



Research Article

Received: September 19, 2023

Accepted: October 20, 2022

Published: November 6, 2022

ISSN 2304-6295

Interaction of a sand cushion with a viscoelastic soil base

Kraev, Andrey Nikolaevich¹ Maltseva, Tatyana Vladimirovna^{1*} Abdullayev, Akmaljon Abduljalilovich²

¹ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation; kraev-an@mail.ru (K.A.N.); maltsevatv@tyuiu.ru (M.T.V.)

Correspondence: * email kraev-an@mail.ru; contact phone [+79097408456](tel:+79097408456)

Keywords:

Weak clay soils; Sand cushions; Reinforcement; Creep; Viscoelastic properties

Abstract:

The object of research is a sand cushion with contour reinforcement placed in a viscoelastic clay soil base. The work aims to analyze the stress-strain state of the reinforced soil mass. **Method.** Research of the soil array at the first stage of work is carried out on small-scale models in laboratory conditions. Quantitative assessment of the stress-strain state is performed on large-scale foundation models in the field. **Results.** Based on the results of experimental data, the dependences of the deformation of a soil mass reinforced with a sand cushion with contour reinforcement were established. A decrease in the vertical settlement of the foundation was revealed due to a decrease in shear deformations in the body of the sand cushion. A comparison of numerical modeling with experimental results showed good convergence, with a discrepancy between the results by 20-30%. A constructive solution for strengthening a weak base in the form of a sand cushion with contour reinforcement makes it possible to reduce the creep of the base, increasing the linear stage of its work.

1 Introduction

Строительство на слабых глинистых грунтах сопровождается значительными затратами на возведение фундаментов. Связано это с большой деформативностью слабых грунтов основания в процессе его нагружения, а, следовательно, и приспособлением фундамента к восприятию неравномерных осадок.

Для усиления слабого основания в малоэтажном строительстве применялись различные конструктивные мероприятия, позволяющие снизить затраты на возведение фундаментов, например, клиновидные сваи с гранулированным материалом различной формы частиц, но в одинаковом диапазоне размеров сыпучих материалов [1], песчаные сваи, армированные геосинтетическим материалом [2], геосинтетические мембраны [3], микросваи из стекловолокна [4], [5].

В работе [6] армирование грунта выполнялось полыми пластиковыми трубками, устанавливаемыми вертикально под сооружением. Армирующие элементы снижают перемещения грунта основания за пределами фундаментной плиты.

В работе [7] рассматриваются экспериментальные исследования песчаных грунтов, армированных горизонтальными слоями геосинтетическими материалами. Для изучения работы основания авторами применяется метод цветных полосок, который позволяет наглядно увидеть траектории кривых скольжения в грунтовом основании и оценить распределительную способность армированных грунтов. Авторами установлены зависимости угла рассеивания напряжений в армированном основании от размера ячейки. Установлено, что чем меньше размер ячейки, тем больше значение угла рассеивания напряжений под армирующей сеткой.

В работе [8] проведены экспериментальные исследования песчаного армированного основания в лабораторных условиях на стенде с прозрачным стеклом. В качестве армирующего

Kraev, A.; Maltseva, T., Abdullayev, A

Interaction of a sand cushion with a viscoelastic soil base;

2023; Construction of Unique Buildings and Structures; 109 Article No 10916. doi: 10.4123/CUBS.109.16



материала в экспериментах применялись либо георешетка, либо тканый геотекстиль. Армирующие элементы располагались горизонтально в один и несколько горизонтов армирования. Отмечено, что за счет большей поверхности контакта у геотекстиля армирование геотекстилем более эффективно с точки зрения увеличения несущей способности основания, чем армирование георешеткой.

В работе [9] рассмотрена работа армированного основания с горизонтальным расположением слоёв армирования и изменяющимся количеством слоёв, а также их положения, при испытаниях на трехосный сдвиг. Отмечается, что применение армирующих материалов увеличивает прочность на сдвиг и повышает жесткость.

Достаточно большое количество исследований посвящено армированным по контуру сваям, так в работах [10], [11], [12] исследованы армированные сваи, заполненные каменным грунтом. Отмечено, что применение каменных свай в слабых грунтах снижают общую осадку фундамента, а также ускоряют процесс консолидации грунтов.

Экспериментальные исследования армированной каменной сваи приведены в работе [13]. Авторы рассматривали комбинированное расположение армирующих элементов в виде вертикального армирования по контуру каменной сваи, а также горизонтально расположенных слоёв в несколько горизонтов. Применение армированных колонн увеличило предельную нагрузку до 1.8 раз. Наиболее эффективным является горизонтальное расположение армирующих элементов с одинаковым интервалом по всей высоте сваи.

В работе [14] исследованы каменные сваи, устроенные в слабых грунтах с контурным армированием и заполнителем в виде переработанного (измельченного) бетона или смешивания грунтов с отходами стекольного дробления и пластиковых бутылок, нанодобавок [15], [16], [17]. Используемые решения приводят к повышению механических характеристик грунтов, уменьшению их пластичности за счет применения добавок стекла и пластиковых отходов.

Вопрос экспериментальных исследований армированных свай с заполнением тела сваи местными материалами достаточно хорошо изучен. Однако, в этих работах нет ответа на вопрос какое армирование вертикальное или горизонтальное эффективнее.

Современное обобщение принципов строительства на армогрунтовых основаниях отражено в работе [18], отмечено, что наряду со сваями в случае необходимости замены грунта применяют армированные фундаментные подушки. Приведены расчетные и конструктивные требования по армированию грунтов. Не описан способ назначения размеров этих подушек.

В работе [19] отмечается эффективность применения песчаных подушек на слабых грунтах, а также насыпных и лессовых грунтах. Приводится методика назначения габаритных размеров песчаных подушек.

Экспериментальные исследования песчаных армированных подушек отражены в работе [20], где отмечается, что применение песчаных армированных подушек увеличивает несущую способность основания на 40% по сравнению с естественным основанием, а армирование подушки приводит к распределению напряжений под георешеткой.

В экспериментальных исследованиях в работе [21] выявлено, что предварительное натяжение армирующего элемента позволяет увеличить несущую способность усиленного основания на 70% по сравнению с решением без преднапряжения, а также снижает общие осадки модели.

Анализ приведенных выше работ показал, что произошло увеличение несущей способности и устойчивости грунтового основания за счет применения песчаных армированных подушек. Но не исследовано влияние контура подушки и вязкоупругих свойств грунта на несущую способность и устойчивость грунтового основания. Авторы не показали деформирование во времени песчаной подушки и подстилающих слабых грунтов. В расчетах по линейным вязкоупругим моделям грунта вязкоупругие свойства подушки или грунта учитываются с помощью временных механических характеристик материала. Для этого проводятся эксперименты по определению материальных функций ползучести, отражающие механические свойства грунта. Отдельные точки кривой ползучести материала (грунта) определены экспериментальным путем, и соответствуют деформациям ползучести в фиксированные моменты времени $t_i, i=1, \dots, n$.

Экспериментальное исследование вязкоупругих свойств грунта без усиления его несущей способности, то есть без конструктивного решения в виде песчаной подушки, приведено в экспериментах [22]-[24]. В этих работах целью экспериментов было определение параметров (механических характеристик, как функций времени) выбранной вязкоупругой математической модели грунта. Например, если грунт рассматривался как твердое тело, то для определения



напряженно-деформированного состояния грунта во времени в работе [23] разработана вязкоупругопластическая модель грунта, учитывающая изменение формы. Модель основана на линейной зависимости между скоростью деформаций сдвига и напряжениями.

Грунты с коэффициентом водонасыщения более 80% обладают особыми условиями деформируемости. В механике грунтов зависящая от времени реакция грунта интерпретировалась как результат процесса сжатия, в котором каркас грунта считался упругим и однофазным. Поровое давление жидкости полностью рассеивается, уплотнение грунта прекращается, что противоречит результатам лабораторных и полевых экспериментов [23, 25].

Известные вязкоупругие модели однофазного грунта основаны на моделях Максвелла и Кельвина-Фойгта. В модели Максвелла последовательно соединены пружина и демпфер (поршень с вязкой жидкостью). Пружина представляет собой элемент, отвечающий за упругую деформацию материала, а демпфер - за вязкую деформацию. Оба элемента работают вместе и моделируют вязкоупругое поведение грунта.

Математически модель Максвелла описывается уравнением [14]:

$$\sigma(t) = E(t) + \eta \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \quad (1)$$

где $\sigma(t)$ - напряжение в грунте в момент времени t , $\varepsilon(t)$ - деформация грунта в момент времени t , E - модуль упругости грунта, η - коэффициент вязкости грунта.

Модель Кельвина-Фойгта состоит из параллельно соединенных пружины и демпфера, аналогично модели Максвелла. Отличие моделей в способе соединения двух элементов.

В работе [27] для моделирования вязкоупругих свойств глины рассмотрена обобщенная модель Фойгта. Теория дробного исчисления впервые была введена в модель Кельвина-Фойгта для описания уплотнения вязкоупругих насыщенных грунтов в [28]. Модель вязкоупругой пластической ползучести с дробной производной для мерзлых вязкоупругих грунтов рассмотрена в работе [29].

В статье [30] дифференциальные зависимости деформаций от напряжений, получаемые в различных вязкоупругих моделях, не используются, а рассмотрена интегральная форма уравнения деформаций от напряжений. Параметры математической модели определены из эксперимента. Физический закон связи напряжений и деформаций задан с помощью интеграла Больцмана, который приведен к свертке двух функций в изображениях по Лапласу-Карсону. Из совпадения выражений для законов Гука и Больцмана в изображении по Лапласу-Карсону с точностью до обозначений решение вязкоупругой задачи получено в два этапа согласно подходу А.А. Ильюшина и П.М. Огибалова, предложенному для расчета конструкций [31]. На первом этапе записывается решение для упругого основания. На основе принципа Вольтерры (системы переобозначений) упругое решение записывается в изображениях по Лапласу-Карсону. На втором этапе, для фиксированной точки пространства, осуществляется приближенный переход от известного изображения к оригиналу [32]. Представление решения вязкоупругой задачи в два этапа является новым в математическом моделировании вязкоупругих грунтов.

На основании обзора экспериментального и математического моделирования усиленных и вязкоупругих грунтовых оснований авторами выбран способ повышения несущей способности основания в виде армированных песчаных подушек. Цель исследования - для конструктивного решения в виде песчаной подушки, внедренной в грунт, проведены эксперименты, показывающие влияние контура армирования подушки на несущую способность основания, и получена функция ползучести осадки для определения вязкоупругих механических характеристик песчаной подушки. Объектом исследования является песчаная подушка, устроенная в грунтовое основание, предметом исследования является напряженно-деформированное состояние песчаной подушки, внедренной в грунтовое основание.

2 Materials and Methods

Для выявления закономерностей работы песчаных армированных подушек, устроенных в слабых глинистых грунтах, авторами проводились исследования, как в лабораторных, так и в натуральных (полевых) условиях, позволяющих получить качественную картину работы усиленного основания, а также изучить напряженно-деформированное состояние грунтового массива.

Лабораторные эксперименты были проведены для 4 вариантов грунтовых оснований, нагруженных полосовой нагрузкой. При исследованиях рассматривалось естественное основание (рис.1а); основание с устройством прямоугольной подушки из песка средней крупности (рис.1б); основание с устройством песчаной подушки с криволинейным контуром (рис. 2в); основание с устройством песчаной подушки с криволинейным контуром, армированной геосинтетическим материалом (рис. 2г).

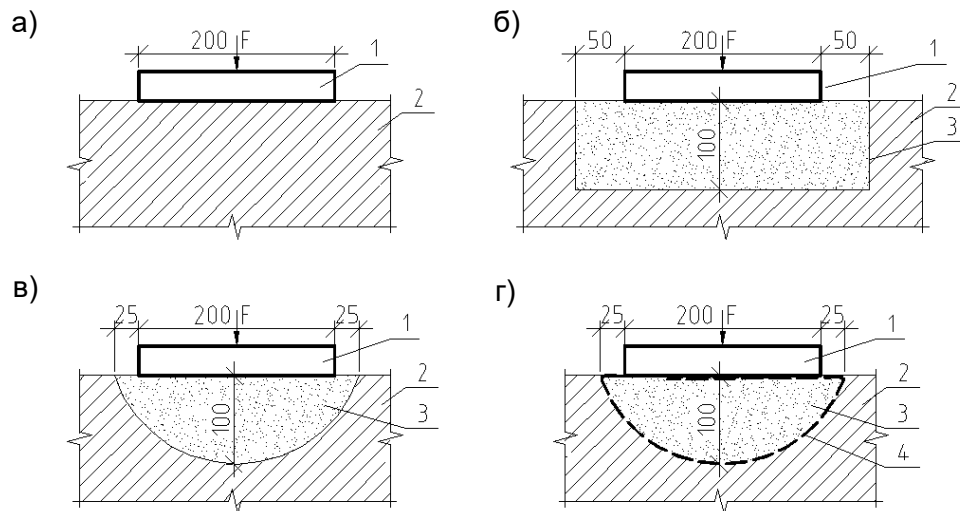


Рис. 1 - Схемы лабораторных экспериментов 1 – штамп; 2 – глинистое основание; 3 – песок; 4 – геосетка

Fig. 1 - Schemes of laboratory experiments 1 – stamp; 2 – clayey base; 3 – sand; 4 – geogrid

Цель экспериментов - исследование несущей способности грунтового основания для 4 вышеуказанных вариантов. В лабораторных условиях одна серия экспериментов была поставлена в экспериментальном лотке прямоугольной формы, другая в экспериментальном лотке в форме полутрубы.

3 Results and Discussion

В экспериментах модели фундаментов в плане имели размеры: 200мм x 500 мм. Песчаная подушка в виде половины эллипса с полуосями 100 мм и 500 мм.

Эксперимент проводился в лотке с размерами 1500x2500 мм в плане и высотой – 1200 мм. Нагрузка прикладывалась ступенчато (рис.2). Критерием условной стабилизации являлась осадка на ступени, не превышающая 0.1 мм за последние 2 часа наблюдений.

В экспериментах использовался грунт нарушенной структуры, который укладывался в лоток слоями по 200 мм. Мощность экспериментального основания составила 1000 мм. При укладке грунта для контроля физико-механических характеристик грунтов послойно отбирались образцы грунта с последующим их испытанием.

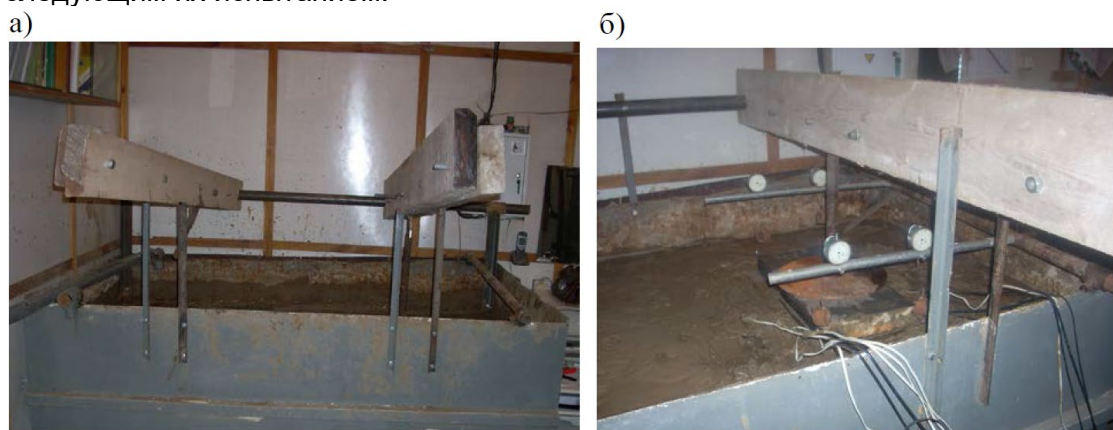


Рис. 2 - Грунтовый лоток а) общий вид лотка; б) загрузка образца

Fig. 2 - Ground tray a) general view of the tray; b) sample loading

В качестве армирующего элемента в лабораторных исследованиях использовалось водопроницаемое стекловолокно ССП 30/30 (производитель АО «СТЕКЛОНИТ», Уфа, Россия). Результаты эксперимента представлены в виде зависимости «осадка-давление» (рис.3).

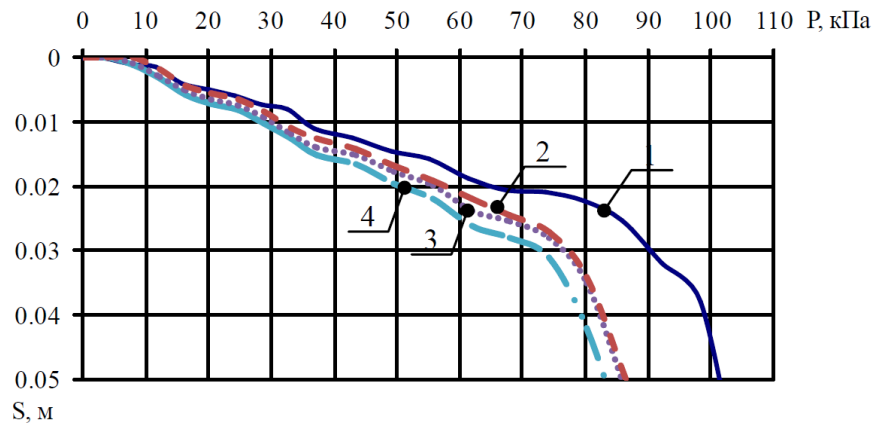


Рис. 3 – Зависимость осадки от давления 1 – основание с криволинейной песчаной подушкой (с армированием); 2 – основание с прямоугольной песчаной подушки; 3 – основание с криволинейной песчаной подушкой (без армирования); 4 – глинистое основание
Fig. 3 – Dependence of settlement on pressure 1 – base with a curved sand cushion (with reinforcement); 2 – base with a rectangular sand cushion; 3 – base with a curved sand cushion (without reinforcement); 4 – clay base

Согласно графикам (рис.3) осадки штампа, действующего на основание с песчаной подушкой без армирования, как для прямоугольной, так и для подушки с криволинейной подошвой практически совпадают. Это объясняется «раздавливанием» песчаной подушки, возникающими при нагружении поперечными деформациями песчаного грунта. Контурное армирование песчаной подушки с криволинейной подошвой позволило снизить осадку до 35%, за счет уменьшения этих деформаций.

Для изучения деформаций грунтового основания были проведены экспериментальные исследования с использованием метода «фотофиксации». При проведении эксперимента на боковой грани грунта формировалась сетка из марок (рис 4б). Далее данная поверхность грунта закрывалась прозрачным оргстеклом, позволяющим оценить деформации установленных марок. Загружение лотка проводилось ступенчато, на каждой ступени выполнялась съемка геометрического положения марок. Грунтовой лоток представлял собой полуцилиндр диаметром 1000мм, высотой 800мм (рис.4).

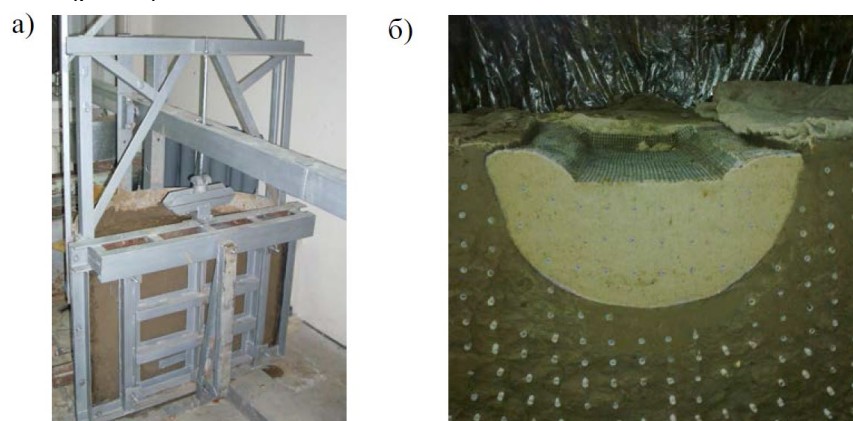


Рис. 4 - Грунтовой лоток а) общий вид грунтового лотка; б) общий вид грунтового массива после проведенного эксперимента
Fig. 4 - Soil tray a) general view of the soil tray; b) general view of the soil mass after the experiment

В эксперименте использовался суглинок, который послойно укладывался в лоток с отбором проб для контроля физико-механических характеристик грунтов.

Фундамент моделировался прямоугольным штампом шириной 100 мм, длиной 250 мм. Размеры штампа подбирались с учетом размеров лотка, для исключения влияния стенок установки на результаты эксперимента. Глубина песчаной подушки составляла 100мм, с шириной по верху отсеченного эллипса 240 мм. Длина песчаной подушки соответствовала длине модели фундамента и составляла 250 мм.

В результате экспериментов построены графики «осадка-давление» (рис.5).

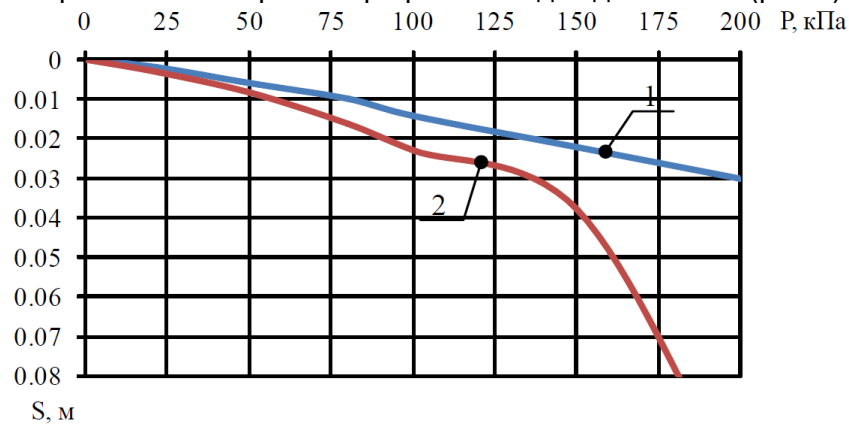


Рис. 5 – Зависимость осадки от давления 1 – песчаная подушка, армированная по контуру; 2 – глинистое основание

Fig. 5 – Dependence of settlement on pressure 1 – sand cushion, reinforced along the contour; 2 – clay base

По экспериментальным результатам видно, что осадка основания, усиленного песчаной армированной подушкой меньше осадки штампа на глинистом основании (при 150 кПа разница в 1.7 раза; при 175 кПа разница в 2.5 раза). Основание, усиленное песчаной армированной подушкой, продолжает работать линейно до окончания эксперимента.

По данным экспериментов при давлении 150 кПа построены изолинии вертикальных и горизонтальных перемещений в моделируемом объеме грунта (рис.6).

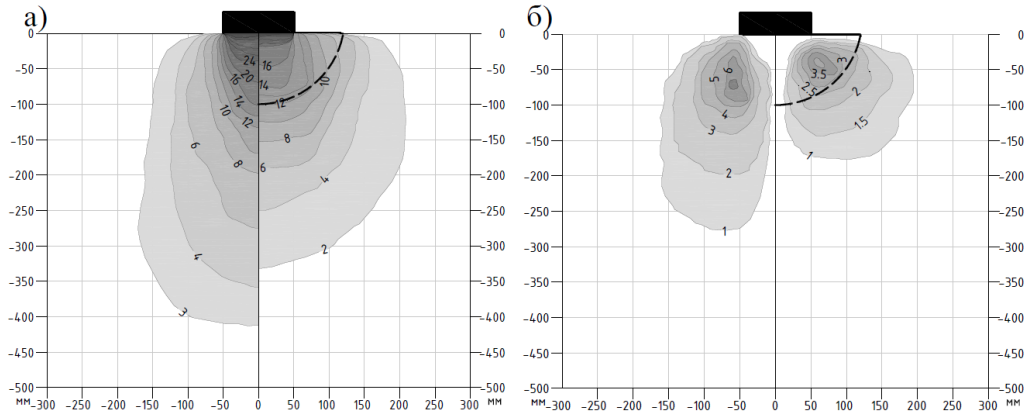


Рис. 6 - Перемещения (мм): а) вертикальные; б) горизонтальные; (слева от оси симметрии – глинистое основание; справа – основание с песчаной, армированной подушкой)

Fig. 6 - Displacements (mm): a) vertical; b) horizontal; (to the left of the symmetry axis is a clay base; to the right is a base with a sandy, reinforced cushion)

По результатам исследования деформируемости грунтового основания установлено, что сформированная криволинейная поверхность позволяет включить в работу грунт, расположенный по контуру песчаной подушки, что позволяет увеличить линейную работу основания. Армирование песчаной подушки геосинтетическим материалом позволяет снизить поперечные деформации, тем самым уменьшая вертикальную осадку фундамента.

Для дальнейших исследований представленного конструктивного решения усиления слабых грунтов были выполнены полевые экспериментальные исследования крупномасштабных моделей ленточного фундамента.

В качестве экспериментальных моделей фундаментов в полевых условиях использовались два ленточных фундамента с размерами в плане 0.5мх5м. Под одним ленточным фундаментом

формировалась песчаная подушка, армированная по контуру геосинтетическим материалом ГЕОСПАН ТН-80 (производитель компания Гекса, г. Красногорск, Россия). Форма криволинейной поверхности была принята в виде полуэллипса с полуосями 0.8м и 1.5м. Длина подушки соответствовала длине модели ленточного фундамента и составляла 5м.

В качестве исследуемых параметров при проведении полевых экспериментов были: осадка фундаментов, деформации грунтовых слоёв, распределение напряжений в теле подушки и грунтовом основании.

Загружение обоих ленточных фундаментов выполнялось одновременно, ступенями, через распределительную балочную систему. Максимальное давление под подошвой ленточного фундамента составило 240 кПа.



Рис. 7 - Проведение полевого эксперимента
Fig. 7 - Conducting a field experiment

По результатам проведенного полевого эксперимента были построены графики «осадка-давление» для обеих моделей ленточных фундаментов. Для сопоставления результатов было выполнено численное моделирование эксперимента в программных комплексах FEM models (<http://georeconstruction.com>) и Plaxis (<https://www.plaxis.ru>).

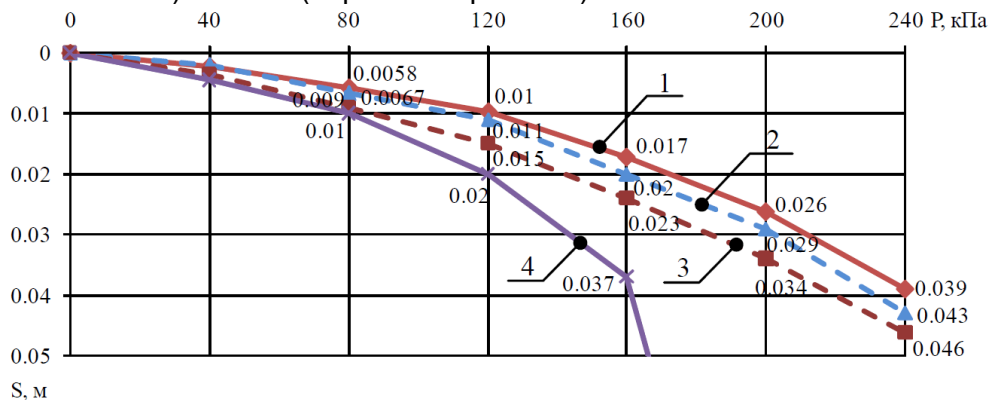


Рис. 8 - График «осадка – давление» 1 – эксперимент, ленточный фундамент с песчаной армированной подушкой; 2 – значения полученные в ПК FEM models (ленточный фундамент с песчаной армированной подушкой); 3 – значения полученные в ПК Plaxis (ленточный фундамент с песчаной армированной подушкой); 4 – эксперимент, фундамент на естественном основании

Fig. 8 - Settlement - pressure graph 1 - experiment, strip foundation with a reinforced sand cushion; 2 – values obtained in PC FEM models (strip foundation with reinforced sand cushion); 3 – values obtained in the Plaxis PC (strip foundation with reinforced sand cushion); 4 – experiment, foundation on a natural basis

По результатам численного моделирования и сопоставления данных с результатами эксперимента выявлена хорошая сходимость, с расхождением результатов до 20-30%, что

позволяет с достаточной степенью оценивать применяемое конструктивное решение при численном моделировании.

С целью изучения деформирования песчаной армированной подушки и подстилающих слабых грунтов во времени, для натурального эксперимента построен график зависимости вертикальной осадки модели фундамента от времени – кривая ползучести, для каждой степени загрузки.

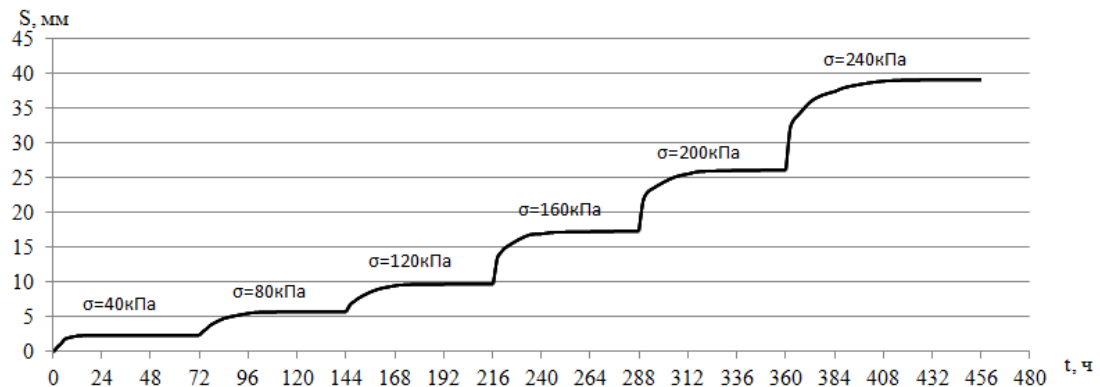


Рис. 9 - График кривой ползучести
Fig. 9 - Creep curve graph

По результатам анализа кривой ползучести виден её затухающий характер на всех ступенях загрузки, что говорит о не исчерпаниии несущей способности основания, усиленного песчаной подушкой с контурным армированием.

Результаты полевого эксперимента подтвердили полученную в результате лабораторных исследований качественную оценку эффективности конструктивного решения и позволили количественно оценить напряженно-деформированное состояние грунтового массива.

4 Conclusions

Комплексный анализ результатов лабораторных и полевых исследований позволил сделать следующие выводы:

1. Применение песчаной армированной подушки в основаниях, сложенных слабыми глинистыми грунтами, позволило увеличить несущую способность основания более чем в 2 раза, за счет уменьшения сдвиговых деформаций подушки и окружающего грунта.
2. Армирование песчаной подушки по контуру снизило более чем в 2.5 раза её поперечные деформации и уменьшило вертикальные осадки фундамента на 50%.
3. Выявлены закономерности деформирования грунтового основания, усиленного песчаной армированной подушкой. Осадка основания с песчаной армированной подушкой состояла из деформации подушки (до 70%), так как она находилась в зоне максимальных напряжений, передаваемых от фундамента, и деформаций слабых подстилающих слоёв (до 30%). Поэтому с помощью изменения характеристик песчаного грунта подушки, возможно, регулировать напряженно-деформированное состояние всего основания.
4. Применение конструктивного решения в виде песчаной армированной по контуру подушки позволило снизить ползучесть грунтового основания. На всех ступенях нагружения кривая ползучести имела затухающий характер, за счет замены слабого глинистого грунта в зоне с максимальными напряжениями, на более равномерно распределенные напряжения.

5 Fundings

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23–29–00118, <https://rscf.ru/project/23-29-00118>

This research was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 23-29-00118, <https://rscf.ru/project/23-29-00118>

References



1. Liu, Y.-Y., Yeung, A.T., Zhang, D.-L., Li, Y. (2017) Experimental study on the effect of particle shape on stress dip in granular piles. *Powder Technology*, **319**, 415-425. <https://sci-hub.ru/10.1016/j.powtec.2017.07.021>
2. Maltseva, T., Nabokov, A., Chernykh, A. (2015) Reinforced Sandy Piles for Low-Rise Buildings. *Procedia Engineering*, **117**, 239-245. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581501810X?via%3Dihub>
3. Brian, O. Oyegbile, B., Oyegbile, A. (2017) Applications of geosynthetic membranes in soil stabilization and coastal defence structures. *International Journal of Sustainable Built Environment*, **6** (2), 636-662. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212609016302059?via%3Dihub>
4. Sabri, M.M.S., Vatin, N.I., Nurmukhametov, R.R., Ponomarev, A.B., Galushko, M.M. (2022) Vertical Fiberglass Micro piles as Soil-Reinforcing Elements. *Materials*, **15**(7), 2592. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35407923/>
5. Sabri, M.M.S., Vatin, N.I., Ponomarev, A.B., Nurmukhametov, R.R., Kostyukov, I.I. (2022) Settlement of Soil Reinforced with Vertical Fiberglass Micro-Piles. *Materials*, **15**(14), 4744. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35888215/>
6. Mirsayapov, I.T., Popov, A.O. (2008) Experimental and theoretical studies of the work of reinforced soil masses. *News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*, **2**(10), 75-80. <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalno-teoreticheskie-issledovaniya-raboty-armirovannyh-gruntovyh-massivov>
7. Aleksandrov, A.S., Kalinin, A.L., Tsyguleva M.V. (2016) Distribution capacity of sandy soils reinforced with geosynthetics. *Engineering and Construction Journal*, **6**(66), 35-48. <https://cyberleninka.ru/article/n/distribution-capacity-of-sandy-soils-reinforced-with-geosynthetics>
8. Brahim Lafifi, Ammar Rouaiguia, El Alia Soltani (2023) A Novel Method for Optimizing Parameters influencing the Bearing Capacity of Geosynthetic Reinforced Sand Using RSM, ANN, and Multiobjective Genetic Algorithm. *Studia Geotechnica et Mechanica*, **45**(2), 174-196. <https://doi.org/10.2478/sgem-2023-0006>
9. Xiaofei Jing, Changshu Pan, Yulong Chen, Xiangfu Li, Wensong Wang, Xu Hu (2021) Improvement Effect of Reticular Glass Fibers on the Mechanical Properties of Tailings Sand with the Lenticle (Layered Sandy Soil). *Water*, **13**, 1379. <https://doi.org/10.3390/w13101379>
10. Mohamed Elsayy. (2013) Behaviour of soft ground improved by conventional and geogrid-encased stone columns, based on FEM study. *Geosynthetics International*, **20**(4), 276-285. https://www.researchgate.net/publication/270428065_Behaviour_of_soft_ground_improved_by_conventional_and_geogrid-encased_stone_columns_based_on_FEM_study
11. Basuony M. El-Garhy, Basuony M. El-Garhy. (2016) Behavior of strip footing resting on soft ground stiffened by granular piles. *Journal of Engineering And Technology Research*, **4**(1), 1-12. https://www.researchgate.net/publication/299605014_behavior_of_strip_footing_resting_on_soft_ground_stiffened_by_granular_piles
12. Yada Tesfaye Boru, Adamu Beyene Negesa, Gianvito Scaringi, Wojciech Puła (2022) Settlement Analysis of a Sandy Clay Soil Reinforced with Stone Columns. *Studia Geotechnica et Mechanica*, **44**(4), 333-342. <https://doi.org/10.2478/sgem-2022-0020>
13. Srijan Kumar Gupta, Ashok Kumar Gupta, (2023) Horizontally Layered and Vertically Encased Geosynthetic Reinforced Stone Column: An Experimental Analysis. *Applied Sciences*, **13**, 1-18. <https://www.mdpi.com/journal/applsci>
14. Ahmed Hussein Majeed, Alaa H. J. Al-Rkaby (2023) Improving weak soils with reinforced stone columns. *3C Tecnología*, **12**(2), 78-91. <https://doi.org/10.17993/3ctecno.2023.v12n2e44>
15. Tewodros Tsegaye Woldesenbeti (2023) Strength Improvement of Black Cotton Soil Using Plastic Bottles and Crushed Glass Wastes. *Journal of Engineering*, 1583443, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2023/1583443>
16. Mohammad Saleh Baradaran, Ramin Qazanfari, Sajed Baradaran (2023) Study of soil reinforcement in the east of Mashhad using glass granule. *Mater. Research Express*, 055202, 10. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acd5af>
17. Govindarajan Kannan, Evangelin Ramani Sujatha (2022) Effect of Nano Additive on Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Soil. *Journal of Natural Fibers*, **20**(1), 2143980. <https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2143980>
18. Usmanov, R., Mrdak, I., Vatin, N., Murgul, V. (2014) Reinforced soil beds on weak soils. *Applied Mechanics and Materials*, **633**-634, 932-935. <https://www.scientific.net/AMM.633-634.932>



19. Mangushev R.A., Usmanov R.A., Lanko S.V., Konyushkov V.V. (2012) Methods of preparation and installation of artificial foundations. <https://www.litres.ru/book/v-v-konushkov/metody-podgotovki-i-ustroystva-iskusstvennyh-osnovaniy-17187731/>
20. Tatyannikov D.A., Ponomarev A.B. (2017) Full-scale testing of reinforced foundation pads. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture*, **8** (3), 97–105. https://www.researchgate.net/publication/320670335_Full-scale_testing_of_reinforced_foundation_pads
21. Shiranov A.M., Nevzorov A.L. (2020) Increasing the stability of the sand cushion due to prestressing of the reinforcing layers of geosynthetics. *Construction and Geotechnics*, **11**, No. 1, 30-40. <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-ustoychivosti-peschano-podushki-za-schet-prednapryazheniya-armiruyuschih-sloev-geosintetika>
22. Ai, Z. Y., Chu, Z. H., Cheng, Y. C. (2020) Time effect of vertically loaded piled rafts in layered cross-anisotropic viscoelastic saturated soils. *Computers and Geotechnics*, **119**, 103384. <https://sci-hub.ru/10.1016/j.compgeo.2019.103384>
23. Demin V. A. (2005) Experimental and theoretical study of a viscoelastic two-phase medium. <https://www.dissercat.com/content/eksperimentalnoe-i-teoreticheskoe-issledovanie-napryazhenno-deformirovannogo-sostoyaniya-dvu>
24. Sabri, M.M., Shashkin, K.G. (2023) Soil-structure interaction: theoretical research, in-situ observations, and practical applications. *Magazine of Civil Engineering*. **120**(4), 12005. <https://engstroy.spbstu.ru/en/article/2023.120.5/>
25. Bugrov A.K., Golly A.V., Kagan A.A., Kuraev S.N., Pirogov I.A., Shashkin A.G. (1997) Field studies of the stress-strain state and consolidation of the foundations of protection complex structures St. Petersburg from floods. *Foundations, foundations and soil mechanics*, **1**, 2-9. <https://ofmg.ru/index.php/ofmg/article/view/1535>
26. Dalmatov B.I., Bronin V.N., Karlov V.D., Mangushev R.A. (2000) Soil mechanics. *Fundamentals of geomechanics in construction*, 1, ISBN 5-93093-070-8. <https://bik.sfu-kras.ru/elib/view?id=BOOK1-624.131/M55-420115>
27. Liu, J.C., Lei, G.H., Wang, X.D. (2015) One-dimensional consolidation of visco-elastic marine clay under depth-varying and time-dependent load Marine. *Georesour Geotechnol*, **33**(4), 337–347. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1064119X.2013.877109>
28. Wang, L., Sun, D.A., Li, P., Xie, Y. (2017) Semi-analytical solution for one-dimensional consolidation of fractional derivative viscoelastic saturated soils. *Computers and geotechnics*, **83**, 30–39. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1064119X.2013.877109>
29. Liao, M., Lai, Y., Liu, E., Wan, X. (2016) A fractional order creep constitutive model of warm frozen silt. *Acta Geotechnica*, **12**(2), 377–389. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11440-016-0466-4>
30. Maltseva, T. (2022) Modeling a weak foundation in interaction with reinforced sand piles under a low-rise building. *Key Engineering Materials*, **906**, 39-45. <https://www.scientific.net/KEM.906.39>
31. Ilyushin, A.A., Pobedrya, B.E. (1970) Fundamentals of the mathematical theory of thermoviscoelasticity. <https://search.rsl.ru/ru/record/01007124977>
32. Maltsev, L.E., Karpenko, Yu.I. (1999) The theory of viscoelasticity for civil engineers. ISBN 5-88131-005-5 https://rusneb.ru/catalog/000219_000026_RU_ГПНТБ+России_IBIS_0000253448/