностей изменения прочности грунта во времени и обоснование полученных результатов.

Результаты. Экспериментальные исследования выполнены на образцах цилиндрической формы, изготовленных из грунта нарушенной структуры. Основными результатами выполненных исследований являются новые данные об изменении прочности образцов в условиях трехосного нагружения зависимости от режима нагружения с учетом времени «выдержки до испытания» и «отдыха в процессе испытания». Выполнен анализ результатов исследований и установлены некоторые закономерности поведения глинистых грунтов при режимных трехосных нагружениях.

Выводы. Установление влияния времени на изменение значений предельных вертикальных напряжений в образце глинистого грунта нарушенной структуры в условиях трехосного сжатия является важной задачей для строительной отрасли.

Ключевые слова: глинистый грунт, двухступенчатое нагружение, время, упрочнение, трехосное сжатие

Для цитирования: Королева И.В. Исследование влияния фактора времени на прочность глин // Известия КГАСУ, 2023, № 4(66), с. 53-60, DOI: 10.52409/20731523_2023_4_53, EDN: EPCSQR

Study of the time factor influence on the strength of clays

I.V. Koroleva¹

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

Abstract: *Problem statement.* When designing foundation base, the question arises about the mechanical characteristics of soils used in limit state calculations, especially if cyclic loading is considered as an external influence. At the same time, the “time” factor is not taken into account, that the structure is being built and operated for a long period. One of the ways to solve this issue can be to study the change in soil properties over time. The main purpose of this study is to identify the features of the change in the strength of clay soil samples under conditions of triaxial cyclic loading at different values of the exposure time in the desiccator before and

during loading. The objectives of the study are to identify graphical dependencies and patterns of changes in soil strength over time and substantiate the results obtained.

Results. Experimental studies were carried out on cylindrical samples made from soil of a disturbed structure. The main results of the studies performed are new data on the change in the strength of samples under triaxial loading depending on the loading mode, taking into account the time of "hold before testing" and "rest during testing". The analysis of the research results is carried out and some regularities of the behavior of clay soils under regime triaxial loading are established.

Conclusions. Establishing the influence of time on the change in the values of limiting vertical stresses in a sample of clay soil of a disturbed structure under conditions of triaxial compression is an important task in the construction industry.

Keywords: clay soil, two-stage loading, time, hardening, triaxial compression

For citation: Koroleva I.V. Study of the time factor influence on the strength of clays // News KSUAE, 2023, № 4(66), p. 53-60, DOI: 10.52409/20731523_2023_4_53, EDN: EPCSQR

1. Введение

Грунты являются одним из важнейших элементов системы «основание – фундаменты – надземная часть здания», при этом это единственная составляющая с природными (не заданными человеком) свойствами [1]. Особенно остро этот вопрос встает для случаев, когда основание сложено глинистыми грунтами [2-3], даже в дорожном строительстве [4-6]. Модули деформации и прочность грунтов значительно меньше, чем у бетона и арматуры, при этом вся нагрузка через фундамент воспринимается грунтовыми основаниями [7-8], особенно этот вопрос становится главным при проектировании глубоких фундаментов [9-11] и вертикальных ограждений котлованов [12-14].

Расчетные модели грунтовых оснований существенно усложняются и требуют новых исследований прочностных и деформационных параметров грунта [15-17]. На сегодняшний день имеется ряд исследований изменения прочности грунта при режимных нагружениях [18-20]. Установлено, что прочностные параметры грунта существенно зависят от генезиса [21-22], не являются постоянными величинами и изменяются в процессе внешних воздействий [20, 23]. Свойства глинистых грунтов определяются в основном глинистой фракцией и в значительной степени зависят от микроструктуры, в том числе от количества и прочности межчастичных связей [11, 17]. Механические и физические свойства грунтов важны как исходные данные при проектировании оснований и фундаментов. Однако, поведение глинистых грунтов при режимном циклическом нагружении с учетом фактора «время» практически не изучено. В связи с выше изложенным, целью данного исследования является выявление особенностей изменения прочности образцов глинистого грунта в условиях трехосного циклического нагружения при разных значениях времени выдержки в эксикаторе до и в процессе нагружения. Задачи исследования: 1) выявление графических зависимостей и закономерностей изменения прочности грунта во времени; 2) научное обоснование полученных результатов.

2. Материалы и методы

Для изучения влияния времени выдержки без нагрузки на прочность были проведены серии испытаний образцов грунтов нарушенной структуры в приборе трехосного сжатия – стабилометре с поддержкой автоматической испытательной и вычислительной системы «АСИС». Все параметры лабораторных работ принимались по действующей нормативной методике для схемы неконсолидированно-недренированных испытаний.

Исследуемый образец изготовлен из глинистого грунта нарушенной структуры, что позволяет минимизировать количество дефектов в структуре, с заданными физико-механическими параметрами (на момент изготовления образца), приведенными в таблице 1.

Программа испытаний включала в себя три основных нагружения (рис.1).

Нагружение 1 (рис. 1а). После изготовления образец грунта цилиндрической формы устанавливался в прибор трехосного сжатия, подвергался всестороннему обжатию ($\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=100\text{кПа}$), а затем в результате статического ступенчатого нагружения разрушался по схеме «раздавливание». Это значение вертикальной нагрузки было принято за эталонную прочность.

Нагружение 2 (рис. 1б). После изготовления образец грунта цилиндрической формы устанавливался в прибор трехосного сжатия, подвергался всестороннему обжатию ($\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=100\text{кПа}$), а затем к образцу прикладывалась вертикальная нагрузка соответствующая 65% от разрушающей величины, установленной при нагружении 1, и начинался этап циклического нагружения в течение 50 циклов. Если образец выдерживал этот этап нагружения, то он разрушался по схеме «раздавливание» в результате статического ступенчатого нагружения.

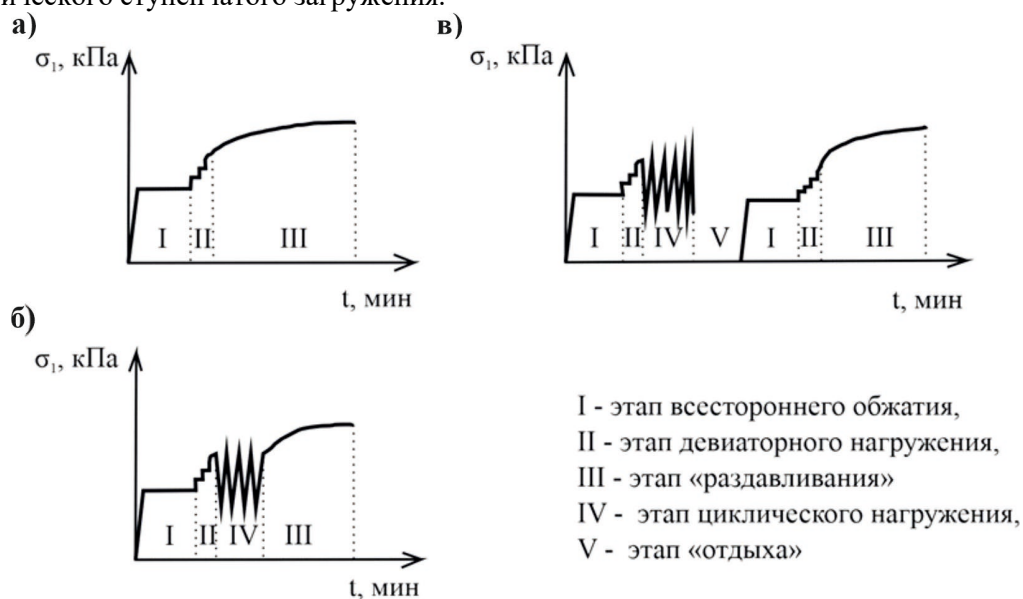


Рис. 1. Программа испытаний

а – нагружение 1, б – нагружение 2, в – нагружение 3 (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Test program

a – loading 1, b – loading 2, c – loading 3 (illustration by the authors)

Таблица 1

Физико-механические характеристики грунтов (до начала испытания)

| Наименование показателей | Обозначение | Ед.измерения | Значение |
|-----------------------------------|----------------|-------------------|----------|
| Удельный вес | γ | кН/м ³ | 19,4 |
| Удельный вес скелета | γ_s | кН/м ³ | 27,3 |
| Влажность | W | % | 23 |
| Влажность на границе текучести | W _L | % | 40,1 |
| Влажность на границе раскатывания | W _P | % | 22,8 |
| Число пластичности | I _P | - | 17,3 |
| Удельное сцепление | c | кПа | 67,467 |
| Угол внутреннего трения | φ | Град. | 20,60 |

Нагружение 3 (рис. 1в). После изготовления образец грунта цилиндрической формы устанавливался в прибор трехосного сжатия, подвергался всестороннему обжатию, а затем к образцу прикладывалась вертикальная нагрузка соответствующая значению, принятому при схеме нагружения 2, и начинался этап циклического нагружения в течение 50 циклов. Затем образец разгружался и помещался в герметичный эксикатор на «отдых» в течение одних суток. После он снова помещался в стабилометр и разрушался по схеме «раздавливание». Было выполнено две серии испытаний с различным значением величины бокового обжатия $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=100\text{кПа}$ и $\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3=200\text{кПа}$ с целью получения прочности образцов грунта в интегральном объеме.

Для оценки скорости восстановления структурных связей в грунте нарушенной структуры часть образцов до начала испытаний по схемам нагружения 2 и 3 помещалась в эксикатор на заданный интервал времени от 1 суток до 5 суток.

Таким образом, разработанная программа исследований позволила исследовать влияние фактора «время» на прочность образцов глинистого грунта.

3. Результаты и обсуждение

По результатам испытаний в ПК АСИС были автоматически построены графики изменения вертикальных деформаций в зависимости от величины вертикальных напряжений (рис. 2).

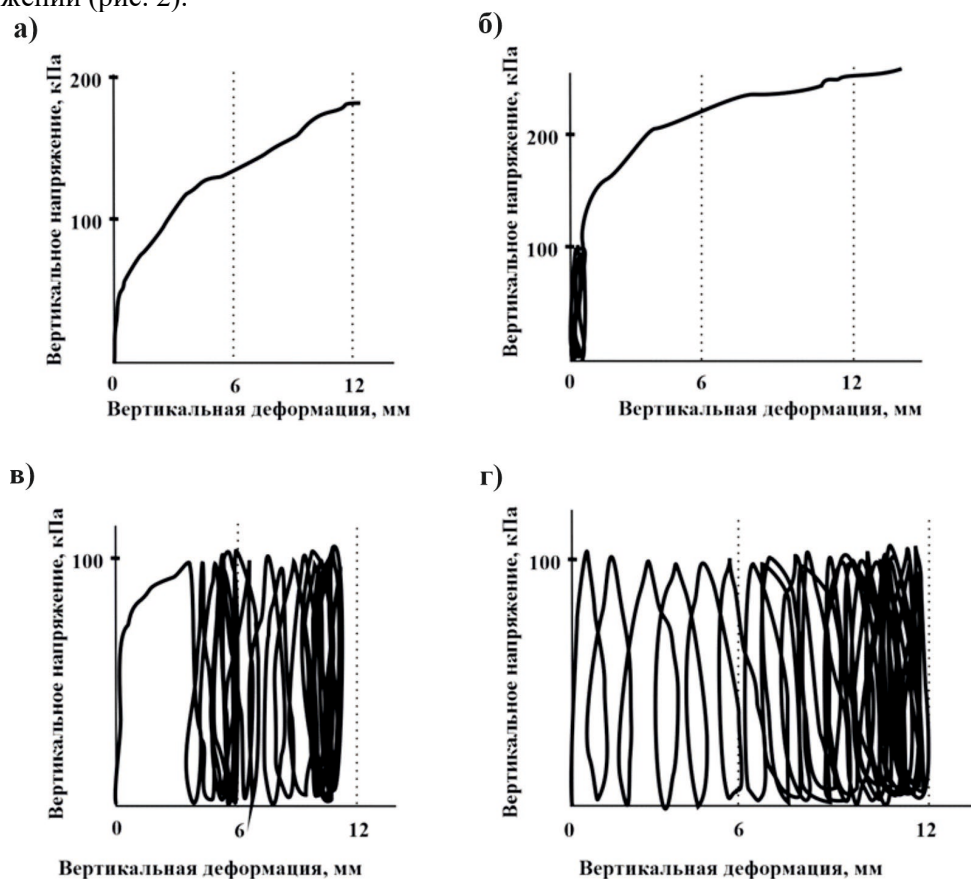


Рис. 2. Графики изменения вертикальных деформаций в процессе трехосного нагружения а – нагружение 1, б – нагружение 2 (выдержка в эксикаторе до начала нагружения в течение 1 суток), в – этап приложения циклической нагрузки (нагружение 3, выдержка в эксикаторе до начала нагружения в течение 0 суток), г – этап приложения циклической нагрузки (нагружение 3, выдержка в эксикаторе до начала нагружения в течение 1 суток) (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Graphs of changes in vertical deformations during triaxial loading а – loading 1, b – loading 2 (exposure in a desiccator before loading for 1 day), c – stage of applying a cyclic load (loading 3, holding in a desiccator before loading for 0 days), d – stage of application of cyclic load (loading 3, holding in a desiccator before loading for 1 day) (illustration by the authors)

График на рисунке 2а показывает развитие вертикальных деформаций при статическом девиаторном нагружении, принятом за эталонную прочность. Установлено, что до $\sigma_1=50\text{кПа}$ вертикальные деформации образца практически не увеличивались, затем

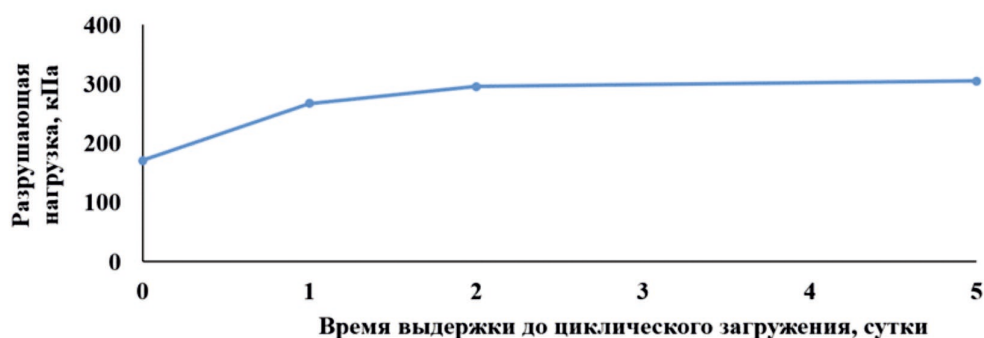
деформации накапливались и привели к разрушению образца. Выдержка эксикаторе в течение 1 суток и приложение нагружения 2 (рис. 2б) привели к увеличению прочности образца почти на 50% по сравнению с «эталонным значением», при этом скорость накопления деформаций на этапе девиаторного нагружения существенно снизилась.

Анализируя графики (рис. 2), можно выделить особенность развития деформаций при циклическом нагружении в образце без выдержки в эксикаторе до начала испытания (рис. 2в) при нагружении 3. В процессе деформирования образца наблюдается на первых циклах нагружения доуплотнение образца, затем шаг между петлями гистерезиса увеличивается и проявляется разуплотнение образца, но на завершающих циклах нагружения шаг между петлями уменьшается и образец снова уплотняется. В других образцах (рис. 2г), имеющих выдержку в эксикаторе в течение 1 суток и более до начала нагружения, указанная особенность не проявляется, так как за время до начала испытания происходит частичное восстановление структурных связей.

Получены графические зависимости влияния фактора «время» на прочность глинистых образцов нарушенной структуры в условиях трехосного сжатия (рис. 3).

При нагружении 2 (рис. 3а) установлено увеличение прочности образца при увеличении времени выдержки образца в эксикаторе до начала испытания, однако, следует отметить, что в течение первых суток прочность образца увеличилась на 51%, а за вторые сутки образец упрочнился на 73% от начального значения, полученного при испытании первого образца без выдержки (0 суток) по схеме нагружение 2. Дальнейшее увеличение времени выдержки существенно не повлияло на упрочнение грунта, так, за 5 суток выдержки образца в эксикаторе прочность увеличилась всего на 5% по сравнению с двухсуточной выдержкой. Следовательно, без влияния внешних факторов, максимальная скорость восстановления связей в данном грунте нарушенной структуры наблюдается в первые 48 часов после изготовления образца. Этот эффект объясняется наличием некоторого ограниченного объема «свободной» воды в образце и ее активном участии в восстановлении водно-коллоидных связей между частицами грунта, так как они являются причиной упрочнения.

а)



б)

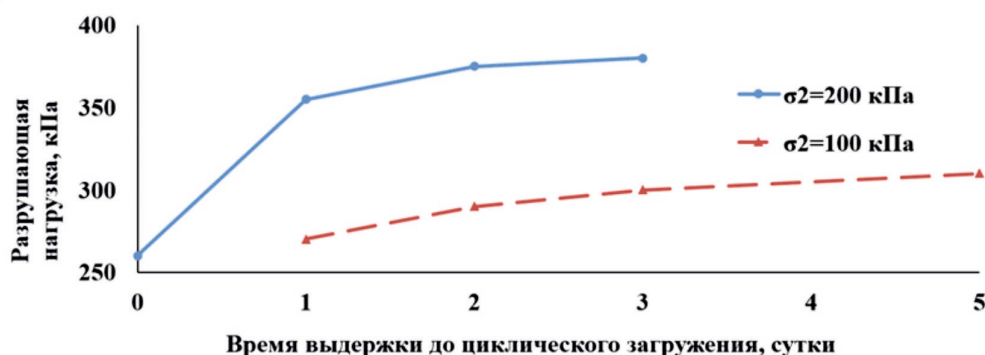


Рис. 3. Изменение прочности образца в зависимости от фактора «время»
а – нагружение 2, б – нагружение 3 (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Change in the strength of the sample depending on the factor "time"
a – loading 2, b – loading 3 (illustration by the authors)

Аналогичный характер зависимости величины упрочнения образцов нарушенной структуры от времени выдержки в эксикаторе до начала загрузки (рис. 3б) был отмечен в нагружении 3 при боковом давлении 100 кПа. Однако, отдых образцов между этапами циклического и статического нагружения в течение 24 часов в этой схеме не привел к существенному увеличению прочности. Возможно, это объясняется малой влажностью грунта, так как большая часть «свободной» воды была израсходована в процессе восстановления связей после изготовления, а освободившейся из пор в процессе циклического нагружения воды оказалось недостаточно для залечивания всех дефектов и повреждений, возникших в процессе приложения циклической нагрузки.

Увеличение бокового давления до 200 кПа (рис. 3б) привело к значительному увеличению прочности грунта по сравнению с $\sigma_2 = \sigma_3 = 100$ кПа. Фактор времени также оказал влияние на процессы упрочнения. За первые сутки выдержки в эксикаторе до циклического нагружения прочность образца после испытания увеличилась на 36%, за вторые – на 44% по сравнению с образцом без выдержки, однако, дальнейшее увеличение времени привело к незначительному упрочнению на 2%.

Анализ изменения прочностных параметров грунта в интегральном объеме, полученных с помощью построения кругов предельных напряжений, показал, что с увеличением времени выдержки образца нарушенной структуры в эксикаторе до начала испытаний в течение трех суток произошло увеличение удельного сцепления грунта до 10%.

Рассматривая выявленные особенности, можно заключить, что циклическое девиаторное нагружение сопровождается возникновением и развитием множества поверхностей сдвига и разрывов сплошности грунта образца, положение которых меняется в процессе увеличения количества циклов, и следовательно, отрицательная дилатансия (разрыхление) глинистого грунта при циклическом трехосном сжатии локализуется в пределах потенциально возможных площадок предельного равновесия [10, 20].

Учитывая, что независимо от степени начальной неоднородности напряженно-деформированного состояния элементарного объема грунта разрушение всегда происходит в пространстве главных напряжений, совмещая пространство главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и пространство главных деформаций $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ и сохраняя принцип коаксиальности тензоров напряжений и скоростей деформаций [10, 20], примем, что закон сухого трения Кулона связывает проекции сил, действующих на площадках предельного равновесия на нормаль к площадке скольжения и на нее саму. Тогда условие течения при трехосном нагружении запишется в виде:

$$|t| = S \cdot \operatorname{tg} \varphi(t, t_1, N, \tau) + c_0(t, t_1, N, \tau), \quad (1)$$

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

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

$\varphi(t, t_1, N, \tau)$ – переменный во времени угол внутреннего трения;

$c_0(t, t_1, \tau)$ – переменное во времени удельное сцепление;

l, m, n – направляющие косинусы нормали к площадке предельного равновесия;

l', m', n' – направляющие косинусы нормали к площадке скольжения.

Опираясь на результаты исследований, можно заключить, что в зависимости от величины и продолжительности действия нагрузки в многофазном глинистом грунте происходят два взаимно компенсирующих явления – упрочнение, обусловленное залечиванием дефектов и более плотной перекомпоновкой частиц, и разупрочнение, вызванное переориентацией частиц, а также образованием и развитием микро и макротрещин. Этап отдыха способствует «залечиванию» имеющихся дефектов и повреждений при достаточном количестве свободной воды в образце. В случае недостатка влаги, накопленные дефекты объединяются в плоскость сдвига и происходит разрушение образца [17, 20].

4. Заключение

1. Механические и физические свойства грунтов важны как параметры при проектировании грунтов и фундаментов, при этом они не являются постоянной величиной и изменяются в процессе нагружения.

2. Проведены экспериментальные исследования изменений прочностных параметров глинистого грунта при циклическом трехосном сжатии с фактора «время». Установлено, что процессы упрочнения грунта нарушенной структуры зависят от времени выдержки образцов после изготовления до начала нагружения, а также от времени «отдыха» между блоками нагружения и величины всестороннего обжатия. Упрочнение грунта проявляется в увеличении разрушающей нагрузки и в увеличении удельного сцепления грунта в интегральном объеме образца на 10%.

3. Влажность грунта и объем глинистых частиц в образце также влияют на скорость упрочнения.

Список литературы / References

1. Mohamad N.O., Razali C.E., Hadi A.A.A., Som P.P. Challenges in Construction over Soft Soil - Case Studies in Malaysia // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. № 1 (136).
2. Ural N. The Importance of Clay in Geotechnical Engineering // InTech, 2018. P. 83–102.
3. Guan-lin, Y., Bin, Y. Investigation of the overconsolidation and structural behavior of Shanghai clays by element testing and constitutive modeling // Shanghai, China, Tongji University. 2016. 1(1). P. 62–77. DOI: 10.1016/j.undsp.2016.08.001.
4. Sadono K.W. et al. Analisis Geologi Teknik Pada Kegagalan Bendung Cipamingkis, Bogor, Provinsi Jawa Barat // Seminar Nasional Kebumihan. 2017. № September (10). P. 190–201.
5. Sobhan, K. Challenges due to problematic soils: a case study at the crossroads of geotechnology and sustainable pavement solutions. Innov. Infrastruct. Solut. 2017. 2, 40. <https://doi.org/10.1007/s41062-017-0070-y>.
6. Uge B. U. Performance, Problems and Remedial Measures for Roads Constructed on Expansive Soil in Ethiopia – A Review // Civil and Environmental Research. 2017. № 5 (9). P. 28–37.
7. Zhi Yong Ai, Ye Cheng Dai, Yi Chong Cheng. Time-dependent analysis of axially loaded piles in transversely isotropic saturated viscoelastic soils // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2019. 101. P. 173–187. DOI: 10.1016/j.enganabound.2019.01.004.
8. Mirsayapov I.T., Aysin N.N. Influence of a deep construction pit on a technical condition of surrounding buildings // Proceedings of the Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations In: Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations, 6–8 February. – St.-Petersburg, Russia, 2019. P. 197–201.
9. Song D., Chen Z., Dong L. Monitoring analysis of influence of extra-large complex deep foundation pit on adjacent environment: a case study of Zhengzhou City, China // Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2020. Vol. 11, no. 1. P. 2036–2057.
10. Mirsayapov, I.T., Koroleva, I.V. Prediction of deformations of foundation beds with a consideration of long-term nonlinear soil deformation // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2011. Vol. 48. P. 148–157. <https://doi.org/10.1007/s11204-011-9142-8>.
11. Yang, H.Z., Wang, L.A. & Zhao, J.C. Analysis of the Effects of Rheology on the Band Structures of Periodic Pile Barriers in Cohesive Soils // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2023. Vol. 60. P. 7–14. <https://doi.org/10.1007/s11204-023-09857-4>.
12. Mirsayapov I., Khasanov R., Safin D. Ensuring the stability of the deep pit enclosure and foundation bases in the conditions of reconstruction of the architectural monument in the city of Kazan. E3S Web of Conferences. 2021, vol. 274, no. 5, article 03022. DOI: 10.1051/e3sconf/202127403022.

13. Деменков П. А., Комолов В. В. Исследование влияния строительства глубоких котлованов на оседания массива в плоской и пространственной постановке // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 6. С. 97–110. DOI:10.25018/0236_1493_2023_6_0_97 [Demenkov P. A., Komolov V. V. Investigation of the influence of the construction of deep pits on the subsidence of the massif in a flat and spatial formulation // Mining information and analytical bulletin. 2023. № 6. P. 97–110. DOI:10.25018/0236_1493_2023_6_0_97].
14. Ding Z., Jin J., Han T.-C. Analysis of the zoning excavation monitoring data of a narrow and deep foundation pit in a soft soil area // Journal of Geophysics and Engineering. 2018. Vol. 15, no. 4. P. 1231–1241.
15. Fengxi Zhou, Yanping Shao, Musa Abdallah Ibrahim Ahmed. An Elastoplastic Constitutive Model for Unsaturated Soils Using the Suction Stress Variable // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2022. Vol.59. P. 23–31.
16. Subramaniam P, Banerjee S. Factors affecting shear modulus degradation of cement treated clay // Soil Dyn Earthq Eng. 2014. Vol. 65. P. 181–188.
17. Zaretskii, Yu. K. 2002. Two Failure Mechanism and a Unified strength Condition for Geomaterials // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2002. Vol. 39(6). P. 193–201.
18. Mirsayapov, I., Sharaf, H.M.A. Studies of Clay Soils Under Triaxial Block Cyclic Loading // Lecture Notes in Networks and Systems. 2023. 574 LNNS. P. 2378–2386.
19. Mirsayapov, I., Aysin, N. Clay Soil Deformations Under Regime Long-Term Triaxial Compression Taking into Account Initial Defects // Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. V. 291. P. 99–108.
20. Mirsayapov, I.T., Koroleva, I.V. Strength and Deformability of Clay Soil Under Different Triaxial Load Regimes that Consider Crack Formation // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2016. Vol. 53. P. 5–11. <https://doi.org/10.1007/s11204-016-9356-x>.
21. Vucetic M, Dobry R. Effect of soil plasticity on cyclic response // J Geotech Eng. 1991. Vol. 117(1). P. 89–107.
22. Lunev A.A., Katsarskii R.S. Influence of Water Content and Degree of Compaction on the Mechanical Properties of Soils of Various Geneses // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2022. Vol.59. P. 417–421.
23. Mirsayapov, I.T., Koroleva, I.V. Water Migration Influence on Changes of Physical and Mechanical Characteristics a Clay Soil Under Triaxial Loading // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 125. P. 244–250.

Информация об авторах

Ирина Владимировна Королева, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: ofdsiig.koroleva@bk.ru

Information about the authors

Irina V. Koroleva, Candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: ofdsiig.koroleva@bk.ru