УДК 624.138.23

© А. С. Гришина, аспирант

© Р. С. Смирнов, магистрант

© А. Б. Пономарев, д-р техн. наук, профессор
(Пермский национальный исследовательский
политехнический университет)

E-mail: spstf@pstu.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-2-126-132

© A. S. Grishina, post-graduate student

© R. S. Smirnov, undergraduate

© A. B. Ponomaryov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Perm National Research Polytechnic University)

E-mail: spstf@pstu.ru

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПОДПОРНОЙ СТЕНЫ С ОБРАТНОЙ ЗАСЫПКОЙ ИЗ ФИБРОАРМИРОВАННОГО ГРУНТА ПО МОДЕЛЬНЫМ ИСПЫТАНИЯМ

PERFORMANCE EVALUATION OF RETAINING WALL WITH FIBER REINFORCED SAND BACKFILL BY MODEL TEST

Оценивается возможность применения фиброармированного песка в качестве обратной засыпки подпорных стен. Поставлены и решены следующие задачи: разработка рекомендаций по приготовлению фиброгрунтовой смеси; подготовка стенда для испытаний моделей подпорных стен; приготовление необходимого объема фибропеска с оптимальным содержанием армирующих волокон, определенным автором в предыдущих исследованиях; модельные испытания подпорной стены с обратной засыпкой из песка и фибропеска. Результаты испытаний демонстрируют эффективность применения фиброармированного песка в качестве обратной засыпки подпорных стен.

Ключевые слова: подпорная стена, фибровое армирование, фибропесок, модельные испытания.

The article is focused on evaluating the possibility of using fiber reinforced sand as retaining wall backfill. The following tasks have been set and solved: development of recommendations on preparation of the fiber-soil mixture; laboratory stand preparation to test the models of retaining walls; preparation of the necessary volume of fiber reinforced sand with an optimum content of reinforcing fibers previously determined by the author in research works; carrying out model tests of the retaining wall backfilled with sand and fiber sand. The test results demonstrate the effectiveness of fiber reinforced sand as backfill of retaining walls.

Keywords: retaining wall, fiber reinforcement, fiber sand, model tests.

На сегодняшний день подпорные стены — неотъемлемый элемент транспортного и городского строительства. Они устраиваются для удержания откосов предельной крутизны, а также позволяют рационально использовать городские территории. Подпорные стены могут испытывать давление не только от собственного веса обратной засыпки — могут быть нагружены дополнительным давлением от здания или дороги, находящихся на призме обрушения. Конструкция

и материалоемкость облицовки подпорной стены, а значит, и стоимость во многом зависят от величины горизонтального давления грунта обратной засыпки и гидростатического давления грунтовой воды. Для снижения давления грунтовой воды на подпорные стены в качестве обратной засыпки рекомендуется применять грунты с хорошими фильтрационными свойствами (песчаные или крупнообломочные). Такие грунты, как правило, не обладают сцеплением и, следо-

вательно, оказывают значительное давление на конструкцию подпорной стены. В настоящее время осуществляется активное применение армированных подпорных стен, обратная засыпка которых включает слои уплотненного грунта, чередующиеся с плоской арматурой, в качестве которой могут выступать металлические сетки, тонкие стали, геосинтетические материалы [1].

Помимо известной технологии армирования рулонными геосинтетиками существует недостаточно изученная технология фибрового армирования грунта, где короткие природные или синтетические волокна внедряются в массив грунта для придания ему оптимальных физических и механических характеристик. Результаты лабораторных исследований [2–4] показывают, что волокна фибры, внедренные в грунт, повышают прочностные характеристики песчаного грунта. Совместная работа частиц грунта и армирующих волокон способствует появлению у несвязного грунта удельного сцепления и увеличению угла внутреннего трения. Фибропесок имеет хорошие фильтрационные свойства и будет оказывать меньшее активное давление на ограждения за счет увеличенных прочностных характеристик по сравнению с неармированным грунтом. Таким образом, одной из перспективных областей применения фиброгрунта может стать использование его в качестве обратной засыпки различных ограждающих конструкций [3].

Целью настоящего исследования является оценка возможности применения фиброармированного песка в качестве обратной засыпки подпорных стен.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- анализ существующих подходов к приготовлению смеси волокон с грунтом и разработка рекомендаций по приготовлению фибропесчаной смеси в промышленных объемах;
- разработка конструкции стенда для испытаний моделей подпорных стен;
- подготовка необходимого объема фиброармированного грунта с оптимальным содержанием армирующих волокон, определенным автором ранее из лабораторных исследований;
- проведение испытаний модели подпорной стены с обратной засыпкой из песка и фибропес-

ска на давление от собственного веса и при наличии равномерно распределенной временной пригрузки;

- анализ полученных результатов.

Несмотря на доказанную эффективность фибрового армирования полипропиленовыми волокнами в лабораторных условиях, применение такого материала, как фиброгрунт, ограничено в современной практике строительства. Причиной этому является отсутствие нормативных документов и рекомендаций для осуществления строительства в полевых условиях, а также технологические проблемы, возникающие при перемешивании грунта и волокон. Подбор оптимальной технологии смешивания является одной из основных задач по его массовому внедрению в геотехническое строительство. Поэтому первым этапом данной работы являлся анализ существующих подходов к приготовлению смеси волокон с грунтом и разработка рекомендаций по приготовлению фибропесчаной смеси для дальнейшего ее использования при строительстве геотехнических сооружений.

Аналогично фиброармированным бетонам, для получения фиброгрунтового композита с наиболее высокими качественными показателями необходимо обеспечить равномерное распределение армирующих волокон в заданном объеме грунта с образованием пространственного каркаса, гарантирующего формирование однородной структуры материала и стабильность физико-механических свойств [5]. Основной сложностью приготовления фиброгрунта является комкование волокон, что мешает получению однородной смеси. Технология смешивания волокон с грунтом плохо освещена в литературе. В существующих исследованиях грунт с фиброй смешивают во влажном состоянии вручную или механизированным способом с помощью специальных устройств [6].

Ручное смешивание волокон с грунтом — простой способ, который может быть использован для получения смеси высокого качества с достаточно равномерным распределением волокон. Этот метод предполагает смешивание волокон с грунтом до получения однородной смеси. Волокна добавляются небольшими порциями в несколько приемов до нужного процентного содержания. Хотя эта задача проста, но при этом

достаточно трудоемка. Если использовать данный метод для крупных проектов, потребуется много рабочих, которые должны будут переработать большой объем материала за достаточно короткий промежуток времени, чтобы предотвратить потерю воды в грунте в процессе смешивания.

Исследование возможности механизированного смешивания грунта и волокон может развиваться по двум направлениям: первое рассматривает возможность применения существующих серийно выпускаемых установок, второе предполагает разработку принципиально новых типов смесителей. Общим для двух подходов является необходимость снижения энергоемкости и трудоемкости процессов дозирования и перемешивания с обеспечением равномерного распределения армирующих волокон в объеме смеси без их слипания [5]. Также технология смешивания должна исключать возможность повреждения волокон, так как это может привести к преждевременному разрушению волокон и неэффективному использованию материала [6].

Анализ литературы показывает, что для механического смешивания волокон с грунтом могут быть использованы устройства следующих типов: культиваторы, миксеры для бетона, барабанные смесители [6].

В данной работе приготовление фиброгрунтовой смеси авторами осуществлялось при помощи гравитационного бетоносмесителя с двумя лопастями НСМ650 с емкостью барабана 180 л и скоростью вращения 29,5 об./мин (рис. 1). Чтобы грунт не оседал на дне смесителя, барабан располагался параллельно полу так, что ось вращения была горизонтальна.

Смесь готовилась из мелкого однородного песка и полипропиленовых волокон длиной 12 мм, применяемых в промышленных масштабах для армирования бетона. Влажность песка составила 7 %. Процентное содержание армирующих волокон варьировалось от 0,25 до 0,5 % от массы сухого грунта. В эксперименте рассматривалось влияние таких факторов, как время перемешивания, наполненность барабана, процентное содержание волокон, влажность грунта.

На первой стадии эксперимента было выполнено перемешивание песка в объеме 12 л с полипропиленовыми волокнами в количестве 0,25 %

от массы песка. Длительность смешивания составила 10 мин с контролем качества смеси каждые 2 мин. В результате фибра равномерно перемешалась с грунтом спустя 6 мин. Дальнейшее увеличение времени смешивания на качество смеси не повлияло.

Далее в барабан смесителя было добавлено еще 0,25 % фибры, таким образом, процентное содержание волокон составило 0,5 %. Длительность смешивания также составила 10 мин с контролем качества смеси каждые 2 мин. К исходу 10 мин в фибропесчаной смеси присутствовали комки волокон полипропилена, отделившиеся от смеси. По результатам этого этапа был сделан вывод, что увеличение процента армирования приводит к локализованной концентрации волокон и сложности приготовления однородной смеси.

На следующей стадии в барабан было добавлено еще 12 л песка так, что процентное содержание волокон снова стало 0,25 %, но при этом объем материала в смесителе увеличился в два раза. В результате через 10 мин фибра равномерно перемешалась с песком, то есть увеличение наполненности барабана привело к увеличению времени смешивания.

Далее к смеси было добавлено еще 0,25 % волокон, в результате чего процентное содержание волокон составило 0,375 %. Спустя 10 мин смешивания была получена однородная фибропесчаная смесь. Так же через 10 мин была получена однородная смесь из песка объемом 36 л и с 0,25 % полипропилена.

Рис. 1. Бетоносмеситель, примененный авторами для приготовления фиброгрунтовой смеси

На следующей стадии эксперимента барабан смесителя был одновременно наполнен 60 л песка с 0,25 % полипропилена. В этом случае спустя 20 мин в фибропесчаной смеси присутствовали комки волокон. По результатам этого этапа можно сделать вывод, что последовательное увеличение загрузки барабана позволяет получить фибропесчаную смесь лучшего качества по сравнению с одновременной загрузкой большого количества материалов.

Также было исследовано влияние увеличения влажности песчаного грунта на способность к перемешиванию. В песок была добавлена вода до влажности 15 %. В этом случае наблюдалось значительное комкование волокон и отделение их от смеси, что позволяет сделать вывод о том, что увлажнение грунта выше его оптимальной влажности недопустимо.

Следующим этапом исследования стали испытания модели подпорной с обратной засыпкой из песчаного грунта, армированного волокнами полипропилена. Процентное содержание армирующих волокон было принято равным 0,5 % от массы сухого грунта, определенное как оптимальное из анализа результатов прошлых исследований автора [3].

В качестве основного оборудования для испытания модели подпорной стены использовался стенд для испытаний моделей фундаментов [1]. Роль подпорной стенки выполняла фанера толщиной 10 мм с жесткостью, в масштабе эксперимента 1:10 соизмеримой с жесткостью тонкой бетонной стены толщиной 200 мм. Измеряемым параметром в модельных экспериментах были горизонтальные перемещения стенки. Замер горизонтальных перемещений производился пятью индикаторами часового типа, расположенными по высоте стенки на расстоянии 5 см друг от друга. Индикаторы фиксировались на жесткой раме. Схема модельных испытаний приведена на рис. 2.

На первом этапе испытаний были определены горизонтальные перемещения стенки от собственного веса грунта обратной засыпки. После снятия нулевых отсчетов с индикаторов осуществлялась послойная укладка грунта обратной засыпки. Толщина слоя равнялась 5 см. Укладка производилась с уплотнением трамбовкой массой 1,2 кг, сечением 10×10 см с высоты 10 см, ко-

личество ударов для каждого слоя — 20. По мере укладки каждые 5 см засыпки снимались показания со всех пяти индикаторов, расположенных в точках 5, 10, 15, 20 и 25 см. Испытания для каждого типа засыпки были проведены с трехкратной повторяемостью, расхождения между результатами были минимальны. Фотография готовой модели подпорной стены приведена на рис. 3.

В табл. 1 приведены значения средних горизонтальных перемещений по высоте подпорной стенки от собственного веса песчаного и фибропесчаного грунта обратной засыпки в зависимости от мощности засыпки. Из таблицы видно, что максимальные перемещения стенки для песчаной засыпки на высоте 25 см составили 16 мм, для фибропесчаной — 12 мм.

Рис. 2. Схема модельных испытаний

Рис. 3. Общий вид исследуемой модели подпорной стены

В табл. 2 приведены значения процентов снижения горизонтальных перемещений при применении фибропесчаной обратной засыпки во всех измеряемых точках. Из таблицы видно, что в среднем снижение максимальных горизонтальных перемещений подпорной стенки при разных мощностях засыпки составило 25 %.

На рис. 4 представлены графики горизонтальных перемещений на различной высоте подпорной стенки для засыпки разной мощности. Пунктирной линией показаны графики для песчаной засыпки, сплошной — для фибропесчаной. График дает наглядное представление о факте снижения горизонтальных перемещений стенки с обратной засыпкой из фиброармированного грунта.

Следующим этапом исследования было приложение равномерно распределенной временной пригрузки на призму обрушения при высоте обратной засыпки подпорной стены 25 см. Давление задавалось ступенями по 2 кПа. Конечное давление равнялось 6 кПа, что соответствует при

перерасчете на масштаб эксперимента 60 кПа — нагрузке от колесного транспорта по ГОСТ Р 52748. В табл. 3 приведены значения средних горизонтальных перемещений по высоте подпорной стенки от временной пригрузки для песчаной и фибропесчаной обратной засыпки. Влияние временной пригрузки на горизонтальные перемещения в исследованном диапазоне нагрузок от 0,2 до 0,6 кПа незначительно. Прирост горизонтальных деформаций модели подпорной стенки составил до 0,07 мм для песчаной засыпки, 0,04 мм — для фибропесчаной.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Фибровое армирование — перспективный метод улучшения прочностных свойств грунтов, который требует разработки рекомендаций по приготовлению фиброгрунта и по внедрению его в строительную практику.

2. Технология приготовления фиброгрунтовых смесей может развиваться по двум направлениям: применение стандартных смесителей

Таблица 1

Значения средних горизонтальных перемещений по высоте подпорной стенки от собственного веса грунта обратной засыпки в зависимости от мощности засыпки (в мм)

Высота расположения точек замера горизонтальных деформаций, см	Высота обратной засыпки подпорной стенки, см									
	5		10		15		20		25	
	Песок	Фибро-песок	Песок	Фибро-песок	Песок	Фибро-песок	Песок	Фибро-песок	Песок	Фибро-песок
5	1,27	0,78	1,80	1,51	3,07	2,43	4,12	3,18	5,17	3,88
10	1,28	1,05	2,87	2,07	4,33	3,47	6,39	5,06	7,87	5,95
15	1,98	1,30	3,29	2,63	5,28	4,51	8,07	6,28	10,38	8,09
20	2,34	1,55	4,34	3,16	6,80	5,49	9,91	7,74	13,32	10,08
25	2,68	1,82	5,07	3,72	8,05	6,54	11,87	9,30	16,09	12,22

Таблица 2

Значения процентов снижения горизонтальных перемещений при применении фибропесчаной обратной засыпки

Высота расположения точек замера горизонтальных деформаций, см	Высота обратной засыпки подпорной стенки, см				
	5	10	15	20	25
5	38 %	16 %	21 %	23 %	25 %
10	18 %	28 %	20 %	21 %	24 %
15	34 %	20 %	15 %	22 %	22 %
20	34 %	27 %	19 %	22 %	24 %
25	32 %	27 %	19 %	22 %	24 %

Рис. 4. Графики горизонтальных перемещений подпорной стены на различной высоте для разной мощности засыпки

серийного производства и разработка принципиально новых типов смесителей. Стандартный бетоносмеситель гравитационного действия способен решить задачу смешивания песчаного грунта с дискретными волокнами полипропилена на достаточно высоком уровне. Для этого рекомендуется использовать песчаный грунт оптимальной влажности, а загрузку барабана выполнять в несколько приемов, последовательно добавляя порции грунта и волокон.

3. Для применения технологии гравитационного смешивания в геотехнических проектах необходимо увеличение емкости барабана для возможности приготовления фиброгрунтовых смесей в больших объемах. Снижению трудоемкости и повышению качества смеси также будет способствовать оснащение смесителя устрой-

ством для подачи и разделения волокон полипропилена.

4. Применение фиброармированного песка в качестве обратной засыпки является эффективным решением и позволяет снизить максимальные горизонтальные перемещения подпорной стенки в среднем на 25 %.

5. Влияние временной пригрузки, находящейся на призме обрушения, на горизонтальные перемещения в исследованном диапазоне нагрузок незначительно. Прирост горизонтальных деформаций модели подпорной стенки составил 0,00–0,07 мм для неармированной засыпки и 0,00–0,04 мм для армированной. Для такого типа конструкции возможно увеличение нагрузки в диапазонах, характерных для промышленного и гражданского строительства.

Таблица 3

Значения средних горизонтальных перемещений от временной пригрузки (в мм)

Высота расположения точек замера горизонтальных деформаций, см	Величина временной пригрузки, кПа					
	2		4		6	
	Песок	Фибропесок	Песок	Фибропесок	Песок	Фибропесок
5	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00
10	0,00	0,00	0,02	0,00	0,04	0,00
15	0,01	0,00	0,03	0,00	0,06	0,01
20	0,01	0,00	0,02	0,00	0,04	0,01
25	0,01	0,00	0,02	0,01	0,07	0,04

6. Полученные результаты показывают возможность применения фиброармированного песка в качестве обратной засыпки подпорных стен. Дискретное армирование грунтов обратной засыпки — перспективная технология для снижения материалоемкости и повышения рентабельности подпорных стен.

Работа выполнена при финансовой поддержке Благотворительного Фонда Владимира Потанина, грант для преподавателей магистратуры 2015/2016 г. по Благотворительной программе «Стипендиальная программа Владимира Потанина».

Библиографический список

1. Кузнецова А. С., Пономарев А. Б. Планирование эксперимента по исследованию напряженно деформированного состояния нагруженного массива фиброармированного грунта, находящегося за подпорной стеной // Вестник ПНИПУ: Строительство и архитектура. 2015. № 1. С. 135–148.

2. Кузнецова А. С., Пономарев А. Б. Лабораторные исследования прочностных характеристик фиброармированного песка различной степени водонасыщения // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 6 (47). С. 127–132.

3. Колесова А. С., Шаньгина Ю. М., Гришина А. С. Анализ эффективности применения фиброармированного песка при устройстве насыпей автомобильных дорог и обратной засыпки подпорных стен // ГеоТехника. 2016. № 4. С. 10–15.

4. Кузнецова А. С., Пономарев А. Б., Оффрихтер В. Г. Исследование прочностных характеристик песка, армированного дискретными волокнами полипропилена // Вестник ПНИПУ: Строительство и архитектура. 2012. С. 44–57.

5. Пухаренко Ю. В. Особенности приготовления фибробетонных смесей // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 1 (30). С. 157–162.

6. Segetin M., Jayaraman K., Xu X. Harakeke reinforcement of soil-cement building materials:

Manufacturability and properties // Building and Environment. 2007. № 42. С. 3066–3079.

References

1. Kuznetsova A. S., Ponomarev A. B. *Planirovanie ehksperimenta po issledovaniyu napryazhenno deformirovannogo sostoyaniya nagruzhennogo massiva fibroarmirovannogo grunta, nakhodyashchegosya za podpornoy stenoy* [Planning of testing the tensely deformed condition of the loaded massif of the fiber reinforced soil behind the retaining wall]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura – PNIPU Bulletin. Construction and architecture*, 2015, no. 1, pp. 135–148.

2. Kuznetsova A. S., Ponomarev A. B. *Laboratornye issledovaniya prochnostnykh kharakteristik fibroarmirovannogo peska razlichnoy stepeni vodonasyscheniya* [Laboratory testing of strength characteristics of fiber reinforced sand with various extent of water saturation]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2014, no. 6 (47), pp. 127–132.

3. Kolesova A. S., Shan'gina Yu. M., Grishina A. S. *Analiz ehffektivnosti primeneniya fibroarmirovannogo peska pri ustroystve nasypey avtomobil'nykh dorog i obratnoy zasypki podpornykh sten* [The analysis of efficiency of use of fiber reinforced sand at building the embankments of highways and backfilling the retaining walls]. *GeoTekhnika – GeoEngineering*, 2016, no. 4, pp. 10–15.

4. Kuznetsova A. S., Ponomarev A. B., Ofrikhter V. G. *Issledovanie prochnostnykh kharakteristik peska, armirovannogo diskretnymi voloknami polipropilena* [Studying the strength characteristics of the sand reinforced with discrete fibers of polypropylene]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura – PNIPU Bulletin: Construction and architecture*, 2012, pp. 44–57.

5. Pukhareno Yu. V. *Osobennosti prigotovleniya fibrobetonnykh smesey* [Features of preparation fiber reinforced concrete mixtures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2012, no. 1 (30), pp. 157–162.

6. Segetin M., Jayaraman K., Xu X. Harakeke reinforcement of soil-cement building materials. *Manufacturability and properties. Building and Environment*, 2007, no. 42, pp. 3066–3079.