

УДК 624.131.41

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-288-293

ПРОЧНОСТЬ ИСКУССТВЕННЫХ ГРУНТОВ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ВЛАЖНОСТИ

И. В. Королева, А. А. Балабанова, Р. Р. Гильванова

Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Россия

Аннотация. Представлены результаты лабораторных исследований поведения искусственно приготовленных образцов песчаных грунтов в приборе одноплоскостного среза. Грунтовые образцы имели различное значение влажности: от воздушно-сухого состояния до 15 %, при этом плотность скелета грунта была одинаковой. По результатам испытаний на одноплоскостной срез определены прочностные характеристики искусственных песчаных грунтов. Выявлено, что величина влажности влияет на разрушение образцов. Полученные результаты лабораторных исследований могут быть использованы при проектировании песчаных подушек.

Ключевые слова: испытания, песок, прочность, насыпная плотность, влажность, искусственный грунт

STRENGTH OF ARTIFICIAL SOILS AT DIFFERENT HUMIDITY LEVELS

I. V. Koroleva, A. A. Balabanova, R. R. Gilvanova

Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia

Annotation. The laboratory studies results of the behavior of artificially prepared sandy soil samples in a single-plane shear tester are presented. The soil samples had varying moisture contents, ranging from air-dry to 15%, while the soil skeletal density was identical. The strength properties of the artificial sandy soils were determined using single-plane shear tests. It was found that moisture content influences sample failure. The obtained laboratory results can be used in the design of sand cushions.

Keywords: testing, sand, strength, bulk density, moisture, artificial soil

Введение

Безопасность зданий и сооружений во многом зависит от надежности грунтовых оснований их фундаментов [1, 2]. Согласно действующей нормативной документации грунты оснований могут быть ненарушенной и нарушенной структуры, при этом последнее может происходить в результате техногенных воздействий или как результат создания искусственного массива в виде насыпи, грунтовой подушки [3, 4] и т. д. Устройство искусственных оснований из грунтов нарушенной структуры выполняют на основании проектной документации, а основными параметрами для контроля качества устроенного объема является значение плотности, которое обеспечивает равномерное распределение нагрузок [5, 6] и создание дренирующего слоя [7]. В качестве основного материала применяется песок крупный и средней крупности [8, 9].

Исследование механических свойств искусственных грунтов лабораторных условиях при различных значениях влажности является важной задачей в современном фундаментостроении.

В научном центре КГАСУ «Основы» были проведены исследования механических параметров песчаного грунта насыпной плотности от влажности.

Целью данного исследования является анализ влияния содержания воды в искусственном песчаном грунте на прочность в приборе одноплоскостного среза.

Задачи исследования:

- создание цилиндрических образцов из песка с одинаковым значением насыпной плотности, но разной влажности;
- проведение испытаний в приборе одноплоскостного среза;
- выявление зависимостей между содержанием воды в образце и параметрами прочности грунта.

Основная часть

Согласно разработанной программе испытаний проведено в условиях одноплоскостного среза исследование прочности искусственно приготовленных образцов песчаных грунтов с несколькими значениями процентного содержания воды в образце. Песчаный грунт высушивался в печи и послойно отсыпался в лоток через сито с определенной высоты, чем достигалось одинаковое значение плотности грунта в сухом состоянии $\rho_d = 1,4 \text{ г/см}^3$. Каждый отсыпанный слой увлажнялся заданным в программе экспериментальных исследований объемом воды путем ее распыления. Увеличение влажности моделировало возможное замачивание насыпного слоя грунтового основания атмосферными, талыми или техногенными водами. За начальное значение влажности было принято воздушно-сухое состояние грунта, приравненное условно к $W = 0 \%$, также были созданы грунты с влажностью $W = 5 \%$, $W = 10 \%$ и $W = 15 \%$. После послойного формирования модели искусственного песчаного массива методом режущих колец из него отбирались пробы грунта для контроля плотности, оценивалось значение влажности и вырезались образцы для проведения сдвиговых испытаний. Полученные параметры искусственного грунта в каждой серии экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры искусственного песчаного грунта

	Плотность в сухом состоянии, ρ_d , г/см ³	Плотность, ρ , г/см ³	Влажность, W , %
Серия 1	1,4	1,40	0
Серия 2	1,4	1,46	5
Серия 3	1,4	1,55	10
Строка 4	1,4	1,62	15

Исследования проведены на приборе одноплоскостного среза, входящего в состав полевой лаборатории Литвинова ПЛЛ, предназначенной для ускоренных исследований строительных свойств однородных грунтов в непосредственной близости от места отбора. Использование указанного оборудования позволит применять полученные в работе авторов данные при решении практических задач.

Для удобства проведения анализа результаты исследований оформлены в виде диаграммы (рис. 1).

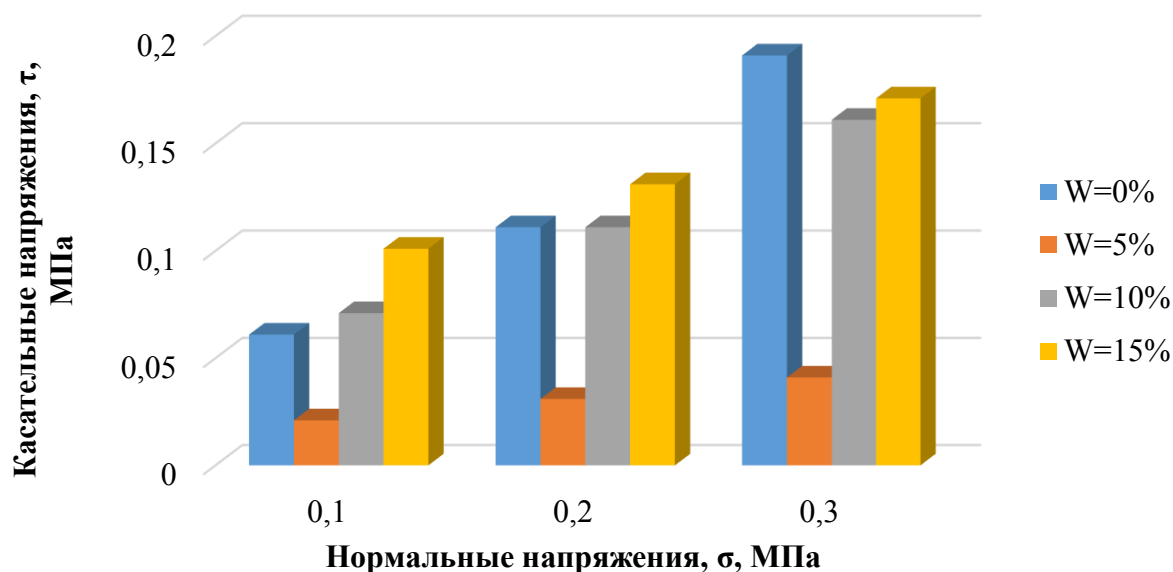


Рис. 1. Величины касательных напряжений τ от значений нормальных напряжений σ

Песчаный образец в воздушно сухом состоянии был принят за эталонный, так как график его испытаний полностью совпадает с «теоретическим» для сыпучего грунта. Следует отметить, что именно он имел большую сдвиговую прочность при $\sigma = 300$ кПа, реализованную за счет сил трения между твердыми частицами. Меньшая прочность на сдвиг при всех значениях нормальных напряжений σ оказалась грунта с влажностью $W = 5\%$, что возможно объяснить значительным уменьшением трения между песчинками при начальном значении плотности вследствие действия воды как «смазки». Образцы с влажностью $W = 10\%$ и $W = 15\%$ оказались при $\sigma = 100$ кПа прочнее эталонного образца на 16 % и 65 % соответственно, а при нагружении до уровня $\sigma = 300$ кПа они оказались менее прочными на 15 % и 11 % соответственно.

С целью определения угла внутреннего трения и удельного сцепления искусственного песчаного грунта построена сводная графическая зависимость касательных напряжений τ от нормальных напряжений σ (рис. 2).

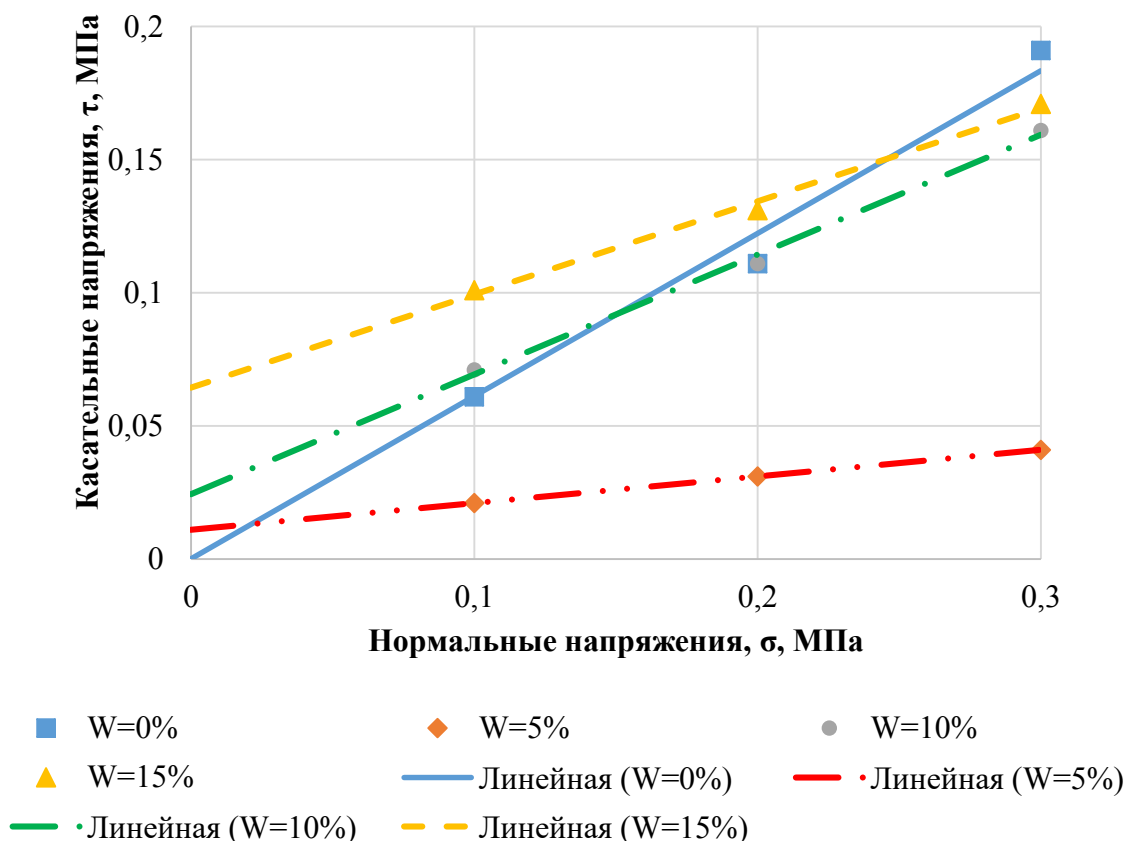


Рис. 2. График зависимости величины сдвиговых (касательных) напряжений τ от нормальных напряжений σ

Отсутствие влаги в образцах первой серии (воздушно-сухое состояние $W = 0 \%$) показало отсутствие сцепления между твердыми частицами искусственного песчаного грунта, при этом угол внутреннего трения грунта составил $\varphi = 31^\circ$. Увеличение влажности до $W = 5 \%$ привело к «появлению» удельного сцепления $C = 11,5$ кПа и снижению угла внутреннего трения до $\varphi = 6^\circ$. Этот факт можно объяснить тем, что вода увлажнила пылеватые частицы, включающие в себя глины, которые увеличились в объеме и оказали влияние на перемещение твердых частиц искусственного песка при сдвиге на начальном этапе нагружения до $\sigma = 100$ кПа, но выступили в роли «смазки» при высоких значениях внешней нагрузки. В третьей серии экспериментов влажность искусственного грунта составила $W = 10 \%$, что увеличило удельное сцепление до $C = 23,3$ кПа и угол внутреннего трения до $\varphi = 24^\circ$. При влажности $W = 15 \%$ зафиксировано уменьшение угла внутреннего трения до $\varphi = 19^\circ$ и увеличение удельного сцепления до $C = 61,5$ кПа. Последнее экспериментально полученное значение сцепления кажется завышенным, но оно показывает увеличившуюся роль воды и как увлажняющей среды для глинистых частиц и как смазки.

Удельное сцепление песка при замачивании возникает благодаря нескольким физическим и химическим процессам, связанным с взаимодействием частиц и воды:

1) при увлажнении песка между зёрнами образуются тонкие водяные перемычки (мениски), которые стягивают частицы друг к другу за счёт сил поверхностного натяжения, что создаёт временное сцепление, исчезающее при высыхании;

2) глинистые частицы в виде примеси заполняют поры при замачивании увеличивая число контактов между песчинками;

3) тонкая пленка свободной воды выполняет роль смазки, уменьшая силы трения.

Следует отметить, что удельное сцепление песка — это не постоянное свойство материала, а расчётный параметр, который зависит от множества факторов и может меняться в зависимости от условий.

Заключение

Проведенные лабораторные исследования искусственно приготовленных песчаных грунтов позволили выявить влияние влажности на изменение прочностных параметров образцов. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании песчаных подушек и насыпных оснований фундаментов зданий и сооружений, а также в качестве одного из векторов для дальнейших исследований.

***Благодарности:** работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ.*

Список источников

1. Lunev, A.A., Katsarskii R.S. Influence of Water Content and Degree of Compaction on the Mechanical Properties of Soils of Various Geneses // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2022. Vol.59. P. 417–421.

2. Абакумова, Н. В. Инженерно-геологические особенности насыпных грунтов территории города Москвы: автореф. дис. ... канд. геолого-минералог. наук / Н. В. Абакумова. – Москва, 2024. – 22 с.

3. Абелев, М. Ю. Об эффективности устройства уплотненной песчаной подушки М. Ю. Абелев, Р. Р. Бахронов, З. У. Джангидзе // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 4. – С. 55-58.

4. Аимбетов, И. К. Оценка возможности использования барханных песков в качестве фундаментных подушек / И. К. Аимбетов, С. Т. Каипов // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации : электрон. сб. ст. VI междунар. науч. конф., Новополюцк, 30-31 окт. 2024 г.; Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой; Редкол.: Д. Н. Лазовский (председ.) [и др.]. – Новополюцк: Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой, 2025. – С. 80-85.

5. Сазонова, С. А. Получение эмпирической градуировочной зависимости для экспресс-оценки качества выполнения грунтовых конструкций / С. А. Сазонова, Д. А. Татьянников, А. Б. Пономарев // Construction and Geotechnics. – 2023. – Т. 14. – № 3. – С. 70-79. DOI: <http://dx.doi.org/10.15593/2224-9826/2023.3.07>.

6. Validation of a new gamma ray soil bulk density sensor / G. Staats, K. Teuling, R. Koomans, K.H.J. Pepers // Eur J Soil Sci. – 2024. – 75:e13542. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/ejss.13542>.

7. Comparative assessment of soil bulk density measurements using core metal ring and power probe methods in acidic soils of Colombian pasturelands / L. Rodriguez, M. Bastidas, M. Da Silva, J. Arias, J.M. Martín-López, N. Matiz-Rubio, S. Loaiza, I. Rao, J. Arango and C. Costa Junior // Front. Soil Sci. – 2025. – 5:1527807. DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fsoil.2025.1527807>.

8. Носков, И. В. Прочность и деформируемость двухслойного основания – композит из песчаной подушки и лессового грунта / И. В. Носков, Ю. А. Гатилов, М. А. Осипова // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4-1. – С. 18-22.

9. Швецов, Г. И. Экспериментально-теоретические исследования двухслойного основания из песчаной подушки и лессовидного грунта / Г. И. Швецов, И. В. Носков. // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2014. - № 6. – С. 28-31.

© Королева И. В., Балабанова А. А., Гильванова Р. Р., 2026