

УДК 624.131

**А.С. Кузнецова, А.Б. Пономарев**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

## **ПЛАНИРОВАНИЕ И ПОДГОТОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ ГЛИНИСТОГО ГРУНТА, УЛУЧШЕННОГО ФИБРОВЫМ АРМИРОВАНИЕМ**

Представлена методика проведения испытаний трехосного сжатия глинистого грунта, армированного дискретными волокнами полипропилена, составлен план лабораторных экспериментов. Приведен порядок подготовки образцов с заданными физическими характеристиками. Описаны методы статистической обработки получаемых экспериментальных данных о свойствах грунтов.

**Ключевые слова:** планирование эксперимента, подготовка образца, глинистый грунт, фибровое армирование, трехосное сжатие.

В связи с увеличением с каждым годом объемов строительства инженеры сталкиваются с проблемой возведения зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях. Все чаще площадки, отведенные под строительство, сложены слабыми, водонасыщенными, структурно-неустойчивыми и другими проблемными грунтами. Такие грунты в естественном состоянии имеют невысокую несущую способность и повышенную сжимаемость [1]. Чтобы не прибегать к большим затратам на замену грунтов оснований, геотехники осваивают различные технологии преобразования свойств местных грунтов.

Методы улучшения грунта можно разделить на три группы [2]:

- физические (виброуплотнение, термическое закрепление, замораживание и т.д.);
- механические (использование пригрузки, каменные колонны, армирование грунтов геосинтетическими материалами и т.д.);
- химические (силикатизация, цементация, битумизация и т.д.).

В настоящее время особое внимание исследователи и инженеры уделяют армированию – процедуре улучшения свойств грунтов путем внедрения различных природных или синтетических добавок. Наряду с послойным армированием рулонными геосинтетическими материалами (геосетками, георешетками, геотекстилем) существует недоста-

точно изученная технология смешивания грунта с короткими дискретными волокнами, так называемое фиброармирование. Волокна со значительной прочностью на растяжение вводятся в грунтовую матрицу, имитируя поведение корней растений, и способствуют повышению прочности и устойчивости грунтового массива [3].

Так, целью дальнейшей работы является определение влияния фибрового армирования на механические характеристики глинистого грунта. Лабораторное исследование маломасштабных моделей грунтов проводится на материально-технической базе экспертной лаборатории кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Лабораторные испытания будут проводиться с глинистыми грунтами различной консистенции, т.е. с заданным показателем текучести  $I_L$ . Согласно проведенным ранее исследованиям [4] на территории г. Перми широко распространены глинистые грунты от полутвердой до мягкопластичной консистенции. Отсюда принятые значения  $I_L = 0,4; 0,6; 0,8$ .

В качестве фибрового армирования принимается полипропиленовое волокно с длиной отрезка 12 мм. Полипропиленовая фибра обладает отличной способностью к перемешиванию, благодаря чему она равномерно распределяется по всему объему грунта [5]. Технические характеристики полипропиленового полотна представлены ниже.

Длина волокна, мм	12
Диаметр волокна, микрон	25–35
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,91
Модуль упругости при изгибе, МПа, не менее	1050
Максимальное относительное удлинение при разрыве, %	23

Характеристики прочности и деформируемости глинистого грунта в естественном состоянии и глинистого грунта, усиленного полипропиленовым волокном, будут получены по результатам лабораторных испытаний по методу трехосного сжатия. Трехосное нагружение позволяет наиболее достоверно смоделировать напряженно-деформированное состояние в массиве грунта, поэтому полученные по результатам трехосных испытаний данные о свойствах грунтов являются наиболее точными по сравнению с испытаниями на плоский сдвиг и одноосное сжатие [6]. Более того, современная нормативная

литература для сооружений I и II уровня ответственности рекомендует определять характеристики грунтов по результатам трехосных испытаний [7].

Лабораторные исследования глинистых грунтов проводятся на приборе трехосного сжатия – стабилометре типа А фирмы ООО «НПП «Геотек» (г. Пенза). Стабилометр представляет собой совокупность камеры давления, средств измерения и устройства силового нагружения. Образец имеет форму цилиндра диаметром 38 мм и высотой 76 мм. Входные параметры, характеристики, получаемые в процессе испытаний, обрабатываются с помощью программного автоматического измерительно-вычислительного комплекса «АСИС».

По рекомендациям ГОСТ 12248 [8] испытания глинистых образцов проводятся по консолидировано-дренированной схеме при различных уровнях всестороннего давления (табл. 1). На стадии предварительного обжатия образец уплотняется заданным в программе давлением, которое передается ступенями. Каждая ступень всестороннего давления при консолидации для глинистых грунтов выдерживается не менее 15 мин. Последняя ступень выдерживается до условной стабилизации. За критерий условной стабилизации принимается приращение относительной объемной деформации 0,0003 за определенный для глинистых грунтов промежуток времени (табл. 2). Вертикальное давление передается ступенями, равными 10 % заданного всестороннего давления, и выдерживается до стабилизации вертикальной деформации образца, за критерий которой принимается приращение относительной вертикальной деформации 0,0001 за 1 мин. Испытания заканчиваются по достижении уровня относительной вертикальной деформации 15 %.

Т а б л и ц а 1

Значения всестороннего давления  $\sigma_3$  и ступеней давления для глинистых грунтов

Грунты	Значение $\sigma_3$ при предварительном уплотнении, МПа	Ступени давления, МПа
Глинистые с $I_L \leq 0,5$	0,1; 0,2; 0,3	0,05
Глинистые с $I_L > 0,5$	0,1; 0,15; 0,2	0,025 до $\sigma_1 = 0,1$ и далее 0,05

Время условной стабилизации глинистого грунта на стадии  
всестороннего давления

Грунты	Время условной стабилизации объемной деформации, ч
Глинистые суглинки:	
с $I_p \leq 12$	6
с $I_p > 12$	12
Глины	24

Одной из важнейших задач при внедрении в производство результатов лабораторных исследований грунтов является предельное сокращение сроков экспериментов. Для решения этой задачи на практике применяют статистические методы оптимизации экспериментов. Грунты в естественном сложении или улучшенные различными природными или синтетическими материалами представляют собой сложные системы, характеризующиеся значительным количеством взаимосвязанных входных параметров – факторов, а происходящие в них явления носят сложный вероятностный характер.

Оптимальное планирование эксперимента предполагает одновременное последовательное изменение всех входных параметров (факторов), влияющих на качество исследуемого материала, и позволяет установить по специально сформулированным правилам зависимость – модель качества материала от этих параметров [9].

В качестве входных варьируемых параметров при испытаниях трехосного сжатия примем индекс текучести глинистого грунта, объемное содержание армирующих волокон и всестороннее давление в камере трехосного сжатия. Таким образом, получим эксперимент с тремя факторами:  $X_1$  – всестороннее давление в камере,  $\sigma_3 = 100, 200, 300$  или  $100, 150, 200$  кПа в зависимости от  $I_L$ ;  $X_2$  – показатель текучести глинистого грунта,  $I_L = 0,4; 0,6; 0,8$ .  $X_3$  – объемное содержание армирующих волокон,  $0; 0,5; 1$  %. Присвоим входным параметрам кодированные значения. Таким образом, каждый фактор имеет три уровня – минимальный (–1), нулевой (0) и максимальный (+1). В качестве параметров оптимизации примем значения удельного сцепления  $Y_1$ , угла внутреннего трения  $Y_2$  и главного напряжения при разрушении образца  $Y_3$ . Составим матрицу планирования эксперимента (табл. 3) [10].

Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Кодированные значения факторов			Количество опытов
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	
1	-1	-1	-1	6
2	-1	-1	0	6
3	-1	-1	+1	6
4	-1	0	-1	6
5	-1	0	0	6
6	-1	0	+1	6
7	-1	+1	-1	6
8	-1	+1	0	6
9	-1	+1	+1	6
10	0	-1	-1	6
11	0	-1	0	6
12	0	-1	+1	6
13	0	0	-1	6
14	0	0	0	6
15	0	0	+1	6
16	0	+1	-1	6
17	0	+1	0	6
18	0	+1	+1	6
19	+1	-1	-1	6
20	+1	-1	0	6
21	+1	-1	+1	6
22	+1	0	-1	6
23	+1	0	0	6
24	+1	0	+1	6
25	+1	+1	-1	6
26	+1	+1	0	6
27	+1	+1	+1	6

Для задания показателя текучести  $I_L$  необходимо знать число пластичности грунта  $I_p$  и определить значение влажности по формуле

$$w = I_L(w_L - w_p) + w_p, \quad (1)$$

где  $w$  – необходимая влажность грунта;  $I_L$  – заданный показатель текучести;  $w_L$  – верхняя граница текучести;  $w_p$  – нижняя граница раскатывания.

Зная влажность грунта, можно определить количество воды, которое необходимо добавить в грунт для получения грунта заданной консистенции:

$$m_w = w \cdot m_s, \quad (2)$$

где  $m_w$  – необходимая масса воды;  $m_s$  – масса сухого грунта.

По ГОСТ 5180 [11] граница текучести определяется с помощью балансирующего конуса (прибора Васильева), а граница пластичности (раскатывания) – по влажности раскатывания в шнур. Для автоматизации процесса будем использовать устройство для раскатывания связного грунта в жгут ГТ 1.8.2 фирмы ООО «НПП «Геотек» (г. Пенза). Принять количество определений каждой величины равным шести.

Образцы для дальнейших испытаний трехосного сжатия готовятся из специально приготовленной глинистой пасты с заданными физическими характеристиками. Паста готовится следующим образом. После определения физических характеристик глинистый грунт высушивается в сушильном шкафу при контролируемой температуре 105 °С. Высушенный грунт измельчается молотком до тонкодисперсного состояния, просеивается через лабораторное сито с размером отверстий 0,1 мм и еще раз высушивается. Затем определяется удельный вес частиц грунта и его плотность, после этого с учетом заданных необходимых значений влажности грунта, его удельного веса, показателя текучести и пластичности готовится грунтовая глинистая паста путем постепенного добавления необходимого количества воды к постоянному объему глинистого грунта. Для получения фиброармированного глинистого грунта вместе с водой в грунт внедряются волокна полипропилена заданного объема и смесь тщательно перемешивается до равномерного распределения волокон в грунтовой массе.

Все физические и механические характеристики грунта, полученные по результатам лабораторных испытаний, должны быть обработаны методами статистической обработки по ГОСТ 20522 [12].

Нормативное значение  $X_n$  всех физических характеристик грунта принимают равным среднеарифметическому значению  $\bar{X}$  и вычисляют по формуле

$$X_n = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (3)$$

где  $n$  – число определений характеристики;  $X_i$  – частные значения характеристики, получаемые по результатам отдельных  $i$ -х опытов.

Для исключения возможных ошибок следует выполнить статистическую проверку полученных величин в соответствии с ГОСТ 20522–2011:

$$|X_n - X_i| > vS, \quad (4)$$

где  $v$  – статистический критерий, принимаемый в зависимости от числа определений  $n$  характеристики,  $v = 2,07$  для  $n = 6$  при  $\alpha = 0,95$  (по таблице ГОСТа);  $S$  – среднеквадратическое отклонение характеристики, вычисляемое по формуле

$$S = \sqrt{\frac{1}{1-n} \sum_{i=1}^n (X_n - X_i)^2}. \quad (5)$$

Если какое-либо значение характеристики исключено, следует для оставшихся опытных данных снова вычислить  $X_n$  по формуле (3) и  $S$  по формуле (5).

Для дальнейших расчетов необходимо вычислить расчетное значение характеристик путем делением нормативного значения на коэффициент надежности по грунту. Для этого вычисляют коэффициент вариации  $V$  характеристики и показатель точности ее среднего значения  $\rho_\alpha$  по формулам:

$$V = \frac{S}{X_n}, \quad (6)$$

$$\rho_\alpha = \frac{t_\alpha V}{\sqrt{n}}, \quad (7)$$

где  $t_\alpha$  – коэффициент, принимаемый по таблице в зависимости от заданной односторонней доверительной вероятности  $\alpha$  и числа степеней свободы  $K = n - 1$ ,  $t_\alpha = 2,01$  для  $K = 5$  при  $\alpha = 0,95$ .

Формула для вычисления коэффициента надежности по грунту:

$$\gamma_g = \frac{1}{1 \pm \rho_\alpha}. \quad (8)$$

Расчетное значение  $X$  характеристики грунта вычисляют по формуле

$$X = \frac{X_n}{\gamma_g}. \quad (9)$$

После проведения всей серии экспериментов трехосного сжатия необходимо вычислить нормативные значения угла внутреннего трения  $\varphi$  и удельного сцепления  $c$  статистическими методами по формулам:

$$\operatorname{tg} \varphi_j = \frac{N_j - 1}{2\sqrt{N_j}}, \quad (10)$$

$$c_j = \frac{M_j}{2\sqrt{N_j}}, \quad (11)$$

где

$$N_j = \frac{k \sum_{i=1}^k \sigma_{1,i} \cdot \sigma_{3,i} - \sum_{i=1}^k \sigma_{1,i} \sum_{i=1}^k \sigma_{3,i}}{k \sum_{i=1}^k (\sigma_{3,i})^2 - \left( \sum_{i=1}^k \sigma_{3,i} \right)^2}, \quad (12)$$

$$M_j = \frac{1}{k} \left( \sum_{i=1}^k \sigma_{1,i} - N_j \sum_{i=1}^k \sigma_{3,i} \right), \quad (13)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  – главные напряжения при разрушении образца грунта.

По найденным частным значениям  $\operatorname{tg} \varphi_j$  и  $c_j$  вычисляют нормативные значения  $\operatorname{tg} \varphi_n$  и  $c_n$  по формуле (3) и среднеквадратические отклонения  $S_{\operatorname{tg} \varphi}$  и  $S_c$  по формуле (5).

Далее выполняют статистическую проверку для исключения возможных ошибок в значениях  $\operatorname{tg} \varphi_j$  и  $c_j$ . Если хотя бы для одного из пары значений  $\operatorname{tg} \varphi_j$  и  $c_j$  не выполняется условие (4), пару значений следует исключить. При этом для оставшихся опытных данных заново вычисляем значения  $\operatorname{tg} \varphi_n$ ,  $c_n$ ,  $S_{\operatorname{tg} \varphi}$  и  $S_c$ .

Для  $\operatorname{tg} \varphi$  и  $c$  вычисляют коэффициент вариации  $V$ , показатель точности  $\rho_\alpha$ , коэффициент надежности по грунту  $\gamma_g$  и их расчетные значения по формулам (6)–(9).



Если по формуле (7) для  $\operatorname{tg} \varphi$  или  $c$  получится  $\rho_\alpha > 1$ , расчетное значение этой характеристики следует принять равным нулю.

По проведенным испытаниям необходимо сравнить расчетное сопротивление армированного грунта с расчетным сопротивлением неармированного, а также установить закономерности изменения механических характеристик глинистого грунта в зависимости от показателя текучести и процентного содержания волокон полипропилена. По возможности выявить пределы действенного применения данного вида армирования для глинистого грунта различной консистенции. Пользуясь уже проведенными исследованиями влияния фибрового армирования на механические характеристики песчаного грунта [13], сравнить эффективность внедрения волокон для различных типов грунта.

### Библиографический список

1. Ухов С.Б., Семенов В.В. Механика грунтов, основания и фундаменты. – М.: Изд-во АСВ, 1994.
2. Hejazi S.M., Sheikhzadeh M. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers // *Construction and Building Materials*. – 2012. – Vol. 30. – P. 101–116.
3. Diambra A., Ibraim E. Fibre reinforced sands: experiments and modeling // *Geotextiles and Geomembranes*. – 2010. – Vol. 28. – P. 238–250.
4. Калошина С.В., Пономарев А.Б. Наиболее значимые факторы строительства при возведении зданий в стесненных условиях // *Известия Орлов. гос. техн. ун-та. Сер. Строительство. Транспорт*. – 2007. – № 1/13, т. 2. – С. 7–10.
5. Фиброволокно полипропиленовое [Электронный ресурс] // Веб-узел ООО «Полимер». – URL: <http://polimer-rostov.ru>.
6. Сипидин В.П., Сидоров Н.Н. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия. – М.: Гос. изд-во лит. по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963.
7. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83\*. – М., 2011.
8. ГОСТ 12248–96. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – М., 1996.

9. Кнатько В.М., Руднева И.Е. Математические методы и планирование эксперимента в грунтоведении и инженерной геологии. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1983.

10. Планирование эксперимента по исследованию напряженно-деформированного состояния песчаного грунтового основания с помощью штамповых испытаний / Д.А. Татьянников, К.П. Давлятшин, Я.А. Федоровых, А.Б. Пономарев // Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Строительство и архитектура. – 2011. – № 1. – С. 105–109.

11. ГОСТ 5180–84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – М., 1984.

12. ГОСТ 20522–96. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. – М., 1996.

13. Кузнецова А.С., Офрихтер В.Г. Оценка прочности фиброармированного песка по результатам испытаний на трехосное сжатие // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Урбанистика. – 2012. – С. 37–44.

**A.S. Kuznetsova, A.B. Ponomarev**

## **EXPERIMENTAL DESIGN AND TRIAXIAL TEST PREPARATION OF CLAY SOILS TREATED BY FIBER REINFORCEMENT**

This paper presents a triaxial testing procedure of clay soil, reinforced by discrete polypropylene fiber, a plan of the laboratory experiments. There is the order of sample preparation with specified physical characteristics. Statistical analysis methods of the obtained experimental soil property data are described.

**Keywords:** experimental design, sample preparation, clay soil, fiber reinforcement, triaxial preparation.

### **Сведения об авторах**

**Кузнецова Алла Сергеевна** (Пермь, Россия) – ассистент кафедры «Строительное производство и геотехника» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (e-mail: spstf@pstu.ru).

**Пономарев Андрей Будимирович** (Пермь, Россия) – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительное производство и геотехника» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (e-mail: spstf@pstu.ru).

### **About the authors**

**Kuznetsova Alla Sergeevna** (Perm, Russia) – Assistant Lecturer, Department of Building production and geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: [spstf@pstu.ru](mailto:spstf@pstu.ru)).

**Ponomarev Andrey Budimirovich** (Perm, Russia) – Doctor of Technics, Professor, Head of Department of Building production and geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (e-mail: [spstf@pstu.ru](mailto:spstf@pstu.ru)).

Получено 11.03.2013