

УДК 624.131

А.С. Кузнецова, В.Г. ОфрихтерПермский национальный исследовательский
политехнический университет**ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ФИБРОАРМИРОВАННОГО
ПЕСКА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ
НА ТРЕХОСНОЕ СЖАТИЕ**

Рассмотрены результаты испытаний на трехосное сжатие песчаного грунта, армированного дискретными волокнами базальта и пропилена. Проведен анализ влияния фиброармирования на основные характеристики грунта.

Ключевые слова: трехосное сжатие, фиброармированный песок, армирующие волокна.

В связи с растущей потребностью в строительстве земляных сооружений, способных нести большие нагрузки, и поиском технических решений по повышению несущей способности земляного полотна и основания, армирование грунтов различными геосинтетическими материалами нашло широкое применение в геотехнической практике. Исследованию положительного влияния армирования на основные характеристики грунтов при испытаниях образцов методами трехосного сжатия, плоского сдвига, одноосного сжатия и компрессионными испытаниями посвящены многочисленные работы.

Наряду с послойным армированием рулонными геосинтетическими материалами для улучшения прочностных свойств грунтового основания и экономии денежных средств в строительстве практикуется внедрение «равномерного произвольного» армирования дискретными волокнами, так называемое «фиброармирование». Фиброармирование имитирует поведение корней растений и приводит к повышению прочности и устойчивости грунта [1].

Полученные по результатам трехосных испытаний данные о свойствах грунтов являются наиболее точными, по сравнению с испытаниями на плоский сдвиг и одноосное сжатие, так как лабораторное тестирование по схеме трехосного сжатия позво-

ляет наиболее достоверно смоделировать напряженно-деформированное состояние в массиве грунта [2].

Широкое внедрение стабилометров в практику исследования грунтов сдерживается более сложной процедурой подготовки образцов и проведения самих испытаний по сравнению с традиционными методами (компрессионные и сдвиговые испытания). В то же время, согласно СП 22.13330.2011, актуализированной редакции СНиП 2.02.01–83* «Основания зданий и сооружений», рекомендуется, наряду с полевыми испытаниями, определять свойства грунтов по результатам трехосных испытаний для сооружений I и II уровня ответственности [3, пп. 5.3.5; 5.3.6].

В настоящей работе представлен анализ результатов трехосных испытаний образцов однородного мелкого песка фиксированной влажности и гранулометрического состава с произвольным армированием и без него. Насыпная плотность песка в состоянии естественной влажности составила $1,64 \text{ г/см}^3$. В качестве армирования были использованы два вида геосинтетических материалов: базальтовое и полипропиленовое волокна. Волокна в образце располагались произвольно равномерно, образуя «фиброгрунт». Для испытаний было использовано стандартное оборудование для испытаний трехосного сжатия. Образцы изготавливались диаметром 38 мм и высотой 76 мм. Экспериментальные данные были получены с помощью программного комплекса автоматизированной системы испытаний.

На достоверность результатов испытаний существенно влияет точность размеров, формы, плотности образца, условия его подготовки. Для обеспечения одинакового объема и плотности насыпного материала была определена масса навески грунта и армирующего материала. Уплотнение образца проводилось по трамбовочной технологии. Образец был послойно уплотнен трамбовкой, состоящей из круглого диска (диаметром чуть меньше внутреннего диаметра формы). До постановки под ограничивающее давление, стабильность образцов обеспечивалась за счет вакуумирования. Достоверность испытаний обеспечивалась необходимым числом повторов (трехкратным).

По рекомендациям ГОСТ [4] испытания песчаных образцов проводились по консолидировано-дренированной схеме при различных уровнях всестороннего давления (100, 200, 300 кПа). На стадии предварительного обжатия образец был уплотнен за-

данным в программе давлением, которое передавалось ступенями 50 кПа в соответствии с ГОСТ [4]. Последняя ступень выдерживалась до условной стабилизации. За критерий условной стабилизации было принято приращение относительной объемной деформации 0,0003 за определенный для песчаных образцов промежуток времени 30 мин. Вертикальное давление передавалось ступенями, равными 10 % заданного всестороннего давления, и выдерживалось до стабилизации вертикальной деформации образца, за критерий которой принималось приращение относительной вертикальной деформации 0,0001 за 1 мин. Испытания заканчивались по достижении уровня относительной вертикальной деформации 15 % [4].

Первая серия экспериментов была проведена по классической схеме с небольшим количеством армирующих волокон (0,5 и 1,5 об. %). Были испытаны неармированные и произвольно армированные базальтовыми и полипропиленовыми волокнами образцы. Результаты испытаний представлены на рис. 1.

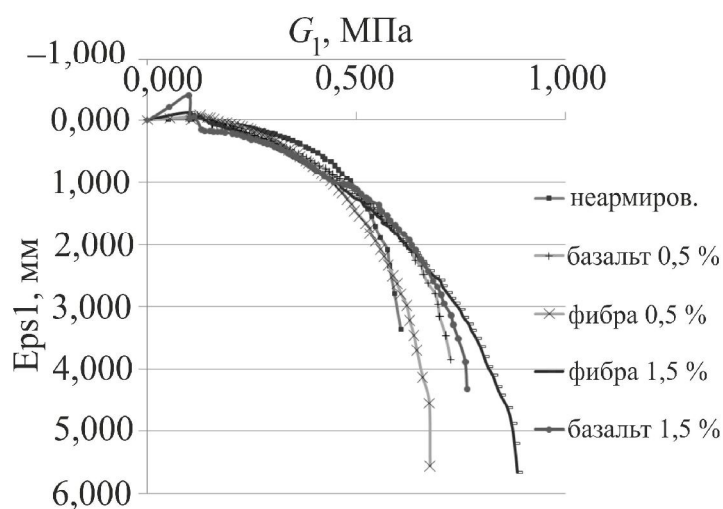


Рис. 1. Результаты трехосных испытаний при всестороннем давлении 100 кПа образцов, произвольно армированных (0,5 и 1,5 %) базальтовыми и полипропиленовыми волокнами, в сравнении с неармированными образцами
Eps1 – абсолютная вертикальная деформация; G_1 – девиаторное напряжение

Результаты испытаний показывают, что при небольших девиаторных напряжениях жесткость армированных образцов меньше жесткости неармированных. На начальном участке диаграммы фиброгрунт имеет незначительно большие по сравнению с чистым песком вертикальные деформации (разница деформаций в диапазоне Eps1 0–1 мм не превышает 0,34 мм), что мо-

жет быть следствием переупаковки структуры фиброгрунта в поле начальных напряжений). При более высоких уровнях нагрузки отчетливо прослеживается эффективность произвольного армирования. Деформации фибропесчаных образцов оказываются меньше деформаций песка при одинаковых уровнях напряжений, и разрушение происходит при большем значении девиаторного напряжения. При этом переход песчаного грунта и грунта, армированного базальтом, в текучее состояние происходит при меньших вертикальных деформациях, по сравнению с образцами, армированными полипропиленовой фиброй (3,36 мм для песчаного образца; 3,72 и 4,32 мм для образцов с базальтовым армированием – при 0,5 и 1,5 % армировании соответственно; 5,56 и 5,67 мм для образцов с полипропиленовым армированием – при 0,5 и 1,5 % армировании). Резкое увеличение осадки, соответствующее исчерпанию несущей способности при малых деформациях, будет опасно и крайне нежелательно в условиях эксплуатации.

Следующая серия испытаний были проведена с образцами, армированными полипропиленовой фиброй, показавшими наиболее интересные результаты в первой серии. При этом объемное содержание армирующих волокон было увеличено и принято равным 3, 4 и 5 %. Зависимость деформаций от напряжений песчаного образца и образцов с различным содержанием фибры представлена на рис. 2.

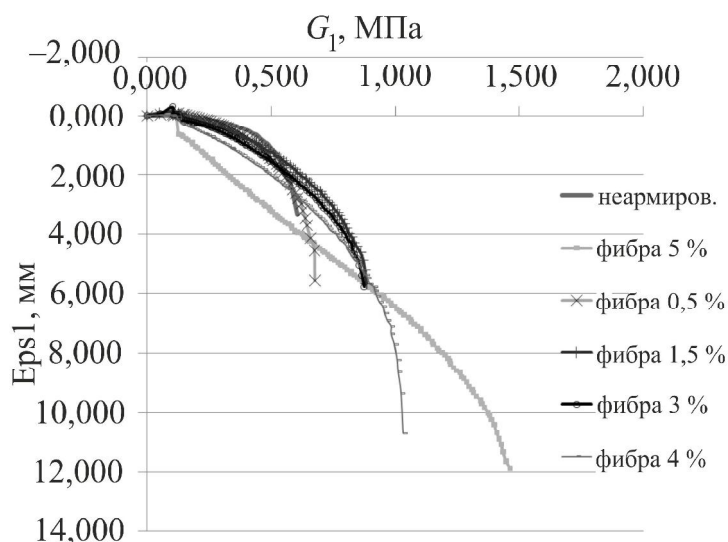


Рис. 2. Результаты трехосных испытаний при всестороннем давлении 100 кПа песчаных образцов, армированных полипропиленовой фиброй в сравнении с неармированными образцами

По графикам можно четко проследить, что с возрастанием содержания армирующих волокон в песке увеличивается протяженность участка линейной деформируемости. Фиброгрунт при армировании 5 % на достаточно большом интервале значений девиаторных напряжений до вертикальной деформации порядка 8 мм работает по линейной зависимости. Кроме того, с увеличением процента армирования возрастает величина разрушающей нагрузки, повышается несущая способность материала. Значения разрушающей нагрузки образцов по результатам трехосных испытаний приведены в табл. 1. Значения вертикальных деформаций, при которых происходит разрушение, также возрастают (5,76 мм для образца с 3 % армированием; 10,72 мм для образца с 4 %). Образец, в котором содержание армирующего материала составило 5 %, не удалось разрушить при достижении стандартного предельного уровня относительной вертикальной деформации 15 %, заложенного в программе испытаний в качестве терминального критерия.

Таблица 1

Разрушающая нагрузка по результатам трехосных испытаний песчаных образцов, армированных полипропиленовой фиброй, при всестороннем давлении 100 кПа

№ п/п	Образец	Разрушающая нагрузка G_1 , кПа
1	Неармированный	600
2	С полипропиленом 0,5 %	677
3	С полипропиленом 1,5 %	875
4	С полипропиленом 3 %	885
5	С полипропиленом 4 %	1033
6	С полипропиленом 5 %	1439

На рис. 3 приведены диаграммы Мора–Кулона, построенные в зависимости от приложенного всестороннего давления и разрушающей нагрузки. Касательная, проведенная к полуокружностям, отсекает на оси ординат отрезок, соответствующий кажущемуся удельному сцеплению грунта, а угол ее наклона равен углу внутреннего трения.

По диаграммам отслеживается существенный рост прочностной характеристики грунта – кажущегося удельного сцепления $c_{\text{каж}}$. С увеличением содержания волокон увеличивается и площадь поверхности взаимодействия волокон и песка, возрастает величина кажущегося удельного сцепления и повышается сопротивление грунта сдвигу. Этот факт подтверждается

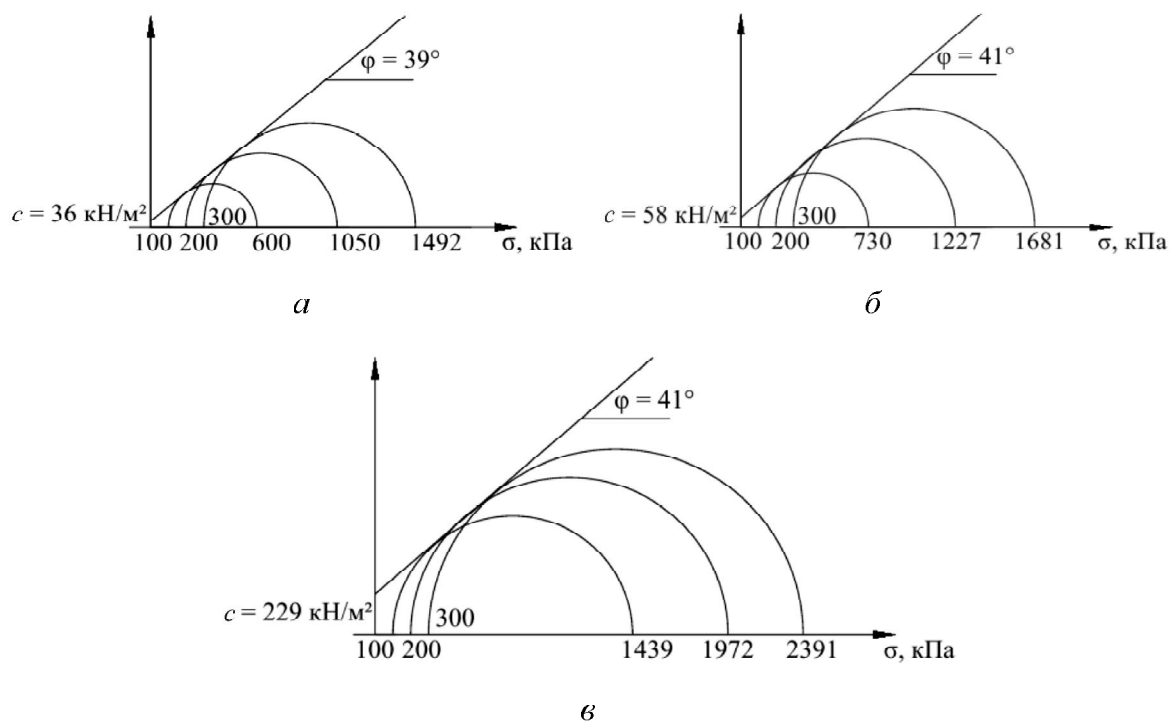


Рис. 3. Диаграмма Мора–Кулона: *а* – неармированные образцы; *б* – армированные базальтом 0,5 %; *в* – армированные полипропиленом 5 % ($\sigma_3 = 100$ кПа, 200 кПа, 300 кПа)

и формой разрушения образца. Разрушение неармированного образца происходит по выраженной поверхности среза (рис. 4), в то время как армированный образец после испытания принимает бочкообразную форму (рис. 5). Прочностные характеристики образцов по результатам трехосных испытаний приведены в табл. 2.



Рис. 4. Характерное разрушение неармированных образцов по поверхности среза

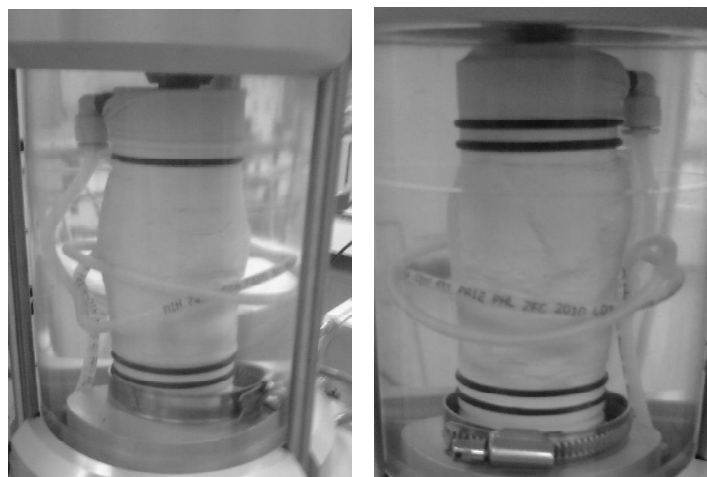


Рис. 5. Характерная деформация армированных (5 %) образцов бочкообразной формы

Таблица 2

Прочностные характеристики образцов по результатам испытаний трехосного сжатия

Образец	Угол внутреннего трения φ , град	Кажущееся удельное сцепление $c_{\text{каж}}$, кПа
Неармированный	39	36
С базальтом 0,5 %	41	58
С полипропиленом 5 %	41	229

Фиброармирование может существенно улучшить свойства грунта по ряду характеристик. Волокна, изменяя микроструктуру грунтового материала, предотвращают появление выраженной локализации деформаций и, следовательно, характерной плоскости среза. Совместная работа произвольного армирования и частиц грунта способствует появлению у несвязного армированного грунта характеристики, свойственной связным грунтам, – кажущегося удельного сцепления, и увеличивает сопротивление сдвигу. Значительный линейный участок на диаграмме зависимости деформаций от напряжений (см. рис. 2) позволяет говорить о возможности применения фиброгрунта для строительства податливых сооружений и повышении надежности грунтовых оснований и земляных сооружений.

Дальнейшие исследования «фиброгрунта» будут направлены на подтверждение возможности его использования при устройстве оснований и земляных сооружений повышенной несущей способности, а также на разработку технологических нормативов выполнения таких работ.

Библиографический список

1. Diambra A., Ibraim E. Fibre reinforced sands: experiments and modeling // Geotextiles and Geomembranes. – 2010. – № 28. – С. 238–250.

2. Сипидин В.П., Сидоров Н.Н. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия. – М.: Стройиздат, 1963.

3. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83*. – М., 2011.

4. ГОСТ 12248–96. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – М., 1996.

Получено 2.03.12