



УДК 624.131.439

Мирсаяпов Илизар Талгатович

доктор технических наук, профессор

Email: mirsayapov1@mail.ru

Айсин Нияз Наилович

аспирант

Email: zarejay@gmail.com

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

Исследования деформаций глинистых грунтов при режимном длительном трехосном сжатии с учетом начальных дефектов

Аннотация

Постановка задачи. Устройство глубоких котлованов приводит к изменению напряженно-деформированного состояния грунтового массива в пределах радиуса зоны влияния. Это вызвано разгрузкой основания при выемке грунта, горизонтальным перемещением стенок котлована, технологическими факторами. При попадании в зону существующей застройки возникает необходимость в оценке и геотехническом прогнозе поведения грунтов основания существующих зданий и сооружений. При этом необходимо учитывать имеющиеся и вновь возникшие дефекты и повреждения грунтов. Цель исследования – на основании лабораторных исследований определить зависимости основных деформационных характеристик глинистого грунта с имеющимися дефектами, для этого необходимо: провести экспериментальное исследование при трехосном сжатии образцов глины с трещинами и без трещин; установить особенности развития трещин в структуре образца глины; установить особенности развития деформаций глинистого грунта с трещинами при трехосном сжатии.

Результаты. Основанные результаты исследования состоят в том, что были получены новые данные о влиянии дефектов в грунтовых образцах на графики деформирования глинистого грунта. На основании результатов исследований построены зависимости основных деформационных характеристик глинистого грунта.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в том, что они позволяют более точно оценивать осадки оснований фундаментов при устройстве вблизи существующих зданий глубоких котлованов

Ключевые слова: глинистый грунт, деформации, микротрещины, макротрещины, несущая способность, реология грунтов.

Для цитирования: Мирсаяпов Илизар Т., Айсин Н. Н. Исследования деформаций глинистых грунтов при режимном длительном трехосном сжатии с учетом начальных дефектов // Известия КГАСУ. 2021. №4 (58). С 5-14. DOI: 10.52409/20731523_2021_4_5.

1. Введение

Процесс разрушения и развития нелинейных деформаций глинистого грунта при трехосном сжатии сопровождается образованием и развитием микро- и макротрещин в плоскостях предельного равновесия. Микро- и макротрещины в структуре грунта влияют на деформации и прочность грунта при длительном нагружении.

Libin Gong и др. [1] изучили моделирование скального грунта, трещины которых заполнены более слабым видом грунта, в которых степень водонасыщения заполнителя в значительной степени влияет на общее поведение соединения при сдвиге и на стабильность грунта. Впервые с использованием численного программного обеспечения Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC) была проведена серия испытаний на прямой сдвиг с постоянным содержанием воды на ненасыщенном заполненном стыковом грунте с использованием численного программного обеспечения. Начальное водонасыщение заполнителя и другие факторы, включая скорость сдвига, шероховатость соединения, толщину заполнения и нормальное напряжение, показали влияние на прочность соединения на сдвиг в соответствии с литературным обзором.

Emil Soból и др. [2, 3] исследовали 15 различных варшавских глин. Собранные данные позволили авторам создавать эмпирические модели, описывающие характеристики жесткости с высокой достоверностью. Комбинированные эмпирические модели позволяют оценить значение модуля сдвига связного грунта в широком диапазоне деформаций сдвига с высокой точностью. В результате исследования было установлено, что максимальный модуль сдвига увеличивается с увеличением среднего эффективного напряжения. Число пластичности оказал незначительное влияние на значение G_{MAX} , а зависит от эффективного напряжения p' и отношения пустот e . Деформация сдвига оказала наибольшее влияние на модуль сдвига и нормализованные кривые деградации модуля сдвига. С увеличением как пластичности, так и эффективного напряжения нелинейная пороговая деформация перешла к более высокой деформации сдвига. Однако среднее эффективное напряжение (p') оказывало заметно меньшее влияние на упругий диапазон сдвиговой деформации, чем индекс пластичности (P_1).

Глинистые грунты обладают выраженными реологическими свойствами, которые меняются в зависимости от степени поврежденности структуры с начальными дефектами и повреждениями. Исследованию влияния дефектов виде микро- и макротрещин трещин на реологические свойства грунтов посвящено сравнительно небольшое количество работ. Вопросы изменения прочности и деформируемости глинистых грунтов с начальными дефектами и повреждениями при длительном режимном статическом нагружении практически не изучены [4-8].

При проектировании и строительстве необходимо избегать неравномерных осадок. В статье Heng Zhang и др. [9] разработано аналитическое решение, основанное на методе интегрального преобразования Лапласа, при прогнозировании длительных неравномерных осадок зданий на нескальных грунтовых основаниях. Методология основана на теории интегрального преобразования Лапласа и теории вязко упругости. Она сочетает аналитическое решение с методом конечных элементов для решения с учетом последовательности строительства и нагружения. Точность аналитического решения, основанного на интегральном преобразовании Лапласа, подтверждена результатами мониторинга.

В глинистых грунтах при трехосном сжатии напряжения и деформации меняются в зависимости от уровня напряжений, соотношения вертикальных и горизонтальных напряжений, времени действия нагрузки, траектории и размеров первоначальных дефектов структуры [10-13]. Поэтому соотношение между напряжением и деформацией не является постоянным, а изменяется, даже если одна из этих величин не изменяется во времени, а другая – напряжение или деформация – будет изменяться.

В связи с вышеизложенным возникает необходимость установления закономерностей изменения прочности и деформируемости грунтов с учетом изменения режимов длительного нагружения и влияния имеющихся дефектов и повреждений, для этого необходимо решить ряд задач:

1. Провести экспериментальное исследование при трехосном сжатии образцов глины с трещинами и без трещин;
2. Установить особенности развития трещин в структуре образца глины;
3. Установить особенности развития деформаций глинистого грунта с трещинами при трехосном сжатии.

2. Материалы и методы

Испытания проводились на приборе истинного трехосного сжатия с жесткими стенками. Прибор был разработан на кафедре [14, 15]. На образец грунта нагрузки передаются с помощью механических рычагов, что обеспечивает постоянное давление при деформировании образца. Испытания проводились при одинаковом боковом давлении. Вертикальные σ_1 напряжения прикладывались к образцу с заданным шагом.

Для испытаний применялись искусственно приготовленные образцы глинистого грунта, имеющие форму куба с размерами 10 x 10 x 10 см, с заданными характеристиками: плотность $\rho = 1,91$ г/см³; влажность $W = 0,2$. Для определения влияния образования и развития дефектов на прочность и деформации глинистого грунта были созданы искусственные трещины двух видов (см. рис. 1): 1 – одна трещина в

предполагаемой плоскости предельного равновесия грунта; 2 – в виде пересекающихся двух трещин в двух плоскостях предельного равновесия.



Рис. 1. Образцы с трещинами в плоскостях равновесия: а) с одной трещиной; б) с двумя пересекающимися трещинами в двух плоскостях равновесия (иллюстрации авторов)

Для установления закономерностей развития деформаций при режимных длительных трехосных нагружениях были проведены испытания трех серий образцов грунта при заданном значении всестороннего давления.

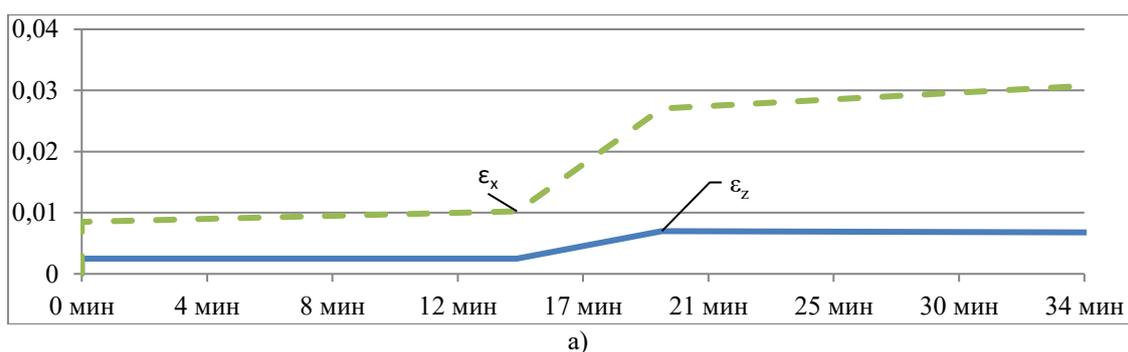
Перемещения, соосные с прикладываемыми нагрузками, замерялись индикаторами часового типа. Величины деформаций определялись расчетом. На начальном этапе образец грунта подвергался всестороннему обжатию $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 160$ кПа. После стабилизации осевых деформаций при постоянных значениях боковых напряжений $\sigma_2 = \sigma_3 = 160$ кПа к образцу прикладывалась вертикальная нагрузка. Каждая ступень нагружения выдерживалась, затем прикладывался следующий уровень нагрузки до достижения предела прочности.

Деформации образца фиксировались через определенные интервалы времени для принятого времени нагружения в этом блоке.

3. Результаты

В пределах каждого блока режимного длительного статического нагружения происходило увеличение линейных вертикальных деформаций, деформаций сдвига, а также изменение интенсивности деформаций сдвига, модуля вертикальных деформаций и модуля сдвига, косвенно характеризующие изменение прочностных и деформационных характеристик грунтов в процессе нагружения.

Графики, построенные по результатам трехосных длительных режимных нагружений, показывают, что на этапе всестороннего обжатия боковые деформации растут интенсивнее, чем вертикальные (см. рис.2). Максимальная величина боковых деформаций достигается в момент, когда вертикальные деформации составляют 25-30 % от величины предельных деформаций при разрушении. Заметное увеличение вертикальных линейных деформаций начинается при $\sigma_z > 0.3 \sigma_{ult}$.



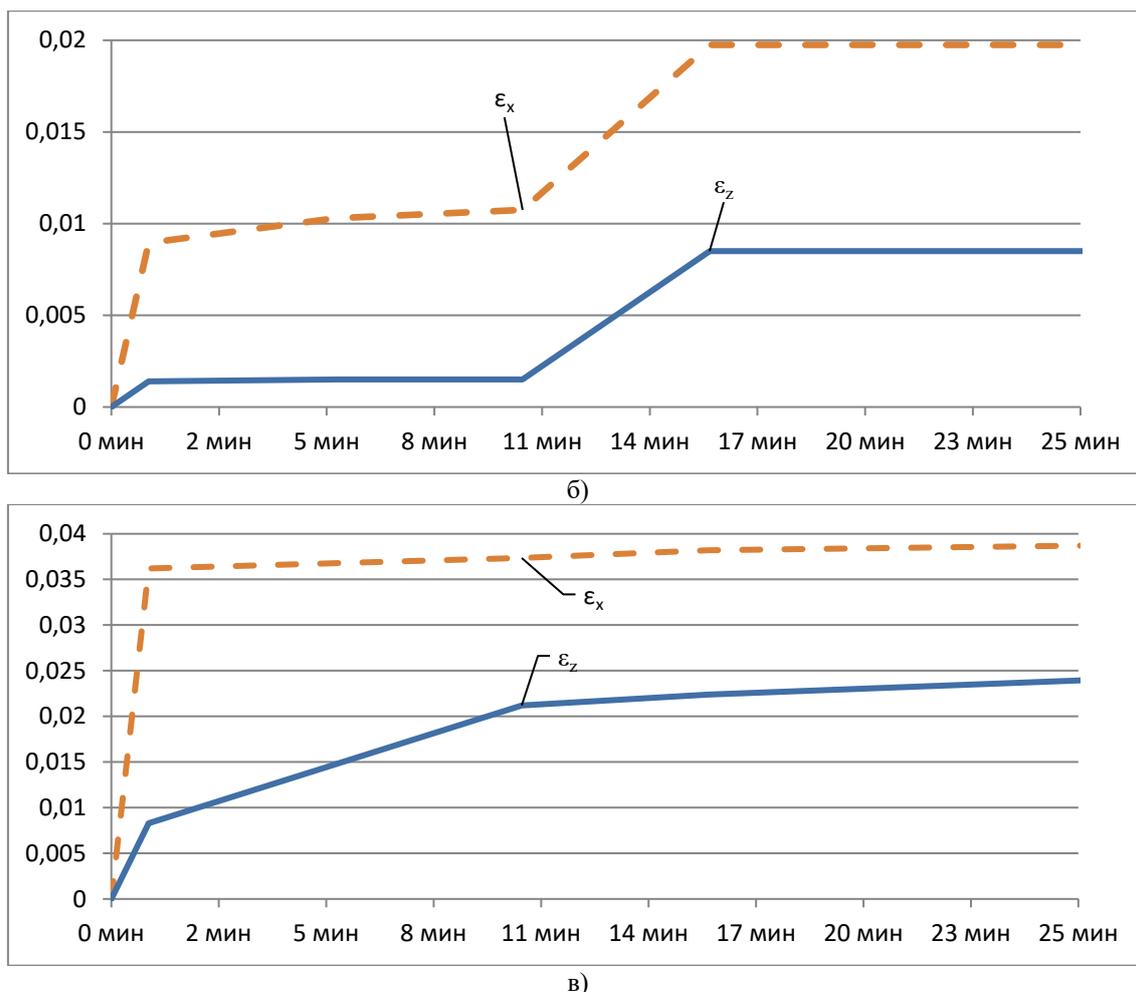


Рис. 2. График относительной деформации образцов: а) без трещин; б) с одной трещиной; в) с двумя трещинами (иллюстрация авторов)

В блоках режимного длительного нагружения происходило увеличение вертикальных деформаций как на стадии всестороннего, так и на стадии девиаторного нагружения. Анализ графика развития вертикальных деформаций показывает, что они развиваются на всем протяжении испытаний с различной интенсивностью. Наиболее интенсивное развитие вертикальных деформаций происходит на стадии девиаторного нагружения в интервале вертикальных напряжений от 300 до 880 кПа. На этом интервале девиаторного нагружения максимальные вертикальные деформации были у образцов с двумя трещинами, минимальные деформации – у образцов без трещин (см. рис. 3.а). Это объясняется тем, что образцы без трещин сопротивлялись образованию плоскости сдвига по граня уплотненных пирамид, а в образцах с трещинами, девиатор напряжений вызывает только перемещение уплотненных пирамид.

Горизонтальные деформации ϵ_x и ϵ_y также развивались на всем протяжении длительного девиаторного нагружения с различной интенсивностью. Как видно из приведенных графиков (см. рис. 3.б), наибольшее значение горизонтальных деформаций наблюдается у образцов с двумя трещинами, минимальные деформации – у образцов без трещин. Анализ графиков развития горизонтальных деформаций показывает, что наиболее интенсивное развитие горизонтальных деформаций происходит в интервале напряжений 500-800 кПа девиаторного нагружения.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что наибольшее значение интенсивности деформаций сдвига были в образцах с одной трещиной и минимальные значения интенсивности деформаций сдвига в образцах без трещин (см. рис. 3.в).

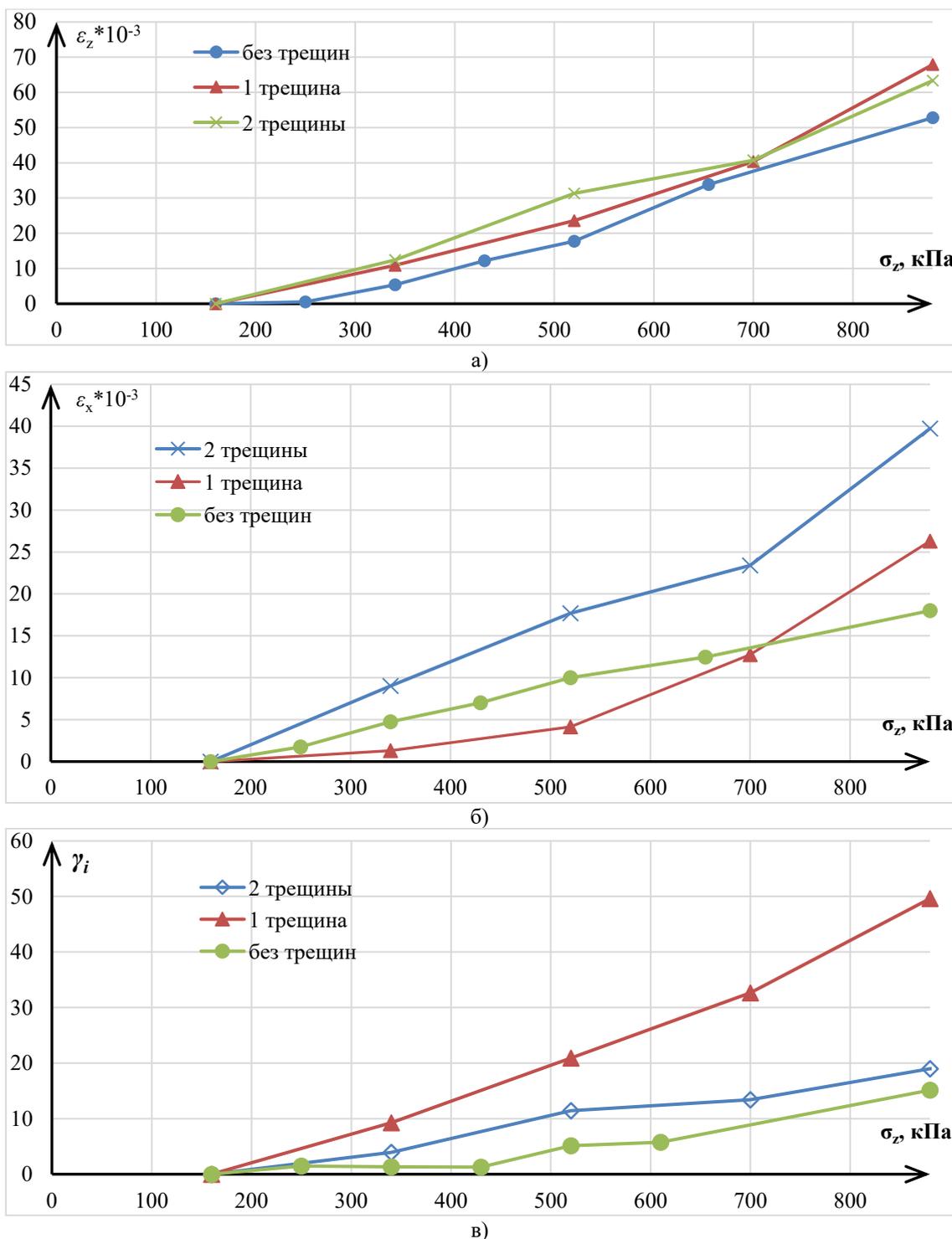


Рис. 3. График деформаций образцов на этапе девиаторного нагружения: а) вертикальных; б) поперечных; в) интенсивности сдвиговых деформаций (иллюстрации авторов)

На стадии девиаторного нагружения на всех блоках режимного нагружения происходило уменьшение линейного модуля вертикальных деформаций, модуля сдвига и объемного модуля деформаций (см. рис. 4). Наиболее интенсивное уменьшение модуля вертикальных деформаций происходило в образцах без трещин. В образцах с одной и двумя трещинами уменьшение модуля вертикальных деформаций происходило более плавно, чем в образцах без трещин. Аналогичная ситуация с объемным модулем деформаций. В связи с тем, что начальные трещины приводили к более интенсивному росту всех составляющих деформаций, снижение объемного модуля деформаций было плавным при увеличении девиатора напряжений.

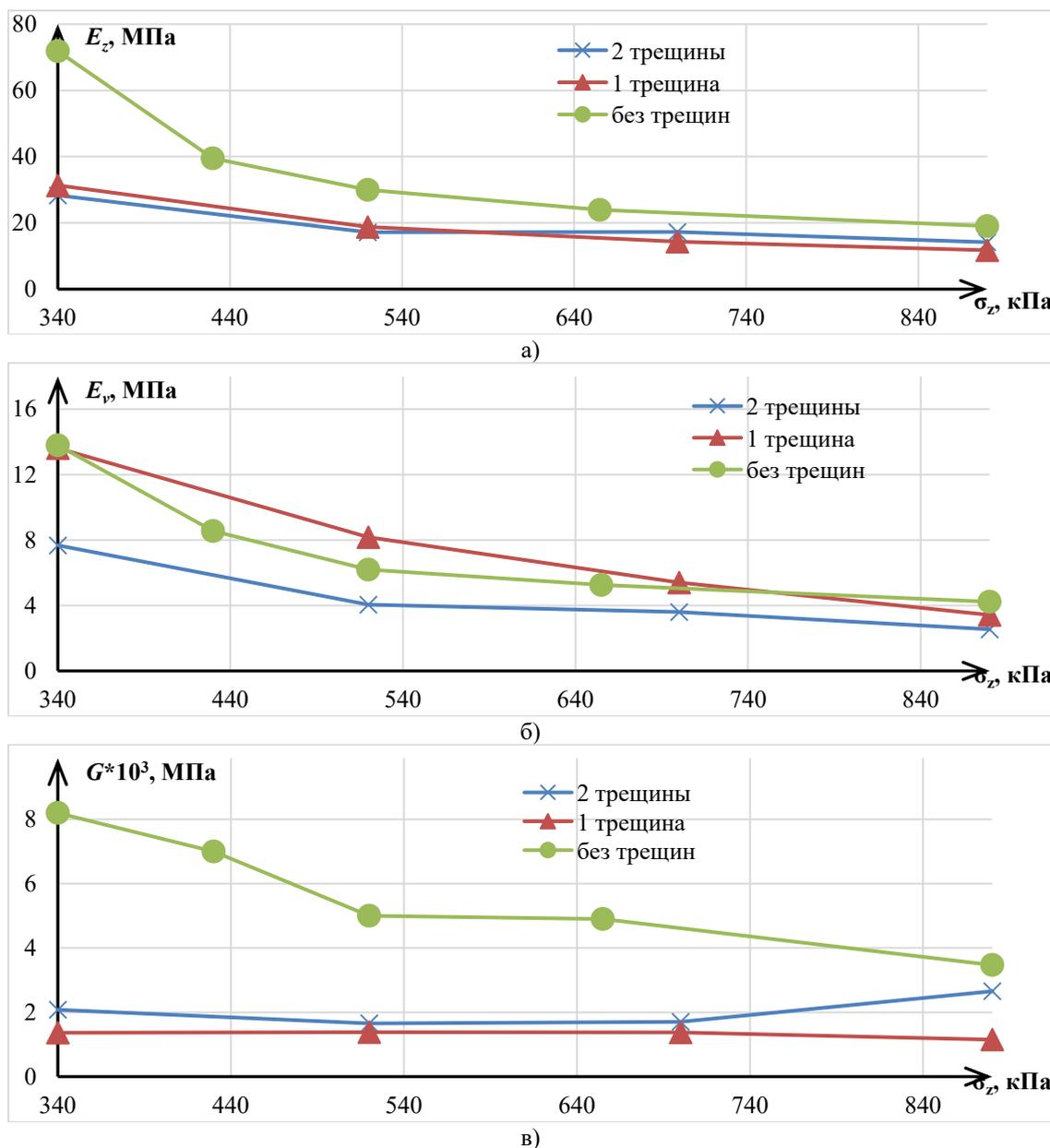


Рис. 4. Графики модулей деформаций: а) вертикального; б) объемного; в) сдвигового (иллюстрация авторов)

4. Обсуждение

Анализ графиков развития вертикальных деформаций показывает, что наиболее интенсивное развитие деформаций происходило в начальной стадии в пределах первого блока нагружения (примерно $t=0$, час), затем происходила относительная стабилизация развития деформаций, но полной стабилизации не происходило. Необходимо отметить, что наиболее интенсивное развитие деформаций наблюдалось в образцах с двумя перекрестными искусственными трещинами (см. рис. 5) и менее интенсивное развитие деформаций наблюдалось в образцах без начальных трещин, а в образцах с одной искусственной трещиной деформации были примерно в два раза меньше, чем в образцах с двумя искусственными трещинами. При переходе на следующий блок нагружения в момент изменения (увеличения) девиатора происходило увеличение общих вертикальных деформаций, затем, как и в первом блоке нагружения происходило наиболее интенсивное нагружение и стабилизация деформаций в пределах второго блока. В последующих блоках нагружения вышеуказанные закономерности повторялись. При этом в каждом последующем блоке в общем интенсивность развития деформаций была меньше, чем в предыдущем блоке.

Линейные горизонтальные деформации имели примерно такие же закономерности развития в пределах каждого блока. При этом необходимо отметить следующую закономерность: в момент увеличения девиатора поперечные деформации уменьшались на величину до $3,25 \cdot 10^{-4}$. Затем происходило восстановление первоначальной величины за время $t = 24$ ч, и дальнейшее увеличение горизонтальных деформаций, что ранее не отмечалось авторами других работ по испытаниям глин трехосными нагрузками [16]. Использование результатов проведенных экспериментальных исследований позволяет повысить точность расчетов до двух раз, по сравнению с другими методами.

Развитие деформаций сдвига имело свои особенности:

1. На начальной стадии происходило увеличение деформаций сдвига по мере увеличения и горизонтальных линейных деформаций.
2. В момент увеличения девиатора напряжений происходило скачкообразное уменьшение деформаций сдвига аналогично поперечным деформациям.
3. Затем происходила стабилизация деформаций сдвига и их дальнейший рост затем они превышали деформации сдвига в предыдущем блоке. Основной причиной этого является деградация структуры грунта, поворот плоскости равновесия и отклонение равнодействующей касательных напряжений от плоскости предельного равновесия.

Необходимость таких расчетов подтверждается востребованностью подобных случаев в строительной области.

5. Заключение

Выполненные экспериментальные исследования трех серий образцов глины в кубическом стабилометре в условиях длительного режимного статического нагружения позволили установить следующие основные закономерности поведения глинистых грунтов под нагрузкой:

1. Основные закономерности изменения основных физико-механических свойств грунтов при трехосном нагружении, заключаются в том, что при таких нагружения трещины развиваются по плоскостям предельного равновесия и приводит к снижению прочностных характеристик грунта.
2. В процессе испытания установлены основные закономерности развития первоначальных дефектов в виде трещин в плоскостях предельного равновесия как по длине, так и по ширине. Скорость развития трещин зависит от скорости изменения девиатора вертикальных напряжений и изменения величины бокового давления.
3. Начальные дефекты образцов глинистого грунта в виде одной или двух трещин, расположенные в плоскостях предельного равновесия, приводили к увеличению вертикальных, горизонтальных деформаций и интенсивности деформаций сдвига не зависимо от режима нагружения по сравнению с образцами без начальных дефектов.

Список библиографических ссылок

1. Gong L., Nemcik J., Ren T. Numerical simulation of the shear behavior of rock joints filled with unsaturated soil. *International Journal of Geomechanics*, 2020. 18 (9), 04018112. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001253.
2. Sobol E., Gabryś K., Zabłocka K., Śadzevičius R., Skominas R., Sas W. Laboratory Studies of Small Strain Stiffness and Modulus Degradation of Warsaw Mineral Cohesive Soils. *Minerals*, 2020. 10 (12), 1127. DOI: 10.3390/min10121127.
3. Głuchowski A., Sas W. Long-Term Cyclic Loading Impact on the Creep Deformation Mechanism in Cohesive Materials. *Materials* 2020, 13, 3907. DOI: 10.3390/ma13173907.
4. Xianzhang Ling., Peng Li., Feng Zhang., Yingying Zhao., Yan Li., Lingshi An. Permanent deformation characteristics of coarse grained subgrade soils under train-induced repeated load. *Hindawi advances in materials science and engineering*. 2017. Vol. 15. p.15. DOI: 10.1155/6241479. 2017. 15.
5. Кутергин В. Н., Панков К. В., Кальберген Р. Г., Карпенко Ф. С., Манукин В. Б. Оценка изменения прочности грунтов при циклических нагрузках, моделирующих воздействия штормовых волн на сооружение. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология Москва*. 2015. Вып. 5. С. 450–459.

6. Leal A. N. and Kaliakin V. N. Behavior of cohesive soils subjected to cyclic loading, 2013.109 p. Hussein H. K., Zeena W. S., Adel H. J. Behaviour of soft clayey soil improved by fly ash and geogrid under cyclic loading, civil engineering journal Iraq. 2020. Vol. 6. Iss. 2. P. 225–237. DOI:10.28991/cej-2020-03091466.
7. Elia G., Rouainia M. Investigating the cyclic behaviour of clays using a kinematic hardening soil model, soil dyn, earthq, eng. School of civil engineering and geosciences, Newcastle University, NE1 7RU Newcastle upon Tyne, UK. 2016. Vol. 88. p. 399–411. DOI:10.1016/j.soildyn.2016.06.014.
8. Gu C., Wang J., Cai Y., Sun L., Wang P., and Dong Q. Deformation characteristics of overconsolidated clay sheared under constant and variable confining pressure, soils and foundations. Japanese geotechnical society. 2016. p. 427–439. Vol. 56. Iss. 3. DOI:10.1016/j.sandf.2016.04.014.
9. Zhang H., Su C., Bai J., Yuan R., Ma Y., Wang W. The Rheological Analytical Solution and Parameter Inversion of Soft Soil Foundation. Symmetry 2021. 13 (7), № 1228. DOI: 10.3390/sym13071228.
10. Hicher P. Y. Experimental study of viscoplastic mechanisms in clay under complex loading, geotechnique. 2016. Vol. 66. Iss. 8. p. 661–669. DOI:10.1680/jgeot.15. P. 203.
11. Hu C. and Liu H. A new bounding-surface plasticity model for cyclic behaviors of saturated clay. Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul. 2015. Vol. 22. Iss. 1–3. p. 101–119. DOI:10.1016/j.cnsns.2014.10.023.
12. Wang Y. Cyclic response of natural soft marine clay under principal stress rotation as induced by wave loads. Ocean eng. 2017. Vol. 129. p. 191–202. DOI:10.1016/j.oceaneng.2016.11.031.
13. Kayumov R. A., Tazyukov B. F., Mukhamedova I. Z. Identification of Mechanical Characteristics of a Nonlinear-Viscoelastic Composite by Results of Tests on Shells of Revolution // Mechanics of Composite Materials. 2019. Vol. 55. P. 171–180. DOI: 10.1007/s11029-019-09802-3.
14. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В., Иванова О.А. Малоцикловая выносливость и деформации глинистых грунтов при трехосном циклическом нагружении. Жилищное строительство Москва. 2012. вып. 9. С. 6–8. DOI: 18083643/0044-4472. 2012. 9. 6–8.
15. Mirsayapov I. T. and Koroleva I. V. Bearing capacity of foundations under regime cyclic loading: 15th Asian Reg. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng. ARC. 2015. p. 1214–1217.
16. Пронозин Я. А., Кайгородов М. Д., Караулов А. М. Аналитическое определение параметров скважины при устранении неравномерной осадки фундаментов методом выбуривания грунта. Construction and geotechnics. 2020. Т. 11. Номер 2. С. 40–48. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.04.

Mirsayapov Iizar Talgatovich

doctor of technical sciences, professor

Email: mirsayapov1@mail.ru

Aysin Niyaz Nailovich

post-graduate student

Email: zarejay@gmail.com

Kazan State University of Architecture and Engineering

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

Investigation of deformations of clay soils under regime of prolonged triaxial compression taking into account initial defects

Abstract

Problem statement. Construction of deep pits leads to changes in the stress-strain state of the soil mass within the radius of the zone of influence. This is caused by base unloading during excavation, horizontal displacement of excavation walls, technological factors. When falling within the zone of existing development, there is a need to assess and geotechnically predict the behavior of the foundations of existing buildings and structures. Existing and newly emerged

defects and damages of soils must be taken into account. The aim of the study is to determine the dependences of the main deformation characteristics of clay soil with existing defects on the basis of laboratory studies, for this purpose it is necessary to: conduct an experimental study in triaxial compression of clay samples with cracks and without cracks; establish the peculiarities of crack development in the clay sample structure; to establish the peculiarities of deformation development of cracked clay soil under triaxial compression.

Results. The basic results of the study are that new data have been obtained on the effect of defects in soil samples on the deformation graphs of clay soil. The dependences of the main deformation characteristics of clay soil are plotted on the basis of the research results.

Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry lies in the fact that they allow more accurate assessment of foundation settlement when deep excavations are made near existing buildings.

Keywords: clay soil, deformations, microcracks, macrocracks, bearing capacity, rheology of soils.

For citation: Mirsayapov Ilizar T., Aysin N. N. Investigation of deformations of clay soils under regime of prolonged triaxial compression taking into account initial defects // Izvestija KGASU. 2021. №4 (58). P. 5-14. DOI: 10.52409/20731523_2021_4_5.

References

1. Gong L., Nemic J., Ren T. Numerical simulation of the shear behavior of rock joints filled with unsaturated soil. *International Journal of Geomechanics*, 2020. 18 (9), 04018112. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001253.
2. Sobol E., Gabrys K., Zabłocka K., Śadzevičius R., Skominas R., Sas W. Laboratory Studies of Small Strain Stiffness and Modulus Degradation of Warsaw Mineral Cohesive Soils. *Minerals*, 2020. 10 (12), 1127. DOI: 10.3390/min10121127.
3. Głuchowski A., Sas W. Long-Term Cyclic Loading Impact on the Creep Deformation Mechanism in Cohesive Materials. *Materials* 2020, 13, 3907. DOI: 10.3390/ma13173907.
4. Xianzhang Ling., Peng Li., Feng Zhang., Yingying Zhao., Yan Li., Lingshi An. Permanent deformation characteristics of coarse grained subgrade soils under train-induced repeated load. *Hindawi advances in materials science and engineering*. 2017. Vol. 15. p.15. DOI: 10.1155/6241479. 2017. 15.
5. Kutergin V. N., Pankov K. V., Kalbergenov R. G., Karpenko F. S., Manukin V. B. Assessment of soil strength changes under cyclic loads simulating the impact of storm waves on the structure. *Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology Moscow*. 2015. I. 5. P. 450–459.
6. Leal A. N. and Kaliakin V. N. Behavior of cohesive soils subjected to cyclic loading, 2013. 109 p. Hussein H. K., Zeena W. S., Adel H. J. Behaviour of soft clayey soil improved by fly ash and geogrid under cyclic loading, *civil engineering journal Iraq*. 2020. Vol. 6. Iss. 2. P. 225–237. DOI: 10.28991/cej-2020-03091466.
7. Elia G., Rouainia M. Investigating the cyclic behaviour of clays using a kinematic hardening soil model, *soil dyn, earthq, eng. School of civil engineering and geosciences, Newcastle University, NE1 7RU Newcastle upon Tyne, UK*. 2016. Vol. 88. p. 399–411. DOI: 10.1016/j.soildyn.2016.06.014.
8. Gu C., Wang J., Cai Y., Sun L., Wang P., and Dong Q. Deformation characteristics of overconsolidated clay sheared under constant and variable confining pressure, *soils and foundations. Japanese geotechnical society*. 2016. p. 427–439. Vol. 56. Iss. 3. DOI: 10.1016/j.sandf.2016.04.014.
9. Zhang H., Su C., Bai J., Yuan R., Ma Y., Wang W. The Rheological Analytical Solution and Parameter Inversion of Soft Soil Foundation. *Symmetry* 2021. 13 (7), № 1228. DOI: 10.3390/sym13071228.
10. Hicher P. Y. Experimental study of viscoplastic mechanisms in clay under complex loading, *geotechnique*. 2016. Vol. 66. Iss. 8. p. 661–669. DOI: 10.1680/jgeot.15. P. 203.
11. Hu C., Liu H. A new bounding-surface plasticity model for cyclic behaviors of saturated clay. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2015. Vol. 22. Iss. 1–3. p. 101–119. DOI: 10.1016/j.cnsns.2014.10.023.

12. Wang Y. Cyclic response of natural soft marine clay under principal stress rotation as induced by wave loads. *Ocean eng.* 2017. Vol. 129. p. 191–202. DOI:10.1016/j.oceaneng.2016.11.031.
13. Kayumov R. A., Tazyukov B. F., Mukhamedova I. Z. Identification of Mechanical Characteristics of a Nonlinear-Viscoelastic Composite by Results of Tests on Shells of Revolution // *Mechanics of Composite Materials*. 2019. Vol. 55. P. 171–180. DOI: 10.1007/s11029-019-09802-3.
14. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V., Ivanova O. A. Low cycle endurance and deformation of clay soils under triaxial cyclic loading. *Housing construction. Moscow*. 2012. Iss. 9. P. 6–8. DOI: 18083643/0044-4472. 2012. 9. 6–8.
15. Mirsayapov I. T. and Koroleva I. V. Bearing capacity of foundations under regime cyclic loading: 15th Asian Reg. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng. ARC. 2015. p. 1214–1217.
16. Pronozin Y. A, Kaygorodov M. D., Karaulov A. M Analytical determination of well parameters while eliminating uneven settlement of foundations by drilling soil. *Construction and geotechnics*. 2020. T. 11. 2. P. 40-48. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.04.