

УДК 624.159

Мирсаяпов И.Т. – доктор технических наук, профессор

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Королева И.В. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: 79178711218@yandex.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

Влияние процесса упрочнения на прочность глинистого грунта при режимном трехосном нагружении

Аннотация

Постановка задачи. В условиях режимного длительного нагружения в грунте одновременно возникают деформации изменения объема и формы, которые, оказывая друг на друга влияние, приводят к стабилизации скорости деформирования и даже к затуханию деформаций или к прогрессирующей ползучести грунта. При этом в расчетных моделях влияние этих процессов на деформирование и прочность грунтового массива отражено недостаточно.

Результаты. В работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния процесса упрочнения на прочность глинистого грунта при режимном трехосном нагружении. Установлено, что в процессе трехосного режимного нагружения происходит одновременное упрочнение и разупрочнение глинистого грунта, при этом процесс деформирования может привести к разрушению в результате прогрессирующего течения или к стабилизации деформаций. Основным критерием разрушения глинистого грунта является критическая величина степени его поврежденности микротрещинами в зоне предельного равновесия.

Выводы. При режимном трехосном нагружении образцов глинистого грунта нарушенной структуры за счет восстановления структурных связей показатели прочности грунта увеличиваются от 5 % до 15 %.

Ключевые слова: глинистый грунт, упрочнение, напряженно-деформированное состояние грунта, режимное нагружение, дилатансия, разупрочнение, микротрещины.

Введение

Деформирование грунта в условиях режимного и циклического длительного трехосного сжатия сопровождается возникновением деформаций как сдвиговых, так и объемных. Они оказывают друг на друга влияние, вызывая изменение плотности грунта, в результате чего грунт упрочняется или разупрочняется и процесс деформирования может закончиться либо стабилизацией деформаций, либо прогрессирующим течением и, как следствие, разрушением.

В многокомпонентной (многофазной) среде, которой является глинистый грунт, в зависимости от продолжительности действия и величины нагрузки могут возникнуть обратимые и остаточные деформации изменения объема и формы, следует учитывать, что пластические деформации развиваются во времени [1-8]. Эти свойства существенно зависят от начальных величин влажности, плотности грунта, так и от их изменяемых при режимном деформировании значений.

Существующие расчетные модели грунта в недостаточной степени отражают эти зависимости, особенно зависимость свойств пластичности от изменяющейся в процессе деформирования плотности скелета грунта, т.е. не учитывается влияние упрочнения скелета грунта.

Теоретические исследования

На упрочнение глинистого грунта в процессе его деформирования во времени влияют следующие факторы:

- а) изменение плотности скелета;

б) структурные изменения в грунте, в том числе залечивание микродефектов, микротрещин и макрополостей, изменение ориентации частиц, как во времени, так и в пространстве.

Следует отметить, что эти два фактора тесно взаимосвязаны и сложно их разделить (выделить долю каждого из них) и учитывать во времени по отдельности.

Опираясь на результаты теоретических и экспериментальных исследований можно представить следующую схему развития деформаций ползучести и изменения длительного сопротивления разрушению в процессе режимного трехосного сжатия. В зависимости от величины, режима 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 микротрещин и макротрещин. В тех случаях, когда разупрочнение начнет превалировать над упрочнением, возникает стадия разрушения и прогрессирующей ползучести, причем эти процессы охватывают не весь объем грунта, а лишь зоны предельного равновесия.

Девиаторное нагружение и длительная выдержка под нагрузкой сопровождаются возникновением и развитием множества поверхностей сдвига и разрывов сплошности грунта образца, положение которых меняется в процессе увеличения девиатора и времени, следовательно, отрицательная дилатансия (разрыхление) глинистого грунта при режимном трехосном сжатии локализуется в пределах потенциально возможных площадок предельного равновесия (рис. 1).

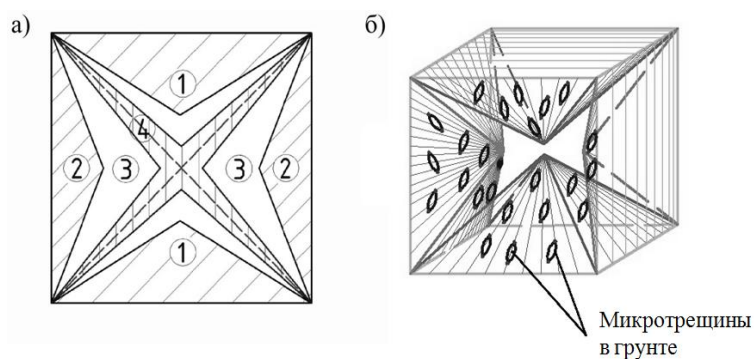


Рис. 1. а) Схема расположения локальных зон различной плотности в образце при трехосных испытаниях: 1 – вертикальные уплотненные пирамиды; 2 – уплотненные пирамиды у боковых граней; 3 – зона однородного напряженного состояния; 4 – зона дилатансии; б) Схема развития трещин в зоне предельного равновесия

При загрузении глинистого грунта в начальной стадии наблюдается интенсивное развитие микроразрушений (субмикротрещин, микротрещин), сопровождающихся разуплотнением структуры и нелинейной ползучестью в целом. Затем, в зависимости от режима нагружения, этот процесс прекращается, структура грунта за счет восстановления водно-коллоидных и структурных связей уплотняется, наблюдается переход к зоне линейной ползучести.

Уплотнение грунта зависит от всей истории нагружения и описывается функцией:

$$g = g \left(t, \frac{s}{R}, r_{cp} = \frac{s_{\min}}{s_{\max}}, N, R \right),$$

которая характеризует возрастание прочности в результате процесса восстановления водно-коллоидных и структурных связей.

Учет изменения γ (t , τ) качественно отражается на характере роста микроповреждений при режимном нагружении.

Рассмотрим механизм упрочнения глинистого грунта в процессе режимного трехосного нагружения. Упрочнение грунта начинается только при напряжениях, значения которых выше уровня нижней границы микротрещинообразования R_T^0 . Как известно, при нагружении массива глинистого грунта вокруг дефектов структуры

(микротрещин, микропор) образуется концевая зона пластически деформированного грунта (зона предразрушения). Концевая зона пластического деформирования – это зона повреждения с мелкими микротрещинами – субмикротрещинами. Поэтому принимается, что процесс упрочнения происходит в этой зоне и она проявляется в увеличении удельной работы разрушения грунта. Субмикротрещины в концевой пластической зоне, образованные при режимном нагружении, остаются открытыми в течение нагрузочного цикла, облегчая образование и рост свежего продукта восстановления водно-коллоидных и структурных связей. Поэтому процесс восстановления связей, а следовательно, микроструктурное упрочнение может продолжаться без торможения в течение всего периода режимного нагружения.

Для аналитического описания влияния процесса восстановления водно-коллоидных и структурных связей на процесс развития микротрещин, и как следствие, изменения деформаций и прочности грунта при режимном нагружении воспользуемся объединенной моделью В.В. Болотина [9]. Следуя работе [9], принимаем энергетическую концепцию Гриффитса в терминах аналитической механики. При этом параметрам трещины придаётся смысл обобщенных координат. Составим выражение для виртуальной работы всех внешних и внутренних сил, вычисленной при варьировании по Гриффитсу:

$$\delta A = \delta A_e + \delta A_i - \delta A_f, \quad (1)$$

где δA_e – элементарная работа внешних сил;

δA_i – элементарная работа внутренних сил;

δA_f – элементарная работа для продвижения трещины.

В массиве грунта, как было сказано выше, всегда имеется система начальных усадочных микротрещин и микропор, заданная при помощи вектора $l = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$. При этом принимаем, что в начальной стадии микроповреждения не взаимодействуют между собой, и условием необратимости микротрещины будет $\delta l_i \geq 0$. При приложении нагрузки на фронте трещин образуются пластические зоны (зоны микроповреждений). Виртуальную работу (1) представим в виде:

$$\delta A = \sum_{j=1}^m (G_j - \Gamma_j) \delta l_j, \quad (2)$$

где G_j – обобщенные силы, способствующие развитию трещины;

Γ_j – обобщенные силы сопротивления.

Обобщенные силы G_j и Γ_j зависят от состояния пластической зоны на фронте микротрещины.

В начальной стадии до приложения нагрузки всегда соблюдается неравенство:

$$G_j < \Gamma_j. \quad (3)$$

После приложения нагрузки, в зависимости от уровня напряжений, в концевой пластической зоне начинают накапливаться микроповреждения в виде субмикротрещин. Принимаем, что уровень поврежденности в концевой пластической зоне микротрещины характеризуется скалярной функцией $\varphi(x, N, T)$, так называемой мерой повреждения.

При $N = 0$ и $T = 0$ имеем $\varphi = \varphi_0(x)$, а $\varphi(x, N, T) = 1$ соответствует полностью поврежденному грунту. Мера повреждений $\varphi(x, N, T)$ существенно влияет на величину обобщенной силы Γ , которая в этом случае имеет смысл удельной работы разрушения (работы, которая затрачивается при продвижении вершины на единицу длины). Рассмотрим два случая изменения удельной работы разрушения в зависимости от меры повреждения в концевой пластической зоне.

В тех случаях, когда не учитывается микроструктурное упрочнение грунта, удельная работа разрушения Γ монотонно уменьшается с увеличением $\varphi(x, N, T)$ в зависимости от уровня нагруженности и количества циклов нагружения (N) или времени действия статической нагрузки (T). В этом случае удельная работа разрушения уменьшается с момента приложения нагрузки с различной интенсивностью в зависимости от уровня нагруженности.

В случае, когда учитывается упрочнение грунта вследствие микроструктурного упрочнения, при небольших значениях $\varphi(x, N, T)$ удельная работа разрушения в концевой пластической зоне возрастает по сравнению с начальным значением Γ_0 .

Максимальная величина удельной работы разрушения $\Gamma^{max}(x, N, T)$ достигается при $\varphi = \varphi_n$, после чего нарушение структуры и разрыхление начинают преобладать над процессом упрочнения и удельная работа разрушения начинает уменьшаться, достигая при $\varphi(x, N, T) = \varphi_s$ начального значения Γ_0 . При увеличении количества циклов нагружения или времени действия нагрузки (если уровень напряжений не снижается) происходит дальнейшее уменьшение удельной работы разрушения (рис. 2).

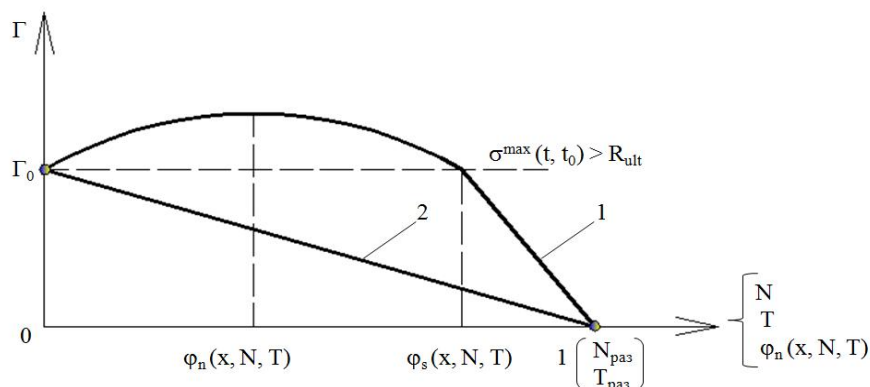


Рис. 2. Зависимость удельной работы разрушения от уровня микроповреждений, количества циклов нагружения или времени действия нагрузки с учетом (1) и без учета (2) микроструктурного упрочнения грунта

В момент приложения нагрузки $l = l_0(t)$ и $\varphi = \varphi_0(x, l)$. При этих начальных данных система находится в субравновесном состоянии. Затем, по мере увеличения количества циклов нагружения или времени действия нагрузки, происходит накопление микроповреждений и одновременное микроструктурное упрочнение на концевой пластической зоне микротрещины при постоянной длине микротрещины (то есть инкубационная стадия).

Инкубационная стадия заканчивается при нарушении неравенства:

$$G[\sigma(N, T), l_0, \varphi(N, T)] < \Gamma[\sigma(N, T), l_0, \varphi(N, T), m_j(N, T)], \quad (4)$$

где $m_j(N, T)$ – обобщенная функция микроструктурного упрочнения грунта.

После этого начинается развитие микротрещины при приближенном выполнении условия

$$G[\sigma(N, T), l(N, T), \varphi(x, N, T)] < \Gamma[\sigma(N, T), l(N, T), \varphi(x, N, T), m_j(N, T)]. \quad (5)$$

Для выяснения характера изменения удельной работы разрушения вследствие восстановления водно-коллоидных и структурных связей глинистого грунта воспользуемся зависимостью [10]:

$$C_0(t, \tau_1, N) = C_0(\tau_1) \cdot m(t, \tau_1) \cdot \lambda(t, \tau_1) \cdot m_E(t, \tau_1), \quad (6)$$

где $C_0(\tau_1)$ – начальное значение удельного сцепления грунта при кратковременном статическом нагружении;

$C_0(t, \tau_1, N)$ – удельное сцепление между частицами глинистого грунта при режимном нагружении;

$m(t, \tau_1)$ – функция упрочнения грунта за счет восстановления водно-коллоидных связей;

$\lambda(t, \tau_1)$ – функция упрочнения грунта за счет восстановления структурных связей с учетом сочетания различных блоков в процессе режимного нагружения;

$m_E(t, \tau_1)$ – функция, учитывающая увеличение обобщенной силы, продвигающей трещины вследствие ползучести грунта.

Функция $m_E(t, \tau_1)$ определяется с учетом изменения объемного модуля деформации $K(\tau_1)$ и $K(t)$, а также меры объемной ползучести грунта $C(t, \tau_1)$:

$$m_E(t, \tau_1) = \sqrt{\frac{K(\tau_1)}{K(t)}} \cdot \frac{1}{1 + K(\tau_1) \cdot C(t, \tau_1)}. \quad (7)$$

Функции $m(t, \tau_1)$ и $\lambda(t, \tau_1)$ учитывают увеличение удельной работы разрушения (работы, которая затрачивается на продвижение фронта трещины на единицу длины) при

режимном нагружении за счет восстановления структурных и водно-коллоидных связей на ранних стадиях нагружения (в блоках с низким уровнем напряжений) или после перехода от блока с циклическим нагружением к блоку с длительным статическим нагружением.

Изменение удельной работы разрушения грунта при режимном нагружении практически не изучено. Поэтому функции $m(t, \tau_1)$ и $\lambda(t, \tau_1)$ определяем косвенно на основе экспериментальных данных.

Экспериментальные исследования.

Авторами проведены испытания глинистых грунтов в условиях режимного нагружения. Для определения влияния процесса восстановления структурных связей образцы были выполнены из грунта нарушенной структуры по ГОСТ 30416. Крупность зерен грунта, используемого для приготовления пасты, составляла менее 2 мм, что с одной стороны позволяло частично сохранить структурную прочность (связь) между частицами как исходного материала для дальнейшего восстановления связей, а с другой – позволяло создать искусственно приготовленный грунт нарушенной структуры. Начальные значения физико-механических характеристик грунта приведены в таблице.

Таблица

Физико-механические характеристики образца глинистого грунта нарушенной структуры до начала испытаний

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

Образец грунта нарушенной структуры с заданными параметрами плотности ρ и влажностью W , близкой к пределу раскатывания, подвергался воздействию статической нагрузки на приборе трехосного сжатия стабилметрического типа, позволяющем осуществить возможность бокового расширения в условиях осесимметричного нагружения $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$ при постоянном давлении в камере σ_3 . Испытания проводились по схеме «неконсолидированно-недренированное» (ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости) при различных режимах нагружения с учетом фактора времени. Согласно программе экспериментальных исследований были рассмотрены следующие изменяемые параметры: величина всестороннего обжатия и время выдержки образца в форме до начала нагружения. Давление в камере принималось равным 100 кПа, 200 кПа, 300 кПа, 400 кПа, что позволило определить частные значения ϕ и c для образца на каждом временном интервале. Образцы глинистого грунта нарушенной структуры выдерживались в форме в течение от 0 до 4 суток.

По результатам экспериментальных исследований получены графические зависимости увеличения прочности образца глинистого грунта нарушенной структуры при упрочнении. Установлено, что за счет восстановления структурных связей удельное сцепление и угол внутреннего трения грунта увеличиваются от 5 % до 15 % (рис. 3-4), прочность образца в интегральном объеме увеличивается на 15 % (рис. 5). Длительность выдержки образца глинистого грунта до начала нагружения оказывает существенное влияние на механические свойства грунта, при этом, чем больше время выдержки ступени нагружения – тем большие механические характеристики имеет грунт. Однако, при увеличении времени выдержки более 4 суток существенного влияния на упрочнение образца грунта не установлено.

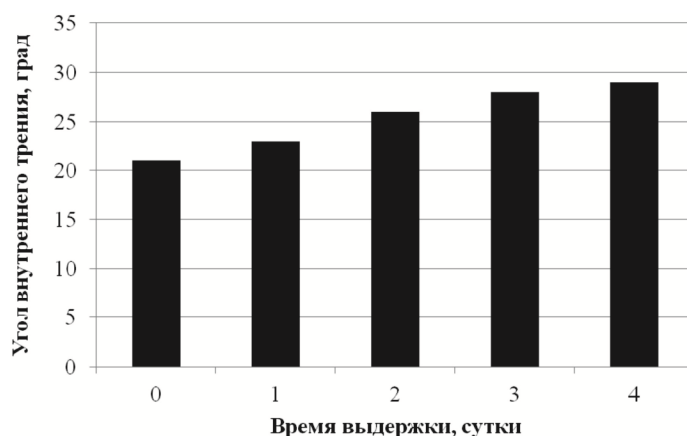


Рис. 3. Влияние процессов упрочнения на угол внутреннего трения глинистого грунта

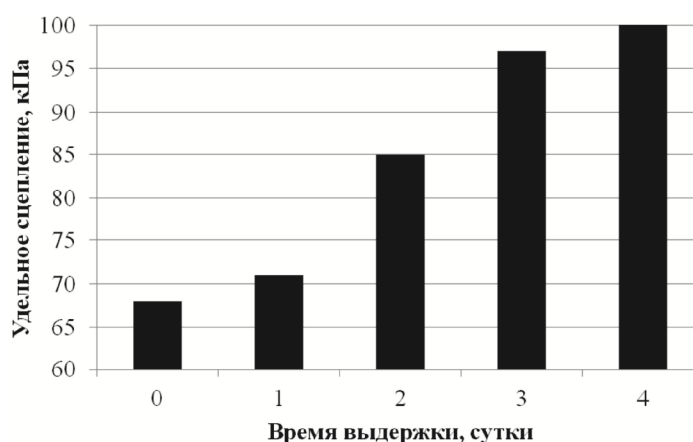


Рис. 4. Влияние процессов упрочнения на удельное сцепление глинистого грунта

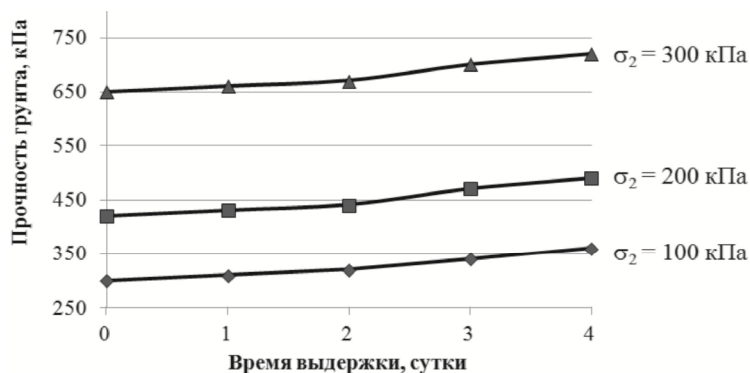


Рис. 5. Влияние процессов упрочнения на прочность глинистого грунта при различных значениях всестороннего обжатия

Заключение

Разработаны аналитические уравнения описания процесса упрочнения глинистого грунта при режимном трехосном сжатии за счет восстановления водно-коллоидных и структурных связей. В результате экспериментальных исследований установлено, что параметры, характеризующие прочность грунта, ϕ и c увеличиваются от 5 % до 15 %, прочность образца в интегральном объеме увеличивается на 15 %. Длительность выдержки образца нарушенного грунта до начала нагружения, а также режим нагружения оказывают существенное влияние на изменение механических свойств грунта при дальнейшем нагружении. Следует отметить, что максимальное упрочнение достигается при выдержке образца в ненагруженном состоянии 4 суток.

Список библиографических ссылок

1. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Прогнозирование деформаций оснований фундаментов с учетом длительного нелинейного деформирования грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2011. № 4. С. 16–23.
2. Тер-Мартirosян З. Г., Тер-Мартirosян А. З., Соболев Е. С. Ползучесть и виброползучесть грунтов : Труды XIV междунар. симп. по реологии грунтов – Перспективные направления развития теории и практики в реологии и механике грунтов / КГАСУ. Казань, 2014. С. 8–23.
3. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Experimental and theoretical studies of bearing capacity and deformation of reinforced soil foundations under cyclic loading : Proc. intern. symp., Kyoto, Japan – Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics / Balkema. Lieden, 2014. P. 742–747.
4. Tanaka T., Yoshiyuki Mohri, Zhussupbekov A. Zh. Elasto-plastic and Viscoplastic Finite Element Analysis – Direct Shear Box Test and Dynamic Deformation of Reinforced Embankment Dam : Труды XIII междунар. симп. по реологии грунтов – Достижения, проблемы и перспективные направления развития для теории и практики механики грунтов и фундаментостроения / КГАСУ. Казань, 2012. С. 18–26.
5. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В., Иванова О. А. Малоцикловая выносливость и деформации глинистых грунтов при трехосном циклическом нагружении // Жилищное строительство. 2012. № 9. С. 6–8.
6. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Bearing capacity and deformation of the base of deep foundations' ground bases : Proc. intern. symp., Seoul, Korea – Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground / Balkema. Lieden, 2014. P. 401–404.
7. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Расчетная модель длительного нелинейного деформирования глинистых грунтов при сложном напряженном состоянии // Известия КГАСУ. 2011. № 2 (16). С. 121–128.
8. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Особенности деформирования глинистых грунтов при режимном нагружении // Известия КГАСУ. 2012. № 4 (22). С. 193–198.
9. Болотин В. В. Объединенные модели в механике разрушения // Известия АН СССР. Механика твердого тела, 1984, № 3. – С. 127–137.
10. 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. Volume 53. Issue 1. P. 5–11.

Mirsayapov I.T. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: mirsayapov@kgasu.ru

Koroleva I.V. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: 79178711218@yandex.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

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

**Influence of the hardening process on the strength of clay soil
under regime triaxial loading****Abstract**

Problem statement. Under the conditions of the regime long-term loading in the ground at the same time arise changes in the deformation volume and shape, which influence to each other, leads to strain rate stabilization and even deformation attenuation or progressive soil creep. Herewith, in the calculation model, the effect of these processes on the soil mass deformation and strength is reflected insufficiently.

Results. The article presents theoretical and experimental study results of the hardening process effect to the clay strength under the regime triaxial loading. It is found that in the process of the regime triaxial loading occurs simultaneous clay soil hardening and softening, wherein the deformation process can lead to the destruction as a result of deformation

progressive or stabilization. The main criterion for the destruction of clay soil is a critical damage degree value by microcracks in the equilibrium zone limit.

Conclusions. At the regime triaxial loading of clay soil samples of disturbed structure by restoring the structural links, soil strength indicators are increased from 5 % to 15 %.

Keywords: clayey soil, hardening, stress-strain state of soil, loading modal, dilatancy, softening, micro-cracks.

References

1. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Prediction of deformation of the foundation with the long-term non-linear deformation of soil // *Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov*. 2011. № 4. P. 16–23.
2. Ter-Martirosyan Z. G., Ter-Martirosyan A. Z., Sobolev Ye. S. Creep and vibrocreep of soils : Proc. XIV intern. symp. on the rheology of soils – Future directions of the theory and practice of rheology and soil mechanics / KGASU. Kazan, 2014. P. 8–23.
3. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Experimental and theoretical studies of bearing capacity and deformation of reinforced soil foundations under cyclic loading : Proc. intern. symp., Kyoto, Japan – Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics / Balkema. Lieden, 2014. P. 742–747.
4. Tanaka T., Yoshiyuki Mohri, Zhussupbekov A. Zh. Elasto-plastic and Viscoplastic Finite Element Analysis – Direct Shear Box Test and Dynamic Deformation of Reinforced Embankment Dam : Proc. XIII intern. symp. on the rheology of soils – Achievements, Problems and Perspective Directions of Development for the Theory and Practice of Soil Mechanics and Foundation Engineering Problems / KGASU. Kazan, 2012. P. 18–26.
5. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V., Ivanova O. A. Low-Cycle Endurance and Deformations of Clay Soils in the Course of Three-Axial Cyclic Loading // *Zhilishchnoye stroitelstvo*. 2012. № 9. P. 6–8.
6. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Bearing capacity and deformation of the base of deep foundations' ground bases : Proc. intern. symp., Seoul, Korea – Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground / Balkema. Lieden, 2014. P. 401–404.
7. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Designed model of long nonlinear deformation of clay soil in a complex stress state // *Izvestiya KGASU*. 2011. № 2 (16). P. 121–128.
8. Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Features of deformation of clay soils during loading of regime // *Izvestiya KGASU*. 2012. № 4 (22). P. 193–198.
9. Bolotin V. V. The combined model in fracture mechanics // *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela*, 1984, № 3. P. 127–137.
10. 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. Volume 53. Issue 1. P. 5–11.