



DOI: 10.15593/2224-9826/2018.4.08

УДК 624.151.5

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АРМИРОВАННОЙ ПЕСЧАНОЙ ПОДУШКИ В ОСНОВАНИИ ФУНДАМЕНТА

А.М. Ширанов, А.Л. Невзоров

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 14 августа 2018
Принята: 24 сентября 2018
Опубликована: 28 декабря 2018

Ключевые слова:

песчаная подушка, торф, геосинтетика, армирование грунта, осадка основания, физическое моделирование

АННОТАЦИЯ

При строительстве на заболоченных территориях устройство фундаментов на песчаной подушке при мощности отложений торфа до 3–4 м зачастую обеспечивает более рациональное проектное решение по сравнению со свайными фундаментами. Проблему представляют трудно прогнозируемые осадки основания, развивающиеся за счет горизонтальных деформаций подушки. В статье представлены результаты физического моделирования в лабораторном лотке песчаных подушек, устраиваемых в слое торфа при различных способах размещения армирующего материала.

Эксперименты проводились с горизонтальным армированием без закрепления концов полотнищ, с их отгибами в тело подушки и креплением к «мешкам» с песком; моделировались S-образное расположение армирующего материала, обойма из геосинтетика со сшитыми концами полотнищ, а также несколько опирающихся друг на друга обойм небольшой высоты, в том числе с предварительным натяжением армирующего материала. На поверхности искусственного основания размещался штамп, нагрузка на него создавалась пневмоцилиндром, давление на грунт в экспериментах достигало 750 кПа. Осадка штампа измерялась датчиками перемещения. Регистрация движения частиц песка в подушке осуществлялась цифровой фотокамерой через прозрачную стенку лотка, получаемые изображения обрабатывались с помощью специализированной программы PIVview 2C 10 Demo v 3.8. Результаты представлены в виде графиков зависимости осадки штампа от давления.

Эксперименты показали, что многослойное армирование подушки с закреплением концов полотнищ армирующего материала позволяет обеспечить требуемые значения осадки фундамента при заданных размерах подушки. Наиболее эффективным является устройство обойм небольшой высоты. Модели с неподатливой анкерровкой концов или предварительным напряжением полотнищ армирующего материала характеризуются малыми осадками на начальных стадиях нагружения штампа и высокой несущей способностью. При разрыве слоев армирования происходит прогрессирующее развитие деформаций с потерей устойчивости основания. Податливая анкерровка позволяет перераспределить напряжения в искусственном основании между армирующим материалом и грунтом, исключая тем самым разрыв полотнищ и быстро прогрессирующее развитие осадки.

© ПНИПУ

© Ширанов Алексей Михайлович – аспирант, e-mail: alexeyshiranov@gmail.com.

Невзоров Александр Леонидович – доктор технических наук, профессор, e-mail: a.l.nevzorov@yandex.ru.

Alexey M. Shiranov – Postgraduate Student, e-mail: alexeyshiranov@gmail.com.

Alexandr L. Nevzorov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: a.l.nevzorov@yandex.ru.

PHYSICAL MODELING OF A REINFORCED SAND BASE OF THE FOUNDATION

A.M. Shiranov, A.L. Nevzorov

Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 14 August 2018
Accepted: 24 September 2018
Published: 28 December 2018

Keywords:

sand bed, peat, geosynthetics, soil reinforcement, foundation settlement, physical modeling

ABSTRACT

When building structures on wetlands with peat deposits of 3–4 m thickness, the footings on a sand bed ensure in many cases more efficient design decisions if compared with pile foundations. But foundation settlement developing as a result sand bed horizontal deformations, which are difficult to estimate, provide quite a problem in designing them. The article describes results of physical modeling in laboratory box for sand beds arranged in a peat layer with reinforcing materials placed according to various methods.

The experiments were carried out with horizontal reinforcement without anchoring the edges of the sheets, with folding them into the body of the bed and with fixing them to sand bags. The S-shaped arrangement of reinforcing material, casing of geosynthetics with stitched edges of sheets as well as several casings of low height, including prestressed reinforcing material were modeled. A rectangular plate was placed on the surface of the sand bed. The load to the plate was applied with a pneumatic cylinder and it achieved 750 kPa to the ground in the course of the experiments. The settlement of the plate was measured by an electronic sensor. The displacement of sand particles was registered by a digital camera through a glass wall of the box and the obtained camera images were processed with special software PIVview 2C 10 Demo v 3.8. The results are provided as plate settlement vs load pressure.

The experiments showed that bed multilayer reinforcement with anchoring edges allows to ensure the required values of settlement provided given bed sizes. The most efficient arrangement is one made of low height casings. Models with unyielding edge reinforcement or with prestressed sheets of reinforcement material are characterized by low settlements at first phases of plate loading and high bearing capacity. After breaking of reinforcement layers the deformations develop progressively and the foundation loses its stability. Yielding anchoring allows distributing stresses between reinforcing material and soil, thus excluding breaking of sheets and fast settlement developing.

© PNRPU

Введение

При строительстве на заболоченных территориях устройство фундаментов мелкого заложения на искусственном основании и, в частности, на песчаной подушке при мощности отложений торфа до 3–4 м зачастую обеспечивает более рациональное проектное решение по сравнению со свайными фундаментами. Проблему представляют трудно прогнозируемые осадки основания, развивающиеся за счет поперечных деформаций подушки [1]. Согласно ТСН 50-302–96 нижний контур подушки должен выноситься за наружную грань фундаментов на расстояние, превышающее ее высоту. Уменьшить размеры подушки, а возможно, и фундаментов здания, позволяет армирование геосинтетиками [2–4].

Основная часть

В настоящей статье представлены результаты физического моделирования армированной песчаной подушки при различных способах размещения армирующих слоев. Исследования выполнялись на стенде ГТ 0.7.2 производства компании «Геотек» (г. Пенза). В связи с тем, что конечной целью было выявление наиболее оптимального способа армирования, т.е. решение качественной задачи, моделирование велось без применения масштабных коэффициентов [5, 6].

Для определения деформаций модели использовался метод цифровой трассерной визуализации, являющийся одним из способов бесконтактных измерений [7]. Необходимо заметить, что регистрацию перемещения частиц грунта с помощью фотоснимков предложил и реализовал В.И. Курдюмов в 90-х гг. XIX в. [8]. Современная цифровая техника и программные продукты позволяют, кроме траектории перемещения частиц, получить скорости их движения, деформации сдвига, изменение объема грунта и др. В геотехнических исследованиях рассматриваемый метод получения и обработки данных начал использовать D.J. White [9].

В наших экспериментах цифровые изображения обрабатывались с помощью программы PIVview 2C 10 Demo v 3.8 (PIV – Particle Image Velocimetry). Фотографии конвертировались в черно-белую гамму, производилась настройка области обработки изображений, размера сетки расчетной области, шага поиска, свойств векторов и прочих характеристик (рис. 1). Анализ того или иного способа армирования подушки выполнялся по полученным полям перемещений частиц грунта в модели.

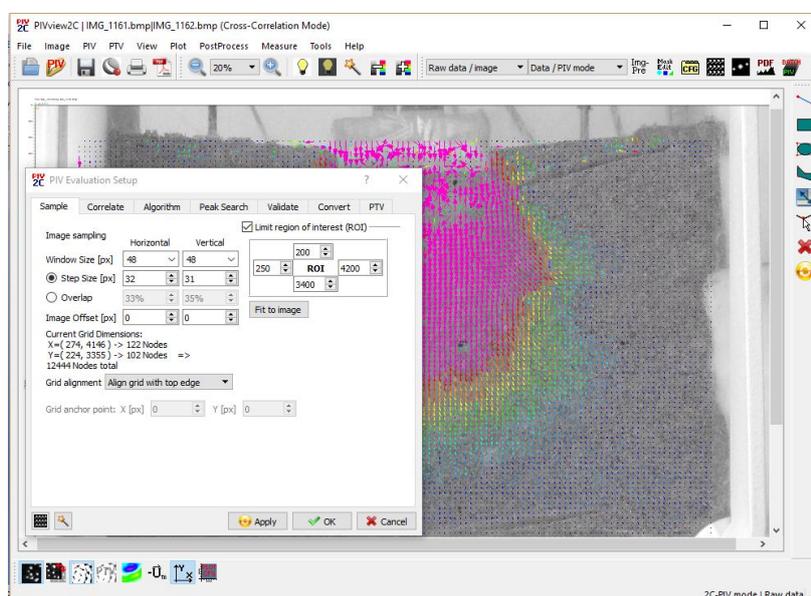


Рис. 1. Окно настройки параметров PIV-расчета с примером обработанного изображения и полученного векторного поля перемещений

Fig. 1. Window for setting the parameters of the PIV calculation with an example processed image and obtained vector displacement field

Материалы. Модель подушки формировалась из мелкого песка, гранулометрический состав которого приведен на рис. 2. Песок уплотнялся послойно до коэффициента пористости 0,58–0,64, его влажность поддерживалась в пределах 5–6 %. Деформационно-прочностные свойства песка были следующими: одометрический модуль деформации $E_{oed} = 11,8$ МПа, угол внутреннего трения $\varphi = 32$, удельное сцепление $c = 0$.

Слой торфа моделировался эластичным пенополиуретаном – поролоном, что существенно облегчало формирование модели и исключало появление в песке включений органики при многократной загрузке-разгрузке лотка, тем более что по данным компрессионных испытаний значение модуля деформации поролона оказалось характерным и для торфа – $E_{oed} = 0,6$ МПа.

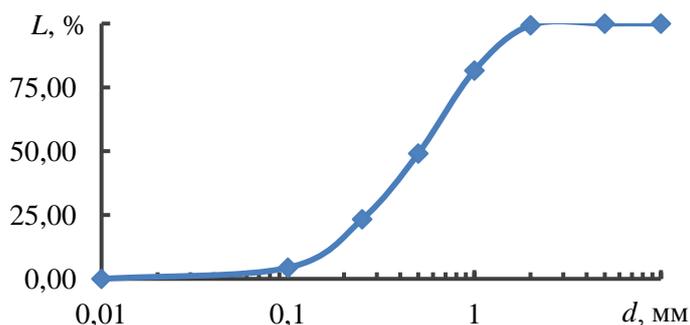


Рис. 2. Кривая гранулометрического состава песка
Fig. 2. Size distribution of the sand

На дно лотка отсыпался щебень, по которому укладывался слой песка, образующий так называемое минеральное дно болота. Слои геокомпозита, состоящего из георешетки и геотекстиля, имитировались армированной полиэтиленовой пленкой с прочностью на растяжение 3,3 кН/м.

Методика исследований. Лоток, входящий в состав стенда, имел размеры в плане 72×16 см, высоту 54 см. Песчаная подушка устраивалась шириной 23 см и высотой 25 см (рис. 3). С двух сторон подушки от ее боковых поверхностей до торцовых стенок лотка укладывался поролон, заменяющий торф. На верх подушки устанавливался штамп шириной 5 см и длиной 16 см, равной ширине лотка. Нагрузка на него создавалась пневмоцилиндром, управляемым модулями обработки сигналов со специальным программным обеспечением. На схеме пунктиром показаны границы подушки, которую следовало бы устроить согласно требованиям ТСН 50-302-96.

Осадки штампа и поверхности грунта измерялись датчиками перемещения с точностью 0,01 мм. Регистрация движения частиц песка в подушке осуществлялась через прозрачную стенку лотка неподвижно установленной и управляемой дистанционно фотокамерой Canon. Съемка велась с частотой 1 кадр в секунду.

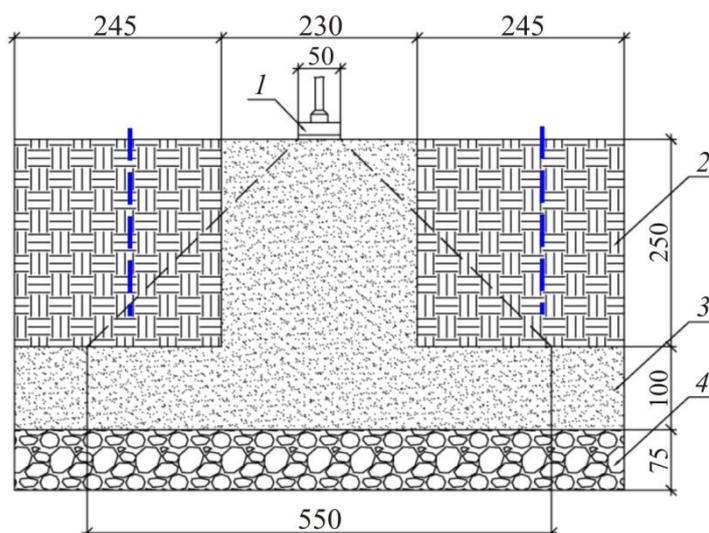


Рис. 3. Схема модели: 1 – штамп; 2 – поролон; 3 – песок; 4 – щебень
Fig. 3. Model scheme: 1 – stamp; 2 – foam rubber; 3 – sand; 4 – crushed stone

Максимальный ход датчиков перемещения составлял 20 мм. При приближении осадки штампа к указанному значению осуществлялись его разгрузка, перестановка датчиков и повторное нагружение. По результатам испытаний строились графики зависимости осадки штампа от давления. Поперечные деформации подушки определялась путем обработки фотоснимков.

Ниже приводятся результаты экспериментов при различных способах армирования подушки.

Результаты. 1. *Подушка без армирования.* Данной модели подушки свойственна малая несущая способность, обусловленная практически свободным развитием поперечных деформаций, которые начинали проявляться уже при давлении под штампом 50 кПа. Потеря несущей способности основания наблюдалась при давлении в 90–100 кПа (рис. 4). Максимальное значение поперечных деформаций составляло примерно 25 мм с каждой стороны подушки.

Заметим, что на рис. 4, как и на всех последующих рисунках, слева вверху показана исходная схема модели, слева внизу – схема деформированной подушки в конце испытаний, справа – график зависимости осадки штампа от давления, построенный по результатам как минимум трех испытаний.

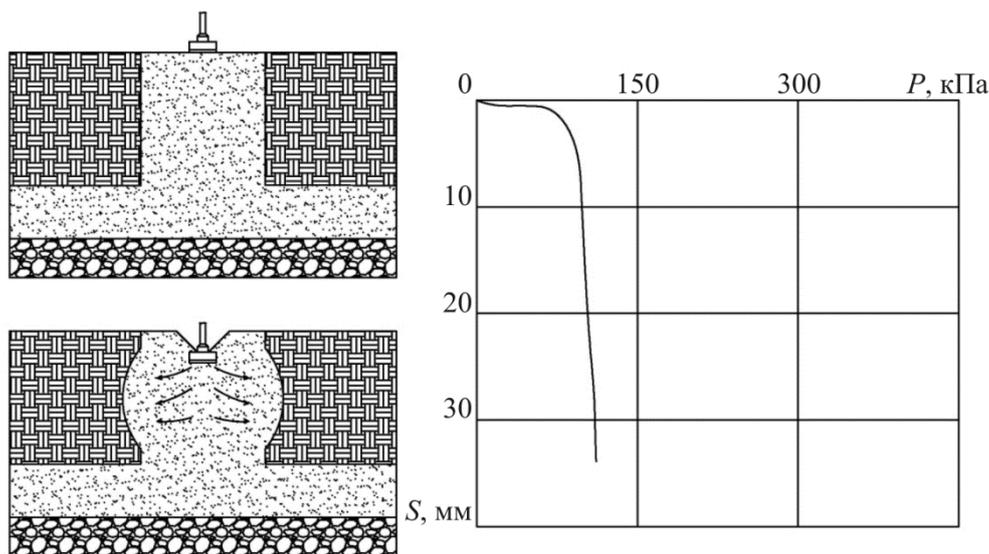


Рис. 4. Модель подушки без армирования

Fig. 4. Model without reinforcement

2. *Трехслойное армирование.* Представляет собой традиционное решение, когда армирующие слои располагаются горизонтально, а концы их полотнищ не закрепляются [10, 11]. В модели эти слои размещались на глубине 50, 100 и 150 мм от штампа (рис. 5). Как видим, армирование изменило характер деформирования подушки, график зависимости осадки штампа от давления стал более пологим. Несущая способность составила 185 кПа. Осадка 12,5 мм, или 5 % от высоты подушки, имела место при давлении под штампом $p_5 = 220$ кПа, а 25 мм, или 10 % высоты, – при давлении $p_{10} = 250$ кПа.

Горизонтальные перемещения песка вначале носили локальный характер и проявлялись между слоями армирования, затем при возрастании нагрузки на штамп из-за проскальзывания концов полотнищ произошло разрушение подушки. Максимальные горизонтальные перемещения частиц песка составили 22–24 мм.

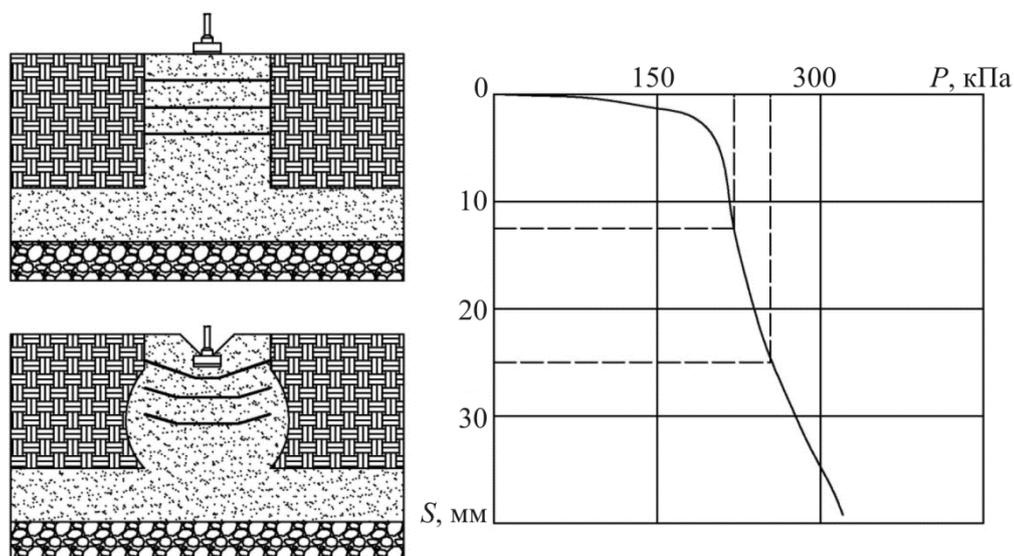


Рис. 5. Модель подушки с трехслойным горизонтальным армированием
 Fig. 5. Model with three-layer horizontal reinforcement

3. *Трехслойное армирование с отгибом концов полотнищ.* Как и в предыдущем случае, в подушку было уложено три слоя армирующего материала на глубине 50, 100 и 150 мм от штампа (рис. 6). Отличие заключалось в анкеровке концов полотнищ путем их отгиба и зацементирования в грунте. При устройстве модели армирующий материал размещался на заданной отметке на поверхности песка, его концы поднимались на край выемки, производились отсыпка и уплотнение слоя песка. После укладки на поверхность краев полотнища приступали к укладке следующего слоя армирующего материала и отсыпке песка.

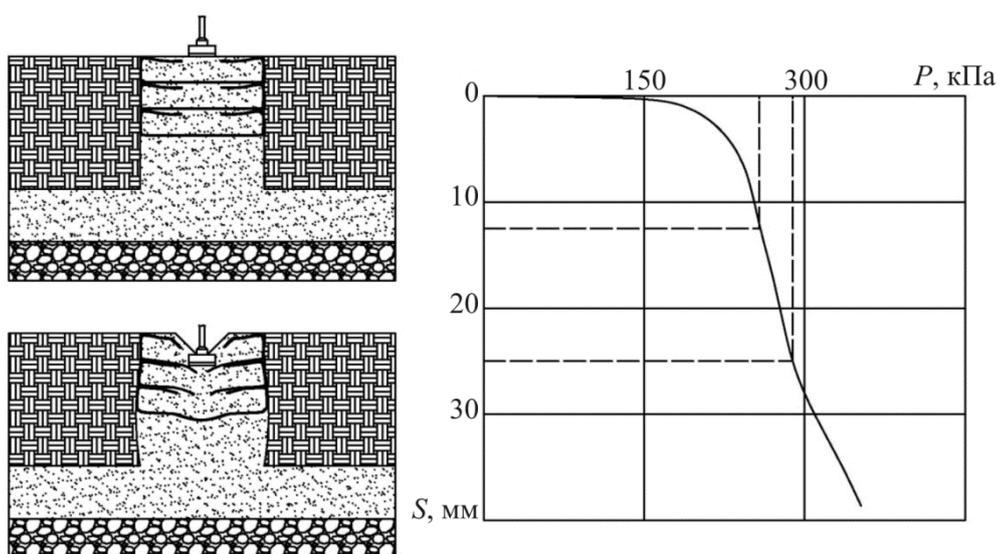


Рис. 6. Модель подушки с трехслойным горизонтальным армированием
 и отгибами концов полотнищ
 Fig. 6. Model with three-layers horizontal reinforcement and the bends
 of the ends of geotextile

Несмотря на наличие отгибов, несущая способность основания осталась почти той же – 195 кПа. Осадка подушки 5 % от ее высоты наблюдалась при давлении под штампом $p_5 = 255$ кПа, а 10 % – при $p_{10} = 290$ кПа, поперечные деформации подушки в первом слое достигали 5 мм, во втором – 7 мм. Таким образом, отгибы концов полотнищ не обеспечили их надежной анкеровки.

4. *Трехслойное S-образное армирование.* Слой армирующего материала размещался на заданной отметке горизонтальной поверхности песчаной подушки, его рулон поднимался на борт выемки, производились отсыпка и уплотнение слоя песка, рулон опускался на него и раскатывался в обратном направлении и т.д. (рис. 7). Таким способом формировалась песчаная подушка с поочередной надежной анкеровкой полотнищ армирующего материала. Заметим, что при устройстве ленточного фундамента направление раскатки полотнищ может меняться по мере продвижения вдоль оси фундамента, обеспечивая тем самым чередование обернутых геосинтетиком краевых участков слоев песка в подушке.

Как видно из графика зависимости осадки штампа от давления $S = f(p)$, поочередное закрепление полотнищ не привело к повышению несущей способности по сравнению со схемой армирования 3. Остались практически прежними и характерные значения давления: $p_5 = 230$ кПа, $p_{10} = 295$ кПа. Обработка фотоизображений показала, что разрушение подушки происходило за счет выдавливания песка между слоями, не обернутыми геосинтетиком.

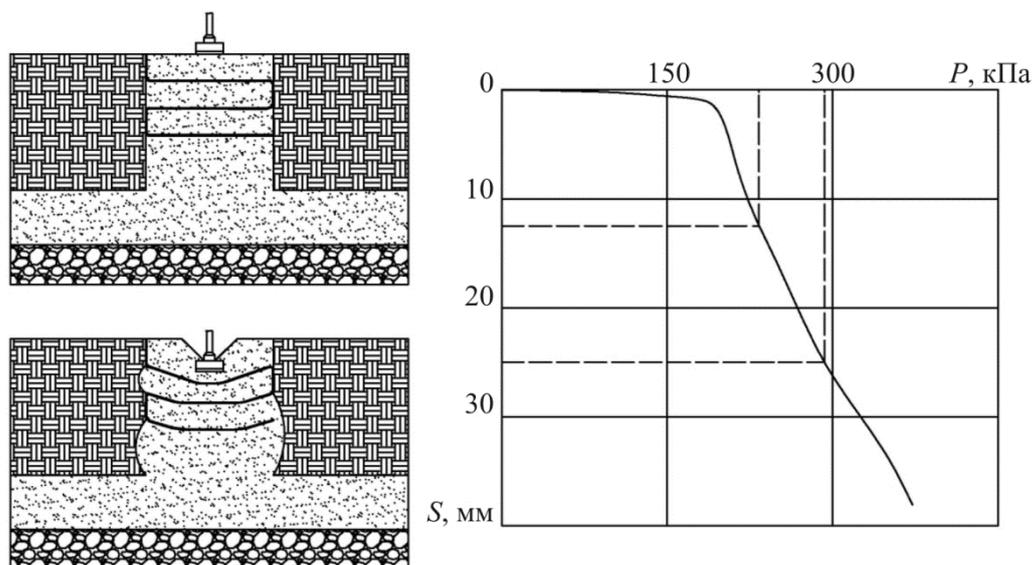


Рис. 7. Модель подушки с трехслойным S-образным армированием
Fig. 7. Model with three-layers S-shaped reinforcement

5. *Трехслойное армирование с анкерровкой концов полотнищ.* Как и в трех предыдущих схемах, подушка армировалась тремя слоями геосинтетика, размещаемыми на глубине 50, 100 и 150 мм. Отличие состояло в том, что концевые участки полотнищ армирующего материала оборачивались вокруг «мешков» с песком диаметром 35–40 мм, обеспечивая их надежную анкеровку (рис. 8). Расстояние между «мешками» по горизонтали уменьшалось от верхнего слоя к нижнему от 90 до 180 мм. Тем самым в основании формировалась трехслойная пирамида, песок внутри которой заключался в обойму, образованную горизонтальными слоями армирующего материала и «мешками» с песком.

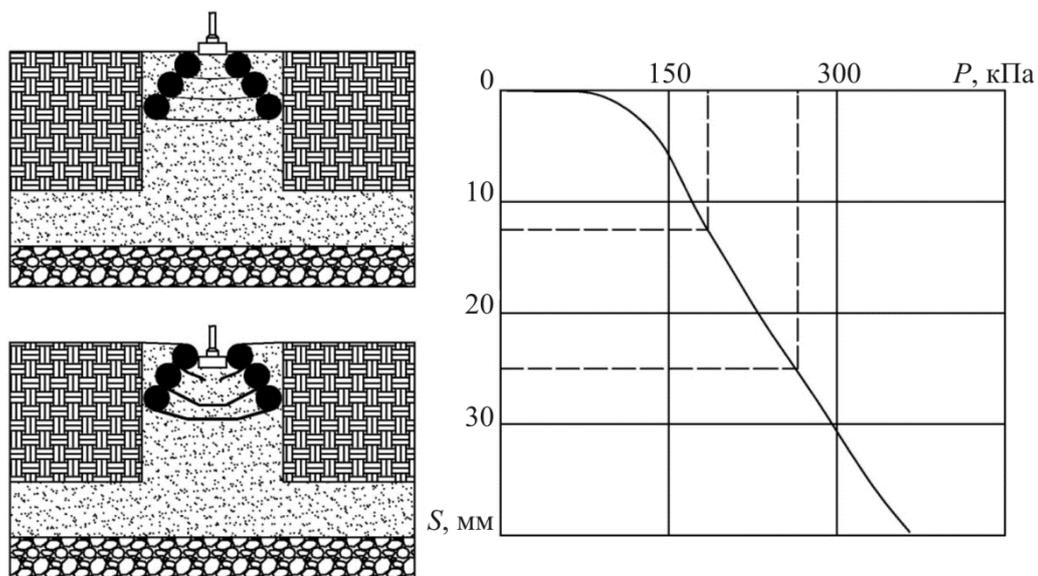


Рис. 8. Трехслойное армирование с анкерровкой концов полотнищ
Fig. 8. Three-layer reinforcement with anchoring of the ends of geotextile

Несущая способность основания составила 125 кПа, характерные значения давления под штампом: $p_5 = 185$ кПа, $p_{10} = 265$ кПа. Анализ изображений и разгрузка лотка после завершения экспериментов показали, что потеря основанием несущей способности происходила из-за разрыва слоев армирования (рис. 9).

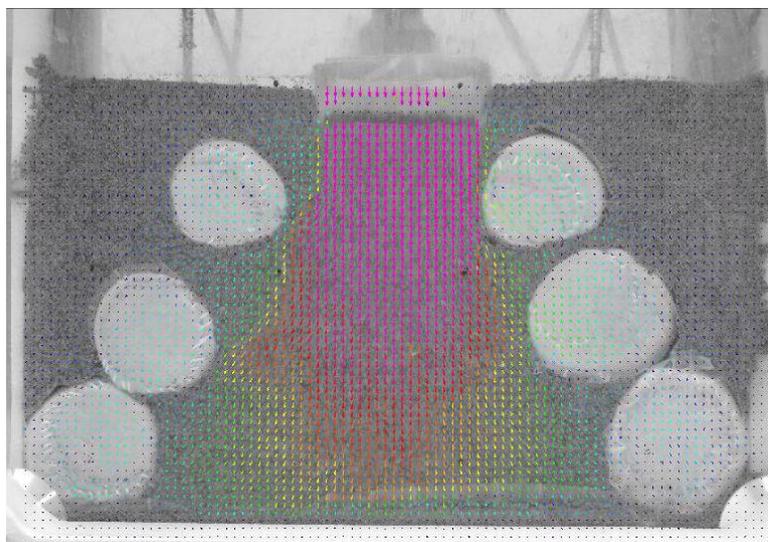


Рис. 9. Векторное поле перемещения частиц грунта в модели после разрыва верхнего армирующего слоя
Fig. 9. The vector field of soil particles displacements after the breaking of the upper reinforcing layer

Следующим шагом стало испытание аналогичной модели с двойным армированием, где в каждом из слоев укладывались друг на друга по два полотна. Результаты испытаний модели представлены на рис. 10. Как видим, усиление армирования принесло вполне ожидаемый результат – повышение несущей способности основания до 135 кПа. Характерные значения давления также несколько возросли: $p_5 = 260$ кПа, $p_{10} = 350$ кПа.

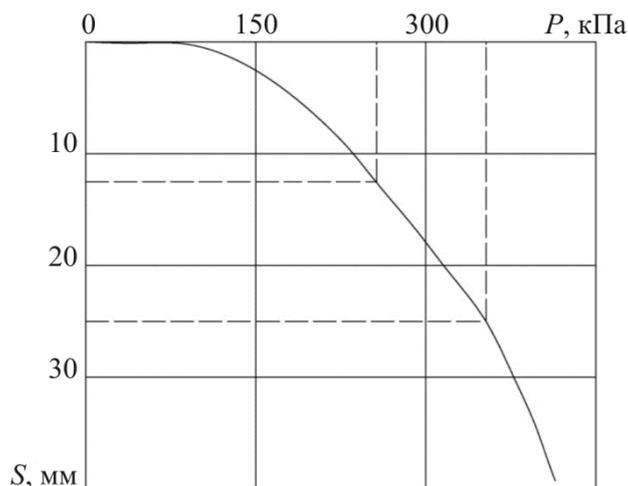


Рис. 10. Трехслойное усиленное армирование с анкерровкой концов полотнищ
 Fig. 10. Three-layer improved reinforcement with anchoring of the ends of geotextile

Следует заметить что, в отличие от схем 2–4, неподатливое крепление концов полотнищ препятствовало перераспределению напряжений в основании между грунтом и слоями армирования. На начальной стадии нагружения штампа осадка основания нарастала медленно, зато быстро росли растягивающие напряжения в верхнем слое геосинтетика, работающем как мембрана, что и приводило к его разрыву и последующей прогрессирующей осадке основания.

6. *Замкнутый контур армирующего материала.* Слой армирующего материала растилялся на заданной отметке по всей ширине горизонтальной поверхности подушки, его концевые участки поднимались вверх на борт выемки, производились отсыпка и уплотнение слоя песка, концевые участки полотнищ растягивались по его поверхности и скреплялись, формируя замкнутый контур, или, другими словами, обойму (рис. 11). Высота обоймы составляла 100 мм, а ширина была равна ширине подушки.

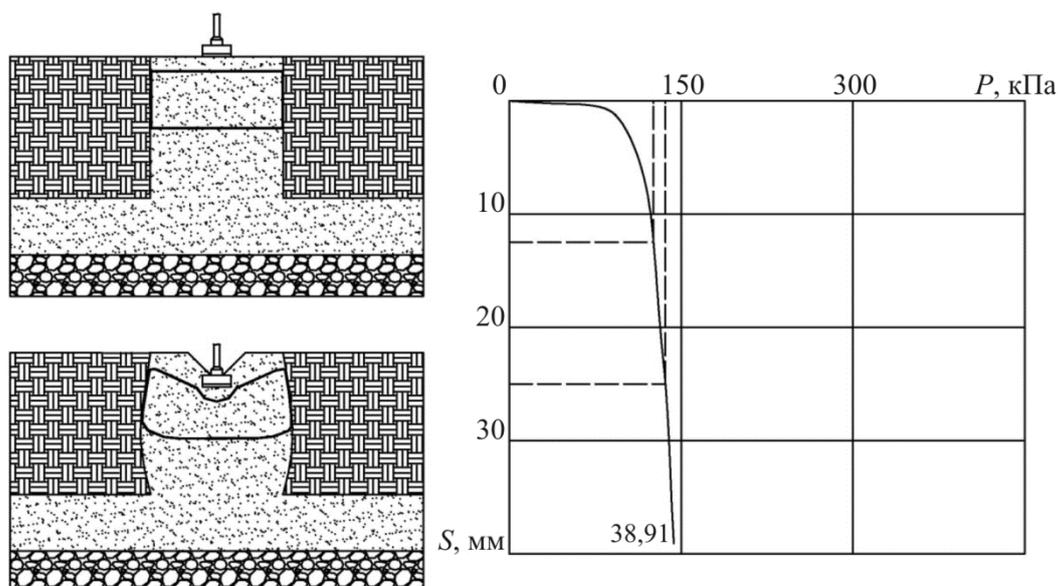


Рис. 11. Модель подушки с одним замкнутым контуром армирующего материала
 Fig. 11. Model with one closed contour of reinforcing material

Такой способ армирования привел лишь к небольшому увеличению несущей способности основания по сравнению с подушкой без армирования (схема 1) и оказался хуже трехслойного армирования (схема 2), что объясняется практически свободным развитием поперечных деформаций песка из-за большого расстояния между армирующими слоями. Характерные значения давления под штампом: $p_5 = 125$ кПа, $p_{10} = 135$ кПа.

7. Три замкнутых контура армирующего материала. Под штампом устраивались три опирающихся друг на друга замкнутых контура высотой по 50 мм каждый (рис. 12).

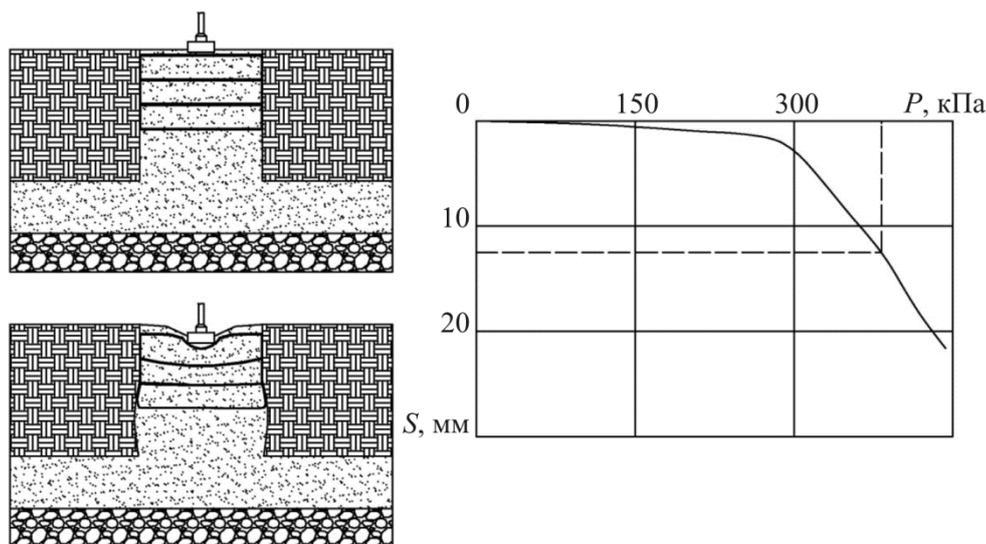


Рис. 12. Три замкнутых контура армирования
Fig. 12. Three closed contours

Следует отметить существенное увеличение несущей способности основания – до 280 кПа, а также отсутствие резкой осадки штампа при достижении указанного значения давления. Давление под штампом p_5 было равно 380 кПа, а давление p_{10} не было достигнуто.

Для увеличения несущей способности была устроена модель с дополнительным армированием нижней части подушки двумя незаанкерными полотнищами (рис. 13).

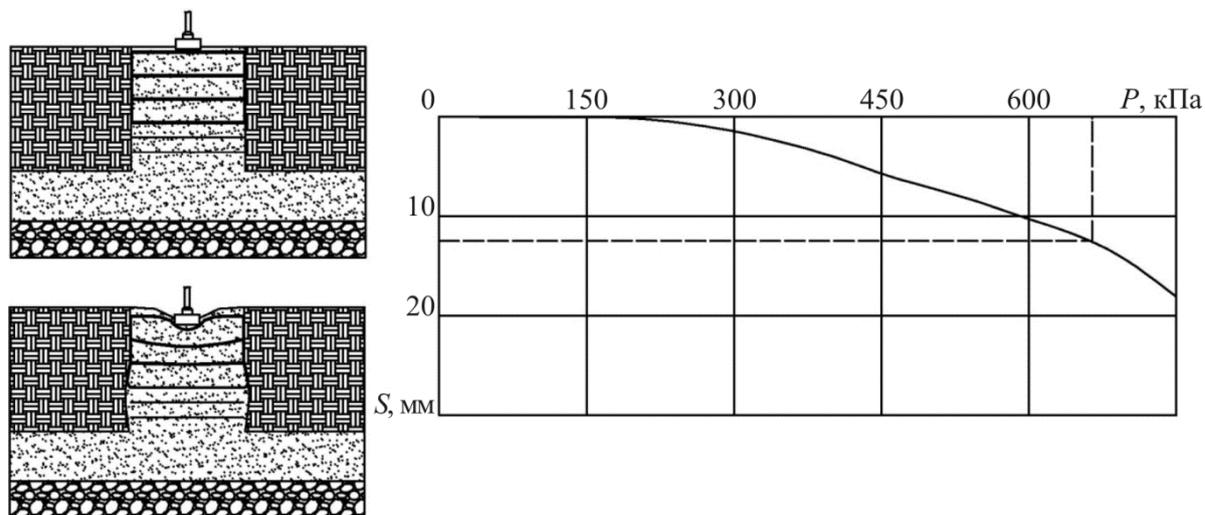


Рис. 13. Три замкнутых контура армирования с дополнительным армированием нижней части подушки
Fig. 13. Three closed reinforcement contours with additional reinforcement of the sand base

Осадка основания практически отсутствовала вплоть до давления под штампом 220 кПа, несущая способность возросла до 310 кПа, график $s = f(p)$ стал более пологим. Осадка основания, равная 5 % от высоты подушки, была достигнута при давлении под штампом 665 кПа, а осадка 10 % не была достигнута. Поперечные деформации подушки не превышали 7 мм.

8. *Три замкнутых контура с предварительным натяжением армирующих слоев.* В большинстве предыдущих моделей одним из слагаемых осадки были перемещения, обусловленные натяжением геосинтетика в ходе нагружения штампа. Его предварительное напряжение способствует быстрому включению армирующих слоев в работу и увеличению общей несущей способности модели [12, 13]. Размещение армирующих слоев было принято таким же, как и в предыдущей модели, показанной на рис. 13. Отличие заключалось в том, что уплотнение песка выполнялось после сшивки концов полотнищ, т.е. после устройства каждой из обойм. Тем самым обеспечивалось предварительное натяжение армирующих слоев [14, 15]. Это привело к изменению характера зависимости $S = f(p)$ (рис. 14).

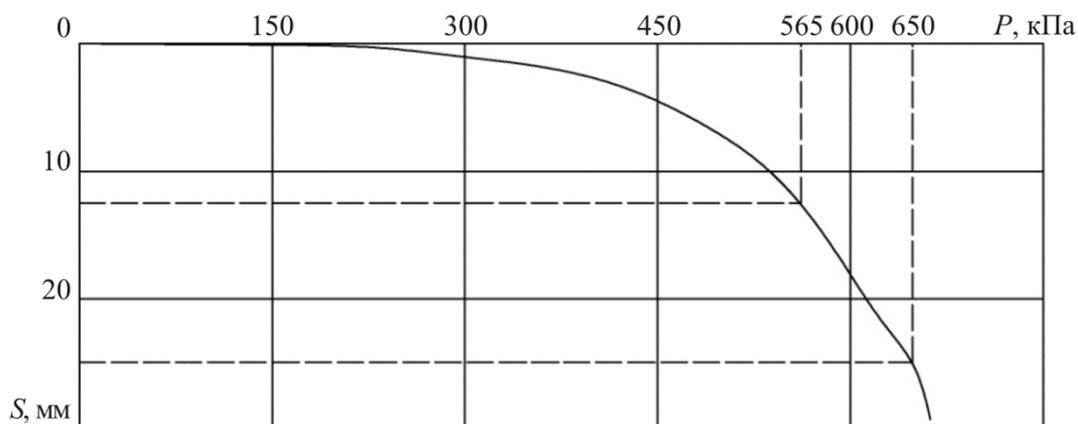


Рис. 14. Три замкнутых контура с предварительным напряжением обойм и дополнительным армированием нижней части подушки

Fig. 14. Three closed prestressed contours with additional reinforcement of the sand base

Развитие вертикальных деформаций началось при давлении под штампом 230 кПа. Несущая способность возросла до 390 кПа, но график после ее достижения стал более крутым из-за последовавшего разрыва армирующего материала. Значение осадки основания в 5 % высоты подушки было достигнуто при уже значительно меньшем давлении, чем в модели без преднапряжения, – 565 кПа, а осадка 10 % имела место при давлении в 650 кПа. Поперечные деформации подушки после разрыва геосинтетика достигли 15 мм.

Выводы

1. Армирование песчаной подушки геосинтетиками позволяет уменьшить осадку и повысить несущую способность искусственного основания. Эффективность армирования в большей степени зависит от способа размещения полотен армирующего материала и анкеровки их концов.

2. Модели с неподатливой анкерровкой или предварительным напряжением полотнищ армирующего материала характеризуются малыми осадками на начальных стадиях загрузки и высокой несущей способностью, однако при разрыве армирующих слоев происходит прогрессирующее развитие деформаций с потерей устойчивости основания.

3. Податливая анкеровка позволяет перераспределить напряжения в искусственном основании между армирующим материалом и грунтом, исключив тем самым разрыв полотнощ и быстро прогрессирующее развитие осадки.

Библиографический список

1. Сорочан Е.А. Основания, фундаменты и подземные сооружения. Справочник проектировщика. – М.: Стройиздат, 1985.
2. Джоунс К.Д. Сооружения из армированного грунта. – М.: Стройиздат, 1989. – 245 с.
3. Shukla S.K., Yin J.H. *Fundamentals of Geosynthetic Engineering*. – Taylor & Francis Group, UK, 2006. – 410 p.
4. Анализ влияния различных типов армирования на деформационные характеристики глинистого грунта / А.Н. Богомолов, А.Б. Пономарев, А.В. Мащенко, А.С. Кузнецова // Интернет-вестник Волгоград. гос. арх.-строит. ун-та. Серия: Политематическая. – 2014. – Вып. 4 (35). – С. 1–9.
5. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: Гос. изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963.
6. Иванов Л.П. Грунты и основания гидротехнических сооружений. – М.: Высшая школа, 1985. – 355 с.
7. Руководство пользователя программы Actual Flow. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2008. – 165 с.
8. Христов Х. Санкт-Петербург, 1889 г.: Первое фотографическое исследование процесса разрушения грунта под фундаментом. – СПб., 2003.
9. Процедура определения полей деформаций в песчаных и глинистых грунтах методом PIV / А.В. Мельников [и др.]. – Пенза: ООО НПП «Геотек», 2012. – 24 с.
10. Jones B.R., Jacobsz S.W., van Rooy J.L. A qualitative model study on the effect of geosynthetics foundation reinforcement in sand overlying very soft clay // *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*. – 2016. – Vol. 58 (2). – P. 25–34.
11. Chen Q. An experimental study on characteristics and behavior of reinforced soil foundation: thesis for the degree of doctor / Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College. – Baton Rouge, USA, 2007. – 22 p.
12. An analytical solution for geotextile-wrapped soil based on insights from DEM analysis/ H. Cheng [at al.] // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2017. – No. 45. – P. 361–375. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.05.001>.
13. Patra C.R., Atalar Cavit. Bearing capacity of embedded strip foundation on geogrid-reinforced sand // *Geotextiles and Geomembranes*. – October 2005. – URL: <http://www.researchgate.net/publication/222417378> (дата обращения: 01.07.2018).
14. Lackner C., Bergado D.T., Semprich S. Prestressed reinforced soil by geosynthetics – Concept and experimental investigation // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2013. – № 37. – P. 123–127.
15. McMahon B. T., Bolton M. D., Experimentally observed settlements beneath shallow foundations on sand // *Geotechnics of Hard Soils – Weak Rocks. Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering – Athens, 2011.* – P. 749.

References

1. Sorochan E.A. Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya. Spravochnik proektirovshchika [Bases, foundations and underground structures. Designers directory]. Moscow, Strojizdat, 1985.
2. Dzhouns K.D. Sooruzheniya iz armirovannogo grunta [Reinforced earth structures]. Moscow, Strojizdat, 1989, 245 p.
3. Shukla S.K., Yin J.H. Fundamentals of Geosynthetic Engineering. Taylor & Francis Group, UK, 2006, 410 p.
4. Bogomolov A.N., Ponomarev A.B., Mashchenko A.V., Kuznetsova A.S. Analiz vliianiia razlichnykh tipov armirovaniia na deformatsionnye kharakteristiki glinistogo grunta [Analysis of the influence of different types of reinforcement on the deformation characteristics of clay soils]. *Internet-vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seria Politematicheskaya*, 2014, iss. 4 (35), pp. 1-9.
5. Tsytovich N.A. Mekhanika gruntov [Soil mechanics]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, arhitekture i stroitel'nym materialam, 1963.
6. Ivanov L.P. Grunty i osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenij [Soils and foundations of hydraulic structures]. Moscow, Vysshaya shkola, 1985, 355 p.
7. Rukovodstvo pol'zovatelya programmy «Actual Flow» [User's manual of the program «Actual Flow»]. Novosibirsk, Institut Teplofiziki SO RAN, 2008, 165 p.
8. Khristov H. Sankt-Peterburg, 1889 g.: Pervoe fotograficheskoe issledovanie processa razrusheniya grunta pod fundamentom [The first photographic study of the process of soil destruction under the foundation]. Saint Petersburg, 2003.
9. Melnikov A.V. et al.] Procedura opredeleniya polej deformacij v peschanyh i glinistykh gruntah metodom PIV [The procedure for determining the deformation fields in sandy and clay soils using the PIV method]. Penza, OOO NPP «Geotek», 2012, 24 p.
10. Jones B.R., Jacobsz S.W., J.L. van Rooy. A qualitative model study on the effect of geosynthetics foundation reinforcement in sand overlying very soft clay. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 2016, vol. 58 (2), pp. 25-34.
11. Chen Q. An experimental study on characteristics and behavior of reinforced soil foundation. Abstract of Doctor's degree dissertation. Baton Rouge, USA, 2007, 22 p.
12. Cheng H. et al. An analytical solution for geotextile-wrapped soil based on insights from DEM analysis. *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, no. 45, pp. 361-375. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.05.001>.
13. Patra C. R., Atalar Cavit. Bearing capacity of embedded strip foundation on geogrid-reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, October 2005; available at: <http://www.researchgate.net/publication/222417378> (accessed 1 Yuli 2018).
14. Lackner C., Bergado D.T., Semprich S. Prestressed reinforced soil by geosynthetics – Concept and experimental investigation. *Geotextiles and Geomembranes*, 2013, no. 37, pp. 123-127.
15. McMahon B.T., Bolton M.D. Experimentally observed settlements beneath shallow foundations on sand. *Geotechnics of Hard Soils – Weak Rocks. Proceedings of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Athens, 2011, P. 749.