



**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
Т. 9, № 2, 2018
PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2018.2.08

УДК 624.131.37

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В ГРУНТАХ

А.В. Безматерных, В.Г. Офрихтер

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 14 декабря 2017
Принята: 27 марта 2018
Опубликована: 29 июня 2018

Ключевые слова:

трехосное сжатие,
пластические деформации,
подготовка образца, глинистый
грунт, песчаный грунт,
фибровое армирование.

АННОТАЦИЯ

В грунтах при приложении нагрузки, превышающей несущую способность основания, развиваются вертикальные деформации сжатия и горизонтальные деформации расширения, что приводит к аварийным ситуациям. Целью исследования являлось изучение напряженно-деформированного состояния образцов грунта в стадии развития пластических деформаций, непосредственно предшествующих разрушению. Испытания проводились на приборе трехосного сжатия в камере типа А. Исследовались образцы из песка, глины и песка, армированного полипропиленовым волокном. Образцы из армированного и неармированного песка формировались путем сухой послойной отсыпки. Образцы из глины формировались из глинистой пасты с заданными характеристиками влажности. Приводятся физические характеристики грунтов. Испытания проводились по консолидировано-дренированной схеме. Трехосные испытания проводились в кинематическом и статическом режимах, кинематические – с заданной скоростью деформирования, статические – ступенями по 50 кПа. Гидростатическое обжатие во всех испытаниях было принято 100 кПа.

По результатам трехосных испытаний определены прочностные характеристики образцов. Образцы из глины и неармированного песка были доведены до разрушения. Разрушение образцов из фибропеска при относительной деформации 20 % не было достигнуто. Для образцов из глины и неармированного песка при непрерывном деформировании значение горизонтальной деформации и максимального вертикального давления меньше, чем при приложении ступенчатой нагрузки, а для песка, содержащего полипропиленовые волокна, эта зависимость обратная. Для фибропеска зависимость между интенсивностями касательных напряжений и деформаций сдвига близка к линейной функции. Определены углы дилатансии. Результаты экспериментальных исследований планируется использовать для численного моделирования.

© ПНИПУ

© **Безматерных Александра Владимировна** – магистрант, e-mail: SOS-Clauf@yandex.ru.
Офрихтер Вадим Григорьевич – доктор технических наук, профессор, e-mail: spstf@pstu.ru.

Alexandra I. Bezmaternykh – Master Student, e-mail: SOS-Clauf@yandex.ru.
Vadim G. Ofrikhter – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: spstf@pstu.ru.

THE STUDY OF THE FEATURES OF INCREASING OF PLASTIC DEFORMATIONS IN SOILS

A.V. Bezmaternykh, V.G. Ofrikhter

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 14 December 2017
Accepted: 27 March 2018
Published: 29 June 2018

Keywords:

triaxial compression, plastic deformation, specimen preparation, clay soil, sand soil, fiber reinforcement.

ABSTRACT

In soils under the application of load that exceeds the bearing capacity, vertical compression and horizontal extension deformation are developed, which leads to the failure. The aim of investigations was to study the stress-strain state in the stage of plastic deformations immediately preceding the destruction of soil specimens. Tests were carried out on the triaxial device in the chamber of type A. Specimens of sand, clay and sand reinforced with randomly oriented polypropylene fibers were investigated. Specimens of reinforced and non-reinforced sand were formed by dry layer-by-layer filling. Specimens of clay were molded from clay paste with predetermined characteristics of moisture. The method of specimen formation is described. Physical characteristics of soils are given. Tests were carried out according to the consolidated-drained scheme. Triaxial tests were carried out in kinematic and static modes, kinematic – with a given strain rate and static in steps of 50 kPa. Hydrostatic compression has been adopted 100 kPa for all tests.

Strength characteristics of the specimens were determined by the results of triaxial tests. Destruction of clay and non-reinforced sand specimens was achieved. The destruction of fiber sand was not achieved at relative deformations of 20 %. For clay and non-reinforced sand specimens with continuous deformation, the lateral deformation and the maximum vertical pressure are lower than when applying a step load, and for sand containing polypropylene fibers, this dependence is the opposite. For sand reinforced with polypropylene fibres, it was found that dependence between the intensities of the tangential stresses and shear deformations close to a linear function. The angles of dilatancy were determined. The results of experimental studies are planned to be used as input data for numerical simulation.

© PNRPU

Введение

В практике строительства и эксплуатации зданий и сооружений бывают случаи, когда к массиву грунта прикладывают нагрузку, превышающую несущую способность основания. В этот момент в грунте развиваются как вертикальные деформации сжатия, так и горизонтальные деформации расширения, что приводит к выпорам грунта, неравномерным осадкам сооружений, потере устойчивости основания, конструкций, другими словами – аварийным ситуациям [1–5].

Целью исследования является изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) в стадии развития пластических деформаций, непосредственно предшествующих разрушению образцов грунта.

Испытания проводились на приборе трехосного сжатия в камере типа А фирмы ООО «НПП «Геотек». Заданные параметры и полученные данные обрабатывались с помощью программного комплекса «АСИС». Образцы имели форму цилиндра высотой 76 мм и радиусом 19 мм.

Основная часть

Для исследования развития пластических деформаций были изготовлены образцы грунта: песка, глины, песка, армированного полипропиленовым волокном. Испытания проводились по консолидировано-дренированной схеме. Критерием разрушения из-за кон-

структивных особенностей прибора была задана максимальная относительная вертикальная деформация 20 %. Характеристики образцов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики образцов грунта

Table 1

Properties of soil specimens

<i>Глина</i>	
Показатель текучести I_L	0,7
Число пластичности I_p	22,5
Влажность w , %	39
Плотность грунта ρ , г/см ³	1,845
Плотность в сухом состоянии ρ_d , г/см ³	1,33
Удельный вес грунта γ , кН/м ³	18,1
По числу пластичности по ГОСТ 25100–2011	легкая пылеватая глина
По показателю текучести по ГОСТ 25100–2011	мягкопластичные суглинки и глины
<i>Песок</i>	
По гранулометрическому составу по ГОСТ 25100–2011	песок пылеватый
По однородности по ГОСТ 25100–2011	песок однородный
Плотность в сухом состоянии ρ_d , г/см ³	1,6
Плотность грунта ρ , г/см ³	2
Удельный вес грунта γ , кН/м ³	19,6
<i>Песок, армированный полипропиленовым волокном</i>	
По гранулометрическому составу по ГОСТ 25100–2011	песок пылеватый
По однородности по ГОСТ 25100–2011	песок однородный
Длина волокна полипропиленового, мм	12
Диаметр волокна полипропиленового, мкм	20
Расход волокон, %	0,93
Прочность на растяжение волокон, МПа	170–260
Удлинение волокна до разрыва, %	150–250

Трехосные испытания проводились в кинематическом и статическом режимах, кинематические – с заданной скоростью деформирования и статические – ступенями по 50 кПа. Гидростатическое обжатие во всех испытания было принято 100 кПа.

Формирование образцов из пылеватого песка и песка с фиброй производилось путем сухой послойной отсыпки. Образцы испытывались в полностью водонасыщенном состоянии.

Для образцов из глины предварительно были определены физические характеристики, после чего грунт высушивался в сушильном шкафу при постоянной температуре 105 °С. Высушенная глинистая паста дробилась, просеивалась и снова помещалась в сушильный шкаф. Воздушно-сухой грунт взвешивался. В отобранную пробу вводилось в несколько приемов рассчитанное количество воды. Грунтом заполнялась форма, после чего с помощью выталкивателя образец извлекался. Производились замеры его высоты и диаметра. Торцы покрывались влажными бумажными фильтрами [6]. С помощью формы-шаблона образец помещался в латексную оболочку и устанавливался на пьедестал камеры трехосного сжатия.

Были проведены трехосные испытания образцов для определения прочностных характеристик [7], результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Прочностные характеристики образцов по результатам испытаний трехосного сжатия

Table 2

Strength characteristics of the specimens based on the results of the triaxial compression test

Образец	Угол внутреннего трения, град	Сцепление, кПа
Глина мягкопластичная	4	27
Песок	36	12
Песок, армированный полипропиленовым волокном	46	56

Результаты трехосного сжатия образцов показывают, что образец из песка в стадии гидростатического обжатия получает значительное дополнительное уплотнение.

Образец из песка, армированного произвольно ориентированными волокнами из полипропилена, обладает существенно большей несущей способностью [8–9], и графики (рис. 1, 2) аппроксимируются линейной функцией, с близкой к единице величиной достоверности аппроксимации. Это говорит о том, что заданная максимальная вертикальная относительная деформация 20 % недостаточна для разрушения образцов фибропеска.

На начальном участке диаграммы (см. рис. 2) песок имеет меньшие вертикальные деформации, чем армированный полипропиленовой фиброй песок, что уже отмечалось в работе А.С. Кузнецовой [10].

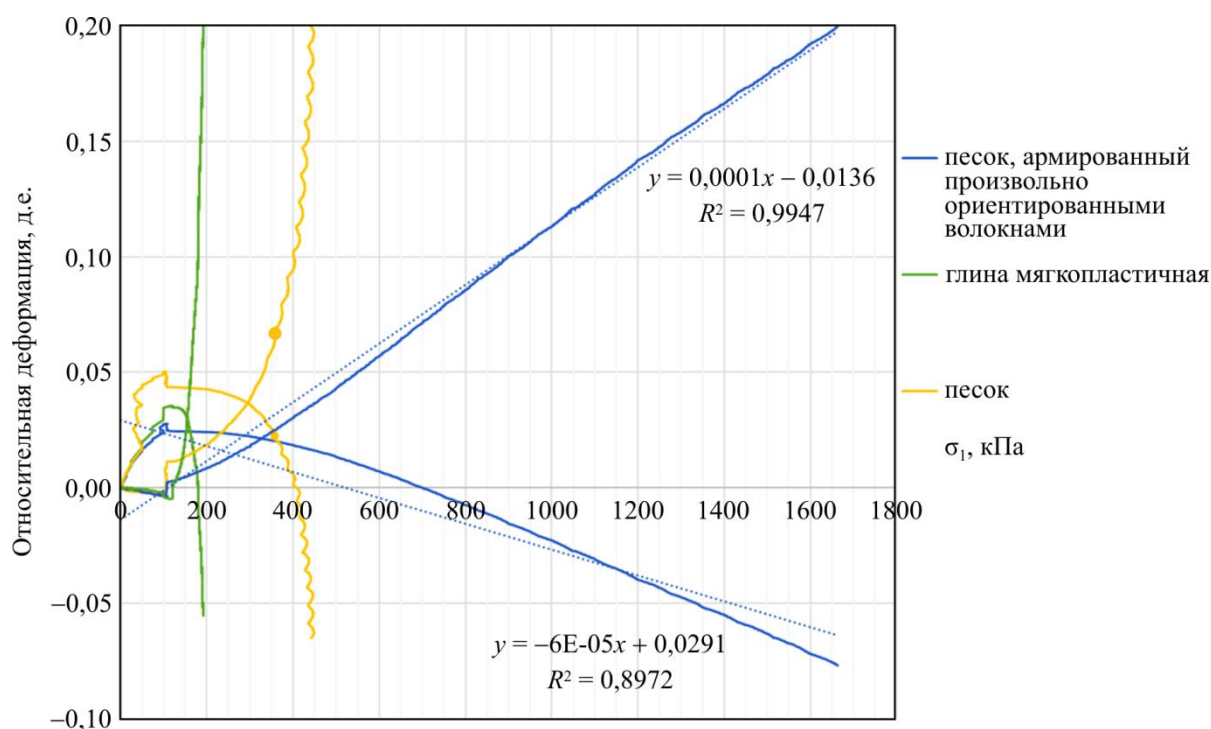


Рис. 1. График зависимости относительных деформаций от вертикальной нагрузки при боковом давлении 100 кПа при кинематическом нагружении образцов грунта: кривые, направленные в сторону отрицательных значений, отображают относительную горизонтальную деформацию ε_3 ; кривые, направленные в сторону положительных значений, отображают относительную вертикальную деформацию ε_1
Fig. 1. Graph of dependence of relative deformations from vertical press at lateral pressure of 100 kPa at kinematic loading of soil specimens: curves directed towards negative values represent relative horizontal deformation ε_3 ; curves directed towards positive values represent relative vertical deformation ε_1

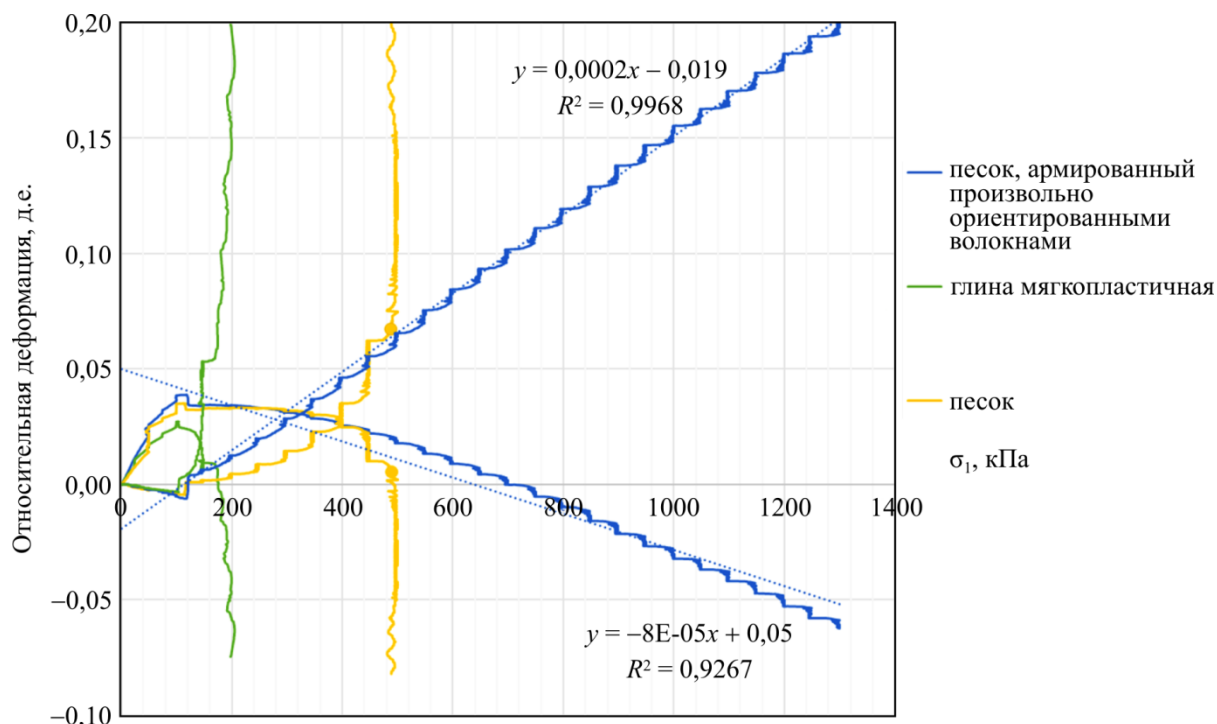


Рис. 2. График зависимости относительных деформаций от вертикальной нагрузки при боковом давлении 100 кПа при статическом нагружении ступенями 50 кПа: кривые, направленные в сторону отрицательных значений, отображают относительную горизонтальную деформацию ε_3 ; кривые, направленные в сторону положительных значений, отображают относительную вертикальную деформацию ε_1
Fig. 2. Graph of relation of relative deformations from vertical press at lateral pressure of 100 kPa under static load steps of 50 kPa: curves directed towards negative values represent relative horizontal deformation ε_3 ; curves directed towards positive values represent relative vertical deformation ε_1

Характеристический порог, при котором наблюдается переход сжатия образца к его расширению, отмечен на графиках закрашенным кружком. В этот момент объем песчаного грунта минимален. После преодоления характеристического порога в песчаном грунте начинает развиваться явление дилатансии.

Образцы из песка, армированного полипропиленовыми волокнами, при достижении 20 % относительной вертикальной деформации не достигли предела текучести. Для образцов из неармированного песка и глины ярко выражены фазы, названные фазами уплотнения и значительных сдвигов. Фаза уплотнения и локальных сдвигов характеризуется близкой к линейной зависимостью между напряжениями и деформациями, быстрым затуханием деформаций. Фаза значительных сдвигов – такое напряженное состояние, при котором развиваются значительные пластические деформации и прогрессирующее течение. В этой фазе вертикальные и горизонтальные деформации нарастают практически при постоянной нагрузке [11]. Для кинематического нагружения образцов из песка переход ко второй фазе происходит при приложении вертикальной нагрузки 350 кПа, а для глины – менее 150 кПа. Для нагружения ступенями по 50 кПа образцов из песка значительные сдвиги и прогрессирующее течение развивается при приложении вертикальной нагрузки 500 кПа, а для глины – более 150 кПа.

Анализируя данные графиков (см. рис. 1, 2), можно говорить о том, что для глины и неармированного песка при непрерывном деформировании значение боковой деформации и максимального вертикального давления меньше, чем при приложении ступенча-

той нагрузки, а для песка, содержащего полипропиленовые волокна, эта зависимость обратная.

Для более разностороннего описания результатов испытаний были построены диаграммы (рис. 3, 4) в координатах «среднее нормальное напряжение σ_m – объемная деформация ε_v » и «интенсивность касательных напряжений τ_i – интенсивность сдвиговых деформаций γ_i ».

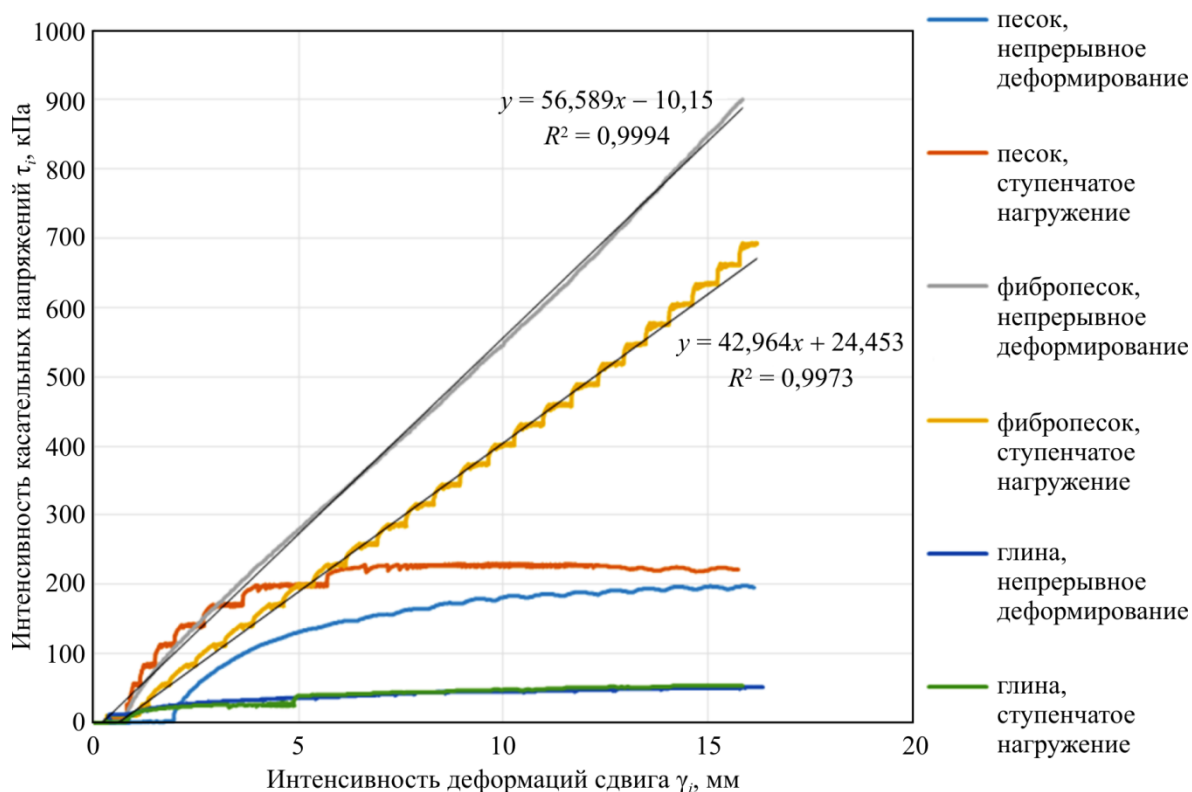


Рис. 3. График зависимости интенсивности касательных напряжений от интенсивности сдвиговых деформаций при боковом давлении 100 кПа

Fig. 3. The graph of relation of the intensity of the tangential stresses on the intensity of shear deformation at lateral pressure of 100 kPa

Среднее нормальное напряжение, интенсивность касательных напряжений и интенсивность сдвиговых деформаций определяются по формулам [12–14]:

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3}, \quad (1)$$

$$\tau_i = \sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (2)$$

$$\gamma_i = \sqrt{\frac{2}{3}[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]}, \quad (3)$$

где σ_1 – вертикальное нормальное напряжение, кПа; $\sigma_2 = \sigma_3$ – боковое нормальное напряжение, кПа; ε_1 – вертикальная деформация; $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ – боковая деформация [6–8].

На графике (см. рис. 3) для испытаний фибропеска проведено аппроксимирование прямой с высокой достоверностью аппроксимации, это говорит о том, что зависимость между интенсивностями касательных напряжений и деформаций сдвига близка к линейной функции. Для испытаний песка заметно выравнивание интенсивностей касательных напряжений с увеличением нагрузки (см. рис. 3).

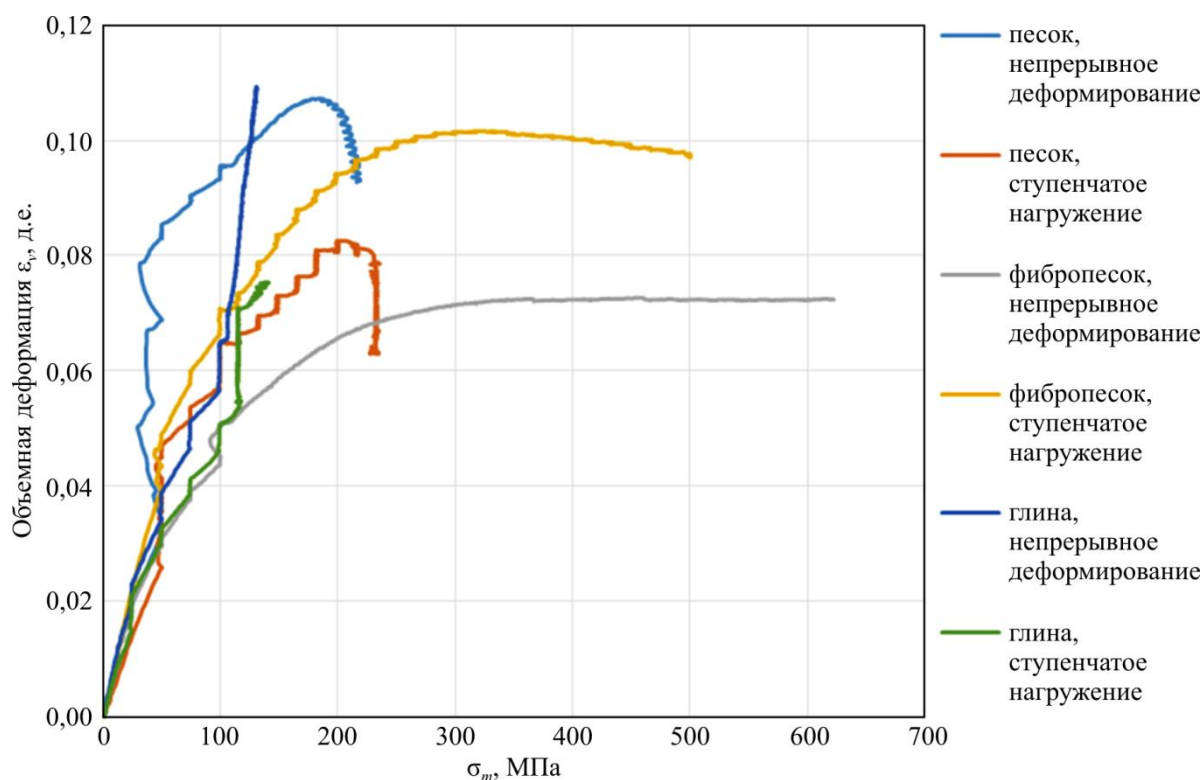


Рис. 4. График зависимости объемной деформации (сжатие принято положительным) от среднего нормального напряжения при боковом давлении 100 кПа

Fig. 4. The graph of relation of volumetric deformation (compression is positive) on the average normal stress at a lateral pressure of 100 kPa

По кривым (см. рис. 1, 2) для статического и кинематического нагружения песка видно, что существует порог напряжений, после которого проявляется дилатансия, т.е. до определенного момента происходит сжатие, а потом расширение образца. У армированного песка с этого момента вплоть до относительной вертикальной деформации 20 % развивается деформационное упрочнение.

Для описания эффекта дилатансии обычно используется величина – угол дилатансии, которая представляет собой отношение объемной деформации при сдвиге к деформации сдвига [15]. Для условий плоской деформации угол можно определить из выражения [16]

$$\sin \psi = \left(-\frac{d\varepsilon_1 + d\varepsilon_3}{d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3} \right). \quad (4)$$

Данные по результатам испытаний и углы дилатансии, определенные по формуле (4), представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний образцов грунта

Table 3

Test results of soil specimens

Испытание	Максимальная относительная горизонтальная деформация ϵ_z , %	Углы дилатансии, град
<i>Глина мягкопластичная</i>		
Непрерывное деформирование	5,5	13,5
Статическое нагружение ступенями по 50 кПа	7,5	13
<i>Песок пылеватый</i>		
Непрерывное деформирование	6,5	9
Статическое нагружение ступенями по 50 кПа	8,2	11
<i>Песок, армированный произвольно ориентированными волокнами полипропилена</i>		
Непрерывное деформирование	7,7	12
Статическое нагружение ступенями по 50 кПа	6,2	11,5

Заключение

На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Образцы из неармированного песка были разрушены при вертикальной нагрузке 445 и 500 кПа, а из глины – 192 и 205 кПа.
2. Вертикальная нагрузка в испытаниях с песком, армированным полипропиленовым волокном, была доведена до 1660 кПа для кинематического нагружения и 1300 кПа для статического нагружения, но разрушения достичь не удалось в связи с возможностями прибора трехосного сжатия.
3. Для кинематического нагружения образцов из песка переход к фазе значительных сдвигов происходит при приложении вертикальной нагрузки 350 кПа, а для глины – менее 150 кПа. Для нагружения ступенями по 50 кПа образцов из песка значительные сдвиги и прогрессирующее течение происходит при приложении вертикальной нагрузки 500 кПа, а для глины – более 150 кПа.
4. В армированных образцах развивается мобилизованная прочность на растяжение, что приводит к выраженному деформационному упрочнению. До относительной деформации 20 % напряженно-деформированное состояние армированного песка развивается практически по линейному закону.
5. При испытаниях образцов из песчаного грунта зафиксирован характеристический порог, при котором наблюдается переход сжатия образца к его расширению. В этот момент объем песчаного грунта минимален. После преодоления характеристического порога в песчаном грунте начинает развиваться явление дилатансии, а образец начинает разрушаться.
6. Характеристики, полученные в экспериментальных исследованиях, будут использованы при численном моделировании напряженно-деформированного состояния грунтов.

Библиографический список

1. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общей ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. – М.: Изд-во АСВ, 2014. – 728 с.

2. Ухов С.Б., Семенов В.В. Механика грунтов, основания и фундаменты. – М.: Изд-во АСВ, 1994.
3. Ishibashi I., Hazarika H. Soil Mechanics. Fundamentals and Applications. 2nd ed. – CRC Press, 2015. – 420 p.
4. Болдырев Г.Г., Малышев М.В. Механика грунтов. Основания и фундаменты (в вопросах и ответах): учеб пособие. – Пенза: ПГУАС, 2009. – 412 с.
5. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений: учеб. для гидро-техн. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1985. – 352 с.
6. Кузнецова А.С., Пономарев А.Б. Планирование и подготовка эксперимента трехосного сжатия глинистого грунта, улучшенного фибровым армированием // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 1. – С. 151–161.
7. Сипидин В.П., Сидоров Н.Н. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия. – М.: Гос. изд-во лит. по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963.
8. Diambra A., Ibraim E. Fibre reinforced sands: experiments and modeling // Geotextiles and Geomembranes. – 2010. – № 28. – С. 238–250.
9. Офрихтер В.Г., Офрихтер Я.В. Результаты компрессионных испытаний псевдосвязного грунта // Вестник МГСУ. – 2015. – № 9. – С. 61–72.
10. Кузнецова А.С., Офрихтер В.Г., Пономарев А.Б. Исследование прочностных характеристик песка, армированного дискретными волокнами полипропилена // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2012. – № 1. – С. 44–55.
11. Шапиро Д.М. Теория и расчетные модели оснований и объектов геотехники: моногр. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2012. – 164 с.
12. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса: монография. – Пенза: ПГУАС, 2008. – 696 с.
13. Бурлаков В.Н., Тер-Мартirosян А.З. Дилатансия, влияние на деформируемость грунтов // Вестник МГСУ. – 2010. – № 4. – С. 182–193.
14. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов: учеб. пособие для строительных вузов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
15. Безматерных А.В., Офрихтер В.Г. Явление дилатансии и его влияние на характер деформирования грунтов под нагрузкой // Master's Journal. – 2017. – № 2. – С. 85–90.
16. Bolton M.D. The strength and dilatancy of sand // Geotechnique 36. – № 1. – P. 65–78.

References

1. Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenti i podzemnye sooruzheniya [Directory geotechnics. Bases, foundations and underground structures]. Eds. V.A. Il'ichev, R.A. Mangushev. Moscow, ASV, 2014, 728 p.
2. Ukhov S.B., Semenov V.V. Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenti [Soil mechanics, bases and foundations]. Moscow, ASV, 1994.
3. Ishibashi I., Hazarika H. Soil Mechanics. Fundamentals and Applications. 2nd ed. CRC Press, 2015, 420 p.
4. Boldyrev G.G., Malyshev M.V. Mekhanika gruntov. Osnovaniia i fundamenti (v voprosakh i otvetakh) [Soil mechanics. Bases and foundations (in questions and answers)]. Penza, PGUAS, 2009, 412 p.

5. Ivanov P.L., Grunty i osnovaniia gidrotekhnicheskikh sooruzhenii [Soils and foundations of hydraulic structures]. Moscow, Vysshaia shkola, 1985, 352 p.
6. Kuznetsova A.S., Ponomarev A.B. Planirovanie i podgotovka eksperimenta trekhosnogo szhatiia glinistogo grunta, uluchshennogo fibrovym armirovaniem [Experimental design and triaxial test preparation of clay soils treated by fiber reinforcement]. *Vestnik Permskogo natsional'no issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2013, no. 1, pp. 151-161.
7. Sipidin V.P., Sidorov N.N. Issledovanie gruntov v usloviakh trekhosnogo szhatiia [The study of soils under conditions of triaxial compression]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, arkhitekture i stroitel'nym materialam, 1963.
8. Diambra A., Ibraim E. Fibre reinforced sands: experiments and modeling. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, no. 28, pp. 238–250.
9. Ofrikhter V.G., Ofrikhter Ia.V. Rezul'taty kompressionnykh ispytanii psevdosviaznogo grunta [Results of compression testing on pseudo-cohesive soil]. *Vestnik MGSU*, 2015, no. 9, pp. 61-72.
10. Kuznetsova A.S., Ofrikhter V.G., Ponomarev A.B. Issledovanie prochnostnykh kharakteristik peska, armirovannogo diskretnymi voloknami polipropilena [Strength research of sand reinforced by discrete polypropylene fibres]. *Vestnik Permskogo natsional'no issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2012, no. 1, pp. 44-55.
11. Shapiro D.M. Teoriia i raschetnye modeli osnovanii i ob'ektov geotekhniki [Theory and computational models of geotechnical bases and objects]. Voronezh, Nauchnaia kniga, 2012, 164 p.
12. Boldyrev G.G. Metody opredeleniia mekhanicheskikh svoistv gruntov. Sostoianie voprosa [Methods for determining the mechanical properties of soils. The state of the question]. Penza, PGUAS, 2008, 696 p.
13. Burlakov V.N., Ter-Martirosian A.Z. Dilatansiia, vliianie na deformiruemost' gruntov [Dilatancy, influence on the deformability of soils]. *Vestnik MGSU*, 2010, no. 4, pp. 182-193.
14. Vialov S.S. Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov [Rheological fundamentals of soil mechanics]. Moscow, Vysshaia shkola, 1978, 447 p.
15. Bezmaternykh A.V., Ofrikhter V.G. Iavlenie dilatansii i ego vliianie na kharakter deformirovaniia gruntov pod nagruzkoi [The phenomenon of dilatancy and its impact on the nature of deformation of soil under load]. *Master's Journal*, 2017, no. 2, pp. 85-90.
16. Bolton M.D. The strength and dilatancy of sand. *Geotechnique* 36, no. 1, pp. 65-78.