

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.01.006

纤维与粉煤灰改良粉土的正交试验分析

张笑峰,张艳美,刘锦程,刘 笑

(中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要:黄河三角洲地区粉土、粉砂分布广泛,为了使其满足作为路基填土等实际工程的要求,消除不良工程特性而需要对其进行改良。掺入适量的粉煤灰、石灰可以提高粉土的抗剪强度,但同时也会增加土的脆性。因此在改良土中掺入纤维来进一步提高其抗剪强度并改善其脆性。采用正交试验设计,选取了具有典型代表意义的九组试样进行三轴压缩试验、直接剪切试验与固结试验,分析了不同粉煤灰、石灰掺量,纤维掺量与纤维长度对改良土的抗剪强度与压缩性等工程特性的影响。获得了各项指标的粉煤灰与石灰掺量、纤维掺量与纤维长度的最佳配合比参考值。采用线性多元回归方法,建立了改良土力学指标与多种影响因素的经验公式,为黄河三角洲地区粉土的改良提供了可以借鉴的数据与经验。

关键词:粉土;粉煤灰;聚丙烯纤维;正交试验

中图分类号:

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)01—0036—05

Orthogonal Test Analysis of Improved Silt with Fiber and Fly Ash

ZHANG Xiaofeng, ZHANG Yanmei, LIU Jincheng, LIU Xiao

(College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract: Silt, silty sand is widely distributed in Yellow River Delta. In order to meet the requirements of the actual project such as roadbed fill and eliminate undesirable engineering characteristics, it is necessary to improve silt's engineering characteristics. The appropriate amount of fly ash and lime can improve the shear strength of silt, but also increase the soil brittleness. So that the fiber is incorporated into the improved soil to further improve its shear strength and improve its brittleness. Orthogonal experimental design was used, nine groups of specimens with typical representative significance were selected to conduct triaxial compression tests, direct shear tests and consolidation tests. The effects of different fly ash, lime content, fiber content and fiber length on the shear strength and compressibility of the improved soil were analyzed. The best reference ratio of fly ash and lime content, fiber content and fiber length of various indicators was obtained. The empirical formula of improved soil mechanics index and various influencing factors was established by linear multiple regression method, which provides reference data and experience for the improvement of silt in Yellow River Delta.

Keywords: silt; fly ash; polypropylene fiber; orthogonal test

粉土属于第四系全新统地层(Q4),冲洪积成因,在黄河三角洲地区广泛分布。粉土作为高速铁路路基填料,具有结构性差、稳定性差、压缩性高、力学强度低、在地震载荷作用下易发生液化等特点,在使用时具有极大的安全隐患^[1]。路基作为轨道结构的基础,承受着本身土体的自重和路面结构的重量,同时还承受着由路面传递下来的行车荷载,因此路

基必须具有强度高、刚度大、稳定性和耐久性好等特性,且能抵抗各种自然因素的影响,并在正常使用条件下将轨道的设计参数保持在标准要求的范围之内^[2]。环渤海城际铁路南段(黄骅 威海段)途经地处黄河三角洲中心位置的东营市,沿线多粉土、粉砂等铁路路基 C、D 组填料,需对其进行改良。崔金平^[3]采用水泥及砂砾对强风化千糜岩粉土路堤进行

收稿日期:2018-04-24

修稿日期:2018-06-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51208510);山东省研究生教育创新计划项目(SDY15140)

作者简介:张笑峰(1993—),男,山东潍坊人,硕士研究生,研究方向为岩土工程。E-mail:15764220322@163.com

改良试验,发现其 CBR 值得到很大程度的提高。李振霞等^[4]测试了石灰粉煤灰对低液限粉土的无侧限抗压强度、劈裂强度与抗压回弹模量等指标的影响。赵宪民等^[5]发现泥岩能够提高粉土的防渗性能。尽管上述改良剂能够有效地改良填土的很多不良工程性质,但它同时也增加了土的脆性^[6-7],使其强度在破坏时迅速降低。而纤维的掺入不但能够提高土体强度,还能增强改良土的塑性^[8-11]。

上述研究只针对一种或几种改良剂对土不良工程特性的改良效果进行了探讨,证实了粉煤灰、石灰、纤维等对土进行改良的可行性。但没有具体给出多种影响因素作用下的最佳配比组合,也没有分析针对某一影响因素对某种工程特性的影响规律与显著性大小。为此,本文利用正交试验的优点,选取具有典型代表意义的 9 组试件,研究粉煤灰与石灰掺量,纤维掺量,纤维长度对粉土的强度与压缩性的改良作用,针对改良土的黏聚力、内摩擦角、压缩系数等工程指标,分别找到了对应的最优纤维-粉煤灰配合比,并分析了各因素的作用规律。

1 试验材料及方案

本次试验所用粉土取自东营市东营家园(北区)施工现场。其主要物理力学性质见表 1。根据《土的工程分类标准》^[12](GB/T 50145—2007),判断试验用土为低液限粉土。改良土所用纤维为聚丙烯纤维,其主要物理力学性质见表 2。所用粉煤灰来自燃煤电厂的工业废渣,烧失量小于 20%。石灰选用一般工程用灰,有效 CaO 与 MgO 含量为 70%,为三类钙质石灰。

表 1 试验用土的基本物理性质指标

液限 /%	塑限 /%	塑性指数	最大干密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最优含水率 /%	天然含水率 /%
28.0	22.7	5.3	1.58	16.5	12.44

表 2 试验用纤维的基本物理性质指标

纤维类型	直径 / μm	密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	抗拉强度 /MPa	杨氏模量 /GPa	抗酸性	安全性
束状单丝	31	0.91	≥ 400	≥ 3.5	极高	无毒材料

1.2 试验方案

本文采用正交试验设计,参考前人^[13-16]的研究,选取粉煤灰与石灰掺量(两者配比固定于 3:1)、纤维掺量、纤维长度三个因素,每个因素设计三个水平,制作因素-水平表(见表 3)。采用正交表 $L_9(3^4)$

形式,不考虑因素间的交互作用,并将第二列设置为空列以考虑误差的影响,具体试验方案如表 4 所示。

表 3 试验因素与水平

水平	粉煤灰掺量 + 石灰掺量 /%	纤维掺量 /%	纤维长度 /cm
1	9+3	0.2	3
2	24+8	0.3	5
3	33+11	0.4	10

表 4 正交试验方案

试验号	A (粉煤灰掺量 + 石灰掺量) /%	空列	B (纤维掺量) /%	C (纤维长度) /cm	试验方案
1	1(9+3)	1	1(0.2)	1(3)	A1B1C1
2	1(9+3)	2	2(0.3)	2(5)	A1B2C2
3	1(9+3)	3	3(0.4)	3(10)	A1B3C3
4	2(24+8)	1	2(0.3)	3(10)	A2B2C3
5	2(24+8)	2	3(0.4)	1(3)	A2B3C1
6	2(24+8)	3	1(0.2)	2(5)	A2B1C2
7	3(33+11)	1	3(0.4)	2(5)	A3B3C2
8	3(33+11)	2	1(0.2)	3(10)	A3B1C3
9	3(33+11)	3	2(0.3)	1(3)	A3B2C1

1.3 试验方法

将粉土烘干、碾碎、过 2 mm 筛除去杂质后备用,根据改良土正交试验方案精确称取所用干土、粉煤灰、石灰、纤维和水后混合搅拌均匀并焖料 24 h。按照《土工试验方法标准》^[17](GB/T 50123—1999)对 9 种试验方案分别进行不固结不排水三轴压缩试验、直接剪切试验和固结试验。其中三轴压缩试验试样直径为 61.8 mm,高度 125 mm;直接剪切试验试样直径 61.8 mm,高度 20 mm;固结试验试样直径 79.8 mm,高度 20 mm。试样制作完成后,用塑料薄膜密封并在标准条件(温度 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$,湿度 $\geq 95\%$)下进行养护 7 d。试验指标为三轴压缩试验与直接剪切试验测得的黏聚力与内摩擦角和固结试验测得的压缩系数。

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

正交试验常用分析方法有两种:极差分析法(直观分析法)和方差分析法。可以此分清各因素对试验指标作用大小的顺序,判断因素对试验指标影响的显著程度,并得到试验因素的最优水平和试验范围内的最优组合。为确保计算精确,用 MATLAB 软件编辑程序进行计算^[18]。改良土 7 d 三轴压缩试

验、直接剪切试验和固结试验结果见表 5。

表 5 正交试验结果

试验号	黏聚力/kPa		内摩擦角/(°)		压缩系数/MPa ⁻¹
	三轴压缩试验	直接剪切试验	三轴压缩试验	直接剪切试验	
1	97.4	16.1	21.1	37.1	0.165
2	135.5	20.3	20.9	37.1	0.149
3	172.4	42.7	25.4	36.1	0.138
4	212.3	70.9	42.5	40.3	0.164
5	332.5	63.6	33.6	39.5	0.089
6	256.9	47.4	44.4	43.9	0.170
7	329.0	99.7	39.5	43.4	0.120
8	258.8	66.9	42.8	42.9	0.153
9	224.8	110.9	40.7	42.1	0.141

2.2 极差分析

对改良土三轴压缩试验、直接剪切试验和固结试验测得的黏聚力、内摩擦角和压缩系数结果进行处理,得到正交试验各指标极差,见表 6。每一试验指标在各因素作用下的平均值趋势见图 1—图 3。

表 6 正交试验极差表

因素	黏聚力极差/kPa		内摩擦角极差/(°)		压缩系数极差/MPa ⁻¹
	三轴试验	直剪试验	三轴试验	直剪试验	
因素 A	135.8	66.2	18.5	6.0	0.0127
空列	29.4	16.7	4.4	0.8	0.0193
因素 B	87.1	25.2	3.3	1.6	0.0470
因素 C	26.0	7.7	5.1	1.9	0.0200

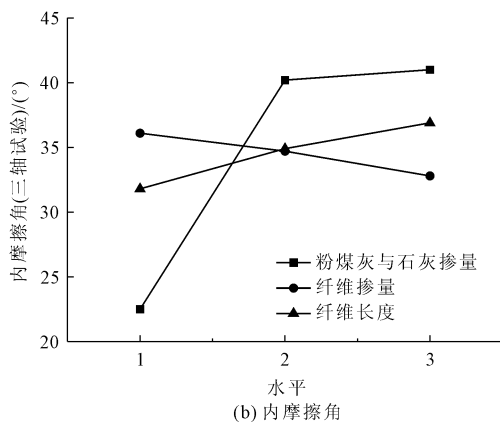
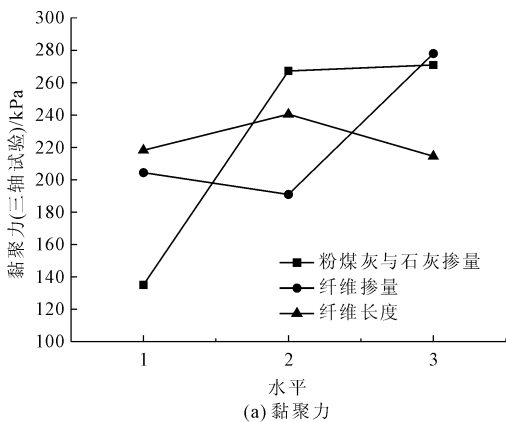


图 1 三个因素与三轴试验指标的关系

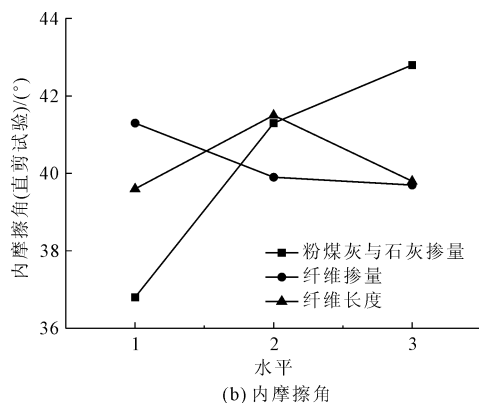
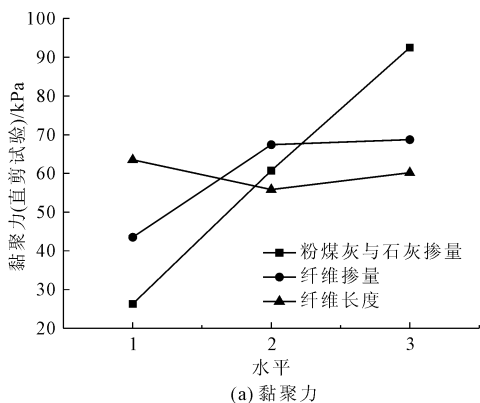


图 2 三个因素与直剪试验指标的关系

表 6 中,极差越大,表明该试验因素对试验指标的影响越大,作用越显著。由表 6 可以看出,无论是三轴试验还是直剪试验,粉煤灰与石灰掺量对改良土黏聚力影响最大,纤维掺量的影响次之,而纤维长度的极差值都小于空列极差值,说明在试验水平取值范围内,其影响可以忽略;对于改良土的内摩擦角,两种试验都表明粉煤灰与石灰掺量对其影响最大,而纤维长度、纤维掺量对其影响较小;对抗剪强

度指标的影响与前人使用其他纤维(玻璃纤维、玄武岩纤维)的成果相近^[15-16]。对于改良土的压缩系数,纤维掺量对其影响最大,其余两种因素的影响都可以考虑在误差范围内。

由图 1(a)、图 2(a)可看出,在三个因素影响下,三轴试验与直剪试验测得的改良土黏聚力指标最优配比分别为 A3B3C2, A3B3C1。两种试验都表明粉煤灰与石灰掺量为 44%(两者之和)、纤维掺量为

0.4%时改良土黏聚力最大;对于改良土的内摩擦角,图 1(b)、图 2(b)表明两种试验所测得最优配比分别为 A3B1C3,A3B1C2,其中主要影响因素粉煤灰与石灰掺量越多,内摩擦角越大,而纤维对应曲线波动较小,说明其作用不明显;对于压缩系数,由图 3 可知最优配比为 A1B1C3,其中纤维掺量越多,压缩系数越小,说明纤维掺量在一定范围内的增加可以使粉土具有不易被压缩的性质。

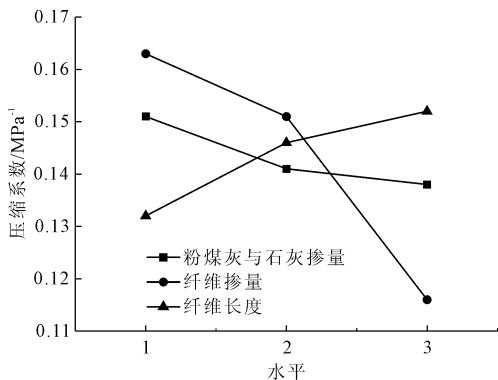


图 3 三个因素与压缩系数的关系

2.3 方差分析

正交试验设计的极差分析简单直观、计算量小,但不能估计误差的大小,不能精确地判断各因素对试验指标影响的显著性程度。为了弥补极差分析的

不足,对试验结果进行方差分析。改良土三轴压缩试验、直接剪切试验与固结试验的试验结果 F 值见表 7 所示。

在 F 检验中, α 值越小,说明根据相应的 F 值作出判断时,犯错误的可能性越小,可信度越高。在表 7 中,对于三轴试验得出的黏聚力这一指标,因素 A 的 F 值 = 27.0111 > $F_{0.01} = 18$,说明粉煤灰与石灰掺量这一因素水平的改变对黏聚力有非常显著影响的可信度为 99%。显著性水平 α 可取值有 0.01、0.05、0.10 等,其中,当某一因素的 F 值 > $F_{0.01}$ 时,认为此因素水平的变化对其试验指标有非常显著的影响;当 $F_{0.05} < F$ 值 < $F_{0.01}$ 时,认为此因素有显著影响;当 $F_{0.1} < F$ 值 < $F_{0.05}$ 时,认为此因素有一定影响;其他情况下认为该因素对其指标无显著影响。特别地,当某一因素的均方差小于对应指标空列均方差的两倍时,将其与其空列一起归入误差中,自由度也加到误差自由度中,组成新的误差项。

由表 7 可知,三轴试验和直剪试验都表明粉煤灰与石灰掺量对改良土黏聚力有显著影响,纤维掺量对其也有一定影响;粉煤灰与石灰掺量同样对内摩擦角有重要影响,而纤维对其影响很小,基本都被归入误差项;压缩系数主要受纤维掺量的影响。方差分析结论基本与极差分析一致。

表 7 不同指标下各因素 F 值

试验指标	各因素 F 值				F 临界值	
	A	B	C	空列	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
黏聚力(三轴试验)	27.0111	9.9195	0.8896	1.1104	6.9443	18.0000
内摩擦角(三轴试验)	23.4673	0.5735	1.4054	1.0211	5.1433	10.9248
黏聚力(直剪试验)	24.4920	4.4944	0.3358	1.6642	6.9443	18.0000
内摩擦角(直剪试验)	54.8801	4.6070	6.0874	1.0000	19.0000	99.0000
压缩系数	0.4768	6.5470	1.1673	1.3559	5.1433	10.9248

3 线性回归分析

利用 MATLAB 编程进行多元线性回归分析,假设改良土各项指标与粉煤灰石灰掺量(两者之和)、纤维掺量以及纤维长度之间存在着线性关系,因此线性回归模型为:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \epsilon \quad (1)$$

式中: y 为改良土各项指标(y_1 为三轴试验所测黏聚力、 y_2 为三轴试验所测内摩擦角、 y_3 为直剪试验所测黏聚力、 y_4 为直剪试验所测内摩擦角、 y_5 为压缩系数); $\beta(i = 0,1,2,3)$ 为回归系数; x_1 为粉煤灰与石灰掺量(两者之和); x_2 为纤维掺量; x_3 为纤维长

度; ϵ 为试验误差。

将表 5 的试验数据代入回归模型(1)中,得到关于 β 的最小二乘估计,回归方程分别为:

$$y_1 = -8.9516 + 4.4839x_1 + 368x_2 - 1.4295x_3 \quad (2)$$

$$y_2 = 17.5555 + 0.6104x_1 - 16.3333x_2 + 0.6641x_3 \quad (3)$$

$$y_3 = -36.2082 + 2.0306x_1 + 126x_2 - 0.2205x_3 \quad (4)$$

$$y_4 = 37.3358 + 0.1921x_1 + 8.1667x_2 - 0.0423x_3 \quad (5)$$

$$y_5 = 0.2105 - 0.0004x_1 - 0.2350x_2 + 0.0025x_3 \quad (6)$$

各指标试验数据 9 组,变量数目为 4,所以自由

度为 $9 - 4 = 5$, 当置信度为 1% 查表得相关系数为 0.8745, 而各项指标相关系数依次为: 0.8771, 0.9245, 0.9425, 0.9324, 0.8786, 都大于 0.8745, 因此, 线性回归方程是有意义的。回归方程的方差见表 8, 各试验指标的 F 值均大于 $F_{0.05}(3, 5) = 5.41$, 可见回归方程是显著的。

表 8 回归方程方差

试验指标	方差来源	偏差平方和	方差	F 值
黏聚力(三轴试验)	回归	39810.0000	13270.0000	5.5576
内摩擦角(三轴试验)	回归	634.5800	211.5300	9.8032
黏聚力(直剪试验)	回归	7421.8000	2473.9000	13.9680
内摩擦角(直剪试验)	回归	61.9990	20.6660	11.0860
压缩系数	回归	0.0041	0.0014	5.6398

4 结 论

(1) 极差、方差分析表明: 粉煤灰与石灰掺量对改良土的黏聚力与内摩擦角都有显著影响, 纤维掺量对改良土黏聚力也有重要影响, 但纤维掺量和长度对内摩擦角无显著影响。纤维掺量是影响改良土压缩系数的主要因素。

(2) 三种试验的趋势图表明: 黏聚力指标的最优配合比分别为 A3B3C2, A3B3C1; 内摩擦角指标的最优配合比分别为 A3B1C3, A3B1C2; 压缩系数指标的最优配合比为 A1B1C3。在实际工程中, 可根据工程实际需要, 合理选择各项因素配比。

(3) 改良土的各项力学指标与粉煤灰与石灰掺量、纤维掺量、纤维长度之间存在着良好的线性相关关系, 可以通过多元线性回归的方法对改良土的各项力学指标进行预测。

参考文献:

[1] 曹 玉, 滕伟福. 高速铁路粉土路基改良试验研究及分析[J]. 岩土工程界, 2004, 7(3): 71-72.

- [2] 陈 燕, 魏宏超, 徐 鹏. 高速铁路粉土路基改良试验研究[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(3): 126-128.
- [3] 崔金平. 强风化千糜岩粉土改良的 CBR 试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(4): 80-84.
- [4] 李振霞, 王选仓, 薛 晖. 石灰粉煤灰加固低液限粉土性能研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(2): 40-44.
- [5] 赵宪民, 刘金禹, 刘惹梅. 泥岩掺量对筑坝粉土渗透性影响的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(6): 139-140.
- [6] Sabry M A, Abdel - Ghani Kh I, El Nahas A M. Strength characteristics of soil-lime columns sections [C]//Yonekura R, et al. Grouting and Deep Mixing. Proc of Second International Conference on Ground Improvement Geosy-stems, Tokyo, Balkema, 1996: 447 - 452.
- [7] 蔡 奕, 施 斌, 刘志彬, 等. 团聚体大小对填筑土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1482-1486.
- [8] 蔡 奕, 施 斌, 高 玮, 等. 纤维石灰土工程性质的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1283-1287.
- [9] 杨博瀚, 翁兴中, 刘军忠, 等. 改性聚丙烯纤维和水泥加固黄土的力学性能[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(4): 694-701.
- [10] 李其轩, 李洪磊, 郭树学, 等. 纤维增强水泥土力学性能试验研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(4): 262-266.
- [11] Ghavami K, Toledo Filho R D, Barbosa N P. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres[J]. Cement and Concrete Composites, 1999, 21(1): 39-48.
- [12] 土的工程分类标准: GB/T 50145—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [13] 沈圆顺, 刘玖壮, 郭丽丽. 纤维土作为路用材料的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(4): 545-549.
- [14] 杨广庆, 管振祥. 高速铁路路基改良填料的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 682-685.
- [15] 王剑焯, 彭丽云. 玄武岩纤维加固粉土性能试验研究[J]. 北京建筑大学学报, 2015, 31(3): 33-38.
- [16] 宋金岩, 孙 红, 葛修润, 等. 玻璃纤维加固土强度特征试验研究[J]. 中外公路, 2012, 32(5): 261-264.
- [17] 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [18] 王 岩, 隋思涟. 试验设计与 MATLAB 数据分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.