

# 复合低掺量水泥红黏土早期无侧限抗压强度试验

田晓敏, 申向东, 薛慧君, 樊浩伦

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

**摘要:** 选取粉煤灰废弃物及价格低廉的聚丙烯纤维作为外掺剂, 与内蒙古自治区中西部地区的红黏土一起制成一种特殊的水泥土。通过正交试验, 研究水泥掺量、粉煤灰掺量、聚丙烯纤维掺量以及混合体含水率对水泥土 7 d 早期无侧限抗压强度的影响。结果表明, 在一定的范围内, 水泥掺量影响最大, 其次为粉煤灰掺量, 聚丙烯纤维掺量和混合体含水率的影响则较小, 且最优配合比为: 水泥 10%, 粉煤灰 16%, 聚丙烯纤维 0.12%, 混合体含水率 18%。然后利用电镜试验, 从微观方面证明浆体的合理层理结构与纤维的固结加筋作用, 结果表明, 第 9 组强度高于第 1 组。并对第 9 组 (水泥掺量 10%, 粉煤灰掺量 16%, 纤维掺量 0.10%, 含水率 16%) 试块进行应力—应变曲线拟合, 得出曲线上升段满足三次多项式方程, 下降段满足二次多项式方程。

**关键词:** 无侧限抗压强度试验; 水泥红黏土; 正交试验; 电镜试验; 应力应变

中图分类号: TU411

文献标识码: A

## The early unconfined compressive strength test with composite low dosage of cement red clay

Tian Xiaomin, SHEN Xiangdong, XUE Huijun, FAN Haolun

(Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

**Abstract:** The red clay in the central and western regions in Inner Mongolia autonomous region was selected and the fly ash waste and polypropylene fiber as the additive agent was applied to make a kind of special cement-soil, which has the economic beneficial and environmental effect. The orthogonal experiment was applied to study the influence of the dosage of cement, fly ash, polypropylene fiber and mixture moisture content on 7 days early unconfined compressive strength of cement-soil. It is concluded that in a certain range, the cement content has the greatest effect, followed by the dosage of fly ash, and the influence of the dosage of polypropylene fiber and mixture moisture content is smaller. The optimal mixture ratio is: cement 10%, fly ash 16%, polypropylene fiber 0.12%, mixed moisture content 18%. Then SEM test demonstrated that reasonable bedding structure of the slurry and the reinforcement and consolidation effect of fiber is the reason that the strength of 9 group is higher than group 1 from the micro aspects. The stress - strain curve fitting was drawn with the 9 group block (cement content 10%, fly ash 16%, fiber content 0.10%, the mixed moisture content 16%). It is concluded that the rising of the curve fits the cubic polynomial equation, and the decline of the curve fits quadratic polynomial equation. The experiment results can provide certain reference for practical engineering application.

**Keywords:** unconfined compressive strength test; red clay cement; orthogonal test; SEM test; stress and strain

水泥土的外加剂包括纤维、聚丙烯酰胺、水玻璃、硅粉、表面活性剂等物质<sup>[1]</sup>。近些年来, 水泥土作为一种新型的建筑材料, 在国内外已被广泛应用于公路工程路面基层、水利工程边坡加固、防渗衬里、建筑工程软土地基处理等工程项目中<sup>[2]</sup>。大量的学者从多角度对水泥土进行研究, 如周丽萍等<sup>[3]</sup>通过室内抗压试验, 得出水泥土无侧限抗压强度、应力-应变的变化规律, 并分析了养护龄期、水泥掺量对水泥土力学性能的影响, 为实际工程提供了参考依据; 宁宝宽等<sup>[4]</sup>研究了水泥土在多种侵蚀条件下的侵蚀效应、破裂特征及机理; 李云峰等<sup>[5]</sup>研究了纤维的掺量及长度、水灰比对水泥土的各种强度的影响。然而, 将粉煤灰作为外加剂掺入水泥红黏土

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51069008); 内蒙古自治区科技计划项目 (20130425); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20121515110002)

**第一作者:** 田晓敏 (1989—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水工结构与材料

**通信作者:** 申向东, 教授, 主要研究方向为水工结构与材料, ndsxd@163.com

中的研究很少。

粉煤灰作为工业废料，严重污染环境。有关资料表明，适量的粉煤灰可以提高水泥土的强度<sup>[6]</sup>，其价格与水泥相比更为低廉，生产取用更为方便。通过试验研究，如果能在满足水泥土各个阶段的强度要求的前提下，尽可能的用粉煤灰替代水泥应用到实际工程材料中，那么其价值将不可估量，因此很有必要研究粉煤灰对水泥土的力学性能影响情况。

## 1 试验材料及方案设计

### 1.1 试验材料

试验用土取自内蒙古自治区呼和浩特市北部广泛分布的的红黏土。依据《土工试验方法标准》（GB/T 50123—1999）<sup>[7]</sup>进行相关物理性能指标试验，所得土样物理参数试验结果见表 1，土样的颗粒组成见表 2。水泥采用内蒙古呼和浩特市冀东水泥厂生产的 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥。粉煤灰取自内蒙古自治区呼和浩特市金桥电厂的 II 级粉煤灰，聚丙烯纤维为北京珠海蓝天技术有限公司所生产，具体性能指标见表 3。试验用水为普通自来水。

表 1 试验土样的物理参数

比重/(g·cm <sup>-3</sup> )	液限/%	塑限/%	塑性指数	最优含水率/%	击实最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
2.7	41.0	19.4	21.6	18.09	1.784

表 2 土的颗粒组成

d/mm	(0.25,0.5)	(0.075,0.25)	(0.005,0.075)	≤0.005
P/%	0.32	11.87	83.23	4.58

注: d 指土颗粒的粒径; P 指百分含量。

表 3 聚丙烯纤维的主要性能指标

纤维类型	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	直径/μm	长度/mm	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%	熔点/°C
束状单丝	0.91	18~48	9	≥500	10~28	160~180

### 1.2 正交试验设计

在多因素多水平的试验中，常常采用正交试验设计<sup>[8]</sup>法。影响水泥土强度的因素有很多，本试验选择了水泥掺量(A)、粉煤灰掺量(B)、聚丙烯纤维掺量(C)以及混合体含水率(D)来进行研究。正交试验采用标准的 4 因素 3 水平的正交试验表 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)进行试验设计，L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)正交表如表 4 所示。

表 4 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>)正交表

组号	试验因素			
	A (水泥掺量)	B (粉煤灰掺量)	C (聚丙烯纤维掺量)	D (混合体含水率)
1	6	8	0.08	16
2	6	12	0.10	18
3	6	16	0.12	20
4	8	8	0.10	20
5	8	12	0.12	16
6	8	16	0.08	18
7	10	8	0.12	18
8	10	12	0.08	20
9	10	16	0.10	16

## 2 试验方法及结果

按照《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2002）<sup>[7]</sup>，根据上述设计好的正交表进行室内试验。将所取得的红黏土自然风干，碾压磨碎，过 2 mm 筛，再按照设计好的配合比分别称取每组的干土、水泥、粉煤灰、聚丙烯纤维以及水。分别将各组称好的干土、粉煤灰及聚丙烯纤维混合后加入一定量的水，经水泥胶砂搅拌机搅拌均匀后，使之密封浸润 24 h，再将一定质量的水泥加入再搅拌均匀，将混合物装入模具，然后迅速在万能试验压力机上压实成型，脱模后制成 φ50 mm×50 mm 的圆柱体试块并编号，将试块放入湿度 95%，温度 (20±2) °C 的标准养护

箱中进行养护。待试块达到7 d 试验指定的龄期后，利用济南试金集团有限公司生产的微机控制电子万能试验机进行无侧限抗压强度试验。每组取 3 块平行试块，采用算术平均值为最后的结果。所测得的 7 d 早期水泥石试块无侧限抗压强度的正交试验结果见表 5。

表 5 试验结果

组号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
抗压强度/MPa	0.983	1.310	1.418	1.336	1.664	1.783	1.660	1.619	2.060

### 3 试验数据分析

#### 3.1 极差分析

极差分析法也称直观分析法，该方法直观易懂，计算量少。选用此法进行分析计算，计算结果见表 6。

表 6 极差分析结果

组别	$K_{1j}$	$K_{2j}$	$K_{3j}$	$n$	$k_{1j}$	$k_{2j}$	$k_{3j}$	极差 $R$
A	3.711	4.783	5.339	3	1.237	1.594	1.78	0.543
B	3.979	4.593	5.261	3	1.326	1.531	1.754	0.428
C	4.385	4.706	4.742	3	1.462	1.569	1.581	0.119
D	4.708	4.752	4.372	3	1.569	1.584	1.457	0.127

注： $K_{1j}$ ：表 4 中的第  $j$  列数码 1 对应组的试验数据之和； $K_{2j}$ ：表 4 中的第  $j$  列数码 2 对应组的试验数据之和； $K_{3j}$ ：表 4 中的第  $j$  列数码 3 对应组的试验数据之和。 $k_{ij} = K_{ij}/n$  ( $i=1, 2, 3; j=A, B, C, D; n=3$ )。

从表 6 可以看出：在确定的试验因素及水平条件下，水泥掺量的极差最大，粉煤灰掺量的极差次之，再其次为含水率，极差最小的为聚丙烯纤维掺量。这表明水泥掺量对水泥石试块的抗压强度影响作用最大，粉煤灰掺量次之，其次为含水率，最后为聚丙烯纤维掺量。其中含水率和聚丙烯纤维掺量的极差特别小，说明在本次试验所取的范围内，含水率和聚丙烯纤维的掺量对水泥石抗压强度的影响较小，即影响作用大小顺序为： $A$ （水泥掺量） $>B$ （粉煤灰掺量） $>D$ （含水率） $>C$ （聚丙烯纤维掺量）。

由表 6 可以看出，在  $A$  列中， $k_{3A} > k_{2A} > k_{1A}$ ，表明因子 A 所选的 3 个水平中，10%掺量的水泥石强度最高，8%掺量的水泥石强度次之，6%掺量的水泥石强度最低。同样，可以得到其他 3 个因素的所选水平优劣排列（由大到小），如表 7 所示。

表 7 各因子水平优劣排列（由大到小）

因子编号	A	B	C	D
水平排列	10%、8%、6% (3、2、1)	16%、12%、8% (3、2、1)	0.12%、0.10%、0.08% (3、2、1)	18%、16%、20% (2、1、3)

由表 7 可知，在所选各个影响因素的水平当中，能使水泥石 7 d 抗压强度值最高的各因子水平为： $A_3$ 、 $B_3$ 、 $C_3$ 、 $D_2$ ，其组合为  $A_3B_3C_3D_2$ ，即为本次试验所研究的 7 d 养护龄期的复掺水泥石粉煤灰聚丙烯纤维红黏土强度最高的最优工程条件。但是这个组合在正交试验中并没有出现过，在此也证明了正交试验的一个优点，即通过少数试验就能够找出最优结果。

#### 3.2 方差分析

为了将各因素对试验结果的影响大小给予精确的数量估计，来考察因素所起作用的显著性，用方差分析来进行补充估计。参照《试验设计与数据处理》<sup>[8]</sup>，经方差分析所得的计算结果如表 8 所示。

表 8 方差分析结果

方差来源	$Q_i$	$f_i$	$S_i^2$	$F_i$ 值	$F_{\alpha}$ (临界值)	显著水平
A	1.370	2	0.685	13.881	$F_{0.01}(2, 18) = 6.01$	**
B	0.823	2	0.411	8.334	$F_{0.05}(2, 18) = 3.55$	**
C	0.077	2	0.038	0.780	$F_{0.10}(2, 18) = 2.62$	—
D	0.086	2	0.043	0.875	—	—
误差 e	0.888	18	0.049	—	—	—
总和	3.245	26	—	—	—	—

注： $Q_i$  为偏差平方和； $f_i$  为自由度； $S_i^2$  为均方； $F_i = S_i^2 / S_{\text{误差}}^2$  ( $i=A, B, C, D, e$ )，显著程度通常分为 3 级：①  $F > F_{0.01}$ ，特别显著，记为“\*\*\*”；②  $F_{0.01} \geq F > F_{0.05}$ ，为显著，记为“\*\*”；③  $F_{0.05} \geq F > F_{0.10}$ ，为有一定影响，记为“\*”。

由表 8 的方差分析结果可以明确看到，水泥掺量和粉煤灰掺量的显著性水平为特别显著，聚丙烯纤维掺量和含水量的显著性则较小。方差分析的结论和极差分析的结论达成一致，证明

此分析得出的无侧限抗压强度试验结论是正确的,即在本次试验范围内,对于水泥土试块抗压能力产生的影响,起主要作用的是水泥掺量,其次为粉煤灰掺量,聚丙烯纤维掺量和含水率的影响则特别微弱,其中含水率的影响作用要稍微强于纤维含量的影响作用,即水泥掺量的显著性 > 粉煤灰掺量的显著性 > 含水率的显著性 > 聚丙烯纤维掺量的显著性。从表 8 还可以看出,水泥掺量、粉煤灰掺量对水泥土试块抗压强度的影响比随机误差的影响大,而聚丙烯纤维的掺量和含水率的影响则不如误差的影响作用大。可见在本次试验所取各因素水平范围内聚丙烯纤维掺量和含水率的影响作用甚微。

### 3.3 各因素对水泥土早期强度的影响

图 1 为正交试验中各因素对水泥土早期抗压强度的影响。

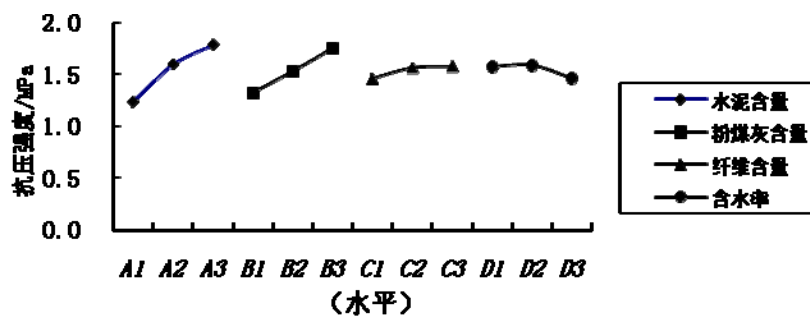


图1 各水平与平均强度关系

从图 1 中可以清楚地看出,在本次试验条件下,水泥和粉煤灰对水泥土试块的无侧限抗压强度的影响基本呈线性增长,主要是因为水泥是胶凝材料,而水泥土的强度主要来源于水泥胶凝材料的水化反应,粉煤灰的掺入一方面能够促进水泥水化反应,另一方面粉煤灰的微集料效应,填充了水泥土内部的空隙,使水泥土密实度增加,强度提高。随着纤维掺量的增加,水泥土的抗压强度增长幅度先快后慢,这是由于在水泥土中加入一定量的聚丙烯纤维后,聚丙烯纤维会均匀地分散在水泥土试块内部,随着水泥土试块的固结硬化,纤维起到加筋作用。但是随着纤维掺量的增加,纤维在水泥土中越密集,在一定程度上阻断了水泥与粉煤灰的水化反应作用;随着含水率的增加,试块的抗压强度先增加后降低,说明该掺量的水泥土最优含水率大约为 18%。

### 3.4 微观形貌分析

宏观体现微观,微观决定宏观。本次正交试验测得的水泥土抗压强度结果为:第 9 组强度最高,第 1 组强度最低,因此这 2 组为代表性最强的组。为了进一步探索试验中最优组与最差组出现的原因,从这 2 组压碎的碎块中分别挑选 1 小块有代表性的水泥土碎块用 QUANTA FEG 650 场发射环境扫描电子显微镜进行扫描,扫描出的图片见图 2。有关资料表明,在一定范围内水泥土的强度随着纤维掺量的增加而提高<sup>[9]</sup>,纤维的固结加筋作用能够抵消水泥土的破坏力,从图 2 (a) 与图 2 (c) 对比情况来看,第 9 组水泥土中的纤维要明显多于第 1 组,这也正是第 9 组水泥土强度高于第 1 组的原因之一。一般来说,7 d 的水泥土水化不完全,生成物较少,不能够很好地填充水泥土的空隙及孔隙<sup>[10]</sup>,但是第 9 组的水泥与粉煤灰含量要多于第 1 组,这样第 9 组的水泥水化反应物与粉煤灰形成的填充效应要强于第 1 组,正如图 2 (d) 也即第 9 组所示的浆体,要比图 2 (b) 所示的第 1 组的层理结构分布合理,这也正是第 9 组水泥土抗压强度高于第 1 组的另一个原因。

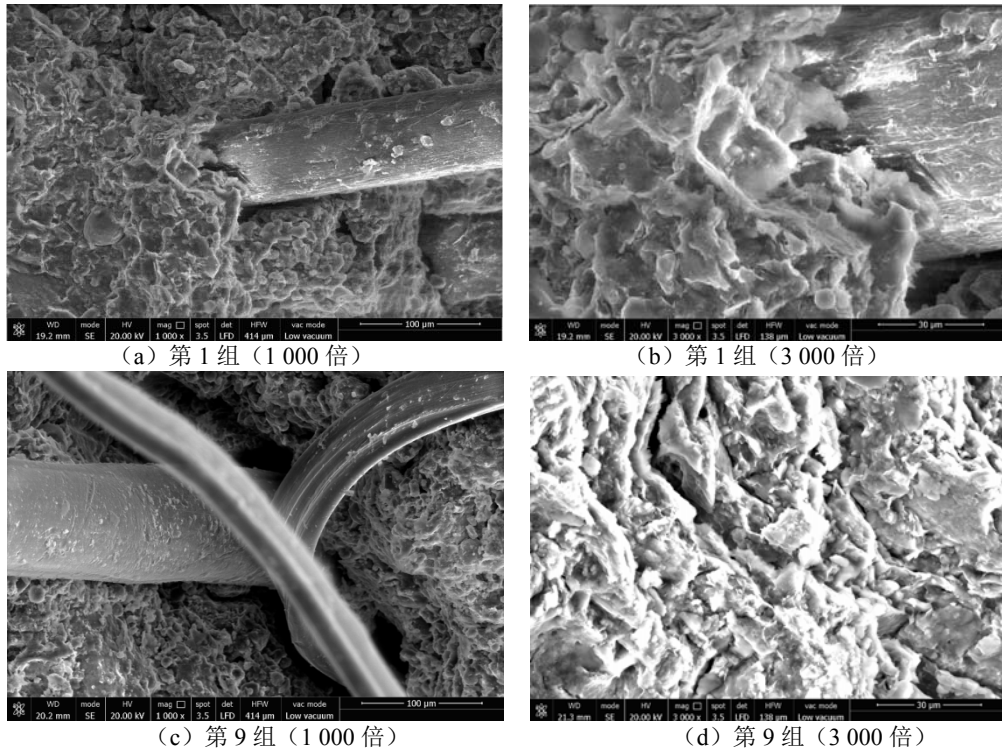


图2 7d最差组（第1组）与最优组（第9组）电镜照片

### 3.5 应力应变分析

现将试验抗压强度最高的第9组和最次的第1组进行应力应变分析，所得的应力应变关系曲线如图3所示。

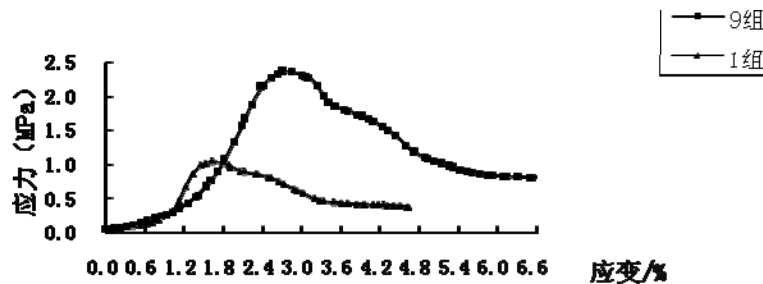


图3 应力应变曲线

应力应变曲线能够很好地反映材料在外力作用下抵抗变形和破坏的能力。从图3可以看出，两条曲线的走势大体相同，不同的是，第9组要比第1组的轮廓线以某个比例扩大些，表现为更高更宽。水泥土应力应变关系曲线可以分为4个阶段<sup>[11]</sup>。

第1阶段：受压初始阶段。当应变较小时，应力应变曲线较平缓，产生这种现象的原因是试验刚开始试块上下两端不是特别平整，试块还没有被压实，开始即为压实阶段。

第2阶段：应力上升阶段。第9组的曲线斜率要缓于第1组的曲线斜率。也就是说第9组抵抗压力变形的能力要比第1组的强。第9组试块的应力峰值约为第1组试块的应力峰值的2.4倍，即第9组试块所能承担的力要比第1组的大。

第3阶段：应力衰减阶段。当应力达到峰值后，水泥土开始软化，表现为应力应变曲线迅速下降。

第4阶段：残余强度阶段。试件产生了较大的塑性变形，应力应变曲线趋于平缓。

为更好地研究水泥红黏土的力学性能，建立应力应变关系曲线模型<sup>[12]</sup>，这对于研究复合水泥粉煤灰聚丙烯纤维红黏土具有重要的意义。第9组试块的抗压强度要高于第1组的，基于此，对最优组第9组无侧限抗压的应力应变关系曲线进行拟合，拟合曲线见图。

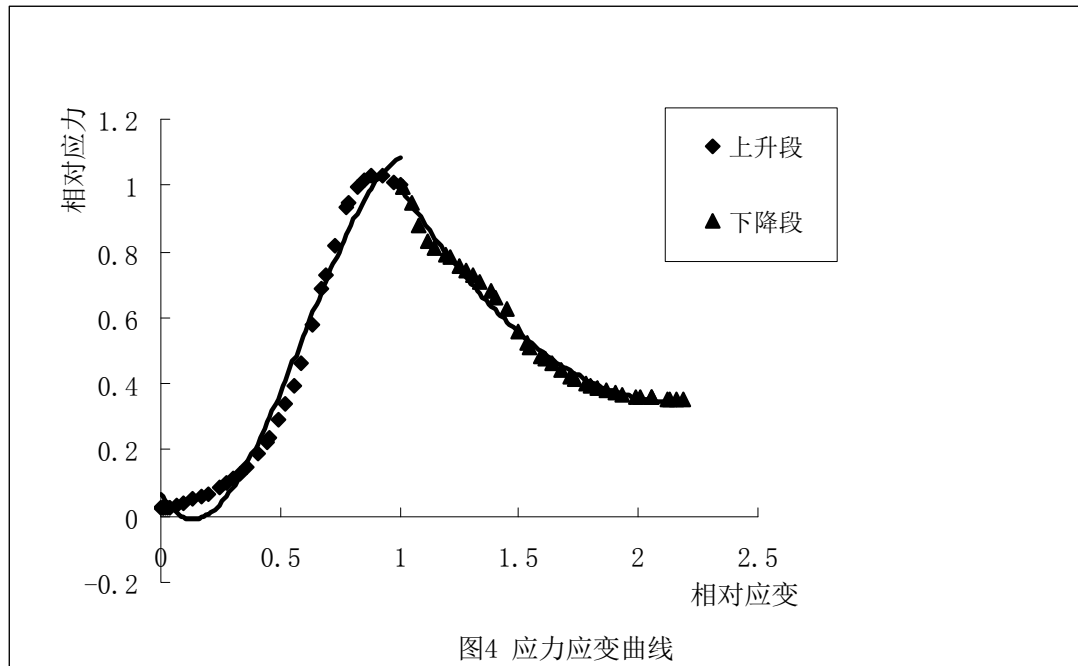


图4 应力应变曲线

将应力应变的量纲化为<sup>[13]</sup>

$$y = \sigma/\sigma_p, \quad x = \epsilon/\epsilon_p \quad (1)$$

式中： $\sigma_p$  为峰值应力， $\epsilon_p$  为峰值应力对应的应变。经拟合后得到的曲线上升段满足三次多项式方程，下降段的满足二次多项式方程：

$$y = \begin{cases} ax^3 + bx^2 + cx + d & (0 \leq x \leq 1) \\ ex^2 + fx + g & (x > 1) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  为上升段曲线参数， $e$ 、 $f$ 、 $g$  为下降段曲线参数。 $a=-2.7991$ ， $b=5.0089$ ， $c=-1.1955$ ， $d=0.0684$ ， $e=0.499$ ， $f=-2.1395$ ， $g=2.6401$ ，是满足复掺 10%水泥，16%粉煤灰，0.10%纤维，含水率为 16%的水泥土应力应变曲线方程的参数。两个拟合曲线相关系数分别为  $R^2=0.9818$ ， $R^2=0.9897$ ，曲线拟合相对准确。

## 4 结 论

1) 在研究的影响复合低掺量水泥红黏土无侧限抗压强度 4 个影响因素的特定水平内，水泥掺量对无侧限抗压强度的影响最大，其次是粉煤灰掺量，聚丙烯纤维掺量和含水率的影响则较小。

2) 方差分析中， $F$  值越大说明该因素水平改变对试验误差造成的影响越大，纤维含量和含水率的  $F$  值特别小，说明在试验所取范围内这 2 个因素的水平之间无显著差异，水泥掺量与粉煤灰掺量的  $F > F_{0.01}$ ，说明本试验所取的范围内，水泥掺量与粉煤灰掺量的水平变化对试块的无侧限抗压强度影响较大，显著性水平为特别显著。

3) 通过场发射环境扫描电子显微镜，观察到纤维的固结加筋作用与浆体的合理层理结构，是第 9 组水泥土试块强度高于第 1 组水泥土试块的原因。

4) 试验组中的抗压强度最高的第 9 组：复掺 10%水泥，16%粉煤灰，0.10%纤维，含水率为 16%的水泥土的应力应变方程由上升段和下降段构成，其中上升段满足三次多项式方程，下降段满足二次多项式方程。

## [参考文献] (References)

- [1] 陆元鹏, 申向东. 硫酸钠溶液对纤维水泥土耐久性能的影响[J]. 中国科技论文, 2014, 9(5): 555-559.  
LU Yuanpeng, SHEN Xiangdong. The durable influence of Sodium sulfate solution to fiber cement-soil [J]. China Sciencepaper, 2014, 9(5): 555-559. (in Chinese)
- [2] 许贤敏, 路凡. 水泥土的性能及其在国外的应用[J]. 公路, 2005 (5):117-124.  
XU Xianmin, LU Fan. Properties and application of cement soil abroad [J]. Highway, 2005(5): 117-124. (in Chinese)
- [3] 周丽萍, 申向东. 水泥土力学性能的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(2): 359-365.

- ZHOU Liping, SHEN Xiangdong. Study on mechanical behaviors of soil cement [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2009, 28(2): 359-365. (in Chinese)
- [4] 宁宝宽, 陈四利, 刘斌. 水泥土的环境侵蚀效应与破裂过程分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1778-1782.
- NING Baokuan, CHEN Sili, LIU Bin. Fracturing behaviors of cemented soil under environmental erosion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1778-1782. (in Chinese)
- [5] 李云峰, 李志国, 郑刚. 纤维水泥土力学性能试验研究[J]. 建筑科学, 2004, 20(6): 56-60.
- LI Yunfeng, LI Zhiguo, ZHENG Gang. A study for properties of cement-soil reinforced with randomly distributed discrete [J]. Building Science, 2004, 20(6): 56-60. (in Chinese)
- [6] 林起奋, 陈峰. 粉煤灰水泥土的力学特性和固化机理研究综述[J]. 福建建材, 2014(7): 17-19.
- LIN Qifen, CHEN Feng. Summary of mechanical properties of soil and fly ash cement curing mechanism [J]. Fujian Building Materials, 2014(7): 17-19. (in Chinese)
- [7] GB/T 50123—1999. 土工试验方法标准[S].
- GB/T 50123—1999. Standard for soil test method [S]. (in Chinese)
- [8] 田胜元, 萧曰嵘. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988: 72-75, 146-170.
- TIAN Shengyuan, XIAO Rirong. Experimental Design and Data Processing [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1988: 72-75, 146-170. (in Chinese)
- [9] 曹雅娴, 申向东, 庞文台. 聚丙烯纤维硅粉水泥土力学性质试验研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(2): 118-120.
- CAO Yaxian, SHEN Xiangdong, PANG Wentai. Experimental study on mechanical properties of polypropylene fiber silica fume soil-cement [J]. Yellow River, 2012, 34(2): 118-120. (in Chinese)
- [10] 庞文台, 申向东. 复合水泥土抗渗性能的实验研究[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(6): 1617-1620.
- PANG Wentai, SHEN Xiangdong. Study on impervious performance of cement-soil [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(6): 1617-1620. (in Chinese)
- [11] 周丽萍. 寒区复合水泥加固土的力学性质及损伤特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- ZHOU Liping. The Damage Characteristics and the Mechanical Properties of Reinforced Composite Cement Soil in Cold Areas [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [12] 周敏锋, 张克绪. 一种水泥土非线性应力-应变关系研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(10): 1400-1402.
- ZHOU Minfeng, ZHANG Kexu. Study on a non-linear stress-strain relationship of cemented soils [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(10): 1400-1402. (in Chinese)
- [13] 段安, 钱稼茹. 冻融环境下约束混凝土应力-应变全曲线试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 3015-3022.
- DUAN An, QIAN Jiuru. Stress-strain relationship of stirrup-confined concrete subjected to freeze-thaw cycles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 3015-3022. (in Chinese)