

# 不同孔隙率下纤维土无侧限抗压强度

宫亚峰<sup>1</sup>, 申杨凡<sup>1</sup>, 谭国金<sup>1</sup>, 韩春鹏<sup>2</sup>, 何钰龙<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 交通学院,长春 130022;2. 东北林业大学 土木工程学院,哈尔滨 150040)

**摘要:**为了研究不同孔隙率下纤维土无侧限抗压强度的影响规律,以孔隙率、纤维长度、纤维掺量作为试验变量,基于单因素试验的结果,运用 BBD 响应面试验设计方法进行无侧限抗压强度试验,建立了不同变量与响应值的拟合方程式。试验结果表明:当纤维长度为 9 mm、纤维掺量为 3%、孔隙率为 0.4 时,纤维增强黏性土体无侧限抗压强度效应最大,且纤维掺量与纤维长度、孔隙率与纤维长度之间有显著的交互作用。研究成果可以为纤维土在路基工程、基础工程等实际工程中的设计与施工提供参考。

**关键词:**道路工程;无侧限抗压强度;响应面法;孔隙率;纤维长度;纤维掺量

**中图分类号:**TU443    **文献标志码:**A    **文章编号:**1671-5497(2018)03-0712-08

**DOI:**10.13229/j.cnki.jdxbgxb20170142

## Unconfined compressive strength of fiber soil with different porosity

GONG Ya-feng<sup>1</sup>, SHEN Yang-fan<sup>1</sup>, TAN Guo-jin<sup>1</sup>, HAN Chun-peng<sup>2</sup>, HE Yu-long<sup>1</sup>

(1. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** To study the influence of unconfined compressive strength of fiber soil with different porosity, the porosity, fiber length and fiber content were taken as the test variables. According to the results of single factor experiment, BBD response surface experiment design method was employed to conduct the unconfined compressive strength tests, and fitting equations of different variables and the response values were established. Test results show that fiber reinforced viscous effects of unconfined compressive strength of the soil is the largest when the fiber length is 9 mm, fiber content is 3% and fiber soil porosity is 0.4. Obvious interaction between fiber length and porosity is observed. The results may provide reference for fiber soil engineering application, such as sub grade engineering, foundation engineering design and construction.

**Key words:** road engineering; unconfined compressive strength; response surface method; porosity; fiber length; fiber content

收稿日期:2017-02-22.

基金项目:国家自然科学基金项目(51478203);吉林省科技厅项目(20140520135H);中央高校基本科研业务费专项资金项目(451170306069).

作者简介:宫亚峰(1977-),男,副教授,博士.研究方向:桥梁结构健康监测理论及应用. E-mail:gongyf@jlu.edu.cn

通信作者:谭国金(1981-),男,教授,博士.研究方向:桥梁检测与加固. E-mail:tgj@jlu.edu.cn

## 0 引言

纤维土作为一类新型的工程土体加筋材料,具有施工便捷、在施工过程中无毒副作用的特点,且采用短纤维对土体进行加固,其分散作用好且加筋后对土体的增强效果是各向同性,可以整体性提升土工构造物的稳定性,被广泛应用于台背回填、路基滑坡回填等修复工程中。例如,美国德州某公园道路在使用3~5年后其路堤出现稳定性问题,后采用聚丙烯长纤维掺入土体填料中,对原有路堤进行修补<sup>[1]</sup>。

由于纤维土具有良好的应用前景,国内、外对于纤维加固土体的工程特性有广泛的研究。Hamidi等<sup>[2]</sup>通过三轴剪切试验研究了纤维加筋水泥砂土的力学行为。Akbulut等<sup>[3]</sup>研究了聚丙烯纤维加筋黏性土抗剪强度,发现在一定的纤维掺量以及纤维长度下,加筋土的粘聚力以及内摩擦角均有明显提升。Yilmaz等<sup>[4]</sup>研究了聚丙烯纤维加筋粉煤灰黏土应力-应变特性。李建<sup>[5]</sup>和唐朝生等<sup>[6]</sup>通过拉拔试验研究了纤维与土颗粒的界面作用机理,并从理论上得到了纤维加固临界长度。张艳美等<sup>[7]</sup>通过动三轴试验研究了不同因素影响聚丙烯加筋粉砂动强度的变化规律。刘寒冰等<sup>[8,9]</sup>研究了聚丙烯纤维加筋粉煤灰土的静动力变化规律。韩春鹏等<sup>[10]</sup>研究了冻融循环作用对聚丙烯纤维土抗剪强度的影响规律。

以上研究主要是根据不同的纤维种类、纤维掺量以及纤维长度等影响因素对土体加固效果的影响,且主要集中在对土体抗剪强度的加固上,而考虑土体自身特性对纤维土无侧限抗压强度增强效果的试验分析较少。本文应用响应面方法,以聚丙烯纤维为试验材料,以土体孔隙率、纤维长度、纤维掺量为试验变量,应用 BBD (Box-Behnken design) 试验设计方法建立了试验变量与无侧限抗压强度间的回归模型。

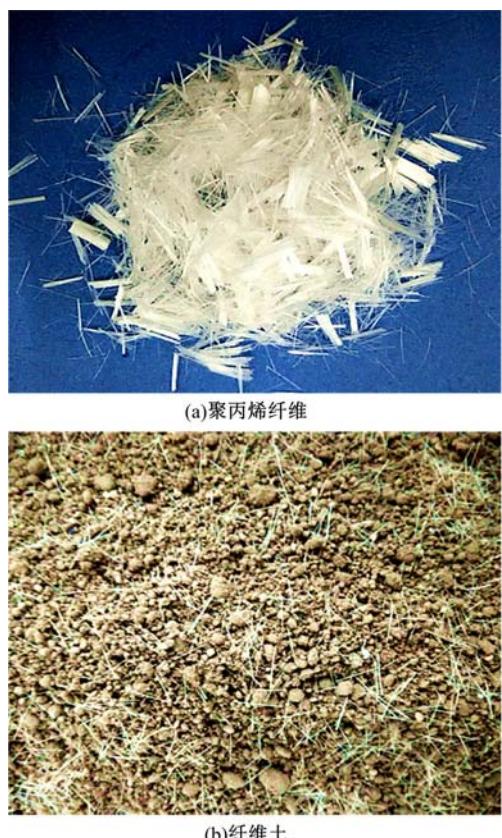
## 1 试验准备

### 1.1 试验材料

本文所采用的试验土样为哈尔滨某基坑开挖土体,土样为淡黄色土体,具有一定的黏性。对试验土样进行基本的物理力学试验,根据试验结果结合公路土工试验规程<sup>[11]</sup>中对于土体的分类标准,判定试验土体为低液限粉质粘土,测得其物理力学参数如下所示:比重  $G_s = 2.65$ ;最大干密度

$\rho_d = 1.86 \text{ g/cm}^3$ ;最佳含水量  $\omega_{opt} = 11.4\%$ ;液限  $\omega_L = 33.3\%$ ;塑限  $\omega_p = 24.0\%$ ;塑性指数  $I_p = 9.3\%$ 。

试验中采用的纤维为工程中常用的聚丙烯纤维,其物理力学参数如下所示:密度为  $0.96 \text{ g/cm}^3$ ;抗拉强度为  $500 \text{ MPa}$ ;弹性模量为  $3850 \text{ MPa}$ ;延伸率为  $10\% \sim 28\%$ ;直径为  $18 \sim 48 \mu\text{m}$ ;熔点为  $165^\circ\text{C}$ 。试验材料如图1所示。



(a)聚丙烯纤维

(b)纤维土

图1 试验材料图

Fig. 1 Test materials

### 1.2 试样准备

将土体试样风干碾碎并过  $2 \text{ mm}$  的土壤筛。根据击实试验所得到的最佳含水率进行计算称取一定质量的水加入土中,将试验土样闷料  $24 \text{ h}$ ,使得水分均匀散布在土体内部。运用水泥砂浆搅拌机将纤维与土体进行充分拌合,使得纤维尽量均匀地分布于土体当中。无侧限抗压强度试验试件制备采用双向静压压实的方法,试件是高为  $8 \text{ cm}$ 、直径为  $3.81 \text{ cm}$  的圆柱形试件。

无侧限抗压强度试验使用 LQ-200S 型号的公路工程全自动无级变速路强仪,对制备得到的试验试件进行无侧限竖向加压,加压速率为  $0.1 \text{ mm/min}$ ,试验仪器自动采集并保存土样的应力

应变曲线,其应力-应变关系曲线中的峰值即为土体试样的无侧限抗压强度。无侧限抗压试验试件加载图片如图 2 所示。



图 2 试件加载图

Fig. 2 Sample upload

### 1.3 响应面方案设计

响应面试验设计方法的基本原理是根据少量的试验点建立多元回归方程,并通过回归方程对较优的试验点或试验取值范围进行预测。相较于全组试验,响应面试验设计法的试验点数较少;相较于正交试验,响应面试验设计方法不仅可以得到最优点值,同时通过拟合方程还可以对试验点进行预测。

响应面试验方法的基本步骤如下:通过单因素试验确定各影响因素的中心点位,再通过响应面设计得到回归方程,并进行方差分析。目前,常用的响应面设计方法有 CCD(Central composite design)法和 BBD 法<sup>[12]</sup>。本文采用 BBD 法进行响应面设计,所建立的二次回归方程为:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_{ii}^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (1)$$

式中: Y 为响应值;  $x$  为影响变量;  $\beta$  为多项式系数;  $\epsilon$  为模型误差;  $k$  为变量的水平数。

## 2 单因素试验

### 2.1 纤维长度

根据参考文献[13]所得结论,当纤维掺量为 3% 时,聚丙烯纤维土的无侧限抗压强度较大,因此采用 3% 作为所对应的试验掺量。采用的纤维长度分别为 3、6、9、12 mm,不同纤维长度下聚丙烯纤维土应力-应变曲线变化趋势如图 3(a)所示,无侧限抗压强度变化趋势如图 3(b)所示。

由图 3 可以看出:掺入纤维以后,土体的应力-应变曲线有一定改变,在应变较小时,不同长

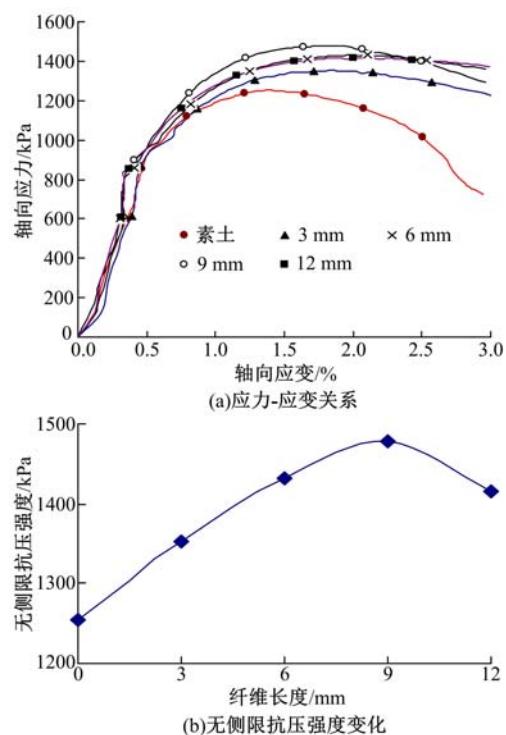


图 3 不同长度下纤维土无侧限抗压强度趋势

Fig. 3 Trend of unconfined compressive strength of fiber soil with different fiber length

度的纤维土应力-应变曲线是基本重合的,纤维土的应力峰值出现时,应变值较大,在试件发生破坏以后,素土的应力-应变曲线出现了斜率较大的下滑段,纤维土的应力-应变曲线应力下降速率并不明显,其中纤维长度为 6 mm 的纤维土应力-应变曲线与纤维长度为 12 mm 的变化趋势基本一致。当曲线出现峰值以后,随着轴向应变的增大,轴向应力的下滑趋势并不明显,此时土体已经出现破裂面,但是由于纤维的增强,土体无侧限抗压强度并未迅速丧失,说明掺加纤维有助于提高土体的韧性。

当纤维掺量为 3% 时,聚丙烯纤维土的无侧限抗压强度随着纤维长度的增长出现先增大后减小的变化趋势,最大无侧限抗压强度对应的长度为 9 mm。这是由于当纤维长度较小时,单根纤维与土颗粒之间的摩擦面积较小,处于破坏界面上的纤维容易被拔出,当纤维长度过大时,根据相关理论,纤维在加固土体时具有临界长度,过长的纤维在加固过程中被拔断,其临界长度计算公式为:

$$l_c = \frac{\sigma_t r}{2 \tau_0} \quad (2)$$

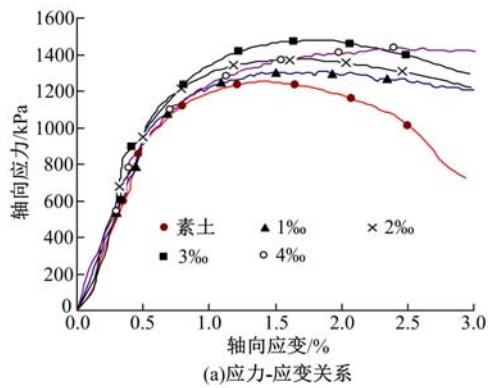
式中;  $l_c$  为单根纤维加固临界长度;  $\sigma_t$  为单根纤

维的抗拉强度;  $r$  为纤维直径;  $\tau_0$  为纤维与土颗粒的界面摩擦力。

根据相关研究,纤维临界长度约为 40~80 mm<sup>[5]</sup>,对于实际工程当中掺加的短纤维而言,通常不会出现纤维拔断情况,但是纤维的锚固长度太长,并未充分发挥纤维的优势,同时考虑纤维在整个土体中均匀分布,在相同掺量下处于破坏界面上的纤维根数较少,由此引发加固效应减弱。

## 2.2 纤维掺量

根据 2.1 节中所得试验结果,采用 9 mm 作为试验纤维长度,用纤维掺量分别为 1%、2%、3%、4% 的聚丙烯纤维制备试件并进行无侧限抗压强度试验,结果如图 4 所示。



(a) 应力-应变关系

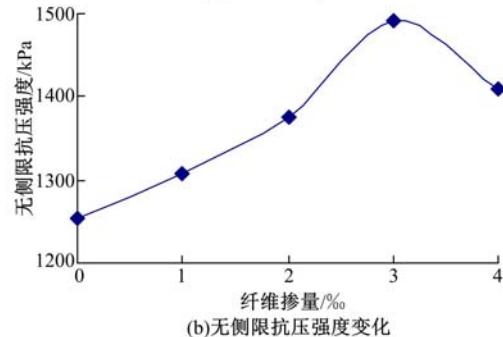


图 4 不同掺量下纤维土无侧限抗压强度趋势

Fig. 4 Trend of unconfined compressive strength of fiber soil with different fiber content

由图 4 可以看出:随着纤维掺量的增大,无侧限抗压强度所对应的轴向应变值增大,纤维的掺入对土体韧性的提高有较大帮助。纤维长度为 9 mm 的聚丙烯纤维土,随着纤维掺量的改变同样出现了先增大后减小的趋势,其中 3% 为最优掺量,且对应的无侧限抗压强度值要远高于其余掺量下的纤维土无侧限抗压强度。当纤维掺量较小时,所掺加的纤维根数较少,进而引起破坏界面上纤维增强土体的摩擦能力较弱。若纤维掺量过大时,在搅拌过程中纤维易相互缠绕成团,在土体中

呈现出定向成层分布,不仅会减弱纤维在土中的三维网状传力体系,同时多数纤维缠绕在一起形成了剪切面上的受力薄弱区,由此表现为纤维土的无侧限抗压强度减小。

## 2.3 孔隙率

根据以上试验结果,采用纤维长度为 9 mm、纤维掺量为 3% 作为试件的纤维掺配比。令土体孔隙率分别为 0.3~0.65,并以 0.05 为间隔点进行试件制备,得到不同孔隙率下纤维土和素土的无侧限抗压强度,如图 5 所示。由于土体本身的无侧限抗压强度会随着孔隙率的增大而减小,因此采用纤维土和素土在不同孔隙率下的无侧限抗压强度的试验平均值差值(见图 6)为研究对象。

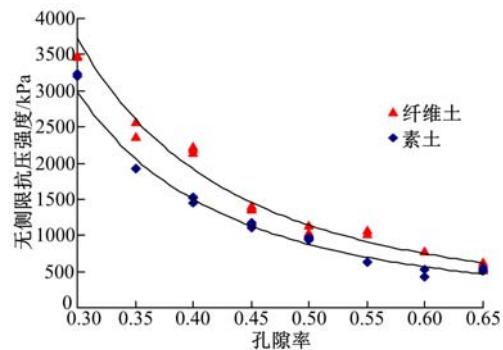


图 5 不同孔隙率下无侧限抗压强度

Fig. 5 Unconfined compressive strength with different porosity

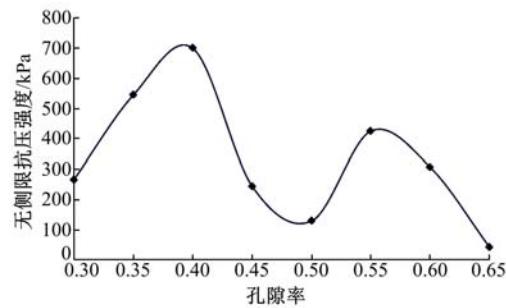


图 6 不同孔隙率下无侧限抗压强度差值

Fig. 6 Different value of unconfined compressive strength with different porosity

由图 5 可以看出:纤维土和素土的无侧限抗压强度随着孔隙率的增大呈指数下滑趋势,纤维土的拟合下滑公式为:

$$Y = 166.07x^{-2.3996}, R^2 = 0.9702 \quad (3)$$

素土的拟合下滑公式为:

$$Y = 228.34x^{-2.3196}, R^2 = 0.9718 \quad (4)$$

根据图 6 所得结果,纤维土和素土的无侧限抗压强度差值随着孔隙率的增大出现了双峰趋

势,其中最大差值为 0.4,此时的纤维加筋土体无侧限抗压强度最大。

### 3 响应面试验

#### 3.1 试验结果

根据单因素试验所得结论,设定纤维掺量  $s$ (影响因素 A)为 3%,纤维长度  $l$ (影响因素 B)为 9 mm、孔隙率  $e$ (影响因素 C)为 0.4 作为响应面的响应因子中心,并以无侧限抗压强度作为响应值。其影响因子的编码如表 1 所示,根据 BBD 试验设计原理将试验分成 17 组,其中有 5 组是作为响应因子中心的重复试验,用于校核试验的误差性,另外 12 组为析因试验,试验点分布在编码正方体的棱点处,使得试验点整体分布均匀,用以建立准确的响应面回归方程。试验方案设计及试验结果如表 2 所示。

表 1 试验编码

Table 1 Test codes

编码因子	编码水平		
	-1	0	1
孔隙率	0.3	0.4	0.5
纤维掺量/%	1	3	5
纤维长度/mm	6	9	12

表 2 试验结果

Table 2 Test results

编号	影响因素			响应值
	A/%	B/mm	C	无侧限抗压强度差/kPa
1	3.00	9.00	0.40	669.033
2	3.00	6.00	0.50	465.467
3	3.00	12.00	0.30	257.850
4	5.00	6.00	0.40	577.633
5	1.00	6.00	0.40	283.733
6	5.00	9.00	0.50	485.967
7	5.00	12.00	0.40	306.635
8	3.00	12.00	0.50	407.967
9	1.00	12.00	0.40	465.133
10	3.00	9.00	0.40	700.533
11	3.00	9.00	0.40	634.633
12	1.00	9.00	0.30	307.750
13	1.00	9.00	0.50	384.967
14	3.00	6.00	0.30	606.350
15	5.00	9.00	0.30	426.050
16	3.00	9.00	0.40	629.133
17	3.00	9.00	0.40	626.533

### 3.2 试验结果分析

#### 3.2.1 方差分析

通过大型试验设计软件 Design Expert8.0 对所得的实验数据进行分析,得到纤维掺量、纤维长度、孔隙比对无侧限抗压强度的二次多项回归方程为:

$$\begin{aligned} Y = & -2019.71 + 408.16x_1 + 1493.55x_2 + \\ & 7051.93x_3 - 18.85x_1x_2 - 21.63x_1x_3 + \\ & 242.5x_2x_3 - 34.61x_1^2 - 11.69x_2^2 - 11233.25x_3^2 \\ R^2 = & 0.9429, C.V. = 0.1091 \quad (5) \end{aligned}$$

同时,对试验数据进行方差分析,结果如表 3 所示。

表 3 方差分析

Table 3 Variance analysis

来源	总方差	自由度	均方差	F 值	p 值 Prob > F
模型	322800	9	35866.02	12.84	0.0014
A	15726.51	1	15726.51	5.63	0.0494
B	30702.42	1	30702.42	10.99	0.0129
C	2677.90	1	2677.90	0.96	0.3602
AB	51166.44	1	51166.44	18.31	0.0037
AC	74.82	1	74.82	0.027	0.8746
BC	21170.25	1	21170.25	7.58	0.0284
AA	80717.81	1	80717.81	28.89	0.0010
BB	46626.86	1	46626.86	16.69	0.0047
CC	53130.91	1	53130.91	19.02	0.0033
残差	19556.97	7	2793.85	—	—
失拟项	15438.32	3	5146.11	5.00	0.0771
绝对误差	4118.65	4	1029.66	—	—
总离差	342400	16	—	—	—

本模型的  $R^2$  为 0.9429,说明有 94.29% 的试验结果可以通过回归模型进行解释,模型的拟合程度较高。变异系数 C.V. 值代表试验整体数据的离散程度,C.V. 值越小,说明数据离散程度越低,数据的可靠性越好。若 C.V. 值大于 0.15,则统计数据可能出现异常,应重复试验。本次试验中,无侧限抗压强度的 C.V. 值等于 0.1091,试验数据具有一定的离散性,这是由于纤维在拌合过程中可能未达到完全均匀而导致的,但试验结果仍在可信的范围内。为了进一步检验试验的准确性,对试验结果进行残差正态性检验,结果如图 7 所示。由图 7 可知:试验点近似分布于一条直线上,试验结果呈现正态性分布趋势。

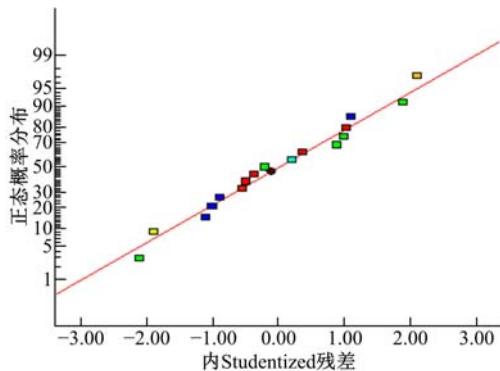


图 7 正态性检验图

Fig. 7 Normality test

在响应面方差检验中,用 F 分布来检验各影响因素及其之间的交互作用对试验模型的影响显著性,其中概率值  $P(F > F_a)$  越小,说明影响效果越显著。通常在统计分布中, F 的下确界点分别为 0.01、0.05、0.1, 代表影响因素对于模型的影响显著性为: 非常显著、显著、较为显著。由表 3 可知: 该模型 P 值为 0.0014, 说明回归模型是显著的, 根据 P 值结果, 各单因素对于纤维土无侧限抗压强度的影响显著性从大到小排序为: 纤维长度、孔隙比、纤维掺量。其中纤维掺量和纤维长度 P 值均小于 0.05, 影响显著; 孔隙比的 P 值大于 0.1, 影响不显著。纤维掺量与纤维长度二者交互项的 P 值小于 0.01, 说明两者交互作用非常显著; 纤维长度与孔隙比交互项的 P 值满足:  $0.01 < P < 0.05$ , 说明二者交互作用显著; 纤维掺量与孔隙比交互项的 P 值大于 0.1, 说明二者交互作用不显著。

### 3.2.2 双因素交互作用

根据表 3 可知, 模型中纤维掺量与纤维长度、纤维长度与孔隙比均具有显著的交互作用, 说明各影响因素对于纤维土无侧限抗压强度的影响并不是简单的线性关系。因此, 仅对两个影响显著的交互作用进行分析, 二者交互影响的三维图以及所对应的等高线图分别如图 8 和图 9 所示。

由图 8 可知: 当纤维长度和纤维掺量较小时, 其无侧限抗压强度的提升并不明显; 当纤维长度较低、纤维掺量较高时, 纤维土无侧限抗压强度有较大程度的提高。通过等高线图可以看出: 其等高线呈现出明显的斜向椭圆形, 说明两个影响因素具有明显的交互作用。这是由于纤维掺量与纤维长度均影响纤维加固土体破坏界面的有效加固面积, 在孔隙率相同的情况下, 有效加固面积即为

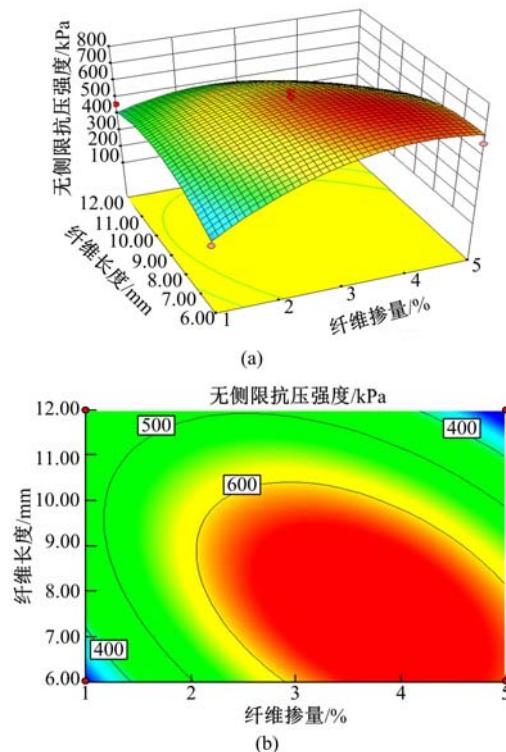


图 8 纤维长度与纤维掺量交互作用图

Fig. 8 Interaction between fiber length and content

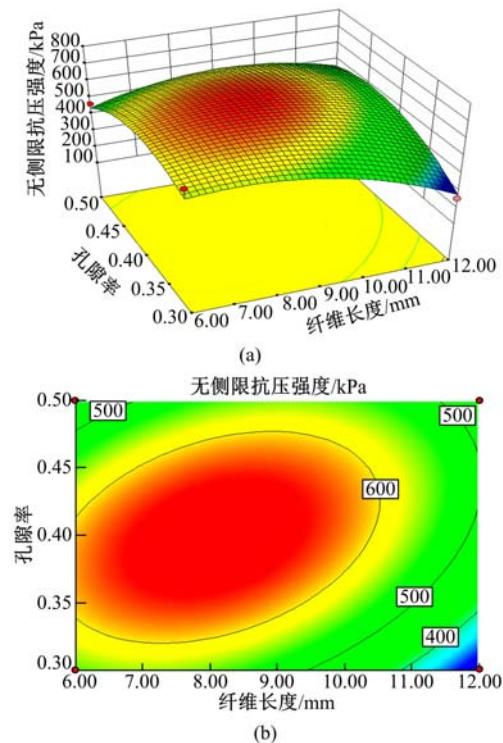


图 9 纤维长度与孔隙率交互作用图

Fig. 9 Interaction between fiber length and porosity

纤维与土颗粒之间的摩擦接触面积。因此, 当纤维掺量较高时, 其加固的交互作用更为明显。但

当纤维掺量较高、纤维长度较长时,纤维容易缠绕成团,使得加固效果反而减弱。

由图 9 可知:无侧限抗压强度的三维图呈现出以中心试验点为中心的凸曲面形状,随着孔隙率以及纤维长度的增加,在交互作用的影响下,无侧限抗压强度均出现先增大后减小的趋势。从等高线图可以看出:等高线值呈现出椭圆形,且沿纤维长度方向的等高线密度较大,说明在交互作用影响下纤维长度对纤维土无侧限抗压强度的影响更为显著。这是由于无侧限抗压强度的大小从本质上而言可以等效于纤维与土颗粒之间的界面摩擦作用的强弱。摩擦力的大小主要与摩擦接触面积以及土颗粒对纤维的压力有关,纤维长度越长,摩擦接触面积越大。孔隙率越低,土体压实度越大,使得单位长度的纤维与土颗粒之间的接触面积增大,同时提高了土颗粒对于纤维的压力作用。但当纤维长度过长、孔隙率较小时,土颗粒对纤维压力过高,破坏其原有截面形状,影响拉应力传递,同时纤维在土中自身缠绕交织,在土中成层分布,影响加固效果。

## 4 结 论

通过单因素试验确定了纤维加筋土体无侧限抗压强度各因素的中心值,采用 BBD 响应面法拟合了二次回归方程,并对主要因素及各因素的交互作用进行了分析,可知:

(1)选取合适的试验变量可以有效地提高纤维加筋土体无侧限抗压强度效果,其中各因素的最优组合是:纤维掺量为 3%、纤维长度为 9 mm、孔隙率为 0.4。纤维土的无侧限抗压强度随着以上影响因素的增加均出现先增大后减小的趋势。

(2)所建立的二元回归方程拟合度较高,很好地反映了各影响因素对于纤维土无侧限抗压强度的变化规律,在 3 个影响因素中,影响显著性最大的是纤维长度,其次为孔隙率,纤维掺量影响效果最小。纤维长度与纤维掺量的交互作用最为明显, $P(AB)=0.037$ ;孔隙率与纤维长度交互作用也较为显著, $P(BC)=0.0284$ ;纤维掺量与孔隙率的交互作用不显著, $P(AC)=0.8746$ 。

## 参考文献:

- [1] 包承纲,丁金华. 纤维加筋土的研究和工程应用[J]. 土工基础,2012,26(1):80-83.  
Bao Cheng-gang, Ding Jin-hua. Researches and applications of fiber reinforced soils[J]. Soil Engineering and Foundation, 2012, 26(1):80-83.
- [2] Hamidi A, Hooresfand M. Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand[J]. Geotextiles & Geomembranes, 2013, 36(1):1-9.
- [3] Akbulut S, Arasan S, Kalkan E. Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers[J]. Applied Clay Science, 2007, 38(1):23-32.
- [4] Yilmaz Y. Compaction and strength characteristics of fly ash and fiber amended clayey soil[J]. Engineering Geology, 2015, 188(7):168-177.
- [5] 李建,唐朝生,王德银,等. 基于单根纤维拉拔试验的波形纤维加筋土界面强度研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(9):1696-1704.  
Li Jian, Tang Chao-sheng, Wang De-yin, et al. Single fiber pullout tests on interfacial shear strength of wave-shape[J]. Fiber-reinforced Soils Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9):1696-1704.
- [6] 唐朝生,施斌,高玮,等. 纤维加筋土中单根纤维的拉拔试验及临界加筋长度的确定[J]. 岩土力学,2009,30(8):2225-2230.  
Tang Chao-sheng, Shi Bin, Gao Wei, et al. Single fiber pull-out test and the determination of critical fiberreinforcement length for fiber reinforced soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8):2225-2230.
- [7] 张艳美,阮东华,程志良. 土工合成纤维土动力特性试验研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(2):119-123.  
Zhang Yan-mei, Ruan Dong-hua, Cheng Zhi-liang. Experimental study on dynamic characteristics of TEXSOL[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2015, 39(2):119-123.
- [8] 刘寒冰,何岩,魏海斌,等. 聚丙烯纤维改良粉煤灰土[J]. 吉林大学学报:工学版,2010,40(2):431-434.  
Liu Han-bing, He Yan, Wei Hai-bin, et al. Enhancing fly ash soil by blending polypropylene fiber[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2010, 40(2):431-434.
- [9] 刘寒冰,何岩,魏海斌,等. 聚丙烯纤维改良粉煤灰土的动力特性[J]. 吉林大学学报:工学版,2010,40(3):672-675.  
Liu Han-bing, He Yan, Wei Hai-bin, et al. Dynamic property of polypropylene fiber improved fly ash soil[J]. Journal of Jilin University (Engineering

- and Technology Edition). 2010,40(3):672-675.
- [10] 韩春鹏,何钰龙,申杨凡,等. 冻融作用下纤维土抗剪强度影响因素试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2015,12(2):275-281.  
Han Chun-peng, He Yu-long, Shen Yang-fan, et al. Experimental study on factors of shear strength of fiber soils under the freeze-thaw cycle[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12 (2): 275-281.
- [11] JTG E40—2007. 公路土工试验规程[S].
- [12] 李莉,张赛,何强,等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索,2015,34(8):41-45.
- Li Li, Zhang Sai, He Qiang, et al. Application of response surface methodology in experiment design and optimization[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2015, 34(8):41-45.
- [13] 何钰龙,韩春鹏,王绍全,等. 冻融作用下聚丙烯纤维土力学性能试验研究[J]. 公路工程,2015,40(6):84-87,95.  
He Yu-long, Han Chun-peng, Wang Shao-quan, et al. Experimental study on mechanical properties of polypropylene fibers soil under the freezing and thawing[J]. Highway Engineering, 2015, 2015, 40(6): 84-87,95.