Рубцова М.В., Клевеко В.И. Анализ возможности использования приборов трехосного сжатия для изучения прочностных и деформационных характеристик армированных грунтов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2016. – Т. 7, № 4. – С. 143–150. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.4.14

Rubtsova M.V., Kleveko V.I. Analysis of the possibility of using triaxial test system for the study of strength and deformation characteristics of reinforced soil. *PNRPU Bulletin. Construction and Architecture*. 2016. Vol. 7, no. 4. Pp. 143-150. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.4.14

**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**
Т. 7, № 4, 2016
**PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9826/2016.4.14

УДК 624.131.37

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИБОРОВ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АРМИРОВАННЫХ ГРУНТОВ

М.В. Рубцова, В.И. Клевеко

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 02 октября 2016
Принята: 21 октября 2016
Опубликована: 28 декабря 2016

Ключевые слова:

прибор трехосного сжатия,
геосинтетические материалы,
песчаный грунт, максимальная
прочность

АННОТАЦИЯ

Представлен анализ научных работ, посвященных исследованию напряженно-деформированного состояния песков, армированных различными геосинтетическими материалами, в частности испытаниям на приборе трехосного сжатия. При помощи данного устройства можно найти прочностные и деформационные характеристики усиленных грунтов. Преимуществом этого вида испытаний является значительная степень приближенности к реальным условиям. Кроме того, многие ученые продолжают разрабатывать усовершенствованные варианты прибора. В данной статье отмечены авторы некоторых патентов.

Исследователи из разных уголков мира описали процесс и результаты своих экспериментов. Основная часть их выводов сходится, но каждый ученый внес в изучение указанной темы что-то новое. Таким образом, все работы имеют важное значение в изучении напряженно-деформированного состояния армированных грунтов и влияния геосинтетических материалов на прочность грунтового основания.

Для создания виртуальной модели образца грунта были успешно применены компьютерные технологии. Это дало возможность поэтапно проследить процесс потери прочности образца.

Анализ научной литературы позволил запланировать ряд опытов на приборе трехосного сжатия. Внешний вид и особенности устройства, на котором будут проводиться испытания, описаны ниже.

© ПНИПУ

© Рубцова Мария Владимировна – магистр, e-mail: masharubzova@yandex.ru.

Клевеко Владимир Иванович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: vlivkl@mail.ru.

Mariia V. Rubtsova – Master, e-mail: masharubzova@yandex.ru.

Vladimir I. Kleveko – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: vlivkl@mail.ru.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING TRIAXIAL TEST SYSTEM FOR THE STUDY OF STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF REINFORCED SOIL

M.V. Rubtsova, V.I. Kleveko

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 02 October 2016
Accepted: 21 October 2016
Published: 28 December 2016

Keywords:

triaxial test system,
geosynthetic materials,
sand, maximum strength

ABSTRACT

The article represents an analysis of scientific papers on research the stress-strain–volumetric responses of sands, which are reinforced with a variety of geosynthetic materials. In particular, papers on triaxial compression tests.

Nowadays laboratory tests on triaxial test system widely used. The strength and deformation characteristics of reinforced soil can be found with the help this apparatus. The advantage of this type of testing is a significant degree of approximation to the real conditions. In addition, many scientists continue to develop improved versions of the device. In this article is offered the authors several patents.

Researchers from around the world described the process and results of their experiments. The main part of the conclusions are similar, but each of them has made to the theme of the new parts. Therefore, all papers have an important value in the study of stress-strain state of reinforced soil and the effect of geosynthetic materials on soil bases strength.

Moreover, for creation of virtual soil model computer technologies was used successfully. This made it possible to trace the process of gradually losing strength of the soil sample.

The analysis of scientific literature allowed to schedule a series of experiments on triaxial test system. The appearance and features of the device, which will be carried out tests, are illustrated in the text.

© PNRPU

Надежность и долговечность зданий и сооружений зависят от многих факторов, в том числе и от прочности грунта, расположенного в основании. Согласно С.Б. Ухову под прочностью в общем смысле понимаются способность материала сопротивляться разрушению или развитию больших пластических деформаций, которые приводят к недопустимым изменениям формы массива [1]. При изучении прочностных свойств грунтовых оснований принято руководствоваться теориями, которые базируются и подтверждаются эмпирически.

Так, например, уже в XVIII в. французский ученый Шарль Огюстен де Кулон при помощи экспериментов определил особенности разрушения песчаных грунтов, которое вызвано смещением одной части относительно другой, а сопротивление в таком случае объясняется трением между перемещающимися частями и зацеплением отдельных частей. При этом песчаные и крупнообломочные грунты в большей степени не способны сопротивляться растягивающим нагрузкам. Аналогичное представление о прочности было исследовано применительно к связным грунтам. Однако разрушение связных грунтов имеет несколько иной характер.

Способность любого грунта сопротивляться разрушению формируется из нескольких характеристик, включая гранулометрический состав, плотность, влажность и др. Данные показатели можно определять в полевых или лабораторных условиях.

На сегодняшний день наиболее популярным среди лабораторных исследований является испытание грунта на приборе трехосного сжатия. Устройство состоит из рабочей ка-

меры с жидкостью, в которой размещается образец, окруженный резиновой оболочкой для предотвращения поступления в него воды. Затем создается необходимое давление, и фиксируются значения на индикаторах или в программном комплексе.

Принципиальная схема прибора остается неизменной, тем не менее продолжается совершенствование элементов его конструкции, чтобы оптимизировать процесс проведения опытов и обеспечить более корректные результаты.

Начиная с 1973 г., когда Garrett D. Shaw получил патент в США на прибор трехосного сжатия, началось активное изучение данной области геотехники¹. З.Г. Тер-Мартirosян, Д.М. Ахпателов, Ю.С. Григорьев, В.А. Тищенко в 1975 г. предложили конструкцию прибора со схемой нагружения образца в форме куба². На протяжении нескольких лет разработкой новых технических решений для устройства трехосного сжатия также занимаются Г.Г. Болдырев, Е.Г. Болдырева, И.Х. Идрисов, А.И. Елатонцев, О.А. Виноградов³. По одному из последних изобретений зарегистрирован патент на прибор трехосного сжатия с измерением контактных напряжений, в котором расширена функциональность и улучшена точность.

При помощи прибора трехосного сжатия можно найти прочностные и деформационные характеристики грунтов, применяя разные схемы нагружения образца.

В наши дни известно достаточно много исследований как зарубежных, так и российских ученых, посвященных трехосным испытаниям разнообразных грунтов. Среди них особое внимание заслуживают работы, связанные с изучением поведения грунтов, армированных геосинтетическими материалами. В связи с освоением новых территорий, на которых имеются неблагоприятные инженерно-геологические условия, появлением необходимости усиления основания под зданиями и сооружениями и другими подобными проблемами применение армированных грунтовых оснований выступает приоритетным направлением исследований. Следует отметить, что во многих случаях вариант с использованием геосинтетических материалов является более экономичным и имеет ряд преимуществ.

Изучение деформационных и прочностных характеристик армированного всевозможными материалами грунта с применением испытаний на трехосное сжатие началось с 1970-х гг.

В 1977 г. В.В. Broms в своей работе показал, что боковое давление грунта в образцах, армированных горизонтально расположенными дисками геотекстиля, существенно снижается. При уменьшении расстояния между геотекстильными дисками наблюдалось увеличение максимальной прочности. Результаты эксперимента показали также, что диски, которые были размещены на двух концах образцов, не оказывали влияния на максимальную прочность [2].

Помимо использования геосинтетиков, проводились исследования грунта, усиленного металлическими элементами (A. McGown, K.Z. Andrawes, M.M. Al-Hasani) [3]. Вследствие значительно меньшей жесткости у геосинтетических тканей, по сравнению с металлическими армирующими элементами, последние не получили распространения.

¹ Triaxial compression test apparatus: пат. № 3728895 США / Garrett D. Shaw. Оpubл. 24.04.1973.

² Прибор для исследования свойств грунтов в условиях трехосного сжатия: пат. № 700838 СССР / З.Г. Тер-Мартirosян, Д.М. Ахпателов, Ю.С. Григорьев, В.А. Тищенко. № 2629174/29-33; заявл. 06.09.1975; опубл. 30.11.1979. Бюл. № 44.

³ Прибор трехосного сжатия: пат. № 2418283 Рос. Федерация / Г.Г. Болдырев, Е.Г. Болдырева, И.Х. Идрисов, А.И. Елатонцев. № 2010108180; заявл. 04.03.2010; опубл. 10.05.2011. Бюл. № 13; Прибор трехосного сжатия с измерением контактных напряжений: пат. № 2467305 Рос. Федерация / Г.Г. Болдырев, Е.Г. Болдырева, И.Х. Идрисов, А.И. Елатонцев, О.А. Виноградов. № 2011124966/28; заявл. 17.06.2011; опубл. 2012.

Ученые из Ирана и США S.M. Haeri, R. Noorzad, A.M. Oskoorouchi в 2000 г. опубликовали итоги лабораторных трехосных испытаний на сжатие сухого берегового песка, который был горизонтально армирован геосинтетическим текстилем [4]. Механическое поведение композитного материала было исследовано в различных вариантах: изменялись тип геотекстиля, количество армирующих слоев, их расположение и значение бокового давления. Чтобы выявить влияние размера образцов на рассчитываемые характеристики, были изучены образцы двух диаметров. В итоге выяснилось, что более выраженное увеличение прочности армированных образцов наблюдается при меньшем диаметре. Была также отмечена изогнутая бочкообразная форма испытанного образца после извлечения его из прибора, с явными разделениями в местах расположения геосинтетических прослоек.

Позднее группа исследователей из Национального тайваньского университета науки и технологии M.D. Nguyen, K.H. Yang, S.H. Lee, C.S. Wu, M.H. Tsai осуществила испытания образцов песка диаметром 50 мм и высотой 100 мм, аналогично изменяя боковое давление и число армирующих слоев [5]. Далее, обработав изображения цифровыми методами, они определили остаточную деформацию нетканого геосинтетического материала при растяжении. Это позволило оценить растягивающие нагрузки, которые действуют на материал.

В каждом армирующем слое деформации растяжения максимальны в центре элемента и снижаются при удалении от него, тогда как напряжение сдвига достигает наибольшего значения на расстоянии 0,5–0,7 радиуса диска.

Реакцию неармированного и армированного геосинтетиком сухого песка под статической и динамической нагрузкой рассмотрели в 2015 г. G. Madhavi Latha и Nandhi A.M. Varman [6]. Особенностью их исследования является значительный размер образца – 300 мм в диаметре и 600 мм в высоту. Благодаря этому появилась возможность преодолеть краевые эффекты, ранее присутствовавшие в трехосных испытаниях армированных песков.

Тканый геотекстиль, который был использован в данном исследовании, состоит из тканых комплексных полипропиленовых нитей. Предел прочности на разрыв по широкой полосе геотекстиля составлял 55 кН/м, толщина геотекстиля – 1 мм.

Количество усиливающих элементов в различных экспериментах варьировалось от одного до шести. Было отмечено, что при повышении значения бокового давления в статических условиях эффект от армирования уменьшался, следовательно, геосинтетическое усиление производительнее при низких боковых давлениях.

Циклические трехосные испытания проводились с образцами неармированными и армированными шестью слоями геосинтетика при нагрузке 4 кН и частоте 1 Гц. При низком боковом давлении в 60 кПа динамический модуль упругости в обоих образцах оказался приблизительно равным, однако с увеличением давления усиленные образцы показали более высокое значение модуля.

S. Nouri, A. Nechnech, B. Lamri, M. Lurdes Lopes анализировали поведение армированного песчаного образца, сформированного в виде куба со стороной 70 мм [7]. Лабораторные испытания включали в себя исследование образцов с количеством слоев геосинтетика от одного до пяти. Необходимо отметить, что в данной работе обращено внимание на изменение таких характеристик, как угол внутреннего трения и удельное сцепление. Первая характеристика для армированных грунтов в среднем увеличилась на 49 %. Изме-

нение значения сцепления зависит от количества слоев армирования. Было также вычислено, что прочность усиленного песка может возрасти на 340 %.

Чаще всего песок на участке строительства содержит многообразные примеси, которые могут ухудшать характеристики грунта. Ученые из университета в Иране S.A. Naeini, N. Gholamroog сделали серию трехосных испытаний песка, добавляя в образцы различный объем ила (от 0 до 50 %), под действием циклической нагрузки [12]. Они пришли к следующему выводу: если содержание ила не превышает 35 % от общего объема навески, то осевой модуль в армированных и неармированных песках уменьшается, а циклическая пластичность возрастает. С дальнейшим увеличением процентного содержания ила значения упомянутых параметров изменяются в противоположном направлении.

Кроме того, немаловажными параметрами являются форма и размер частиц грунта. Они играют большую роль в механическом поведении усиленных геосинтетическими материалами грунтах. Ioannis Markou подверг испытаниям на приборе трехосного сжатия шесть вариантов песков с разным гранулометрическим составом, применяя при этом несколько типов геосинтетиков [9]. Образцы имели диаметр 70 мм и высоту 144 мм, армировались три, пять и семь раз по высоте. Прочность армированных песков возрастает при уменьшении размера частиц грунта и увеличении числа горизонтальных усилениях. Вдобавок она зависит от формы зерен: пески с менее округлыми зернами достигают большего значения прочности, чем образцы с закругленными частицами. В дополнение к этому L. Wils, W. Naegeman and P.O. Van Impe, изучая известняковой песок из Персидского залива, оценили зависимость между способностью песка сопротивляться растягивающим нагрузкам и его фракцией [10]. Очевидно, что чем размер частиц песка меньше, тем упомянутая способность лучше.

Для выполнения функции армирования грунта представлен широкий ассортимент геосинтетических материалов. Известными и применяемыми среди них являются геотекстиль, георешетки и фиброволокно. G. Madhavi Latha, S. Vidya Murthy сравнили вышеуказанные материалы в качестве усиления песчаных образцов [11]. В ходе испытаний обнаружено, что фибропесок уступает по эффективности двум другим материалам.

Однако возможны такие случаи, когда именно фиброармирование будет самым оптимальным способом усиления грунтового основания. Специфичность фиброволокна заключается в том, что оно равномерно распределяется по всему объему грунта, тем самым становится его частью. Взаимодействие между частицами грунта и фиброволокном уже не получится исключить.

Тщательным изучением грунта, армированного произвольными волокнами, занимаются в Пермском национальном исследовательском политехническом университете А.С. Кузнецова, В.Г. Офрихтер и А.Б. Пономарев [12]. В своих работах они приводят проанализированные результаты испытаний на трехосное сжатие фиброармированных грунтов. На основе реализованной серии экспериментов, состоящей из шести сочетаний материалов при трех различных боковых давлениях, каждый из которых был выполнен не менее трех раз, созданы диаграммы возникающих напряжений и деформаций. С целью нахождения величин угла внутреннего трения и удельного сцепления испытываемого грунта построены круги Мора.

Необходимо помнить, что в настоящее время в области строительства обрели широкую известность компьютерные технологии. Создание виртуальных моделей дает возможность поэтапно проследить все процессы, происходящие с образцом в приборе. Это

позволяет очень детально разобрать воздействие укреплений из синтетических материалов на характеристики грунта. В 2013 г. Yung-Shan Hong, Cho-Sen Wu поставили эксперименты на образцах из песка, параллельно моделируя 70-миллиметровую колонну армированного песка в программном комплексе [13]. Сопоставленные в виде графиков величины продемонстрировали высокий уровень сходимости.

Все же нужно учесть, что при компьютерном моделировании строится всего лишь модель грунтового образца. Как и многие модели, она не идентична реальному объекту. Аналогичным недостатком обладают и лабораторные методы испытаний.

Вышеописанные наблюдения исследователей всего мира натолкнули на дальнейшее экспериментирование с композиционными грунтами.

Планируется совершить ряд опытов с образцами из уплотненного песка. Испытания будут проводиться на приборе трехосного сжатия, имеющемся в лаборатории строительного факультета Пермского национального исследовательского политехнического университета. Устройство, находящееся в лаборатории кафедры «Строительное производство и геотехника», оснащено автоматизированной системой управления АСИС-6. Внешний вид устройства и панели управления представлен на рис. 1.

Максимально возможные параметры образца ограничены 100 мм в диаметре и 200 мм в высоте. При подготовке эксперимента задаются соответствующие размеры и подбираются необходимые детали. Посредством специального комплекта, служащего для измерения локальных деформаций, фиксируются радиальные деформации образца (рис. 2).

Рис. 1. Устройство силового нагружения, камера трехосного сжатия (тип А) и панель управления давлением

Рис. 2. Комплект с датчиками для измерения локальных деформаций на образце

На изображенном приборе трехосного сжатия реализуются различные схемы испытания образцов грунта, а именно: неконсолидированно-недренированное трехосное сжатие, консолидированно-недренированное трехосное сжатие, консолидированно-дренированное трехосное сжатие и определение прочностных характеристик, консолидированно-дренированное трехосное сжатие и определение деформационных характеристик. Это открывает широкий спектр возможностей для запланированных опытов.

Таким образом, обзор научной литературы, посвященной испытаниям на приборе трехосного сжатия песчаных образцов, армированных геосинтетическими материалами, приводит к следующим выводам:

1. Предел прочности армированного песка превосходит значение, зафиксированное у неармированного песка.
2. Расстояние между горизонтальными прослойками из геосинтетика сказывается на максимальной прочности образца.
3. Геосинтетический диск сильнее подвергается растягивающим деформациям в центральной части.
4. Положительный эффект армирования проявляется лучше при статическом нагружении и низком значении бокового давления. При динамическом нагружении наибольший эффект достигается при высоком значении бокового давления.
5. На сцепление между синтетическим элементом и грунтом, степень их взаимодействия оказывают действие гранулометрический и минералогический состав грунта, вид геосинтетика, размер ячеек в нем и многое др.
6. Работа армированных грунтов на приборах трехосного сжатия изучена недостаточно хорошо. Практически не изучены поведение глинистых армогрунтов и контактное взаимодействие песчаных и глинистых грунтов армированных грунтов. В связи с этим в дальнейшем планируется проведения испытаний для этих типов грунтов.

Библиографический список

1. Механика грунтов, основания и фундаменты: учеб. / С.Б. Ухов [и др.]. – М.: АСВ, 1994. – 520 с.
2. Broms B.B. Triaxial tests with fabric-reinforced soil // Proceedings of the International Conference on the Use of Fabric in Geotechnics. – Paris, 1977. – Vol. 3. – P. 129–134.
3. McGown A., Andrawes K.Z., Al-Hasani M.M. Effect of inclusion properties on the behavior of sand // Geotechnique. – 1978. – № 28 (3). – P. 327–347.
4. Haeri S.M., Noorzad R., Oskoorouchi A.M. Effect of geotextile reinforcement on the mechanical behavior of sand // Geotextile Geomemb. – 2000. – № 18. – P. 385–402.
5. Behavior of nonwoven-geotextile-reinforced sand and mobilization of reinforcement strain under triaxial compression / M.D. Nguyen [et al.] // Geosynthetics. – 2013. – № 20 (3). – P. 207–225.
6. Madhavi Latha G., Nandhi Varman A.M. Static and cyclic load response of reinforced sand through large triaxial tests // Proceedings of the 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Japan, 2015. – P. 5.
7. Triaxial test of drained sand reinforced with plastic layers / S. Nouri [et al.] // Arab. J. Geosci. – 2016. – № 53. – P. 1–9.
8. Naeini S.A., Gholampoor N. Cyclic behaviour of dry silty sand reinforced with a geotextile // Geotextiles and Geomembranes. – 2014. – № 42. – P. 611–619.
9. Markou I. Effect of grain shape and size on the mechanical behavior of reinforced sand // Advances in Transportation Geotechnics 3: Proceedings of the 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG-2016). – Portugal, 2016. – Vol. 143. – P. 146–152.
10. Wils L., Haegeman W., Van Impe P.O. Triaxial compression tests on a crushable sand in dry and wet conditions // Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. – Edinburg, 2015. – P. 3449–3454.

11. Madhavi Latha G., Murthy V.S. Effects of reinforcement form on the behavior of geosynthetic reinforced sand // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2007. – № 25. – P. 23–32.

12. Кузнецова А.С., Офрихтер В.Г., Пономарев А.Б. Исследование прочностных характеристик грунта, армированного дискретными волокнами полипропилена // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. – 2012. – № 1. – С. 44–55.

13. Yung-Shan Hong, Cho-Sen Wu. The performance of a sand column internally reinforced with horizontal reinforcement layers // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2013. – № 41. – P. 36–49.

References

1. Ukhov S.B. [et al.]. *Mekhanika gruntov, osnovaniia i fundamenti* [Mechanics of soils, bases and foundations]. Moscow: ASV, 1994. 520 p.

2. Broms B.B. Triaxial tests with fabric-reinforced soil. *Proceedings of the International Conference on the Use of Fabric in Geotechnics*. Paris, 1977, vol. 3, pp. 129-134.

3. McGown A., Andrawes K.Z., Al-Hasani M.M. Effect of inclusion properties on the behavior of sand. *Geotechnique*, 1978, no. 28, pp. 327-347.

4. Haeri S.M., Noorzad R., Oskoorouchi A.M. Effect of geotextile reinforcement on the mechanical behavior of sand. *Geotextile Geomemb*, 2000, no. 18, pp. 385-402.

5. Nguyen M.D. [et al.]. Behavior of nonwoven-geotextile-reinforced sand and mobilization of reinforcement strain under triaxial compression. *Geosynthetics*, 2013, no. 20 (3), pp. 207-225.

6. Madhavi Latha G., Nandhi Varman A.M. Static and cyclic load response of reinforced sand through large triaxial tests. *Proceedings of the 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Japan, 2015, p. 5.

7. Nouri S. [et al.]. Triaxial test of drained sand reinforced with plastic layers. *Arabian Journal of Geoscience*, 2016, no. 53, pp. 1-9.

8. Naeini S.A., Gholampoor N. Cyclic behaviour of dry silty sand reinforced with a geotextile. *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, no. 42, pp. 611-619.

9. Markou I. Effect of grain shape and size on the mechanical behavior of reinforced sand. *Proceedings of the 3rd International Conference on Transportation Geotechnics "Advances in Transportation Geotechnics 3"*. Portugal, 2016, pp. 146-152.

10. Wils L., Haegeman W., Van Impe P.O. Triaxial compression tests on a crushable sand in dry and wet conditions. *Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. Edinburg, 2015, pp. 3449-3454.

11. Madhavi Latha G., Murthy V.S. Effects of reinforcement form on the behavior of geosynthetic reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, no. 25, pp. 23-32.

12. Kuznetsova A.S., Ofrikhter V.G., Ponomarev A.B. Issledovanie prochnostnykh kharakteristik grunta, armirovannogo diskretnymi voloknami polipropilena [Strength research of sand reinforced by discrete polypropylene fibres]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2012, no. 1, pp. 44-55.

13. Yung-Shan Hong, Cho-Sen Wu. The performance of a sand column internally reinforced with horizontal reinforcement layers. *Geotextiles and Geomembranes*, 2013, no. 41, pp. 36-49.