**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
Т. 8, № 3, 2017
PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9826/2017.3.12

УДК 624.138

АНАЛИЗ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ФИБРОГРУНТА НА СДВИГ

А.С. Гришина, А.Б. Пономарев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 07 июня 2017

Принята: 25 июля 2017

Опубликована: 29 сентября 2017

Ключевые слова:

проектирование армогрунтовых конструкций, фибропесок, модели фиброгрунта, прочность грунта на сдвиг

АННОТАЦИЯ

Армирование грунтов на сегодняшний день – один из наиболее популярных методов повышения несущей способности и снижения деформируемости грунтов оснований и земляных сооружений. Для эффективного применения армирующих геосинтетических материалов в строительной практике были разработаны «дискретные» подходы к проектированию армогрунтовых конструкций, которые предполагают ведение расчетов по независимым характеристикам грунта и волокон, что позволяет отказаться от долгих и дорогостоящих испытаний армогрунтовых композитов.

Общепринятые методы расчета армогрунтовых конструкций разработаны только для армирования плоскими геосинтетическими материалами. Армирование грунтов короткими случайно распределенными волокнами нуждается в дополнительной оценке. Вопрос проектирования фиброгрунтовых конструкций с последующим нормированием расчетных подходов до сих пор открыт в геотехнической практике. Разработанные «композитные» подходы для определения прочности фиброгрунта на сдвиг требуют в качестве входных параметров характеристики, полученные по результатам испытаний фиброгрунтов, что в значительной мере удорожает проектирование. Для верификации экспериментальных данных, полученных авторами, была выбрана «дискретная» модель фиброгрунта, предложенная Zornberg. Полученные Zornberg выражения позволяют оценивать прочность фиброгрунта на сдвиг по характеристикам неармированного грунта и волокон.

В результате сравнения экспериментальных данных и данных, полученных по результатам подстановки в модель, были сделаны выводы о хорошей сходимости рассмотренной модели в компоненте удельного сцепления для образцов, армированных волокнами до 0,5 % по массе сухого грунта. Для армирования более 0,5 % расхождения в экспериментальных и спрогнозированных данных значительны. Для последующего внедрения концепции фиброгрунта в геотехническую практику необходимо введение области применимости рассмотренной модели, а также и ее совершенствование.

© ПНИПУ

© Гришина Алла Сергеевна – старший преподаватель, e-mail: koallita@yandex.ru.

Пономарев Андрей Будимирович – доктор технических наук, профессор, e-mail: spstf@pstu.ru.

Alla S. Grishina – Senior Lecturer, e-mail: koallita@yandex.ru.

Andrei B. Ponomarev – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: spstf@pstu.ru.

ANALYSIS OF PREDICTIVE MODELS FOR SHEAR STRENGTH OF FIBER REINFORCED SOIL

A.S. Grishina, A.B. Ponomarev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 07 June 2017
Accepted: 25 July 2017
Published: 29 September 2017

Keywords:

design of reinforced soil structures, fiber-sand, models of fiber-soil, soil shear strength

ABSTRACT

Today soil reinforcement is one of the most popular methods of increasing the bearing capacity and reducing the deformability of soil bases and earth structures. To effectively use reinforcing geosynthetic materials in construction operations, "discrete" approaches have been developed to design soil reinforced structures. Such approaches suggest calculations according to independent characteristics of soil and fibers which results in avoiding long and expensive testing of soil reinforced composites.

Generally accepted methods of calculating soil reinforced structures were developed only for the reinforcement with planar geosynthetic materials. Soil reinforcement using short randomly distributed fibers requires an additional evaluation. The issue of designing fiber reinforced soil structures with a subsequent standardization of design approaches is still open in geotechnical practice. The developed "composite" approaches to determine the shear strength of a fiber-soil require shear strength testing of fiber reinforced soil specimens as input parameters, which significantly increases the design cost. To verify the experimental data obtained by the authors, the "discrete" model of the fiber reinforced soil proposed by Zornberg was chosen. The expressions obtained by Zornberg make it possible to evaluate the shear strength of the fiber-soil according to the characteristics of the unreinforced soil and fibers.

As a result of comparing the experimental data and the data obtained from the results of the substitution into the model, the conclusions were drawn about a good convergence of the model in the component of the specific cohesion for the specimens reinforced with fibers of up to 0.5% by the weight of dry soil. To reinforce more than 0.5 %, the difference in the experimental and predicted data is significant. So, it is necessary to introduce the field of applicability and improve the model considered for the subsequent introduction of the concept of fiber-soil into geotechnical practice.

© PNRPU

Одним из эффективных способов повышения прочности и устойчивости, а также снижения деформируемости оснований и земляных сооружений является их армирование. Традиционно под армогрунтовой конструкцией понимают земляное сооружение, состоящее из уплотненных слоев грунта, чередующихся с уложенными в определенном направлении плоскими армирующими элементами. В качестве армирующих элементов в строительной практике нашли широкое применение геосинтетики – гибкие, тонкие, синтетические листовые материалы, улучшающие строительные свойства грунтов [1, 2].

На первых этапах внедрения геосинтетических материалов армогрунтовые конструкции проектировались согласно «композитным» подходам. Такие подходы предполагали оценку поведения конструкции по данным испытаний армогрунтовых композитов, что делало эти методы дорогими и трудозатратными. При этом, несмотря на то что армирующие элементы работают на растяжение, их влияние на устойчивость оценивалось увеличением сопротивления грунта на сдвигу (например, увеличением удельного сцепления). Позже для конструкций, армированных рулонными геосинтетическими материалами, были разработаны дискретные подходы, следуя которым проектирование армогрунтовых конструкций ведется по независимым характеристикам грунта и арматуры. Данные методы обладают высокой точностью и позволяют отказаться от сложных и дорогостоящих испытаний армогрунтов. При этом производители геосинтетических материалов смогли сосредоточиться только на свойствах своих продуктов [3].

Если для традиционного рулонного армирования разработаны основные принципы проектирования, которые с успехом применяются во всем мире, то поведение фиброгрунтовых конструкций нуждается в дополнительной оценке. Доказано, что армированный дискретными слу-

чайно распределенными волокнами грунт обладает высокой прочностью на сдвиг. При этом прочность на сдвиг фиброгрунта обычно количественно оценивается повышенными значениями «эквивалентных» угла трения и сцепления. Параметры прочности обычно определяются по результатам испытаний фиброгрунтовых композитов, что усложняет проектирование конструкций с применением фиброгрунта. Однако внедрение данного материала в практику позволит осуществить давнюю мечту геотехников о связном материале с высокой водопроницаемостью [3–5].

Основными причинами ограниченного применения фиброгрунта в строительной практике являются технологические проблемы, возникающие при перемешивании грунта и волокон и отсутствие нормативных документов и рекомендаций для расчета и проектирования [6]. Вопросы, связанные с приготовлением фиброгрунтовых смесей, могут быть решены с применением рекомендаций, разработанных для приготовления фиброармированных бетонов [7]. Волокна с грунтом могут быть перемешаны во влажном состоянии вручную или механизированным способом с помощью специальных устройств. Механизированное смешивание грунта и волокон может быть выполнено при помощи существующих серийно выпускаемых установок, а также возможна разработка принципиально новых типов смесителей [8]. Авторами настоящего исследования проблема смешивания волокон полипропилена с песчаным грунтом была решена при помощи стандартного бетоносмесителя гравитационного действия [9].

Вопрос проектирования фиброгрунтовых конструкций с последующим нормированием расчетных подходов до сих пор не решен в российской геотехнической практике. Целью настоящего исследования является анализ существующих подходов оценки прочности фиброгрунта на сдвиг по расчетным моделям с верификацией данных, полученных экспериментальным путем.

Конструкции из фиброгрунта традиционно проектировались с использованием композитных подходов, которые рассматривают смесь как однородный композитный материал. Влияние волокон, как правило, оценивалось эквивалентными значениями угла внутреннего трения и удельного сцепления [3].

Для понимания механизма взаимодействия волокон с грунтом исследователями были предложены следующие композитные модели:

- механическая модель Gray и Ohashi [10], расширенная позже Maher и Gray [11];
- статистическая модель Ranjan и др. [12];
- энергетическая модель Michalowski и др. [13].

Первая модель требует в качестве входных параметров величины зоны сдвига и угла искривления волокон, которые трудно оценить количественно. Вторая модель основана только на результатах испытаний автора и не дает истинного представления о механизме поведения фиброгрунта, а также зависит от качества испытаний ее автора. Последняя модель также требует параметров, полученных по характеристикам фиброгрунтовых композитов.

Вместо этого Zornberg была предложена дискретная модель для анализа предельного равновесия фиброгрунта. В этом случае волокна рассматриваются как отдельные элементы, которые способствуют повышению устойчивости путем мобилизации растягивающих напряжений вдоль плоскости сдвига. При этом эквивалентная прочность грунта на сдвиг может быть определена по независимым характеристикам грунта и волокон. Данная модель была верифицирована ее автором по данным испытаний на одноплоскостной срез и трехосное сжатие разных типов грунта, армированных волокнами разной прочности и длины с содержанием волокон по массе от 0 до 0,4 % [3].

Модель рассматривает два случая: когда причиной разрушения является выдергивание волокна и когда причина заключается в его разрыве. Для наиболее применимых полимер-

ных волокон согласно модели Zornberg для строительных давлений разрушение происходит вследствие выдергивания волокна. Для этого случая эквивалентная прочность фиброгрунта на сдвиг S_{eq} может быть определена с помощью выражения

$$S_{eq} = c_{eq} + (\text{tg}\varphi)_{eq} \cdot \sigma_n,$$

где σ_n – нормальное напряжение в плоскости сдвига; c_{eq} и $\text{tg}\varphi_{eq}$ – удельное сцепление и угол внутреннего трения фиброгрунта, определяемые соответственно по формулам

$$c_{eq} = (1 + \alpha \cdot \eta \cdot \chi \cdot c_{i,c}) \cdot c,$$

$$(\text{tg}\varphi)_{eq} = (1 + \alpha \cdot \eta \cdot \chi \cdot c_{i,\varphi}) \cdot \text{tg}\varphi,$$

где c и φ – удельное сцепление и угол внутреннего трения неармированного грунта; η – геометрический параметр волокна, $\eta = \frac{l_f}{d_f}$, где d_f и l_f – диаметр и длина элементарного волокна

соответственно; χ – процентное содержание волокон; α – коэффициент, учитывающий ориентацию и распределение волокон; $c_{i,c}$ и $c_{i,\varphi}$ – коэффициенты взаимодействия волокон и грунта.

Рис. Верификация экспериментальных данных авторов с данными, полученными по модели Zornberg:
а – для фибропеска, армированного 0,25 % полипропилена (ПП); б – для фибропеска, армированного 0,5 % ПП; в – для фибропеска, армированного 0,5 % базальта; г – для фибропеска, армированного 1 % ПП
Fig. 1. Verification of the authors' experimental data with the data obtained by the Zornberg model:
a – for fiber-sand reinforced with 0,25 % of polypropylene (PP); б – for fiber-sand reinforced with 0,5 % polypropylene; в – for fiber-sand reinforced with 0,5 % basalt; г – for fiber-sand reinforced with 1 % polypropylene (PP)

Дискретная модель Zornberg была использована для верификации данных, полученных авторами [5, 14, 15] по результатам испытаний на одноплоскостной срез и трехосное сжатие образцов песка, армированного волокнами полипропилена в количестве 0,25; 0,5 и 1 %, а также волокнами базальта в количестве 0,5 %. Огибающие прочности, построенные по экспериментальным данным и путем подстановки характеристик неармированного грунта и волокон в модель Zornberg, приведены на рисунке, а–г. Сравнение прочностных характеристик, предсказанных моделью и полученных экспериментальным путем, представлено в таблице.

Прочностные характеристики, предсказанные моделью
и полученные экспериментальным путем

Strength characteristics predicted by the model and obtained experimentally

Образцы	Значение удельного сцепления c , кПа		Значение угла внутреннего трения φ , град	
	Предсказанное	Экспериментальное	Предсказанное	Экспериментальное
Песок + 0,25 % ПП	31,3	34,4	52,7	42
Песок + 0,5 % ПП	75,8	69,7	77,2	43,2
Песок + 0,5 % базальта	45,1	52,1	69,1	41,7
Песок + 1 % ПП	136,8	76,6	82,8	42,5
Песок + 1,5 % ПП	197,1	18,0	85,0	50,9

Согласно модели Zornberg при увеличении процента армирования увеличивается и прочность грунта на сдвиг. При этом коэффициент увеличения удельного сцепления и тангенса угла внутреннего трения равны, что не соответствует данным, полученным по результатам экспериментов авторов. На рисунке и в таблице видно, что для процентов армирования до 0,5 % по массе модель Zornberg показывает хорошую сходимость с экспериментальными данными авторов в компоненте удельного сцепления. Увеличение же угла внутреннего трения происходит незначительно на практике, что не учитывает модель. Также модель не учитывает, что с увеличением процента содержания волокон в грунте появляется эффект комкования и, следовательно, снижения характеристик, что было доказано экспериментальными исследованиями автора [14].

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- для эффективного применения фиброгрунта в строительстве необходима разработка основных положений для проектирования фиброгрунтовых конструкций;
- в качестве принципа проектирования авторами рекомендуется применение «дискретного» подхода, предполагающего расчет по параметрам, полученным по независимым характеристикам образцов грунта и волокон;
- рассмотренная «дискретная» модель (Zornberg) хорошо верифицируется с полученными экспериментальными данными авторов в компоненте эквивалентного сцепления для процента армирования, равного 0,5, и не подходит для компонента трения и сцепления для процентов армирования, больших 0,5;
- модель Zornberg не учитывает эффект комкования волокон, а следовательно, и снижение характеристик при больших ($> 0,5$) процентах армирования.

В качестве рекомендаций для дальнейших исследований предполагается ввести область применимости рассмотренной модели, а также ее совершенствование для последующего внедрения концепции фиброгрунта в геотехническую практику.

Библиографический список

1. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. – М.: Изд-во АСВ, 2014. – 728 с.
2. Ponomaryov A., Zolotoubov D. Several approaches for the design of reinforced bases on karst areas // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2014. – № 42 – P. 48–51. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.12.002>
3. Zornberg J.G. Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil // *Geotechnique*. – 2002. – № 52. – P. 593–604.
4. Diambra A., Ibraim E. Fibre reinforced sands: experiments and modeling // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2010. – № 28. – P. 238–250.
5. Кузнецова А.С., Пономарев А.Б., Офрихтер В.Г. Исследование прочностных характеристик песка, армированного дискретными волокнами полипропилена // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2012. – № 1. – С. 44–55.
6. Hejazi S.M., Sheikhzadeh M.A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers // *Construction and Building Materials*. – 2012. – № 30. – P. 101–116.
7. Пухаренко Ю.В. Особенности приготовления фибробетонных смесей // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 1 (30). – С. 157–162.
8. Segetin M., Jayaraman K., Xu X. Harakeke reinforcement of soil–cement building materials: manufacturability and properties // *Building and Environment*. – 2007. – № 4. – P. 3066–3079.
9. Гришина А.С., Смирнов Р.С., Пономарев А.Б. Оценка эффективности работы подпорной стены с обратной засыпкой из фиброармированного грунта по модельным испытаниям // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 2 (61). – С. 125–132.
10. Gray D.H., Ohashi H. Mechanics of fiber-reinforcement in sand // *Journal of Geotechnical Engineering*. – 1983. – № 109. – P. 335–353.
11. Maher M.H., Gray D.H. Static response of sand reinforced with randomly distributed fibers // *Journal of Geotechnical Engineering*. – 1990. – № 116. – P. 1661–1677.
12. Ranjan G., Vassan R.M., Charan H.D. Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil // *Journal of Geotechnical Engineering*. – 1996. – № 120. – P. 419–426.
13. Michalowski R.L., Zhao A. Failure of fiber-reinforced granular soils // *Journal of Geotechnical Engineering*. – 1996. – № 122. – P. 226–234.
14. Кузнецова А.С., Офрихтер В.Г. Оценка прочности фиброармированного песка по результатам испытаний на трехосное сжатие // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Урбанистика. – 2012. – № 2 (6). – С. 37–44.
15. 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.

References

1. Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya [Directory geotechnics. Bases, foundations and underground structures]. Moscow, ASV, 2014, 728 p.
2. Ponomaryov A., Zolotoubov D. Several approaches for the design of reinforced bases on karst areas. *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, no. 42. pp. 48-51. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.12.002>.

3. Zornberg J.G. Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil. *Geotechnique*, 2002, no. 52, pp. 593 – 604.
4. Diambra A., Ibraim E. Fibre reinforced sands: experiments and modeling. *Geotextiles and Geomembranes*, 2010, no. 28, pp. 238-250.
5. Kuznetsova A.S., Ofrikhter V.G., Ponomaryov A.B. Issledovanie prochnostnykh kharakteristik peska, armirovannogo diskretnymi voloknami polipropilena [Study of strength characteristics of sand reinforced with discrete polypropylene fibers]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2012, no 1, pp. 44-55.
6. Hejazi S.M. Sheikhzadeh M.A. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 2012, no. 30, pp. 101-116.
7. Pukharens Yu. V. Osobennosti prigotovleniya ibrobetonnykh smesey [Features of preparation fiber reinforced concrete mixtures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2012, no. 1 (30), pp. 157–162.
8. Segetin M., Jayaraman K., Xu X. Harakeke reinforcement of soil–cement building materials: manufacturability and properties. *Building and Environment*, 2007, no. 4, pp. 3066 – 3079.
9. Grishina A.S., Smirnov R.S., Ponomaryov A.B. Otsenka effektivnosti raboty podpornoy steny s obratnoy zasypkoy iz fibroarmirovannogo grunta po model'nym ispytaniyam [Performance evaluation of retaining wall with fiber reinforced sand backfill by model test]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2017, no. 2 (61), pp. 125–132.
10. Gray D.H., Ohashi H. Mechanics of fiber-reinforcement in sand. *Journal of geotechnical engineering*, 1983, no. 109, pp. 335 – 353.
11. Maher M.H., Gray D.H. Static response of sand reinforced with randomly distributed fibers. *Journal of geotechnical engineering*, 1990, no. 116, pp. 1661 – 1677.
12. Ranjan G., Vassan R.M., Charan H.D. Probabilistic analysis of randomly distributed fiber-reinforced soil. *Journal of geotechnical engineering*, 1996, no. 120, pp. 419 – 426.
13. Michalowski R.L., Zhao A. Failure of fiber-reinforced granular soils. *Journal of geotechnical engineering*, 1996, no. 122, pp. 226 – 234.
14. Kuznetsova A.S., Ofrikhter V.G. Otsenka prochnosti fibroarmirovannogo peska po rezul'tatam ispytaniy na trekhosnoye szhatiye [Strength evaluation of fiber reinforced sand by the results of triaxial tests]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Urbanistika*, 2012, no 2(6), pp. 37-44.
15. Kolesova A.S., Shan'gina Yu.M., Grishina A.S. Analiz effektivnosti 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*, 2016, no. 4, pp. 10–15.