



doi: 10.18720/CUBS.84.2

Уменьшение деформативности водонасыщенных глинистых грунтов путем армирования

Reduction of water saturated clayey soils' deflections by reinforcement

Р.Р. Нурмухаметов ^{1*}

¹ООО "СтройИнвестКапитал", Санкт-Петербург,
Синопская набережная 26, 191167

R. Nurmukhametov ^{1*}

¹StroyInvestCapital LLC, 26, Sinopskaya embankment, Saint Petersburg, Russia, 191167

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

усиление водонасыщенных глинистых грунтов;
водонасыщенный глинистый грунт; армирование грунта;
слабый глинистый грунт; поровое давление; фундаменты
зданий на слабых грунтах; консолидация; армогрунт;
вертикальный армирующий элемент; армирование грунта;

KEYWORDS

strengthening of water saturated clayey soils; water saturated
clayey soil; soil reinforcement; soft clay; pore pressure;
buildings' foundations; consolidation; rheological parameter;
time series deformation; deformation model;

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований деформативности слабых водонасыщенных глинистых грунтов, армированных вертикальными элементами. Современное сообщество геологов, исследователей в области фундаментов и оснований зданий и сооружений активно изучает возможные технологии улучшения деформативных характеристик слабых водонасыщенных глинистых грунтов и методики расчета подобных усилений. Одним из самых перспективных направлений является армирование массива грунта, имеющего слабые характеристики. Основной целью исследований является увеличение экспериментальной базы, которая в последующем позволит подтвердить теоретические выкладки, также разрабатываемые автором. Испытания одноосным сжатием проводились в компрессионно-фильтрационных приборах (одометрах) в лабораторных условиях кафедры Оснований, фундаментов и инженерной геологии Казанского государственного архитектурно-строительного университета. В статье описаны предполагаемые причины и обоснования протекающих в моделях процессов, находящих отражение в результатах экспериментальных исследований. По результатам исследований выявлены закономерности между процентом армирования и деформативностью массива усиленного грунта. Установлено, что устройство армирования слабого водонасыщенного основания уменьшает сжимаемость образцов по сравнению с неармированными образцами. Происходит увеличение модуля приведенной деформации грунтового массива, являясь несомненным преимуществом армированных оснований. Также определено, что армирование способствует уменьшению скорости развития осадки. Данный эффект требует дополнительного изучения, так как увеличение времени стабилизации деформаций основания увеличивает риски неравномерных деформаций фундаментов. Проведенные эксперименты увеличивают практическую базу для последующей разработки расчетной теоретической модели армогрунтового массива

ABSTRACT

The paper presents the results of experimental studies of the deformability of weak water-saturated clay soils reinforced with vertical elements. The modern community of geologists and researchers in the field of foundations and foundations of buildings and structures is actively studying possible technologies for improving the deformative characteristics of weak water-saturated clay soils and methods for calculating such amplifications. One of the most promising areas is the reinforcement of the soil mass, which has weak characteristics. The main goal of the research is to increase the experimental base, which in the future will allow us to confirm the theoretical calculations that are also being developed by the author. Uniaxial compression tests were performed in compression and filtration devices (odometers) in the laboratory conditions of the Department of Foundations, foundations and engineering Geology of the Kazan state University of architecture and construction. The article describes the alleged causes and justifications of the processes occurring in the models, which are reflected in the results of experimental studies. According to the results of the research, the regularities between the percentage of reinforcement and the deformability of the

reinforced soil array were revealed. It was found that the device for reinforcing a weak water-saturated base reduces the compressibility of samples in comparison with non-reinforced samples. There is an increase in the modulus of reduced deformation of the soil mass, which is an undoubted advantage of reinforced bases. It is also determined that reinforcement helps to reduce the rate of precipitation development. This effect requires additional study, since increasing the time of stabilization of base deformations increases the risks of uneven deformations of foundations. The conducted experiments increase the practical basis for further development of the calculated theoretical model of the armogrun array

Содержание

1.	Введение	23
2.	Методы	24
3.	Результаты и обсуждение	27
4.	Заключение	29
5.	Благодарности	30

1. Введение

Слабые водонасыщенные глинистые грунты широко распространены во всем мире, особенно в крупных городах, расположенных в поймах рек (Шанхай [6, 7], Санкт-Петербург, Бангкок [8, 9], Рига, Архангельск и др.). В мировом инженерно-техническом сообществе постоянно идут поиски оптимизации затрат на улучшение деформативных свойств. Так, в многочисленных современных публикациях [37-39], в том числе и зарубежных [1, 6-10] приводятся результаты испытаний и теоретические выкладки поиска оптимальных решений по улучшению деформативных и прочностных характеристик слабых глинистых грунтов. Но все они не учитывают полный цикл происходящих процессов в глинистых водонасыщенных грунтах, что создает необходимость в дальнейшем поиске оптимальных решений инженерной задачи по улучшению характеристик.

Активное участие в изучении проблем водонасыщенных глинистых грунтов позволяют считать изыскания в этой области актуальными. Трудность использования водонасыщенных глинистых грунтов в качестве оснований требует разработки экономически эффективной технологии улучшения деформативных свойств таких грунтов и методики расчета по второй группе предельных состояний.

К слабым грунтам относятся грунты с незначительной несущей способностью ($0,5 - 1 \text{ кг/см}^2$, редко большей), сильносжимаемые, структурные [5]. Слабые глинистые грунты характеризуются почти полной водонасыщенностью, значительным коэффициентом пористости, что свидетельствует об их малой уплотненности (обычно коэффициент пористости больше единицы), структурностью (изменением свойств при нарушении структуры, в том числе и уменьшением несущей способности), большой и неравномерной сжимаемостью (коэффициент относительной сжимаемости $m_v > 0,05 - 0,10 \text{ см}^2 / \text{кг}$ и соответственно модуль общей деформации $E < 5 \text{ кг/см}^2$, а также малым и неодинаковым коэффициентом фильтрации ($k_f \approx 10^{-6} - 10^{-9} \text{ см/сек}$). Осадки оснований, сложенных слабыми глинистыми грунтами, характеризуются продолжительными процессами, протекающими в данных грунтах, начинающимися с медленного отжатия поровой воды. Время отжатия воды зависит от пути фильтрации, который проходит отжимаемая вода до дренажной поверхности. Водонасыщенные глинистые грунты имеют малую прочность – угол их внутреннего трения обычно равен $5 - 12$ градусов, а сцепление $10 - 30 \text{ кПа}$. По этой причине обеспечить устойчивость зданий и сооружений, возведенных на толщах таких грунтов очень сложно. Здания и сооружения возводить на таких грунтах без принятия специальных мер затруднительно [13, 20, 21, 24, 42], а иногда и невозможно.

Новым методом улучшения деформативных свойств слабого водонасыщенного глинистого грунта является его армирование. На начальном этапе своего развития, армирование грунта в основном использовалось в дорожном и гидротехническом строительстве. В последние годы, концепция армированного грунта, вызвала широкий интерес и среди специалистов в области промышленного и гражданского строительства. [11, 12, 27] В настоящее время проводятся многочисленные исследования по данной проблеме. Армирование грунта признано в качестве отдельного направления в геотехнике со своим кругом интересов.

Грунтовое основание, армированное вертикально расположенными в массиве, более прочными по отношению к структурной прочности P_{str} грунта армирующими грунтовой массив элементами, представляет собой искусственно улучшенное физико-химическим [10, 14] или конструктивным методом основание, формируемое путем устройства в грунтовой среде относительно жестких элементов. Нагрузка на вертикально армированное грунтовое основание передается непосредственно через фундамент мелкозаложенного. При этом в контактной зоне, между подошвой фундамента FL и оголовками армоэлементов возможны различные варианты передачи давления, в том числе: посредством непосредственного контакта или через конструктивную прослойку (грунтовую, бетонную, железобетонную или горизонтально армированный грунт).

Заложенные в теории фильтрационной консолидации, наследственной ползучести предпосылки последовательного прохождения стадий деформирования могут быть незначительными и мало влиять на развитие деформаций по отдельности, но при совместном применении в составе одной формулы могут «срезонировать» и дать абсолютно необъективное решение проблемы.

Для установления основных показателей деформируемости слабых водонасыщенных глинистых грунтов, армированных вертикальными элементами, были запланированы и проведены две серии экспериментов. Результатом проведенных экспериментов должна стать возможность сопоставления практических значений с результатами решения задач, имеющих начальные условия одинаковые с экспериментом. Основной целью исследований является увеличение экспериментальной базы, которая в последующем позволит подтвердить теоретические выкладки, также разрабатываемые автором. Подобные задачи допустимо было бы сформулировать, основываясь на исследуемых теоретических закономерностях [4, 18, 27], базирующихся в свою очередь на основе имеющихся теорий и предпосылок [1, 15 – 17, 22, 23, 33 – 38, 40] и экспериментальной базы [18, 39, 41].

2. Методы

При проведении экспериментальной работы по изучению деформативности слабых водонасыщенных глинистых грунтов, армированных вертикальными элементами, были запланированы и проведены в лабораторных условиях две серии экспериментов, различавшихся количеством армирующих элементов. Продолжительность экспериментов составила 30 суток.

Испытания грунтов проводились в компрессионных приборах одноосного сжатия (одометрах) конструкции «Гидропроект» в лабораторных условиях кафедры Оснований, фундаментов и инженерной геологии Казанского государственного архитектурно-строительного университета. Для проведения испытаний были использованы специально изготовленные нестандартные режущие кольца высотой 150мм (рис.1).

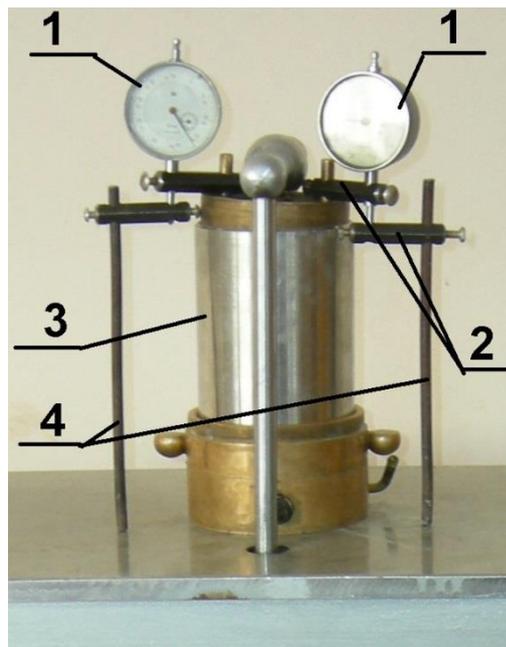


Рис.1. Одометр с испытуемым образцом. 1 – индикаторы часового типа, 2 – кронштейны, 3 – режущее кольцо, $h_k=150\text{мм}$, 4 – упорные штоки.

Грунт для испытаний был искусственно увлажнен до текучей консистенции с заданным значением влажности $W=30\%$ по методике, изложенной в ГОСТ 30416-2012 «Грунты. Лабораторные испытания» [26].

Образцы грунта вырезались режущими кольцами из массива грунта. Исследования происходящих процессов производились на образцах легкого суглинка, отобранных на строительной площадке по улице Зеленая, г. Казань. Грунт имел влажности на границе раскатывания и текучести 17% и 28% соответственно, число пластичности $IP=11\%$.

Табл. 1. Общие сведения о грунте до начала эксперимента.

Грунт	Размеры образца	$g, \text{г}$	$\gamma, \text{г/см}^3$	$\gamma_s, \text{г/см}^3$	$\omega, \%$	e_0
-------	-----------------	---------------	-------------------------	---------------------------	--------------	-------

	h, мм	d, мм	V, см ³					
Суглинок	150	88	900	1728	1,92	2,71	30	0,831

h – высота, мм

d - диаметр, мм

V – объем, см³

G - масса образца, г

G - объемная масса, кг

γ - плотность, г/см³

γ_s – плотность скелета грунта

ω – влажность

e_0 - коэф. пористости

Армирование образцов слабого водонасыщенного глинистого грунта производилось специально изготовленными пластиковыми элементами длиной 100 мм и диаметром 5 мм.

Армирующие элементы имеют искусственно созданную ребристую поверхность для увеличения сцепления с грунтом. Предварительно поверхность армоэлементов была тщательно зачищена шлифовальной бумагой. После этого на каждом армирующем элементе были сделаны разогретой паяльной лампой насечки с шагом 10 мм глубиной до 2 мм с одновременным выпором материала армоэлемента за пределы исходного его сечения до 1 мм. Подобная поверхность армирующих элементов обеспечивала совместное деформирование с грунтом.



Рис. 2. Армирующие элементы.

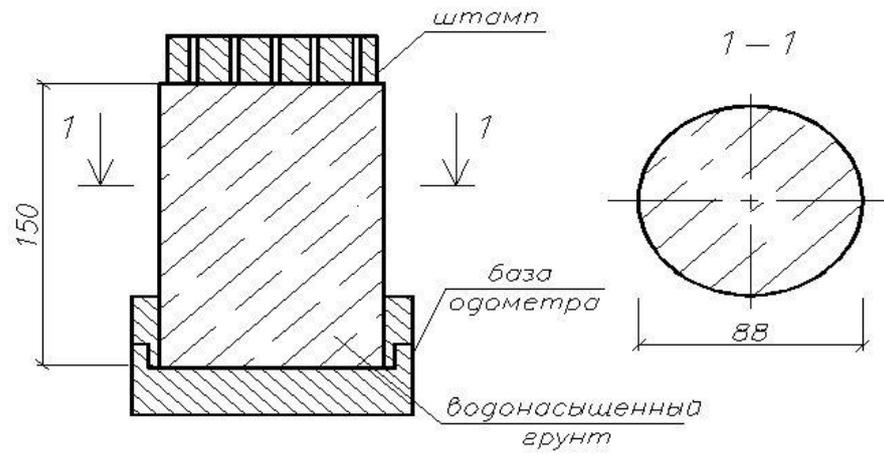
Армирование грунта проводилось после вырезки грунта режущим кольцом и его очистки. Армирующие элементы погружались вдавливанием. Для облегчения вдавливания на концах элементов были сделаны заострения. После вдавливания армирующих элементов лишний грунт был удален.

Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены 3 серии опытов, различающиеся между собой процентом армирования. Первая серия образцов - это неармированные образцы ($\mu = 0\%$). Вторая и третья серии – образцы с четырьмя ($\mu = 1,31\%$) и восемью армоэлементами ($\mu = 2,62\%$).

В процессе нагружения образцов, каждому из них присваивался порядковый номер, определявший очередность их нагружения.

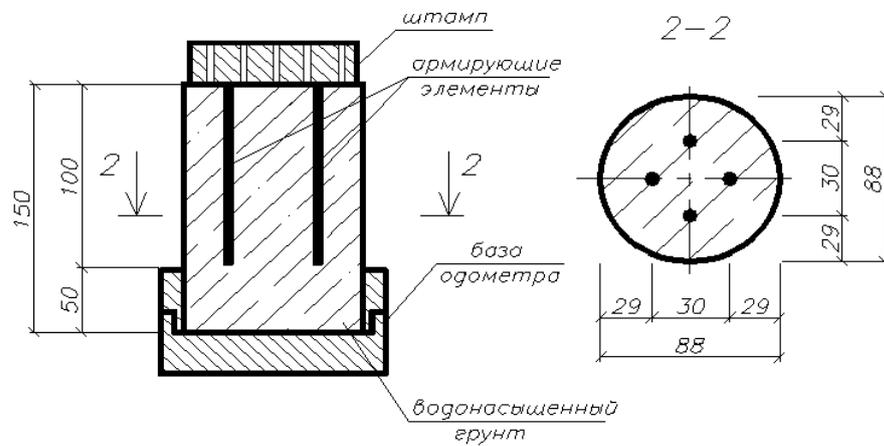
а)

Образец без армирования



б)

Образец с 4-мя армоэл-ми



в)

Образец с 8-мью армоэл-ми

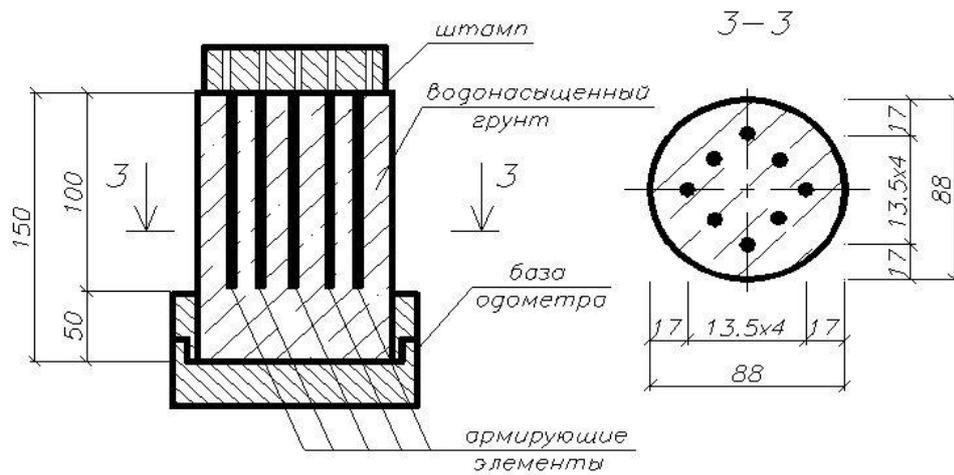


Рис. 3. Схемы армирования образцов.

а) Образец без армирования

б) Образец с 4-мя армоэлементами

в) Образец с 8-мью армоэлементами

Деформации образцов слабо водонасыщенного грунта, армированного вертикальными элементами, измерялись двумя индикаторами часового типа. Осадка образца во времени определялась по перемещению верхнего штампа компрессионного прибора.

Так как образец грунта подвергался консолидировано - дренированному испытанию, то на его верхний торец укладывалась дрена из фильтровальной бумаги. По утверждению Месчяна С.Р. [27] применение дрена может привести к увеличению истинного приращения напряжения $\Delta\sigma_1 = \sigma_1 - \sigma_3$ примерно на 0,015 МПа при диаметре образца 38мм. При увеличении диаметра образца эта ошибка уменьшается.

В течение всего опыта дренажная система прибора была открыта и опыт протекал в условиях, допускающих отжатие поровой воды, что соответствует работе грунта в массиве при медленном росте нагрузок и хороших условиях дренирования – без повышения порового давления. Но отжатие поровой воды происходило только в одну сторону.

Конструкция прибора, на котором испытывались образцы, имеет перфорированные штамп и основание. Через них предполагается фильтрация воды в процессе нагружения. До начала опыта в нижней части отверстия были закрыты: перфорированная пластина одометра, устанавливаемая в его базу и содержащая множество отверстий, была перетянута полиэтиленовой пленкой, препятствующей движению воды вниз (рис. 4).

Это было сделано из определения граничных условий дифференциального уравнения теории фильтрационной консолидации Терцаги-Герсеванова. Согласно этим граничным условиям в модели водонасыщенного грунта с одной стороны на уровне $z=0$ (верхняя точка) имеет место свободный отток воды и, следовательно, $u_w(z=0,t)=0$, а на нижней границе слоя $z=h$ находится водоупор, то есть

$$\frac{\partial u_w}{\partial z} = 0$$

. Следовательно, отток воды предполагается только в одном направлении. По этой причине отверстия в нижней части прибора были до начала опыта перетянуты полиэтиленовой пленкой, препятствующей движению воды вниз.



Рис. 4. Пластина одометра, перетянута полиэтиленовой пленкой.

Испытания проводились при ступенчато-возрастающей нагрузке: 50 кПа каждые 5 минут. Показания индикаторов при этом снимались через 1,2,3,5 минут после приложения нагрузки. Таким образом, давление на образцы в первом эксперименте испытаний было доведено до 200 кПа. При проведении второго и третьего экспериментов - до 300 кПа.

3. Результаты и обсуждение

Результаты одноосного сжатия, записанные в лабораторный журнал, далее выражаются в виде зависимости $S=f(t)$ и строятся консолидационные графики (рис. 5, 6).

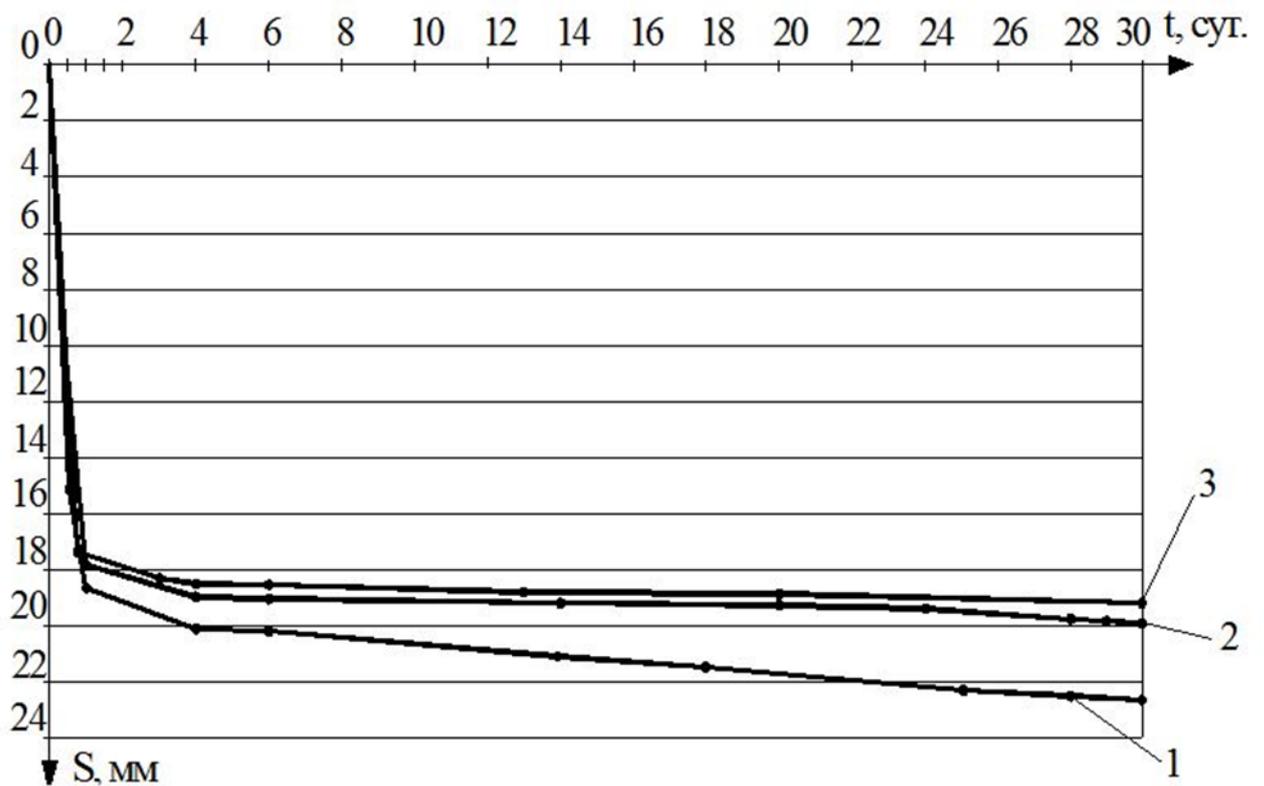


Рис. 5. Зависимость $S = f(t)$ при различном проценте армирования. Давление $P = 200$ кПа. 1 – грунт не армирован, $\mu = 0\%$; 2, 3 – грунт армирован четырьмя элементами, $\mu = 1,31\%$.

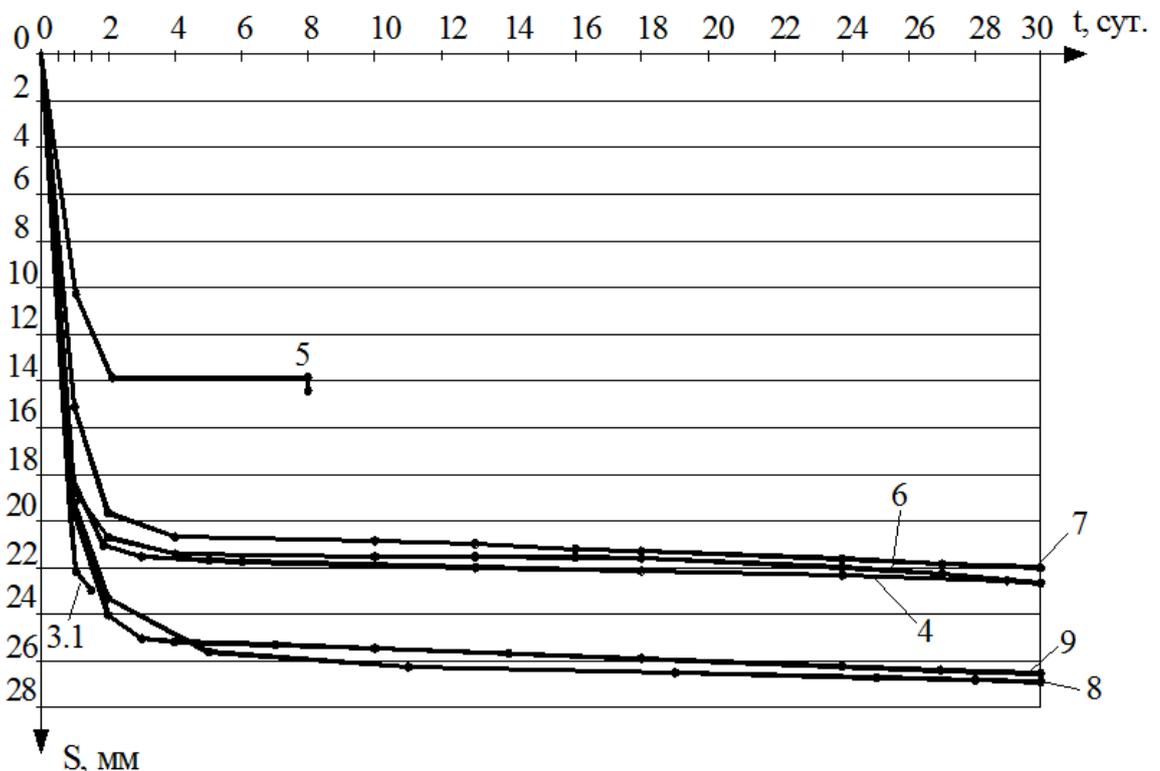


Рис. 6. Зависимость $S = f(t)$ при различном проценте армирования μ . Давление $P = 300$ кПа. 8, 9 – грунт армирован четырьмя элементами, $\mu = 1,31\%$; 4 - 7 – грунт армирован восемью элементами, $\mu = 2,62\%$.

По графикам видно, что скорость увеличения деформаций уменьшается, так как при загрузении водонасыщенных глинистых грунтов происходят сложные процессы деформирования, развивающиеся по нелинейному закону. Общую деформацию грунтового массива можно представить как комплекс деформаций составляющих грунтового массива, развивающихся постепенно. Вначале наблюдается мгновенное сжатие, обусловленное сжимаемостью поровой воды, затем процесс фильтрационного

уплотнения, и, наконец, добавляется процесс вторичной консолидации, или ползучести скелета грунта, обусловленный невозможностью восстановления сдвигами частиц, их агрегатов, водно-коллоидных оболочек и т.п., когда выжимание воды становится весьма незначительным. Прослеживается более быстрое затухание для армированных образцов по сравнению с неармированными и для образцов с большим процентом армирования по сравнению с образцами с меньшим армированием. То есть, чем больше составляющих грунтового массива будут рассмотрены, тем ближе мы приближаемся к реальному поведению этого массива, тем точнее общая деформация [3]. При армировании грунта необходимо решить задачу совместной работы грунта и армирующих элементов.

При первой очереди испытаний, когда давление составляло 200 кПа, по истечении 30 суток абсолютная деформация неармированного образца №1 составила 22,49 мм, а армированных четырьмя армозементами образцов №№2 и 3: 19,54 мм и 18,94 мм соответственно.

При второй очереди испытаний давление составляло 300 кПа. По истечении 30 суток абсолютная деформация образца №9, армированного 4-мя элементами, составила 25,75 мм, а образцов №№6, 7, армированных 8-ю: 21,8 мм и 22,63 мм соответственно.

При третьей очереди для 4-х элементного армирования деформация – 26,54 мм (образец №8), для 8-ми элементного – 22,67 мм (образец №4).

По результатам испытаний установлено, что устройство армирования слабого водонасыщенного основания уменьшает сжимаемость образцов в среднем на 15-20% по сравнению с неармированными образцами уже на 30-е сутки испытания. Это означает, что увеличивается модуль деформации грунтового массива. Это является несомненным преимуществом армированных оснований перед неармированными.

Определено, что армирование способствует уменьшению скорости развития осадки, о чем свидетельствует меньшая пологость кривой мгновенной составляющей осадки. По этому поводу необходимо проводить дополнительные сравнительные исследования деформативности слабых водонасыщенных глинистых оснований, армированных вертикальными элементами, и без армирования. Уменьшение скорости протекания деформирования таит в себе большие трудности в практическом применении такого метода улучшения качества слабого основания, как армирование.

В ходе работы произведен анализ существующих теорий и практик по улучшению деформативных характеристик водонасыщенных глинистых грунтов. Было сделано обобщение существующих методов оценки состояния армированного грунта, сыгравших роль предпосылок для проведения данных экспериментов. По результатам определена методика данного экспериментального исследования.

Предположение о зависимости деформативности армогрунтового массива, сложенного слабыми водонасыщенными глинистыми грунтами от количества армирующих вертикальных элементов подтвердилось в ходе экспериментов. Аналогичные результаты получены и другими авторами, изучающими армирование грунтов, имеющих сложные физико-механические особенности [4, 41]. При этом анализ публикаций во временном срезе показывает, чем свежее публикации, тем сложнее предлагаемые алгоритмы расчетов, определяемые участием большего количества этапов деформирования такого сложного многокомпонентного геологического элемента, как водонасыщенный армогрунт.

Очевидно, что последующие испытания должны учитывать большее количество вводных данных и контролируемых параметров. Например, горизонтальные деформации, поровое давление, которое возможно измерить датчиками порового давления, послойные деформации, коэффициенты затухания ползучести, коэффициенты фильтрационной консолидации, коэффициенты относительной сжимаемости скелета грунта. Подобные измерения будет невозможно выполнить в условиях одноосного сжатия в одометрах. Следующими этапами должны стать крупномасштабные эксперименты в условиях штампового испытания в объемных лотках и (или) в натуральных условиях. Также необходимо создание полноценной расчетной модели, например МКЭ, способной подтвердить сходимость с экспериментальными значениями. Продолжение работы в данном направлении позволит подтвердить многие процессы, происходящие в сложных геологических условиях, и дать возможность инженерам всего мира реализовывать задуманные решения с максимальной экономической эффективностью.

4. Заключение

Способ улучшения деформативных свойств слабого водонасыщенного грунтового основания путем введения в грунтовой массив армирующих вертикальных элементов является перспективным направлением научно-исследовательских изысканий. Армирование слабых грунтов вертикальными элементами позволяет переходить к строительству незамедлительно, не дожидаясь твердения массива, как это происходит при использовании методов создания химическим, электрохимическим, физическим и другими способами новых связей между частицами грунта и вводимых искусственно материалов.

Однако применение метода армирования в слабых водонасыщенных глинистых грунтах сдерживается отсутствием, как в нормативной литературе, так и в научных трудах исследователей адекватной методики расчета и достаточных экспериментальных исследований. Существующие теоретические выкладки для расчетов армирования в слабых водонасыщенных основаниях, имеющиеся в научной литературе, не учитывают взаимодействие всех фаз грунта, не отображают развитие деформаций во времени, либо не рассчитаны на глинистые основания с их связной структурой, начальным градиентом напора и другими специфичными свойствами.

Проведенные экспериментальные исследования деформативности слабых водонасыщенных глинистых грунтов, армированных вертикальными элементами, позволяют приблизиться к определению расчетной модели армогрунтового массива.

В результате экспериментов, представленных двумя очередями образцов, отличающихся между собой процентом армирования грунта, установлено, что армирование слабого водонасыщенного глинистого грунта вертикальными элементами-моделями уменьшает деформативность основания до 15 - 20% при проценте армирования $\mu = 2,62\%$ уже на 30-е сутки. Также армирование уменьшает скорость развития деформаций в первые двое суток, что необходимо с осторожностью учитывать в дальнейшем, так как это явление ведет к увеличению срока стабилизации осадки основания, что может неблагоприятно повлиять на процесс возведения зданий и сооружений. Это явление требует дополнительного рассмотрения в более масштабных экспериментах.

Таким образом, существуют все предпосылки для продолжения научно-исследовательской работы, основы которой заложены в данном материале, и разработке полноценной инженерной методики расчета осадок оснований, сложенных слабыми водонасыщенными глинистыми грунтами и усиленных армирующими элементами.

5. Благодарности

Автор выражает благодарность д.т.н., профессору, зав. каф. ОФДСиИГ Мирсаяпову И.Т. и к.т.н., доценту Сафину Д.Р., Казанский государственный архитектурно-строительный университет, за терпеливые наставления и ценные замечания, позволившие реализовать данную работу. Оборудование и инструментарий были предоставлены Казанским государственным архитектурно-строительным университетом, Россия.

Автор также искренне благодарен отличным замечаниям рецензентов, позволившим значительно улучшить качество данной статьи.

Литература

- [1]. Sun, L., Cai, Y. qiang, Gu, C., Wang, J., Guo, L. Cyclic deformation behaviour of natural K0-consolidated soft clay under different stress paths. Journal of Central South University. 2015. 22(12). Pp. 4828–4836. DOI:10.1007/s11771-015-3034-4.
- [2]. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. // М. 1978.
- [3]. Цытович Н.А., Зарецкий Ю.К., Малышев М.В. и др., под ред. проф. Н.А. Цытовича. Прогноз скорости осадки оснований сооружений (консолидация и ползучесть многофазных грунтов) // М. 1967.
- [4]. Мирсаяпов И.Т., Мустакимов В.Р. Исследование прочности и деформируемости просадочных грунтовых оснований, армированных вертикальными элементами // Труды международной конференции по геотехнике. Взаимодействие сооружений и оснований: методы расчета и инженерная практика. СПб. 2005. С. 133-137.
- [5]. ASTM D 2487 (2487) Standard practices for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). Annual Book of ASTM Standards 04(08)
- [6]. Guan-lin Ye, Bin Ye. 2016. Investigation of the overconsolidation and structural behavior of Shanghai clays by element testing and constitutive modeling. Shanghai, China, Tongji University. 2016. 1(1). Pp. 62–77. DOI: 10.1016/j.undsp.2016.08.001
- [7]. Maosong Huang, Yanhua Liu, Daichao Sheng. 2011. Simulation of yielding and stress–strain behavior of Shanghai soft clay. Computers and Geotechnics 2011.

References

- [1]. Sun, L., Cai, Y. qiang, Gu, C., Wang, J., Guo, L. Cyclic deformation behaviour of natural K0-consolidated soft clay under different stress paths. Journal of Central South University. 2015. 22(12). Pp. 4828–4836. DOI: Pp.10.1007/s11771-015-3034-4
- [2]. Vyalov S.S. Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov [Bases of soils' mechanic's rheology.] Moscow. 1978.
- [3]. Tsytoich N.A., Zaretskiy U.K., Malyshev M.V. Prognoz skorosti osadki osnovanii sooruzhenii (konsolidatsiia i polzuchest' mnogofaznykh gruntov) [Forecast of building's foundation settlement's speed (consolidation and creep of multifractioned soils)]. Moscow. 1967.
- [4]. Mirsayapov I.T., Mustakimov V.R. Issledovanie prochnosti i deformiruемости prosadochnykh gruntovykh osnovanii, armirovannykh vertikal'nymi elementami [Strength and deformability investigation of foundations bedding's subsidence reinforced with vertical elements]. Collection of international geotechnical conference. Saint Petersburg, Russia. 2005. Pp. 133 – 137.
- [5]. ASTM D 2487 (2487) Standard practices for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). Annual Book of ASTM Standards 04(08).
- [6]. Guan-lin Ye, Bin Ye. 2016. Investigation of the overconsolidation and structural behavior of Shanghai clays by element testing and constitutive modeling. Shanghai, China, Tongji University. 2016. 1(1). Pp. 62–77. DOI: Pp. 10.1016/j.undsp.2016.08.001

- 38(3). Pp. 341–353. DOI:38.341–353. 10.1016/j.compgeo.2010.12.005
- [8]. Horpibulsuk Suksun, Shibuya Satoru, Fuenkajorn Kittitep, Katkan Wanchai. 2007. Assessment of engineering properties of Bangkok clay. *Canadian Geotechnical Journal*; Ottawa. 2007. 44 (2, Feb). Pp. 173-187.
- [9]. Horpibulsuk S, Yangsukaseam N, Chinkulkijniwat A, Du Y.J. Compressibility and permeability of Bangkok clay compared with kaolinite and bentonite. *Application Clay Science*. 2011. 52. Pp. 150–159.
- [10]. Horpibulsuk S, Martin D. Liu, Deepa S. Liyanapathirana, Jirayut Suebsuk Behaviour of cemented clay simulated via the theoretical framework of the Structured Cam Clay model. *Computers and Geotechnics*. 2010. 37(1–2). Pp. 1–9. DOI:10.1016/j.compgeo.2009.06.007
- [11]. Землянский А.А. Активное армирование слабых грунтов при строительстве крупноразмерных резервуаров // ж. Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2006г. №43(4). С.131-135.
- [12]. Коновалов П.А., Зехниев Ф.Ф., Безволев С.Г. Расчет эффективности укрепления слабых оснований нагрузением, дренированием и армированием. // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2003. №1. С.2-8.
- [13]. Коновалов П.А., Зехниев Ф.Ф., Безволев С.Г. О расчете консолидации водонасыщенных оснований при одномерном сжатии и осесимметричном дренаже // Вісник Одеської Державної академії будівництва та архітектури. 2001. №4, С.310-315.
- [14]. Абелев М.Ю., Булычев В.Г., Вило А., Далматов Б.И., Денисов Н.Я., Маслов Н.Н., Польшин Д.Е., Соколов Н.М., Цытович Н.А. // Материалы всесоюзного совещания по строительству на слабых водонасыщенных глинистых грунтах. Таллин. 1965. 419с.
- [15]. Зарецкий Ю.К. Теория консолидации грунтов // М.:Наука. 1967. 268с.
- [16]. Абелев М.Ю., Цытович Н.А. Вопросы применения теории фильтрационной консолидации для сильносжимаемых водонасыщенных глинистых грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. М.: Стройиздат. 1964. №3.
- [17]. Абелев М.Ю. Исследование фильтрационных свойств сильносжимаемых глинистых грунтов. // Сб. докладов по гидротехнике, вып.5 ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. Госэнергоиздат. 1963.
- [18]. Сафин Д.Р., Груздева В.А. Исследование несущей способности слабых водонасыщенных глинистых грунтов, армированных вертикальными армирующими элементами // сборник статей Международной научно-практической конференции. Уфа:ООО Омега Сайнс. 2017. С. 54-56.
- [19]. Шашкин А.Г., Шацкий А.А. Влияние буронабивных свай замещения на деформации водонасыщенных глинистых грунтов // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 12. С. 15–22.
- [20]. Дедок В.Н., Тарасевич А.Н. Особенности свойств слабых водонасыщенных глинистых грунтов и меропиратия по их улучшению // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура. Брест. 2015. С. 47-50
- [21]. Шешеня Н.Л. Современные методы повышения свойств слабых грунтов оснований строительных объектов // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 11. С. 5-7
- [22]. Аверин И.В., Абелев М.Ю., Кораблева У.А. Экспериментальные исследования эффективности методов консолидационного уплотнения слабых
- [7]. Maosong Huang, Yanhua Liu, Daichao Sheng. 2011. Simulation of yielding and stress–strain behavior of Shanghai soft clay. *Computers and Geotechnics* 2011. 38(3). Pp. 341–353. DOI: Pp.38.341–353. 10.1016/j.compgeo.2010.12.005
- [8]. Horpibulsuk Suksun, Shibuya Satoru, Fuenkajorn Kittitep, Katkan Wanchai. 2007. Assessment of engineering properties of Bangkok clay. *Canadian Geotechnical Journal*; Ottawa. 2007. 44 (2, Feb). Pp. 173-187.
- [9]. Horpibulsuk S, Yangsukaseam N, Chinkulkijniwat A, Du Y.J. Compressibility and permeability of Bangkok clay compared with kaolinite and bentonite. *Application Clay Science*. 2011. No. 52. Pp. 150–159.
- [10]. Horpibulsuk S, Martin D. Liu, Deepa S. Liyanapathirana, Jirayut Suebsuk. Behaviour of cemented clay simulated via the theoretical framework of the Structured Cam Clay model. *Computers and Geotechnics*. 2010. 37(1–2). Pp. 1–9. DOI: Pp.10.1016/j.compgeo.2009.06.007
- [11]. Zemlyanskii, A.A. Active reinforcement of weak soils during construction of high-capacity holding tanks. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2006. 43(4). Pp. 131–135. DOI:10.1007/s11204-006-0036-0.
- [12]. Konovalov P.A., Zekhniev F.F., Bezvoley S.G. Raschet éffektivnosti ukrepleniia slabykh osnovanii nagruzheniem, drenirovaniem i armirovaniem [Effectiveness' assessment of soft beddings strengthening by loading, drainage and reinforcement]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2003. No. 1. Pp. 2-8.
- [13]. Konovalov P.A., Zekhniev F.F., Bezvoley S.G. O raschete konsolidatsii vodonasyschennykh osnovanii pri odnomernom szhatii i osesimmetrichnom drenazhe [About consolidation's calculation of water saturated beddings during one axial compression and symmetrical drainage]. *Herald of Odessa State Academy of Construction and Architecture*. 2001. No. 4. Pp. 310-315.
- [14]. Abelev M.Yu., Bulychev V.G., Vilo A., Dalmatov B.I., Denisov N.I., Maslov N.N., Polshin D.E., Sokolov N.M., Tsytovich N.A. Herald of union's meeting regarding construction of soft water saturated clayey soils. Tallinn. 1965.
- [15]. Zaretckiy U.K. Teoriia konsolidatsii gruntov [Soils's consolidation theory]. Moscow. Pp. Nauka. 1967.
- [16]. Abelev M.Yu., Tsytovich N.A. Voprosy primeniia teorii fil'tratsionnoi konsolidatsii dlia sil'noszhimayemykh vodonasyschennykh glinistykh gruntov [Application of filtration consolidation theory to heavy compressed water saturated clayey soils]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1964. No. 3.
- [17]. Abelev M.Y. Issledovanie fil'tratsionnykh svoystv sil'noszhimayemykh glinistykh gruntov [Investigation of filtration characteristics of heavy compressed clayey soils]. *Herald of publications for hydro technic. VNIIG named after Vedeneev B.E. Gosenergoisdat*. 1963. No. 5.
- [18]. Safin D.R., Gruzdeva V.A. Issledovanie nesushchei sposobnosti slabykh vodonasyschennykh glinistykh gruntov, armirovannykh vertikal'nymi armiruyushchimi élementami [Investigation of soft water-saturated clayey soils bearing capacity, reinforced with vertical elements]. *Herald of International scientific conference. Ufa, Russia. Omega science LLC*. 2017. Pp. 54-56.
- [19]. Shashkin A. G., Shatsky A. A. Influence of Replacement Bored Piles on Deformation of Water Saturated Clayey Soils. *Industrial and Civil Engineering*. 2017. No. 12. Pp. 15–22.
- [20]. Dedok V.N., Tarasevich A.N. Osobennosti svoystv slabykh vodonasyschennykh glinistykh gruntov i meropiratia po ikh uluchsheniui [Specificity of soft water saturated clayey soils' characteristics and measurements on their strengthening]. *Herald of Brest State technical university. Construction and architecture. Brest*. 2015. Pp. 47 – 50.
- [21]. Sheshenya N.L. Sovremennye metody povysheniia svoystv slabykh gruntov osnovanii stroitel'nykh ob'ektov [Up to date

- глинистых грунтов Имеретинской низменности // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2015. № 6. С. 22-24
- [23]. Абелев М.Ю., Аверин И.В., Чунюк Д.Ю., Коптева О.В. Исследование процессов уплотнения большой толщи водонасыщенных глинистых грунтов при строительстве уникальных сооружений // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2018. № 5. С. 19-24.
- [24]. Битиев М.Р. Исследование возможности закрепления водонасыщенных глинистых грунтов при строительстве инженерных сооружений на подтопляемых территориях Краснодарского края // Сборник статей по материалам XII Всероссийской конференции молодых ученых. Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина Краснодар. 2019. С. 255-256.
- [25]. ГОСТ 30416-2012 Грунты. Лабораторные испытания
- [26]. Месчан С.Р. Начальная и длительная прочность глинистых грунтов // М.: Недра. 1978, 207с.
- [27]. Коновалов В. П., Безволев С. Г. Коновалов П. А. Предпостроечное уплотнение слабых водонасыщенных глинистых грунтов армирующими известковыми дренами // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2011. № 6. С. 22-28.
- [28]. Тер-Мартirosян А.З., Тер-Мартirosян З.Г. Экспериментально-теоретические основы преобразования слабых водонасыщенных глинистых грунтов при поверхностном и глубинном уплотнении // Инженерная геология. 2015. №4. С. 16-25.
- [29]. 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.
- [30]. Бахронов Р.Р., Абелев К. М., Некрылов В. Б. Результаты исследования особенностей строительства зданий и сооружений на территориях с водонасыщенными глинистыми грунтами // Промышленное и гражданское строительство. М.: ООО Издательство ПГС. 2010. С. 57-59.
- [31]. Абелев М. Ю. Особенности строительства сооружений на слабых водонасыщенных грунтах // Промышленное и гражданское строительство. М.: ООО Издательство ПГС. 2010. № 3. С. 12-13.
- [32]. Филимонов Е. А., Устинов А. А. Специальные технологии устройства оснований зданий на территориях с водонасыщенными глинистыми грунтами // Промышленное и гражданское строительство. М.: ООО Издательство ПГС. 2011. С. 70-73.
- [33]. Meijer K.L. Computation of stresses and strains in saturated soil. Amsterdam. 1985. 163 pages.
- [34]. Marshall P.W. Permeability studies on selected saturated clays. University of Florida. 1960.
- [35]. Sridharan A, Abraham BM, Jose BT. Improve technique for estimation of preconsolidation pressure. Geotechnique. 1991. 41(2). Pp. 263–268.
- [36]. Jose BT, Sridharan A, Abraham BM. Log-log method for determination of pre-consolidation pressure. Geotech Test J ASTM. 1989. 12(3). Pp. 230–239.
- [37]. Akira Asaoka, Masaki Nakano, Toshinira Noda. Soil-water coupled behavior of saturated clay near/at critical state. Soils and foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1994. 34(1). Pp. 91-105.
- [38]. Borgesson L., Johannesson L.E., Sanden T., Hernelind J. Modelling of the physical behavior of water saturated clay barriers. Laboratory tests, material models and finite strengthening methods of soft soils intended for construction]. Industrial and Civil Engineering. 2012. No.1. Pp. 5–7.
- [22]. Abelev M. Yu., Averin I.V., Korableva U.A. Experimental investigation of the effectiveness of methods for compacting weak clay soil of the Imereti lowland. Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2015. No. 6. Pp. 22-24
- [23]. Abelev M. Yu., Averin I.V., Chuniuk D.U., Kopteva O.V. Study of the processes of consolidation of a thick mass of water saturated clay soils when erecting unique structures Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2018. No. 5. Pp. 19-24.
- [24]. Bitiev M.R. Issledovanie vozmozhnosti zakrepleniâ vodonasyschennykh glinistykh gruntov pri stroitel'stve inzhenernykh sooruzheniî na podtopliaemykh territoriakh Krasnodarskogo kraia [Investigation of water saturated clayey soils strengthening during construction of networks' structures at inundate areas of Krasnodar region.] Herald of publications based on materials of XII Russian conference of young scientists. Kuban State agricultural university named after Tribulin I.T. Krasnodar, Russia. 2019. Pp. 255 – 256.
- [25]. Konovalov V.P., Bezvolev S.G., Konovalov P.A. Preconstruction compaction of weak water saturated clay soils by the reinforcing limestone drains. Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2011. No. 6. Pp. 22-28.
- [26]. GOST 30416-2012 Soils. Laboratory tests
- [27]. Meschan S.R. Nachal'naia i dlitel'naia prochnost' glinistykh gruntov [Initial and long term strength of clayey soils]. Moscow. Nedra. 1978.
- [28]. Ter-Martirosian A.Z., Ter-Martirosian Z.G. Èksperimental'no-teoreticheskie osnovy preobrazovaniâ slabykh vodonasyschennykh glinistykh gruntov pri poverkhnostnom i glubinnom uplotnenii [Experimental and theoretical basis of transformation of weak water-saturated clay soils at surface and deep compaction]. Engineering geology magazine. 2015. No. 4. Pp. 16-25.
- [29]. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Prognozirovaniâ deformatsiî osnovanii fundamentov s uchetom dlitel'nogo nelineinogo deformirovaniâ gruntov [Prediction of deformation of the foundation with the longterm non-linear deformation of soil]. Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2011. No. 4. Pp.16-23.
- [30]. Bakhronov R.R., Abelev K.M., Nekrylov V.B. Rezul'taty issledovaniâ osobennostei stroitel'stva zdaniî i sooruzheniî na territoriakh s vodonasyschennymi glinistymi gruntami [Investigation results of buildings and structures characteristics at the areas with water saturated clayey soils]. Industrial and Civil Engineering.2010. No. 8. Pp. 57–59.
- [31]. Abelev M.Yu. Osobennosti stroitel'stva sooruzheniî na slabykh vodonasyschennykh gruntakh [The features of building and construction work over weak water-inundated soils]. Industrial and Civil Engineering. 2010. No. 3. Pp. 12–13.
- [32]. Filimonov E.A., Ustinov A.A. Special Technologies of Construction of Buildings' Foundations on Territories with Water Saturated Clay Soils. Industrial and Civil Engineering. 2011. No. 15. Pp. 70–73.
- [33]. Meijer K.L. Computation of stresses and strains in saturated soil. Amsterdam. 1985. 163 pages.
- [34]. Marshall P.W. Permeability studies on selected saturated clays. University of Florida. 1960.
- [35]. Sridharan A, Abraham BM, Jose BT. Improve technique for estimation of preconsolidation pressure. Geotechnique. 1991. 41(2). Pp. 263–268.
- [36]. Jose BT, Sridharan A, Abraham BM. Log-log method for determination of pre-consolidation pressure. Geotech Test J ASTM. 1989. 12(3). Pp. 230–239.
- [37]. Akira Asaoka, Masaki Nakano, Toshinira Noda. Soil-water coupled behavior of saturated clay near/at critical state. Soils and foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1994. 34(1). Pp. 91-105.
- [37]. Akira Asaoka, Masaki Nakano, Toshinira Noda. Soil-water coupled behavior of saturated clay near/at critical state. Soils

element application. Swedish nuclear fuel and waste management Co. 1995.

- [39]. Гольдин А.Л., Нгуен Фьонг Зунг. Построение траектории напряжений для ненасыщенного грунта при консолидированно-недренированных испытаниях в стабилометре // Инженерно-строительный журнал. 2012. №9(35). С.35-40. DOI:10.5862/mce.35.5
- [40]. Баданин А.Н., Колосов Е.С. Определение несущей способности армированного георешеткой грунтового основания // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 4(30). С. 25-32. DOI:10.5862/mce.30.4
- [41]. Попов А.О. Расчет конечной осадки глинистых оснований, армированных вертикальными элементами // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 4(56). С. 19-27. DOI:10.5862/MCE.56.3
- [42]. В.А. Соколов, Д.А. Страхов, Л.Н. Синяков, Г.В. Гарманов. Эффективность метода струйной цементации для закрепления грунтов основания // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. №5 (56). С. 55-63. DOI:10.18720/CUBS.56.5
- and foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1994. 34(1). Pp. 91-105.
- [38]. Borgesson L., Johannesson L.E., Sanden T., Hemelind J. Modelling of the physical behavior of water saturated clay barriers. Laboratory tests, material models and finite element application. Swedish nuclear fuel and waste management Co. 1995.
- [39]. Goldin, A.L., Dzung, N.F. Plotting the stress-path for unsaturated soil during consolidated undrained tests in stabilometer. Magazine of Civil Engineering. 2012. 35(9). Pp. 35–40. DOI: Pp.10.5862/mce.35.5.
- [40]. Badanin, A.N., Kolosov, E.S. Determining the bearing capacity of soil foundation reinforced by geogrid. Magazine of Civil Engineering. 2012. 30(04). Pp. 25–32. DOI: Pp.10.5862/mce.30.4.
- [41]. Popov, A.O. Settlement calculation of clay bed reinforced with vertical elements. Magazine of Civil Engineering. 2015. 56(4). DOI: Pp.10.5862/MCE.56.3.
- [42]. Sokolov, V.A., Strakhov, D.A., Sinyakov, L.N., Garmanov, G. V. Effectiveness of jet grouting method for soil base strengthening. Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. 5(56). Pp. 55–63. DOI: Pp.10.18720/CUBS.56.5.

Контактная информация

1.* 89817198862, nrenatkazan@gmail.com (Нурмухаметов Ренат, Главный инженер проекта)

Contact information

1.* 89817198862, nrenatkazan@gmail.com (Nurmukhametov Renat, Chief project engineer)

© Нурмухаметов Р.Р. 2019