

Влияние коэффициента неравномерности расширения грунтового образца на механические характеристики

Армен Завенович Тер-Мартirosян¹, Георгий Олегович Анжело¹,
Любовь Юрьевна Ермошина¹, Илья Алексеевич Боков¹,
Артур Ванушевич Манукян²

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

² Концерн МонАрх; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Наиболее распространенным методом определения механических характеристик грунта является испытание в приборе трехосного сжатия. Данный вид испытаний широко используется в прикладных и научных целях, и описан в работах как отечественных, так и зарубежных авторов, а также в нормативно-технической документации. Однако в рамках научных работ различных авторов коэффициент неравномерности расширения грунтового образца при трехосных испытаниях зачастую остается без должного внимания и не учитывается при обработке результатов испытаний. В существующих актуальных нормативно-технических документах, таких как ГОСТ 12248.3–2020, учет коэффициента неравномерности расширения образца грунта при трехосном сжатии b носит рекомендательный характер.

Материалы и методы. Проведены экспериментальные исследования методом трехосного сжатия на образцах песчаного грунта различного гранулометрического состава с целью определения его механических характеристик с использованием двух различных методик обработки результатов лабораторных испытаний — с учетом коэффициента неравномерности расширения грунтового образца и без его учета.

Результаты. По результатам выполненных экспериментальных исследований получено, что исключение из процесса обработки результатов лабораторных испытаний коэффициента нелинейности расширения b приводит к значительному завышению значений угла внутреннего трения. Однако значения секущего модуля деформации при 50%-ной прочности E_{50} при исключении из процесса обработки коэффициента нелинейности расширения стали ниже в среднем на 7,7 %.

Выводы. Анализируя полученные результаты, а также учитывая различные факторы, влияющие на результаты исследования (плотность, влажность и т.д.), требуется проведение дополнительных лабораторных испытаний с целью дальнейшего уточнения корреляционных зависимостей при определении прочностных и деформационных характеристик песчаных грунтов с учетом и без учета коэффициента b .

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: лабораторные испытания, трехосное сжатие, песок, прочностные характеристики, деформационные характеристики, коэффициент неравномерности расширения образца грунта при трехосном сжатии

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тер-Мартirosян А.З., Анжело Г.О., Ермошина Л.Ю., Боков И.А., Манукян А.В. Влияние коэффициента неравномерности расширения грунтового образца на механические характеристики // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 10. С. 1574–1586. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1574-1586

Автор, ответственный за переписку: Илья Алексеевич Боков, ilililila@yandex.ru.

Influence of the coefficient of non-uniform expansion of the soil sample on mechanical characteristics

Armen Z. Ter-Martirosyan¹, Georgiy O. Anzhelo¹, Lyubov Yu. Ermoshina¹,
Ilya A. Bokov¹, Artur V. Manukyan²

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation;

² Concern MonArch; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The most common method of determining the mechanical characteristics of the soil is triaxial compression testing. This type of testing is widely used both for applied and scientific purposes, and is described in the works of both domestic and foreign authors, as well as in regulatory and technical documentation. However, within the framework of scientific works by various authors, the coefficient of uneven expansion of a soil sample during triaxial tests is often neglected and is not taken into account when processing the test results. In the existing current regulatory and technical documents, such as GOST 12248.3–2020, consideration of the coefficient of uneven expansion of the soil sample under triaxial compression b is of a recommendatory nature.

Materials and methods. Within the framework of the work, experimental studies by the triaxial compression method were carried out on sandy soil samples of different granulometric composition in order to determine its mechanical characteristics using two different methods of processing laboratory test results — taking into account the coefficient of uneven expansion of the soil sample and without it.

Results. According to the results of the performed experimental studies, it was found that the exclusion of the expansion non-linearity coefficient b from the processing of laboratory test results leads to a significant overestimation of the values of the internal friction angle. However, the values of secant modulus of deformation at 50 % strength E_{50} are lower by an average of 7.7 % when the nonlinear expansion coefficient of the steel is excluded from the processing.

Conclusions. Analyzing the results obtained, as well as taking into account various factors influencing the results of the study (density, humidity, etc.), additional laboratory tests are required in order to further clarify the correlation dependencies in determining the strength and deformation characteristics of sandy soils, with and without taking into account the coefficient b .

KEYWORDS: laboratory tests, triaxial compression, sand, strength characteristics, deformation characteristics, coefficient of uneven expansion of the soil sample under triaxial compression

FOR CITATION: Ter-Martirosyan A.Z., Anzhelo G.O., Ermoshina L.Yu., Bokov I.A., Manukyan A.V. Influence of the coefficient of non-uniform expansion of the soil sample on mechanical characteristics. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(10):1574-1586. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1574-1586 (rus.).

Corresponding author: Ilia A. Bokov, ilialia@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Для проектирования и расчетов сооружений необходимо исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового массива с последующим определением его механических (прочностных и деформационных) характеристик. Точность установления механических характеристик оказывает значительное влияние на все этапы разработки проекта.

На данный момент существует достаточно большое количество приборов различных производителей, предназначенных для определения механических характеристик грунта. Так, в лабораторных условиях испытания проводятся в приборах одноплоскостного среза (прочностные характеристики), приборах компрессионного сжатия (деформационные характеристики) и в приборах трехосного сжатия с возможностью бокового расширения образца (прочностные и деформационные характеристики). Наиболее точным из описанных выше методов определения механических характеристик грунта является испытание в приборе трехосного сжатия. Данная методика позволяет с наибольшей достоверностью среди существующих методов воспроизвести НДС грунтового массива, а соответственно наиболее точно определить механические характеристики грунта. Трехосные испытания находят применение в различных сферах: от строительства до сельского хозяйства. В этом можно убедиться, рассмотрев результаты исследований, представленные в научно-технической литературе.

Работа [1] посвящена трехосным испытаниям в крупномасштабном приборе трехосного сжатия с диаметром образцов 300 мм и высотой 600 мм. В рамках исследования формируется методика проведения испытаний в крупномасштабной установке трехосного сжатия. Большое внимание уделяется точности определяемых во время испытания характеристик, а также погрешностям, которые могут возникать в меру масштаба образца.

Неоднородность состава, различная степень окатанности частиц, количество и качество заполнителя в образцах не позволяют однозначно судить о механических характеристиках крупнообломочного грунта с дисперсным заполнителем. Выполнение испытаний в регионах, где использование крупнообломочного грунта обуславливается необходимостью возведения гидротехнических сооружений, зачастую невозможно в связи с трудоемкостью выполнения испытаний в поле (срез целиков), дороговизной и отсутствием приборов необходимых масштабов для исследований методом трехосного сжатия. В рамках исследования [2] трехосные испытания выполнялись на крупномасштабной установке трехосного сжатия для установления механических характеристик крупнообломочного грунта с дисперсным заполнителем с последующим составлением зависимостей, позволяющих принять расчетные характеристики в первом приближении в зависимости от ряда параметров.

В труде [3] проводится анализ коралловой глины с точки зрения геотехнических свойств. Устанавливались зависимости механических характеристик, получаемых с помощью трехосных испытаний, от химического и гранулометрического состава коралловой глины с определением содержания кораллового песка и ила в составе глины.

Были выполнены испытания в приборах трехосного сжатия по консолидированно-дренированной (КД) схеме на образцах песчаного грунта различной крупности и плотности [4]. По результатам выполненных исследований получена эмпирическая зависимость, позволяющая оценить начальный модуль деформации при имеющемся значении секущего модуля деформации.

В настоящее время многие здания и сооружения возводятся с развитой подземной частью, основанием для которых служат голубые (серые) глины. Возможное замачивание грунта основания атмосферными осадками во время строительства может вызвать изменение механических характеристик

грунта относительно принятых расчетных значений. Рассматривается влияние влажности образца глинистого грунта на его механические характеристики [5].

С целью определения механических характеристик кинетического песка в работе [6] выполнены испытания в приборах трехосного сжатия по неконсолидированно-недренированной схеме (НН), установления сопротивления недренированному сдвигу c_u и по КД, определения удельного сцепления c , угла внутреннего трения ϕ и модуля деформации E .

Для установления влияния температуры на изменение порового давления, а также на физические (текучесть) и механические характеристики глубоководной глины, извлеченной из Южно-Китайского моря, выполнены [7] трехосные испытания в отсутствии дренажа при различных температурах.

Определение механических характеристик грунта — необходимая процедура при моделировании НДС грунтового массива. В работе [8] рассматривается применимость использования метода прямого среза для параметризации грунтовых моделей, используемых в расчетах методами конечных элементов. Для установления возможности использования испытаний методом прямого среза результаты, полученные в срезовых приборах, сравнивают с результатами испытаний в приборах трехосного сжатия с последующим анализом.

Хорошо известно, что в образцах грунта при низком водонасыщении поверхность разрушения наиболее выражена и представляет собой характерную полосу, по которой происходит срез одной части образца относительно другой. В исследовании [9] проводятся трехосные испытания песка при низком водонасыщении с последующим рентгенографическим анализом состояния поверхности разрушения образца. С помощью рентгенографии устанавливают вариативность локальных коэффициентов пористости, число контактов частиц песка, развитие полосы сдвига.

Поскольку дробимость частиц оказывает значительное влияние на НДС сыпучего грунта, то в связи с этим в публикации [10] с помощью трехосных испытаний определялись зависимости НДС грунтового массива сыпучего грунта от степени дробления песчаных частиц. Испытания проводились на образцах кораллового песка с различным размером частиц в дренированных и недренированных условиях. После выполнения трехосных испытаний осуществлялось повторное определение гранулометрического состава. По результатам исследований была предложена математическая модель разрушения для сыпучих грунтов с учетом дробимости и возможности повторных нагружений, при которых дробимость будет оказывать особое влияние.

Уплотнение почвы, вызванное влиянием сельскохозяйственной техники, оказывает негативное влияние на плодородность данной почвы. В тру-

де [11] для установления механических характеристик почвы, используемой в сельскохозяйственных целях, выполнены трехосные испытания по НН схеме при различной влажности образцов испытываемой почвы. По результатам исследования получены зависимости механических характеристик от влажности, а также выполнено численное моделирование.

Для установления характера взаимодействия песка и геотекстиля (при армировании песка геотекстилем) и определения коэффициентов трения на границе раздела сред в работе [12] проводились трехосные испытания на образцах песка (с угловатыми и округлыми зернами), армированного геотекстилем различных типов и свойств. Получено, что песок округлой формы с уменьшенным шагом решетки геотекстиля позволяет эффективно мобилизовать трение на границе раздела грунт — геотекстиль. Эффективность трения при испытаниях методом трехосного сжатия достигается при соотношении шага решетки геотекстиля к среднему размеру фракции 1,9.

Лабораторные исследования методом трехосного сжатия получили широкое распространение при производстве инженерно-геологических испытаний для строительства инженерных сооружений различного уровня ответственности. Проведены трехосные испытания с целью составления методических указаний по практическому применению полученных характеристик грунтового массива для геоинформационной геотехнической базы данных г. Астаны [13].

При строительстве гидротехнических сооружений из грунтовых материалов актуальным является вопрос о получении достоверных механических характеристик крупнообломочного грунта. В свою очередь такое явление, как дилатансия, напрямую связано с прочностными и деформационными свойствами грунтов. Для определения угла дилатансии крупнообломочных грунтов [14] используется крупномасштабная установка трехосного сжатия. Данные исследования легли в основу лабораторных исследований, подтверждающих выдвинутые гипотезы о связи дилатансии с механическими характеристиками грунта.

Основными показателями, влияющими на механическое поведение кварцевого песка, служат плотность, эффективное давление, структура сложения образца в природных условиях. Данные параметры обобщаются [15] единой моделью на основе лабораторных исследований в приборе трехосного сжатия.

В связи с недостаточной изученностью вопроса зависимости дилатансии от напряжений проведены испытания [16] методом трехосного сжатия при различном водонасыщении образцов грунта. Получено, что увеличение значений прочностных характеристик при частичном водонасыщении согласуется с увеличением показателей дилатансии.

Стабилизация слабых грунтов, таких как лесс, является актуальной задачей при строительстве сооружений в сложных грунтовых условиях. Выполнены испытания [17] методом трехосного сжатия с целью определения прочностных характеристик лессового грунта при различном процентном содержании альбумина.

Для определения механических характеристик грунта при различной влажности [18] проведены испытания методом трехосного сжатия по НН схеме. Экспериментальные исследования были использованы для калибровки параметров в модели дискретных элементов.

В исследовании [19] выполнено моделирование КД трехосных испытаний песчаного грунта с помощью метода трехмерных дискретных элементов. Зерна песка моделировались с помощью кластеров частиц, состоящих из жестких сфер (сфер с точками контакта). При моделировании внимание уделялось распределению частиц в образце по диаметру, диапазону размера зерен, размеру образца, граничным условиям. Результаты численного моделирования были подтверждены экспериментальными исследованиями.

С целью определения влияния методики и качества подготовки образцов из песка, включая закрепление штампа в горизонтальной плоскости, проведены трехосные КД испытания [20].

При обработке результатов лабораторных испытаний, выполненных в приборе трехосного сжатия, необходимо учитывать множество факторов, таких как: поправка на упругие свойства оболочки к вертикальному напряжению, поправка на упругие свойства оболочки к горизонтальному напряжению, также требуется определять коэффициент неравномерности расширения образца грунта при трехосном сжатии и учитывать его значение при обработке результатов испытаний. В результате анализа научной-технической литературы [1–20] выявлено, что в рассмотренных работах в процессе обработки результатов лабораторных испытаний и непосредственного определения механических характеристик образцов грунта не упоминается о влиянии коэффициента неравномерности расширения образца грунта на полученные значения прочностных и деформационных характеристик. В существующих актуальных нормативно-технических документах, таких как ГОСТ 12248.3–2020 «Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия», учет коэффициента неравномерности расширения образца грунта при трехосном сжатии b носит рекомендательный характер. Также отсутствует информация о численном влиянии коэффициента неравномерности расширения образца b на получаемые механические характеристики для различных грунтов. Поскольку данный коэффициент оказывает влияние на получаемые механические характеристики грунта, в рам-

ках данной работы выполнена серия экспериментальных исследований в приборе трехосного сжатия на образцах песчаного грунта различного гранулометрического состава с последующей обработкой результатов с целью сравнения получаемых механических характеристик с учетом и без учета коэффициента неравномерности расширения образцов грунта и установления степени влияния коэффициента неравномерности расширения b , выраженной в процентном отношении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках данной работы проведены экспериментальные исследования методом трехосного сжатия на образцах песчаного грунта различного гранулометрического состава (ИГЭ-1 — песок мелкий, ИГЭ-2 — песок средней крупности, ИГЭ-3 — песок гравелистый) с целью установления его механических характеристик с использованием двух различных методик обработки результатов лабораторных испытаний.

Первая методика заключается в определении прочностных и деформационных характеристик дисперсного грунта с учетом коэффициента неравномерности расширения образца грунта при трехосном сжатии, в соответствии с рекомендациями приложения Е ГОСТ 12248.3–2020 «Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия».

Вторая методика основана на исключении из процесса обработки результатов лабораторных испытаний данного коэффициента с последующим сравнением, полученных по двум методам результатов, и установлением в процентном эквиваленте влияния коэффициента неравномерности расширения на механические характеристики песчаного грунта.

Трехосные испытания выполнялись при полном водонасыщении по консолидированно-дренированной схеме при плотности скелета грунта $\rho_d = 1,67 \text{ г/см}^3$ (ИГЭ-1) и $\rho_d = 1,64 \text{ г/см}^3$ (ИГЭ-2, ИГЭ-3).

Величины всестороннего обжатия принимались в зависимости от глубины отбора образца и составили: 130, 230 и 330 кПа (ИГЭ-1); 100, 200 и 300 кПа (ИГЭ-2, ИГЭ-3). После завершения консолидации проводилось кинематическое нагружение со скоростью 0,5 мм/мин. Испытание осуществлялось до достижения относительными вертикальными деформациями ϵ_v значения 18 % либо до разрушения образца. Каждое испытание проводилось на новой навеске песчаного грунта.

Для выполнения трехосных испытаний применялось сертифицированное и поверенное оборудование производства ООО НПП «Геотек». Общий вид прибора трехосного сжатия представлен на рис. 1.

По результатам обработки результатов трехосных испытаний были определены следующие меха-



Рис. 1. Общий вид прибора трехосного сжатия с камерой типа А

Fig. 1. General view of a triaxial compression device with a type A chamber

нические характеристики песчаного грунта: удельное сцепление c , кПа; угол внутреннего трения φ , град.; секущий модуль деформации при 50%-ной прочности E_{50} , МПа.

Прочностные характеристики песчаного грунта определялись по следующим формулам:

$$c = \frac{M}{2\sqrt{N}}; \quad (1)$$

$$\varphi = \arctg \frac{(N-1)}{2\sqrt{N}}; \quad (2)$$

$$N = \frac{n \sum \sigma'_{1f} \sigma'_{3f} - \sum \sigma'_{1f} \sum \sigma'_{3f}}{n \sum (\sigma'_{3f})^2 - (\sum \sigma'_{3f})^2}; \quad (3)$$

$$M = \frac{\sum \sigma'_{1f} (\sum \sigma'_{3f})^2 - \sum \sigma'_{3f} \sum \sigma'_{1f} \sigma'_{3f}}{n \sum (\sigma'_{3f})^2 - (\sum \sigma'_{3f})^2}. \quad (4)$$

Значение секущего модуля деформации при 50%-ной прочности E_{50} определяется по формуле:

$$E_{50} = \frac{q_{\max}}{2(\epsilon_1)_{50}}, \quad (5)$$

где q_{\max} — максимальный девиатор напряжений при разрушении образца, МПа; $(\epsilon_1)_{50}$ — значение ϵ_1 при $0,5q_{\max}$.

Девиатор напряжений q вычисляется по следующей формуле:

$$q = (\sigma_1 - \Delta\sigma_{1m}) - (\sigma_3 + \Delta\sigma_{3m}) = \frac{F - A_s \sigma_3}{A_i} 10 - \Delta\sigma_{1m} - \Delta\sigma_{3m} - \sigma_3, \quad (6)$$

где F — вертикальная нагрузка, кН; A_s — площадь поперечного сечения штока, см²; A_i — текущая площадь образца, определяемая прямым измерением или в соответствии с формулой (7); $\Delta\sigma_{1m}$ — поправка на упругие свойства оболочки к вертикальному

напряжению; $\Delta\sigma_{3m}$ — поправка на упругие свойства оболочки к горизонтальному напряжению.

Текущая площадь образца A_i для любого момента испытания определяется по формуле:

$$A_i = A \frac{1 - \epsilon_v}{1 - b\epsilon_1}, \quad (7)$$

где ϵ_v — относительная объемная деформация образца грунта; b — коэффициент нелинейности расширения грунтового образца; ϵ_1 — относительная вертикальная деформация.

Коэффициент нелинейности расширения образца грунта b при трехосных испытаниях определяется по следующей формуле:

$$b = \frac{1 - A_c/A_k}{\Delta h_k/h_c}, \quad (8)$$

где A_c — площадь поперечного сечения образца в конце этапа реконсолидации для НН испытаний и этапа консолидации для КН и КД испытаний, см²; A_k — площадь поперечного сечения в средней части образца после испытания, см²; Δh_k — полная деформация после испытания, см; h_c — высота образца в конце этапа реконсолидации для НН испытаний и этапа консолидации для КН и КД испытаний, см.

Общий вид образца песчаного грунта до и после испытания представлен на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид образца в камере трехосного сжатия: а — до испытания; б — после испытания

Fig. 2. General view of a sample in the triaxial compression chamber: a — before the test; b — after the test

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам выполненных трехосных испытаний построены графики зависимости относительных вертикальных деформаций от вертикального напряжения (рис. 3–5), также построены паспорта прочности (рис. 6–11) для каждого из трех видов песчаного грунта (ИГЭ-1, ИГЭ-2, ИГЭ-3). В табл. 1–6 представлены результаты обработки испытаний песчаного грунта по двум методикам. В табл. 7, 8 приведена сравнительная характеристика результатов

Табл. 1. Результаты испытаний для ИГЭ-1 по двум методикам

Table 1. Test results for IGE-1 using two methods

С учетом коэффициента b With coefficient b			Без учета коэффициента b Without coefficient b		
σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	E_{50} , кПа kPa	σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	E_{50} , кПа kPa
0,130	0,473	15,95	0,130	0,514	15,04

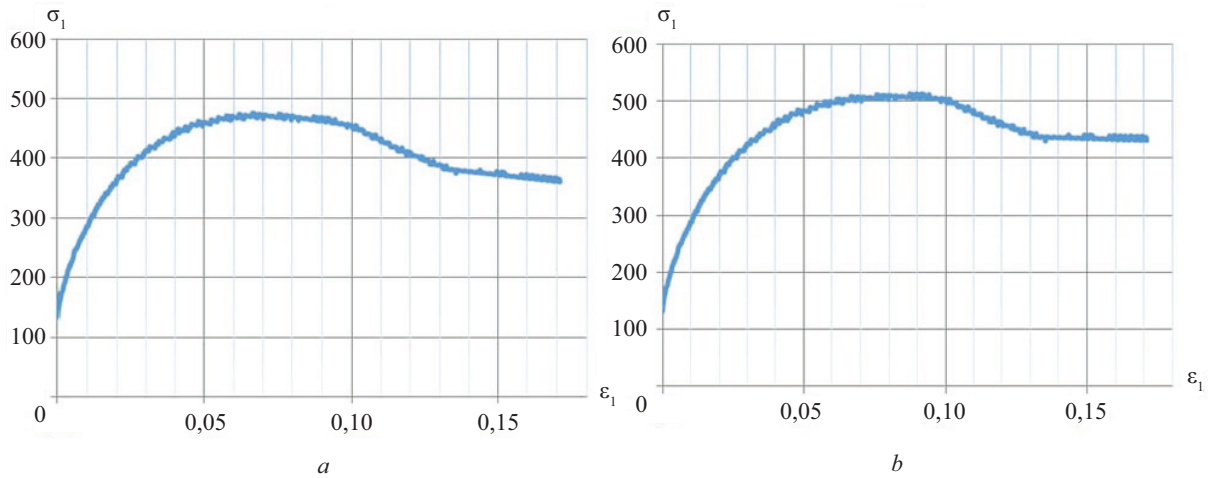


Рис. 3. График зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ_1 от вертикальных напряжений σ_1 для ИГЭ-1: a — с учетом коэффициента нелинейности расширения b ; b — без учета коэффициента нелинейности расширения b

Fig. 3. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ_1 on vertical stresses σ_1 for IGE-1: a — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b

Табл. 2. Результаты испытаний для ИГЭ-2 по двум методикам

Table 2. Test results for IGE-2 by two methods

С учетом коэффициента b With coefficient b			Без учета коэффициента b Without coefficient b		
σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	E_{50} , кПа kPa	σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	E_{50} , кПа kPa
0,100	0,368	15,50	0,100	0,406	14,36

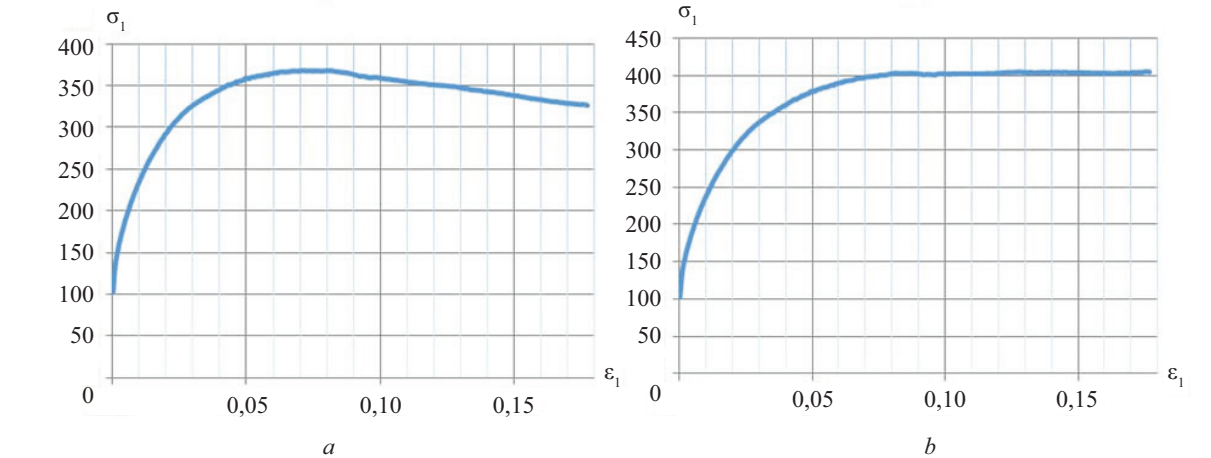


Рис. 4. График зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ_1 от вертикальных напряжений σ_1 для ИГЭ-2: a — с учетом коэффициента нелинейности расширения b ; b — без учета коэффициента нелинейности расширения b

Fig. 4. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ_1 on vertical stresses σ_1 for IGE-2: a — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b

Табл. 3. Результаты испытаний для ИГЭ-3 по двум методикам

Table 3. Test results for IGE-3 by two methods

С учетом коэффициента b With coefficient b			Без учета коэффициента b Without coefficient b		
σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	E_{50} , кПа kPa	σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	E_{50} , кПа kPa
0,100	0,351	6,24	0,100	0,442	5,81

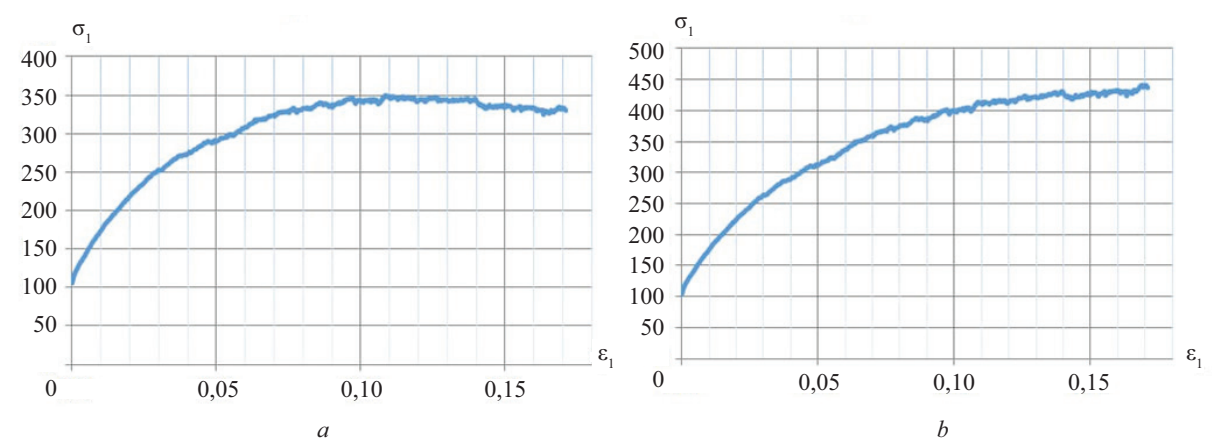


Рис. 5. График зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ_1 от вертикальных напряжений σ_1 для ИГЭ-3: a — с учетом коэффициента нелинейности расширения b ; b — без учета коэффициента нелинейности расширения b
Fig. 5. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ_1 on vertical stresses σ_1 for IGE-3: a — taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b

Табл. 4. Результаты испытаний для ИГЭ-1 по двум методикам

Table 4. Test results for IGE-1 using two methods

Без учета коэффициента b Without coefficient b				С учетом коэффициента b With coefficient b			
σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	φ°	C , кПа kPa	σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	φ°	C , кПа kPa
0,130	0,514	37,2	0	0,130	0,477	34,5	0,34
0,230	0,897			0,230	0,817		
0,330	1,368			0,330	1,198		

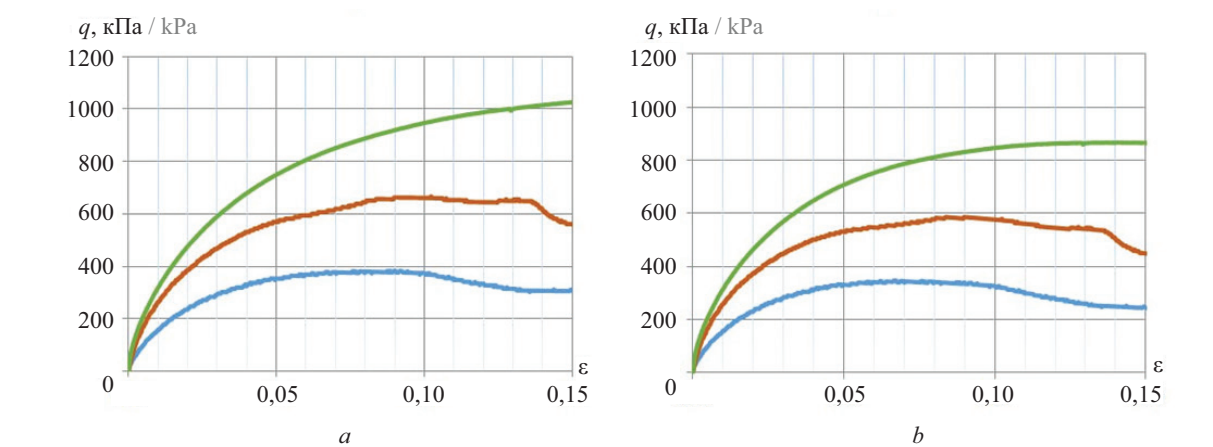


Рис. 6. График зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ от девиатора напряжений q для ИГЭ-1: a — без учета коэффициента нелинейности расширения b ; b — с учетом коэффициента нелинейности расширения b
Fig. 6. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ on the stress deviator q for IGE-1: a — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — taking into account the coefficient of nonlinearity of the expansion b

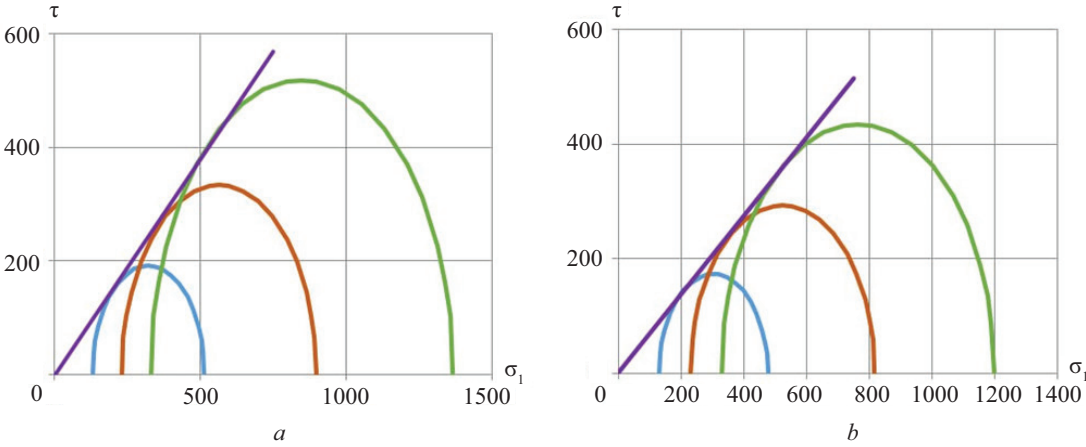


Рис. 7. Диаграмма Кулона – Мора для ИГЭ-1: *a* — без учета коэффициента нелинейности расширения *b*; *b* — с учетом коэффициента нелинейности расширения *b*
Fig. 7. Coulomb – Mohr diagram for IGE-1: *a* — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion *b*; *b* — taking into account the coefficient of nonlinearity of the expansion *b*

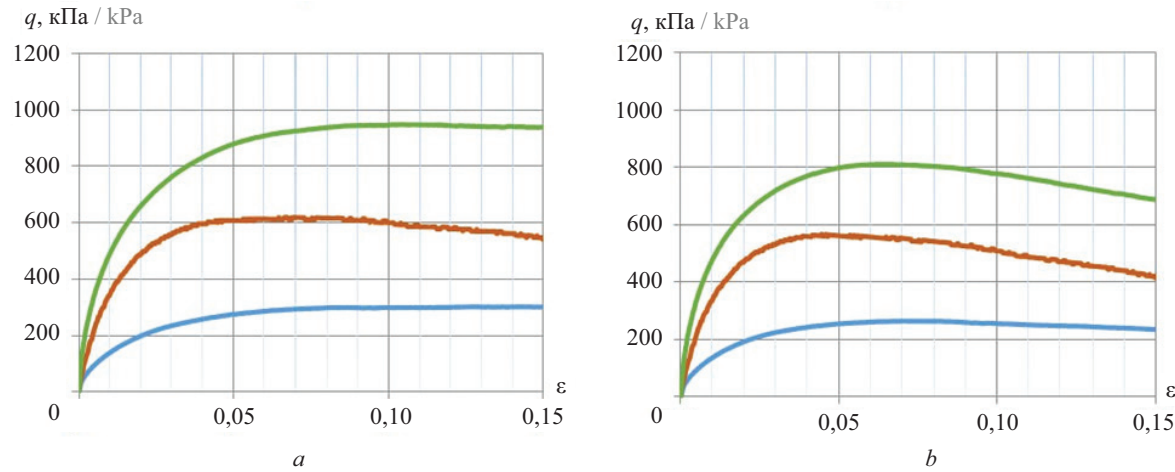


Рис. 8. График зависимости относительных вертикальных деформаций ε от девиатора напряжений q для ИГЭ-2: *a* — без учета коэффициента нелинейности расширения *b*; *b* — с учетом коэффициента нелинейности расширения *b*
Fig. 8. Graph of the dependence of relative vertical deformations ε on the stress deviator q for IGE-2: *a* — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion *b*; *b* — taking into account the coefficient of nonlinearity of the expansion *b*

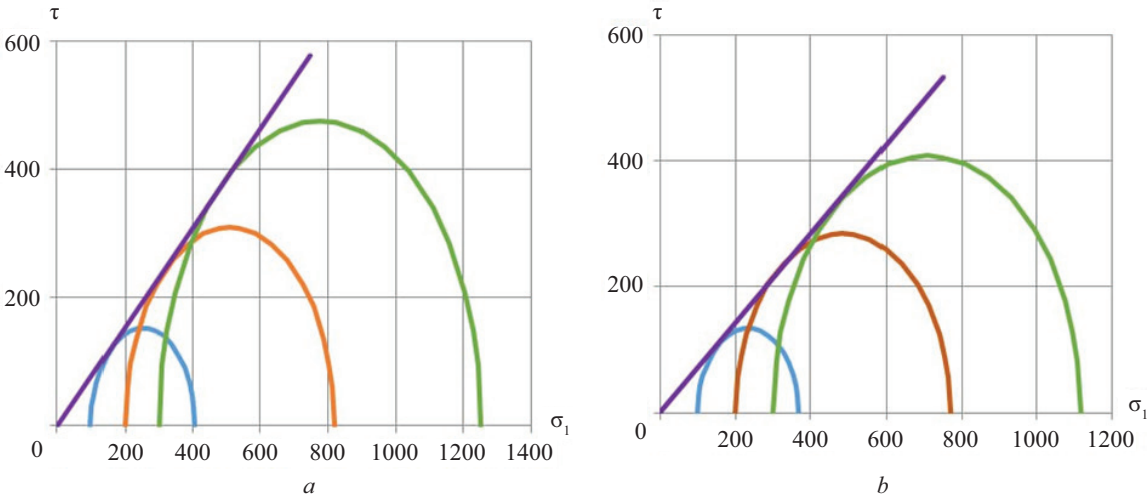


Рис. 9. Диаграмма Кулона – Мора для ИГЭ-2: *a* — без учета коэффициента нелинейности расширения *b*; *b* — с учетом коэффициента нелинейности расширения *b*
Fig. 9. Coulomb – Mohr diagram for IGE-2: *a* — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion *b*; *b* — taking into account the coefficient of nonlinearity of the expansion *b*

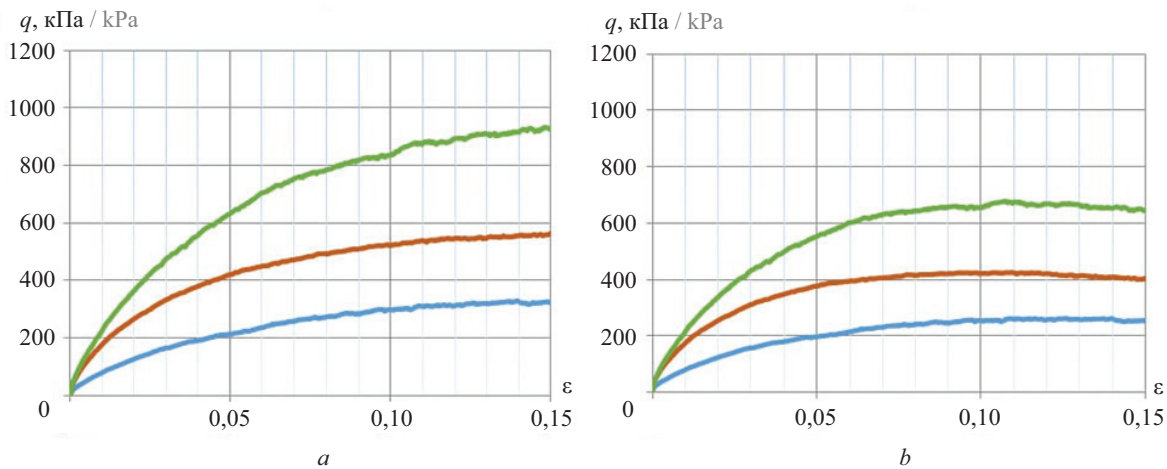


Рис. 10. График зависимости относительных вертикальных деформаций ϵ от девиатора напряжений q для ИГЭ-3: a — без учета коэффициента нелинейности расширения b ; b — с учетом коэффициента нелинейности расширения b
Fig. 10. Graph of the dependence of relative vertical deformations ϵ on the stress deviator q for IGE-3: a — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — taking into account the coefficient of nonlinearity of the expansion b

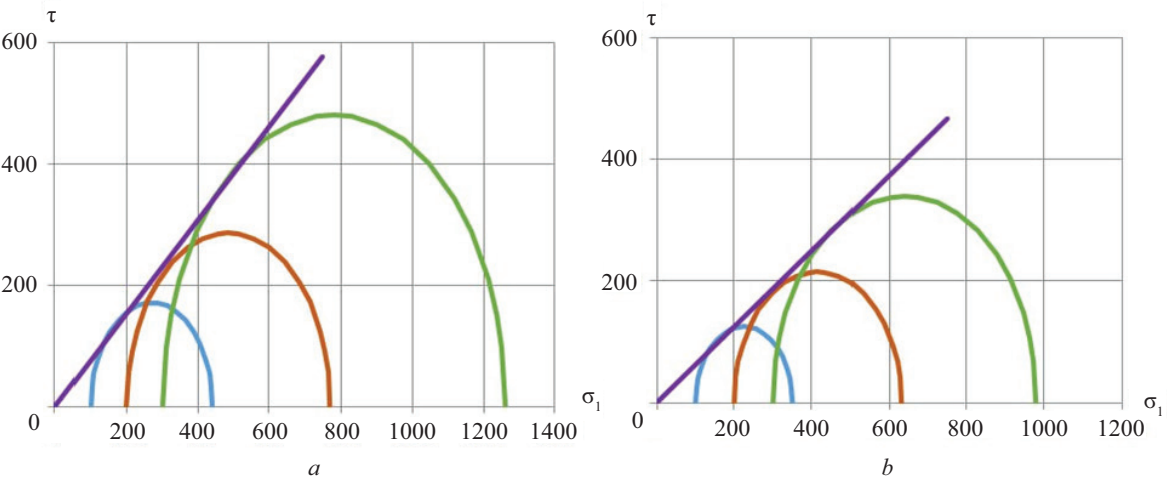


Рис. 11. Диаграмма Кулона – Мора для ИГЭ-3: a — без учета коэффициента нелинейности расширения b ; b — с учетом коэффициента нелинейности расширения b
Fig. 11. Coulomb – Mohr diagrams for IGE-3: a — without taking into account the coefficient of nonlinearity of expansion b ; b — taking into account the coefficient of nonlinearity of the expansion b

Табл. 5. Результаты испытаний для ИГЭ-2 по двум методикам

Без учета коэффициента b Without coefficient b				С учетом коэффициента b With coefficient b			
σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	φ°	C , кПа kPa	σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	φ°	C , кПа kPa
0,100	0,406	37,7	0	0,100	0,368	35,3	0,8
0,200	0,820			0,200	0,769		
0,300	1,252			0,300	1,116		

Табл. 6. Результаты испытаний для ИГЭ-3 по двум методикам

Table 6. Test results for IGE-3 using two methods

Без учета коэффициента b Without coefficient b				С учетом коэффициента b With coefficient b			
σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	φ°	C , кПа kPa	σ_3 , МПа MPa	σ_1 , МПа MPa	φ°	C , кПа kPa
0,100	0,442	37,6	0	0,100	0,351	32,0	0
0,200	0,772			0,200	0,631		
0,300	1,262			0,300	0,981		

Табл. 7. Прочностные характеристики песчаного грунта

Table 7. Strength characteristics of sandy soil

ИГЭ IGE	Тип, согласно гранулометрическому составу Type, according to particle size distribution	Угол внутреннего трения φ° Internal friction angle φ°		Удельное сцепление c , кПа Specific cohesion c , kPa	
		с учетом коэффициента b with coefficient b	без учета коэффициента b without coefficient b	с учетом коэффициента b with coefficient b	без учета коэффициента b without coefficient b
ИГЭ-1 IGE-1	Песок мелкий Fine sand	34,5	37,2	0,34	0
ИГЭ-2 IGE-2	Песок средней крупности Medium-sized sand	35,3	37,7	0,8	0
ИГЭ-3 IGE-3	Песок гравелистый Gravel sand	32,0	37,6	0	0

Табл. 8. Деформационные характеристики песчаного грунта

Table 8. Deformation characteristics of sandy soil

ИГЭ IGE	Тип, согласно гранулометрическому составу Type, according to particle size distribution	Секущий модуль деформации при 50%-ной прочности E_{50} , кПа Secant modulus of deformation at 50 % strength E_{50} , kPa	
		с учетом коэффициента b with coefficient b	без учета коэффициента b without coefficient b
ИГЭ-1 IGE-1	Песок мелкий Fine sand	15,77	15,04
ИГЭ-2 IGE-2	Песок средней крупности Medium-sized sand	15,50	14,36
ИГЭ-3 IGE-3	Песок гравелистый Gravel sand	6,24	5,81

трехосных испытаний, полученных путем обработки по двум методикам для каждого ИГЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных экспериментальных исследований можно сделать следующие основные выводы.

Исключение из процесса обработки результатов лабораторных испытаний коэффициента нелинейности расширения b приводит к существенно завышению значений угла внутреннего трения, а именно: для ИГЭ-1 (песок мелкий) — на 8 %, для ИГЭ-2 (песок средней крупности) — на 7 %, для ИГЭ-3 (песок гравелистый) — на 18 %, которое может ока-

зать непосредственное влияние при выборе и обосновании проектных решений.

Необходимо отметить, что значения секущего модуля деформации при 50%-ной прочности E_{50} при исключении из процесса обработки коэффициента нелинейности расширения стали ниже в среднем на 7,7 %, а именно: для ИГЭ-1 (песок мелкий) — на 6,4 %, для ИГЭ-2 (песок средней крупности) — на 7,5 %, для ИГЭ-3 (песок гравелистый) — на 9,2 %.

В частности, наибольшее влияние в процентном эквиваленте на получаемые в результате обработки трехосных испытаний прочностные характеристики песчаного грунта коэффициент b оказывает в случае, когда испытания проводятся на гравелистых песках.

Анализируя полученные результаты, а также учитывая различные факторы, влияющие на результаты исследования (плотность, влажность и т.д.), требуется проведение дополнительных лабораторных

испытаний с целью дальнейшего уточнения корреляционных зависимостей при определении прочностных и деформационных характеристик песчаных грунтов с учетом и без учета коэффициента b .

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мирный А.Ю., Тер-Мартirosян А.З. Определение механических характеристик крупнообломочных грунтов прямыми испытаниями в трехосном приборе // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сб. мат. Междунар. науч. конф. 2017. С. 937–941. EDN XSNIQV.

2. Ишмаев О.А., Филимонова Н.В. Результаты трехосных испытаний песков гравелистых в комплексе «АСИС» с диаметром образцов 100 мм // Известия Уральского государственного горного университета. 2022. № 2 (66). С. 89–95. DOI: 10.21440/2307-2091-2022-2-89-95 EDN XNCBJY.

3. Jiang C., Ding X., Chen X., Fang H., Zhang Y. Laboratory study on geotechnical characteristics of marine coral clay // Journal of Central South University. 2022. Vol. 29. Issue 2. Pp. 572–581. DOI: 10.1007/s11771-022-4900-5

4. Шулятьев О.А., Исаев О.Н., Шарафутдинов Р.Ф., Морозов В.С., Закатов Д.С. Лабораторные исследования влияния напряженного состояния на деформационные характеристики песчаных грунтов // Вестник НИЦ «Строительство». 2019. № 20 (1). С. 140–154. EDN YVTYXZ.

5. Королева И.В., Сагдатова М.Р. Экспериментальные исследования поведения серых глин в условиях трехосного сжатия при разной влажности // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 4 (50). С. 228–235. EDN EUGJOR.

6. Мамаева А.А., Клевеко В.И. Исследование характеристик кинетического песка с помощью установки трехосного сжатия // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2021. Т. 2. С. 48–54. EDN DZBZQE.

7. Sun A., Yang G., Yang Q., Qi M., Wang N., Ren Y. Experimental investigation of thermo-mechanical behaviors of deep-sea clay from the South China Sea // Applied Ocean Research. 2022. Vol. 119. P. 103015. DOI: 10.1016/j.apor.2021.103015

8. Steidel S., Jahnke J., Chang X., Becker A., Vrettos C. Triaxial compression and direct shear tests in the parametrization of soil modeled via the discrete element method // 7th edition of the International Conference on Particle-based Methods. 2021. DOI: 10.23967/particles.2021.013

9. Kido R., Higo Y. Distribution changes of grain contacts and menisci in shear band during triaxial compression test for unsaturated sand // Japanese Geotech-

nical Society Special Publication. 2019. Vol. 7. Issue 2. Pp. 627–635. DOI: 10.3208/jgssp.v07.096

10. Wang G., Wang Z., Ye Q., Zha J. Particle breakage evolution of coral sand using triaxial compression tests // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2021. Vol. 13. Issue 2. Pp. 321–334. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.06.010

11. Hernández-Hernández V.A., Joya-Cárdenas D.R., Equihua-Anguiano L.N., Leal-Vaca J.C., Diosdado-De la Peña J.A., Pérez-Moreno L. et al. Experimental and numerical analysis of triaxial compression test for a clay soil // Chilean Journal of Agricultural Research. 2021. Vol. 81. Issue 3. Pp. 357–367. DOI: 10.4067/S0718-58392021000300357

12. Markou I.N. A study on Geotextile — Sand interface behavior based on direct shear and triaxial compression tests // International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering. 2018. Vol. 4. Issue 1. DOI: 10.1007/s40891-017-0121-7

13. Tulebekova A., Zhussupbekov A., Zhumadilov I., Bukenbaeva D., Drozdova I. Laboratory tests of soils on triaxial compression apparatus // 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2020. Vol. 2019. Pp. 45–56.

14. Du J., Qiu Z. Experimental research on dilatancy characteristics of coarse-grained soils by triaxial compression test // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2011. Issue 1. P. 012067. DOI: 10.1088/1742-6596/2011/1/012067

15. Fern J., Soga K., Sakanoue T. Modelling the shear strength and dilatancy of dry sand in triaxial compression tests // Geomechanics from Micro to Macro. 2014. Pp. 673–678. DOI: 10.1201/b17395-120

16. Fern E.J., Robert D.J., Soga K. Modeling the stress-dilatancy relationship of unsaturated silica sand in triaxial compression tests // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2016. Vol. 142. Issue 11. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001546

17. Zarei C., Wang F., Qiu P., Fang P., Liu Y. Laboratory investigations on geotechnical characteristics of albumen treated loess soil // KSCE Journal of Civil Engineering. 2022. Vol. 26. Issue 2. Pp. 539–549. DOI: 10.1007/s12205-021-1723-0

18. Nandanwar M.R., Chen Y. Simulations of triaxial compression test for sandy loam soil using PFC3D // 2014 ASABE Annual International Meeting. 2014. DOI: 10.13031/aim.20141911030

19. Kozicki J., Tejchman J., Mühlhaus H. Discrete simulations of a triaxial compression test for sand by DEM // *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2014. Vol. 38. Issue 18. Pp. 1923–1952. DOI: 10.1002/nag.2285

20. Mozaffari M., Liu W., Ghafghazi M. Influence of specimen nonuniformity and end restraint conditions on drained triaxial compression test results in sand // *Canadian Geotechnical Journal*. 2022. Vol. 59. Issue 8. Pp. 1414–1426. DOI: 10.1139/cgj-2021-0505

Поступила в редакцию 20 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 23 июня 2023 г.

Одобрена для публикации 30 июля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Армен Завенович Тер-Мартirosян** — доктор технических наук, профессор, проректор, руководитель научно-образовательного центра «Геотехника»; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9467-5034, ORCID: 0000-0001-8787-826X, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017; gic-mgsu@mail.ru;

Георгий Олегович Анжело — кандидат технических наук; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; nocgeo@mail.ru;

Любовь Юрьевна Ермошина — аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; lyubov.ermoshina1801@mail.ru;

Илья Алексеевич Боков — студент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; iliililia@yandex.ru;

Артур Ванушевич Манукян — доктор технических наук; **Концерн МонАрх**; 125284, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 31А, стр. 1; a.manukyan@mon-arch.ru.

Вклад авторов:

Тер-Мартirosян А.З. — научное руководство.

Анжело Г.О. — концепция исследования, развитие методологии, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Ермошина Л.Ю. — концепция исследования, развитие методологии, написание статьи, обработка результатов испытаний, итоговые выводы.

Боков И.А. — проведение лабораторных испытаний, написание статьи, обработка результатов испытаний, доработка текста.

Манукян А.В. — научное руководство.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Mirny A.Yu., Ter-Martirosyan A.Z. Determination of the mechanical characteristics of coarse-elastic soils by direct tests in a three-axis device. *Integration, partnership and innovation in construction science and education : collection of materials of international scientific conference*. 2017; 937-941. EDN XSNIQV. (rus.).

2. Ishmaev O.A., Filimonova N.V. Results of three-axis tests of gravel sands in the complex “ASIS PRO” with a sample diameter of 100 mm. *Bulletin of the Ural State Mining University*. 2022; 2(66):89-95. DOI: 10.21440/2307-2091-2022-2-89-95. EDN XNCBJY. (rus.).

3. Jiang C., Ding X., Chen X., Fang H., Zhang Y. Laboratory study on geotechnical characteristics of marine coral clay. *Journal of Central South University*. 2022; 29(2):572-581. DOI: 10.1007/s11771-022-4900-5

4. Shuljatjev O., Isaev O., Sharafutdinov R., Morosov V., Zakatov D. Laboratory studies of a stress state effect on sand deformation characteristics. *Bulletin*

of Science and Research Center of Construction. 2019; 20(1):140-154. EDN YVTYXZ. (rus.).

5. Koroleva I.V., Sagdatova M.R. Experimental studies of gray clay behavior under conditions of triaxial compression at different moisture. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2019; 4(50):228-235. EDN EUGJOR. (rus.).

6. Mamaeva A.A., Kleveko V.I. Properties research of kinetic sand by use of stabilometer. *Modern Technologies in Construction. Theory and Practice*. 2021; 2:48-54. EDN DZBZQE. (rus.).

7. Sun A., Yang G., Yang Q., Qi M., Wang N., Ren Y. Experimental investigation of thermo-mechanical behaviors of deep-sea clay from the South China Sea. *Applied Ocean Research*. 2022; 119:103015. DOI: 10.1016/j.apor.2021.103015

8. Steidel S., Jahnke J., Chang X., Becker A., Vrettos C. Triaxial compression and direct shear tests

in the parametrization of soil modeled via the discrete element method. *7th edition of the International Conference on Particle-based Methods*. 2021. DOI: 10.23967/particles.2021.013

9. Kido R., Higo Y. Distribution changes of grain contacts and menisci in shear band during triaxial compression test for unsaturated sand. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. 2019; 7(2):627-635. DOI: 10.3208/jgsspp.v07.096

10. Wang G., Wang Z., Ye Q., Zha J. Particle breakage evolution of coral sand using triaxial compression tests. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2021; 13(2):321-334. DOI: 10.1016/j.jrmge.2020.06.010

11. Hernández-Hernández V.A., Joya-Cárdenas D.R., Equihua-Anguiano L.N., Leal-Vaca J.C., Diosdado-De la Peña J.A., Pérez-Moreno L. et al. Experimental and numerical analysis of triaxial compression test for a clay soil. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2021; 81(3):357-367. DOI: 10.4067/S0718-58392021000300357

12. Markou I.N. A study on geotextile — Sand interface behavior based on direct shear and triaxial compression tests. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2018; 4(1). DOI: 10.1007/s40891-017-0121-7

13. Tulebekova A., Zhussupbekov A., Zhumadilov I., Bukenbaeva D., Drozdova I. Laboratory tests of soils on triaxial compression apparatus. *16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2020; 2019:45-56.

14. Du J., Qiu Z. Experimental research on dilatancy characteristics of coarse-grained soils by tri-

axial compression test. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 2011(1):012067. DOI: 10.1088/1742-6596/2011/1/012067

15. Fern J., Soga K., Sakanoue T. Modelling the shear strength and dilatancy of dry sand in triaxial compression tests. *Geomechanics from Micro to Macro*. 2014; 673-678. DOI: 10.1201/b17395-120

16. Fern E.J., Robert D.J., Soga K. Modeling the stress-dilatancy relationship of unsaturated silica sand in triaxial compression tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2016; 142(11). DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001546

17. Zarei C., Wang F., Qiu P., Fang P., Liu Y. Laboratory investigations on geotechnical characteristics of alumen treated loess soil. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2022; 26(2):539-549. DOI: 10.1007/s12205-021-1723-0

18. Nandanwar M.R., Chen Y. Simulations of triaxial compression test for sandy loam soil using PFC3D. *2014 ASABE Annual International Meeting*. 2014. DOI: 10.13031/aim.20141911030

19. Kozicki J., Tejchman J., Mühlhaus H. Discrete simulations of a triaxial compression test for sand by DEM. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2014; 38(18):1923-1952. DOI: 10.1002/nag.2285

20. Mozaffari M., Liu W., Ghafghazi M. Influence of specimen nonuniformity and end restraint conditions on drained triaxial compression test results in sand. *Canadian Geotechnical Journal*. 2022; 59(8):1414-1426. DOI: 10.1139/cgj-2021-0505

Received June 20, 2023.

Adopted in revised form on June 23, 2023.

Approved for publication on July 30, 2023.

BIONOTES: Armen Z. Ter-Martirosyan — Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9467-5304, ORCID: 0000-0001-8787-826X, Scopus: 35621133900, ResearcherID: Q-8635-2017; gic-mgsu@mail.ru;

Georgiy O. Anzhelo — Candidate of Technical Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; nocgeo@mail.ru;

Lyubov Yu. Ermoshina — postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; lyubov.ermoshina1801@mail.ru;

Ilia A. Bokov — student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; iliililia@yandex.ru;

Artur V. Manukyan — Doctor of Technical Sciences; **Concern MonArch**; build. 1, 31A Leningradsky prospect, Moscow, 125284, Russian Federation; a.manukyan@mon-arch.ru.

Authors' contribution:

Armen Z. Ter-Martirosyan — scientific guidance.

Georgiy O. Anzhelo — research concept, methodology development, scientific text editing, final conclusions.

Lyubov Yu. Ermoshina — research concept, methodology development, article writing, test results processing, final conclusions.

Ilia A. Bokov — laboratory testing, writing an article, processing test results, revision of the text.

Artur V. Manukyan — scientific guide.

The authors declare that there is no conflict of interest.