

DOI: 10.11779/CJGE2022S1009

基于正交设计的风化砂岩流态固化土抗剪强度试验研究

朱彦鹏^{1, 2, 3}, 王浩^{*1, 2, 3}, 刘东瑞^{1, 2, 3}, 吕玉宝^{1, 2, 3}, 张志琦^{1, 2, 3}

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

3. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为保护生态环境、降低工程造价, 将开挖出的风化砂岩进行破碎后, 掺入一定比例的黄土、膨润土、水泥和泵送剂进行固化改良作为流态填筑材料。以兰州某基坑回填工程为依托, 通过正交设计, 对不同配比的流态固化土进行快速剪切试验, 分析抗剪强度的影响因素及其显著性大小, 并给出抗剪强度的回归方程。试验表明: 对内摩擦角和黏聚力影响最为显著的因素分别是泵送剂和膨润土。各因素对内摩擦角影响大小排序为: 泵送剂→水泥→风化砂岩细骨料→黄土→膨润土→风化砂岩粗骨料; 对黏聚力影响大小排序为: 膨润土→风化砂岩粗骨料→泵送剂→黄土→风化砂岩细骨料→水泥。根据各配比的试验结果, 建立预测流态固化土内摩擦角和黏聚力的回归方程。研究结果对评价风化砂岩作为流态填筑材料具有一定的参考价值。

关键词: 风化砂岩; 正交试验; 流态固化土; 抗剪强度; 回归分析

中图分类号: TU471.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S1-0046-06

作者简介: 朱彦鹏(1960—), 男, 甘肃庆阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事支挡结构、地基处理和工程事故分析与处理等方面的研究与教学工作。E-mail: zhuyup1@163.com。

Experimental study on shear strength of fluid-solidified soil of weathered sandstone based on orthogonal design

ZHU Yan-peng^{1, 2, 3}, WANG Hao^{1, 2, 3}, LIU Dong-rui^{1, 2, 3}, LÜ Yu-bao^{1, 2, 3}, ZHANG Zhi-qi^{1, 2, 3}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and

Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou 730050, China; 3. Western Engineering Research Center of Disaster

Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to protect the ecological environment and reduce the project cost, the excavated weathered sandstone is crushed and mixed with a certain proportion of loess, bentonite, cement and pumping agent for solidification and improvement as the fluid-filling materials. Based on the backfill project of a foundation pit in Lanzhou, through orthogonal design, the rapid shear tests on the fluid-solidified soil with different proportions are carried out. The influence factors and significance of shear strength are analyzed, and the regression equation for the shear strength is given. The tests show that the most significant factors affecting the internal friction angle and cohesion are the pumping agent and the bentonite respectively. The order of influence of each factor on the internal friction angle can be arranged as follows: pumping agent→cement→fine aggregate of weathered sandstone→loess→bentonite→coarse aggregate of weathered sandstone. The order of influence on the cohesion can be arranged as follows: bentonite→coarse aggregate of weathered sandstone→pumping agent→loess→fine aggregate of weathered sandstone→cement. According to the test results of various proportions, the regression equation for predicting the internal friction angle and the cohesion of the fluid-solidified soil is established. The research results have certain reference value for evaluating the weathered sandstone as the fluid-filling materials.

Key words: weathered sandstone; orthogonal test; fluid-solidified soil; shear strength; regression analysis

0 引言

风化砂岩在中国分布较广, 考虑到天然砂石资源的有限, 就地取材是必然的^[1]。但其胶结性能弱, 遇水易软化, 故将风化砂岩作为流态填筑材料则需要添加适量的改良剂^[2]。国内许多学者对其工程性质和作

为固态回填材料进行了相关的研究^[3-8], 但在风化砂岩

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978321); 国家重点研发计划项目(2019YFD1101004); 教育部长江学者和创新团队支持计划项目(IRT_17R51)

收稿日期: 2022-09-23

***通信作者** (E-mail: 1799848207@qq.com)

流态填筑材料方面却研究甚少。

抗剪强度是评价土体性能的重要指标之一。甘文宁等^[9]将红砂岩经人工破碎后, 研究其细粒土的抗剪强度特性, 发现压实度和含水率对黏聚力的影响比内摩擦角更显著; 张岩等^[10]借助三轴剪切试验, 得出近代海相沉积软土的围压对原状土的影响大于重塑土; 喻泽红等^[11]通过考虑不同压实度作用下红砂岩的变形特征和抗剪强度, 结果表明: 在一定范围内风化后的红砂岩峰值强度随压实度的增加而上升; 李国维等^[12]研究表明崩解性砂岩的岩屑粒径与改良土的抗剪强度指标正相关; 祝艳波等^[13]采用石灰、粉煤灰和水泥对风化物泥岩进行固化改良, 研究了风化物泥岩固化土的改良机制及其工程性质, 最终得出水泥掺比 5% 的改良效果最佳; 朱彦鹏等^[14]开展了压实土在不同干密度和含水率影响下的抗剪强度试验研究, 分析得出抗剪强度在土体性状改变前与改变后的影响因素; 张豫川等^[15]通过考虑长龄期作用条件下粉煤灰和石灰对黄土的改良效果, 综合各影响因素得到固化土抗剪强度的影响规律; 陈国庆等^[16]对不同含水率的红砂岩进行剪切蠕变试验, 得到冻融循环及含水率变化对红砂岩蠕变特性的影响机制。

目前, 在实际工程应用中, 关于改良剂对风化砂岩流态填筑材料抗剪强度影响的研究甚少, 故探讨其强度特性及影响因素具有重要的理论意义。本文以西北地区广泛分布的黄土为主要改良剂, 借助多指标正交试验, 定量分析在不同黄土、膨润土、水泥配比和不同泵送剂掺量下对风化砂岩流态固化土试样抗剪强度的变化规律, 建立各因素与抗剪强度之间的回归方程, 并将回归方程的预测值与实测值进行比对, 验证方程的精确性。

1 流态固化土抗剪强度试验

1.1 试验材料

试验采用的风化砂岩取自兰州某基坑。试验材料还有过筛干净素黄土、纳基膨润土、P·O42.5普通硅酸盐水泥和缓凝型泵送剂。试验材料的基本物理、化学性质指标见表1~4。

表 1 试验材料基本物理力学性质指标

Table 1 Basic physical and mechanical properties of test materials

土体类型	干密度 /(g·cm ⁻³)	G _s	孔隙比 e ₀	黏聚力 /kPa	内摩擦角/(°)
黄土	1.71	2.17	1.15	47.2	24.9
风化砂岩	1.83	2.60	1.42	23.1	32.35

表 2 水泥的化学成分

Table 2 Chemical compositions of cement

组成	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	烧失量
质量含量/%	80.71	3.66	3.26	5.44	5.36

表 3 膨润土的基本性质指标

Table 3 Basic properties of bentonite

材料名称	蒙脱石含量/%	表观黏度	膨胀倍数	密度 /(g·cm ⁻³)	硬度
膨润土	98	500	35	2.60	5

表 4 泵送剂性能指标

Table 4 Performance indexes of pumping agent

类型	含固量/%	含气量/%	密度 /(g·cm ⁻³)	塌落度增加值/mm	抗压强度比/MPa
缓凝型	36.5	5.0	1.08	80	85

1.2 正交试验设计

本试验选取风化砂岩粗骨料、风化砂岩细骨料、黄土、膨润土、水泥、泵送剂 6 种因素, 依次用 A, B, C, D, E, F 表示, 每种因素分为 5 个水平, 采用正交设计来安排试验, 以内摩擦角和黏聚力作为评价指标。试验采用 L₂₅ (5⁶) 正交表, 因素水平如表 5 所示。

表 5 正交试验因素水平表

Table 5 Factors and levels of orthogonal tests (%)

水平	因素					
	A	B	C	D	E	F
1	80	10	20	2	1	0.2
2	75	15	25	4	3	0.4
3	70	20	30	6	5	0.6
4	65	25	35	8	7	0.8
5	60	30	40	10	10	1.0

1.3 试验方案及试验参数选取

将风化砂岩经人工破碎并过筛, 粒径在 2~5 mm 为粗骨料, 粒径在 2 mm 以下为细骨料, 添加不同掺量的改良剂, 养护 28 d 后进行剪切试验。按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[17]对环刀试样分别施加 100, 200, 300, 400 kPa 的垂直压力, 剪切速率为 0.8 mm/min, 剪坏后计算出每组试样的内摩擦角和黏聚力, 试样放置如图 1 所示。

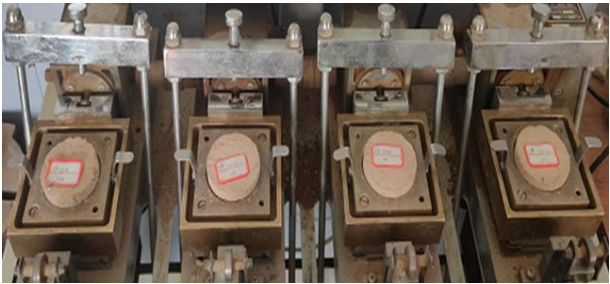


图 1 试样放置图

Fig. 1 Diagram of sample placement

2 试验数据处理与分析

对试验数据进行极差分析, 进而确定 6 种因素对试验指标影响的显著性及其对不同指标的影响规律, 分析结果如表 6 所示。

表 6 正交试验数据表

Table 6 Data of orthogonal tests

编号	A	B	C	D	E	F	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
1	A ₅	B ₁	C ₅	D ₄	E ₃	F ₄	38.36	77.8
2	A ₃	B ₄	C ₅	D ₂	E ₄	F ₁	36.58	29.8
3	A ₄	B ₅	C ₅	D ₃	E ₁	F ₅	34.37	68.4
4	A ₁	B ₄	C ₃	D ₃	E ₃	F ₂	41.31	62.7
5	A ₂	B ₃	C ₅	D ₁	E ₂	F ₂	26.49	9.6
6	A ₅	B ₄	C ₂	D ₁	E ₅	F ₅	28.87	101.4
7	A ₅	B ₅	C ₁	D ₅	E ₄	F ₂	43.27	87.3
8	A ₅	B ₃	C ₃	D ₂	E ₁	F ₃	38.28	74.6
9	A ₂	B ₅	C ₃	D ₄	E ₅	F ₁	37.32	69.9
10	A ₃	B ₅	C ₄	D ₁	E ₃	F ₃	52.62	25.3
11	A ₁	B ₂	C ₅	D ₅	E ₅	F ₃	44.91	109.8
12	A ₁	B ₃	C ₄	D ₄	E ₄	F ₅	42.86	78.2
13	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁	E ₁	F ₁	15.23	31.9
14	A ₂	B ₄	C ₄	D ₅	E ₁	F ₄	41.06	79.1
15	A ₅	B ₂	C ₄	D ₃	E ₂	F ₁	28.46	46.6
16	A ₄	B ₃	C ₂	D ₅	E ₃	F ₁	39.85	32.1
17	A ₂	B ₂	C ₁	D ₂	E ₃	F ₅	31.67	25.3
18	A ₃	B ₂	C ₂	D ₄	E ₁	F ₂	40.43	31.2
19	A ₂	B ₁	C ₂	D ₃	E ₄	F ₃	43.76	49.4
20	A ₁	B ₅	C ₂	D ₂	E ₂	F ₄	37.44	88.3
21	A ₃	B ₁	C ₃	D ₅	E ₂	F ₅	32.92	86.8
22	A ₄	B ₄	C ₁	D ₄	E ₂	F ₃	44.88	30.1
23	A ₃	B ₃	C ₁	D ₃	E ₅	F ₄	31.23	41.8
24	A ₄	B ₂	C ₃	D ₁	E ₄	F ₄	46.03	31.2
25	A ₄	B ₁	C ₄	D ₂	E ₅	F ₂	36.25	45.1

表7, 8为评价指标的极差分析表, 其中: K_i ($i=1, 2, \dots$) 表示某个因素第 i 个水平的试验结果之和, $\bar{K}_i$ 表示其均值; R 为极差。从表7可知, 影响内摩擦角的主次顺序为: 泵送剂→水泥→风化砂岩细骨料→黄土→膨润土→风化砂岩粗骨料; 从表8可以看出, 影响黏聚力的主次顺序为: 膨润土→风化砂岩粗骨料→泵送剂→黄土→风化砂岩细骨料→水泥。

表 7 内摩擦角极差分析结果

Table 7 Results of range analysis of internal friction angle

K_1 值	因素					
	A	B	C	D	E	F
K_1	181.750	166.520	166.280	169.240	169.370	157.440
K_2	180.300	191.500	190.350	180.220	170.190	187.750
K_3	193.780	178.710	195.860	179.130	203.810	224.450
K_4	201.380	192.700	201.250	203.850	212.500	194.120
K_5	177.240	205.020	180.710	202.010	178.580	170.690
$\bar{K}_1$	36.350	33.304	33.256	33.848	33.874	31.488
$\bar{K}_2$	36.060	38.300	38.070	36.044	34.038	37.550
$\bar{K}_3$	38.756	35.742	39.172	35.826	40.762	44.890
$\bar{K}_4$	40.276	38.540	40.250	40.770	42.500	38.824
$\bar{K}_5$	35.448	41.004	36.142	40.402	35.716	34.138
R	24.140	38.500	34.970	34.610	43.130	67.010

表 8 黏聚力极差分析结果

Table 8 Results of range analysis of cohesion

K_1 值	因素					
	A	B	C	D	E	F
K_1	370.90	291.00	216.40	199.40	285.20	210.30
K_2	233.30	244.10	302.40	263.10	261.40	235.90
K_3	214.90	236.30	325.20	268.90	223.20	289.20
K_4	206.90	303.10	274.30	287.20	275.90	318.20
K_5	387.70	339.20	295.40	395.10	268.00	325.80
$\bar{K}_1$	74.18	58.20	43.28	39.88	57.04	42.06
$\bar{K}_2$	46.66	48.82	60.48	52.62	52.28	47.18
$\bar{K}_3$	42.98	47.26	65.04	53.78	44.64	57.84
$\bar{K}_4$	41.38	60.62	29.86	57.44	55.18	63.64
$\bar{K}_5$	77.54	67.84	54.86	79.02	73.60	65.16
R	180.80	102.90	108.80	195.70	62.00	115.50

根据 25 组试验数据描绘出各个因素对评价指标的趋势情况:

(1) 各因素与内摩擦角的关系如图 2 所示。

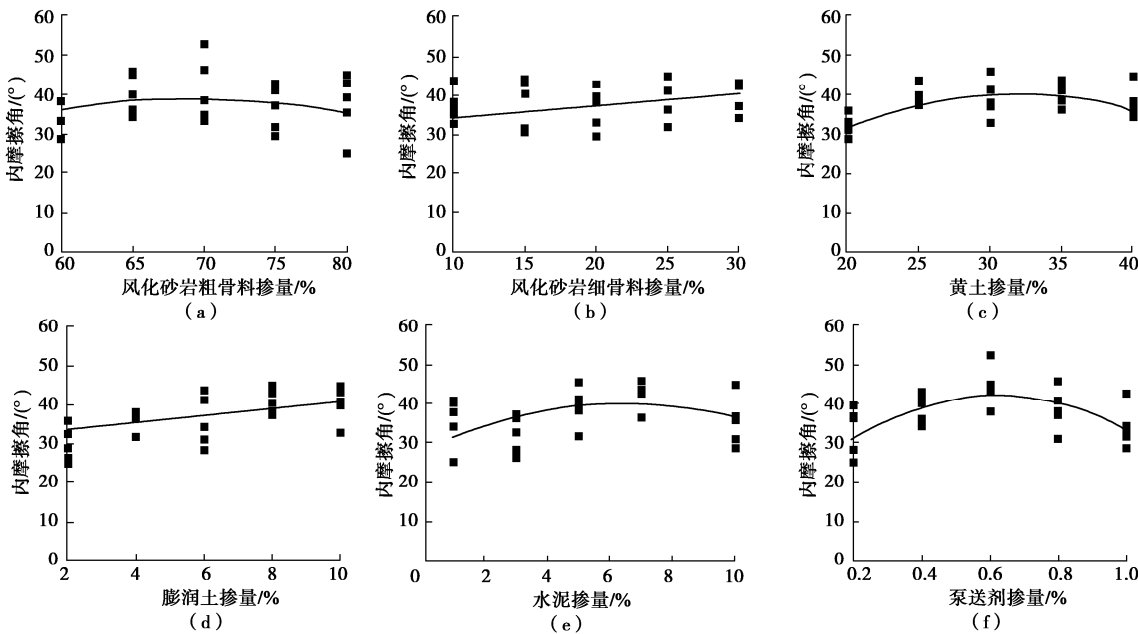


图 2 各因素与内摩擦角关系图

Fig. 2 Relationship between various factors and internal friction angle

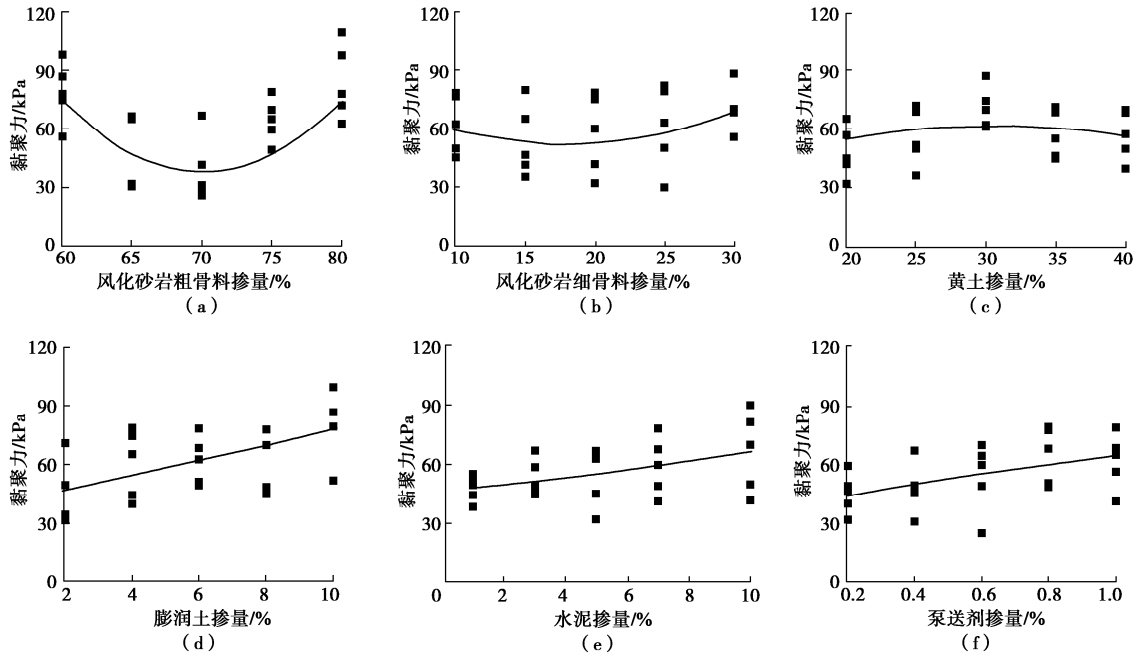


图 3 各因素与黏聚力关系图

Fig. 3 Relationship between various factors and cohesion

从图 2 (b), (d) 中可以看出流态固化土的内摩擦角随风化砂岩细骨料和膨润土掺量的增加而增大, 且在一定范围内均呈现出良好的正相关性, 其原因是流态固化土在掺入风化砂岩细骨料和膨润土后, 其颗粒级配、密度、孔隙比、矿物成分等性质有所提高, 土颗粒间的咬合约束作用增强, 故内摩擦角随掺量的增加而增大。另外, 从图 2 (a), (c), (e), (f) 中分析得出, 流态固化土的内摩擦角随着风化砂岩粗骨料、黄土、水泥和泵送剂掺量的增多均呈现出先增大后减小的趋势, 其中泵送剂掺量的改变对内摩擦角的影响最大。这是因为流态固化土中掺入泵送剂后, 流动性能得到很大的改善, 流动性的改变引起滑动摩擦变化幅度较大, 因此流态固化土的内摩擦角对泵送剂掺量的敏感程度较高。

(2) 各个因素与黏聚力的关系如图 3 所示。

从图 3 (a), (b), (c) 分析得出, 流态固化土的黏聚力随风化砂岩掺量的增多呈现出先减小后增大的趋势, 而随黄土掺量的增多却出现先增大后减小的现象, 其中风化砂岩粗骨料掺量的改变对黏聚力的影响较大, 这是由于风化砂岩粗骨料的颗粒矿物粒径比较大, 相比颗粒粒径较小的风化砂岩细骨料和黄土而言, 其掺量的改变对颗粒间的胶结性能、库仑力(静电力)、范德华力、毛细力、表观黏附力等影响更为明显; 从图 3 (d), (e), (f) 可以看出流态固化土的黏聚力随膨润土、水泥和泵送剂掺量的增大而增大, 且在一定范围内呈现出良好的正相关性, 其中膨润土掺量的增加对黏聚力影响最大, 这是因为膨润土有发育良好

的微孔结构、较好的阳离子交换性、吸附力强等特点, 可以与土颗粒孔隙中的水发生反应产生离子交换作用和胶凝体, 使得土体表面更加粗糙或在膨润土表面能够产生更多的“触角”, 进而达到土颗粒间黏结作用增强的效果。因此, 膨润土对风化砂岩流态固化土黏聚力的影响最为显著。

3 回归模型的建立与验证

3.1 建立回归模型

为了更好地预测风化砂岩流态固化土的抗剪强度, 特建立回归方程, 为工程上的应用设计提供参考。设风化砂岩流态固化土内摩擦角与风化砂岩粗骨料掺量、风化砂岩细骨料掺量、黄土掺量、膨润土掺量、水泥掺量和泵送剂掺量的回归模型为: $Y_1 = a_1 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6 + b_7x_1^2 + b_8x_2^2 + b_9x_3^2 + b_{10}x_4^2 + b_{11}x_5^2 + b_{12}x_6^2$; 黏聚力的回归模型为: $Y_2 = a_2 + b_{13}x_1 + b_{14}x_2 + b_{15}x_3 + b_{16}x_4 + b_{17}x_5 + b_{18}x_6 + b_{19}x_1^2 + b_{20}x_2^2 + b_{21}x_3^2 + b_{22}x_4^2 + b_{23}x_5^2 + b_{24}x_6^2$ 。其中: Y_1 为内摩擦角; Y_2 为黏聚力; x_1 表示风化砂岩粗骨料掺量(%); x_2 表示风化砂岩细骨料掺量(%); x_3 表示黄土掺量(%); x_4 表示膨润土掺量(%); x_5 表示水泥掺量(%); x_6 表示泵送剂掺量(%); $a_1, a_2, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}, b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{15}, b_{16}, b_{17}, b_{18}, b_{19}, b_{20}, b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{24}$ 为回归系数。根据分析表 (6) 得到以下回归方程:

(1) 内摩擦角回归方程

$$Y_1 = -32.767 + 0.029x_1 - 0.629x_2 + 3.028x_3 +$$

$$2.369x_4 + 2.651x_5 + 64.606x_6 - 7.2 \times 10^{-4}x_1^2 + 0.023x_2^2 - 0.052x_3^2 - 0.117x_4^2 - 0.188x_5^2 - 52.682x_6^2。 (1)$$

内摩擦角对应的可信度 R 临界值为 0.438, 其回归方程的相关系数 R_1 为 0.971, 满足条件, 式 (1) 回归方程有效。

(2) 黏聚力回归方程

$$Y_2 = 2050.165 - 60.801x_1 - 6.443x_2 + 9.925x_3 + 0.11x_4 - 8.483x_5 + 63.097x_6 + 0.431x_1^2 + 0.171x_2^2 - 0.16x_3^2 + 0.367x_4^2 + 0.837x_5^2 - 17.214x_6^2, \quad (2)$$

黏聚力对应的可信度 R 临界值为 0.383, 其回归方程的相关系数 R_2 为 0.897, 故式 (2) 的回归方程也是有效可靠的。

3.2 验证回归模型

为进一步检验式 (1) 和式 (2) 的准确性, 将回归方程的预测值与实测值进行比较。结果如图 4, 5 所示, 大部分预测值基本上接近实测值, 其平均误差为 11%, 这对于岩土材料来说是非常准确的。

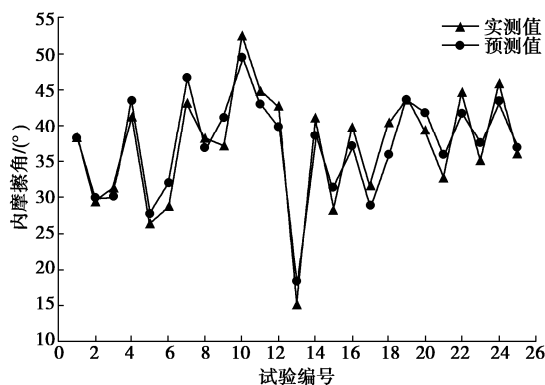


图 4 内摩擦角实测值与预测值关系图

Fig. 4 Relationship between measured value and predicted value of internal friction angle

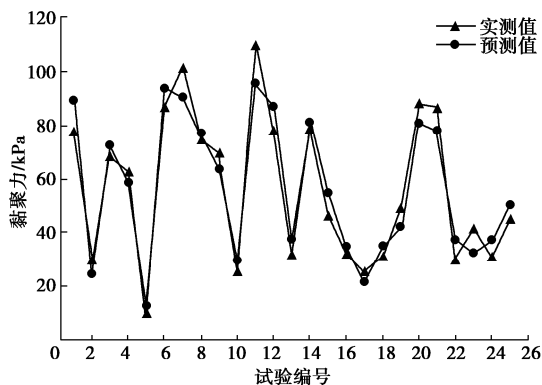


图 5 黏聚力实测值与预测值关系图

Fig. 5 Relationship between measured and predicted values of cohesion

4 结 论

采用正交设计通过直剪试验研究了风化砂岩粗骨料、风化砂岩细骨料、黄土、膨润土、水泥以及泵送

剂对风化砂岩流态固化土抗剪强度的影响, 得到如下初步结论:

(1) 通过直剪试验得到了风化砂岩粗骨料掺量、风化砂岩细骨料掺量、黄土掺量、膨润土掺量、水泥掺量和泵送剂掺量对黏聚力和内摩擦角影响显著性大小及其影响次序。膨润土掺量对黏聚力的影响最为显著; 泵送剂掺量对内摩擦角有明显影响, 水泥掺量次之。

(2) 流态固化土的黏聚力随风化砂岩掺量的增多呈现出先减小后增大的趋势, 而黄土掺量却刚好与之相反; 内摩擦角随风化砂岩细骨料掺量和膨润土掺量的增加而增大, 且在一定范围内呈现良好的正相关性。

(3) 提出了预测风化砂岩流态固化土内摩擦角和黏聚力的回归方程, 并将实测值与计算值进行了对比, 公式的精确性得以验证。

参考文献:

- [1] 赵明华, 邓颢宇, 曹文贵. 红砂岩崩解特性及其路堤填筑技术研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(3): 1 - 5. (ZHAO Ming-hua, DENG Jin-yu, CAO Wen-gui. Study of the disintegration character of red sandstone and the construction techniques of red sandstone embankment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(3): 1 - 5. (in Chinese))
- [2] 朱彦鹏, 马 滔, 杨校辉, 等. 基于正交设计的红砂岩改良土抗剪强度试验和回归分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊 1): 87 - 92. (ZHU Yan-peng, MA Tao, YANG Xiao-hui, et al. Shear strength tests and regression analysis of red sandstone-improved soils based on orthogonal design[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S1): 87 - 92. (in Chinese))
- [3] 赵明华, 刘晓明, 苏永华. 含崩解软岩红层材料路用工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 667 - 671. (ZHAO Ming-hua, LIU Xiao-ming, SU Yong-hua. Experimental studies on engineering properties of red bed material containing slaking rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6): 667 - 671. (in Chinese))
- [4] 张渭军, 王永胜, 马 滔. 基于正交设计的红层软岩改良土压缩模量试验研究[J]. 地震工程学报, 2022, 44(2): 264 - 269. (ZHANG Wei-jun, WANG Yong-sheng, MA Tao. Experimental study on the compression modulus of red-bed soft rock improved soil based on orthogonal design[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(2): 264 - 269. (in Chinese))
- [5] 钟秀梅, 王 谦, 刘钊钊, 等. 干湿循环作用下粉煤灰改良

- 黄土路基的动强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(增刊 1): 95 - 99. (ZHONG Xiu-mei, WANG Qian, LIU Zhao-zhao, et al. Dynamic strength of fly ash-modified loess subgrade under influences of drying-wetting cycle[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(S1): 95 - 99. (in Chinese))
- [6] 黄 瑞, 张孝斌, 朱彦鹏, 等. 红砂岩浮力折减系数研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2022, **20**(2): 15 - 21, 26. (HUANG Rui, ZHANG Xiao-bin, ZHU Yan-peng, et al. Experimental research on red sandstone buoyancy reduction coefficient[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2022, **20**(2): 15 - 21, 26. (in Chinese))
- [7] 王浩宇, 许金余, 王 鹏, 等. 水-动力耦合作用下红砂岩力学性质及能量机制研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(10): 2861 - 2868, 2876. (WANG Hao-yu, XU Jin-yu, WANG Peng, et al. Mechanical properties and energy mechanism of red sandstone under hydro-dynamic coupling effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(10): 2861 - 2868, 2876. (in Chinese))
- [8] 王章琼, 高 云, 沈 雷, 等. 石灰改性红砂岩残积土工程性质试验研究[J]. 工程地质学报, 2018, **26**(2): 416 - 421. (WANG Zhang-qiong, GAO Yun, SHEN Lei, et al. Engineering properties of lime-modified red sandstone residual soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, **26**(2): 416 - 421. (in Chinese))
- [9] 甘文宁, 朱大勇, 吴迎雷, 等. 红砂岩细粒土抗剪强度的试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, **46**(增刊 2): 70 - 75. (GAN Wen-ning, ZHU Da-yong, WU Ying-lei, et al. Experimental study on shear strength of red sandstone fine-grained soils[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, **46**(S2): 70 - 75. (in Chinese))
- [10] 张 岩, 耿济世, 毛 磊, 等. 珠江三角洲海相沉积软土压缩和剪切变形特性试验研究[J]. 地震工程学报, 2018, **40**(4): 745 - 751. (ZHANG Yan, GENG Ji-shi, MAO Lei, et al. Compression and shear deformation properties of marine soft soil deposits in the Pearl River Delta[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, **40**(4): 745 - 751. (in Chinese))
- [11] 喻泽红, 魏红卫, 邹银生. 加筋红砂岩风化土强度和变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(15): 2770 - 2779. (YU Ze-hong, WEI Hong-wei, ZOU Yin-sheng. Characteristics of shear strength and deformation of reinforced red sand silty clay with geosynthetics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(15): 2770 - 2779. (in Chinese))
- [12] 李国维, 王佳奕, 陈 伟, 等. 干湿循环对不同粒径组崩解性砂岩改良膨胀土的影响[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(4): 643 - 651. (LI Guo-wei, WANG Jia-yi, CHEN Wei, et al. Influences of wetting-drying cycles on expansive soils improved with disintegrated sandstone with different particle size groups [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(4): 643 - 651. (in Chinese))
- [13] 祝艳波, 余宏明, 杨艳霞, 等. 红层泥岩改良土特性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(2): 425 - 432. (ZHU Yan-bo, YU Hong-ming, YANG Yan-xia, et al. Indoor experimental research on characteristics of improved red-mudstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(2): 425 - 432. (in Chinese))
- [14] 朱彦鹏, 杨校辉, 周 勇, 等. 基于含水量和干密度影响的压实土抗剪强度试验[J]. 兰州理工大学学报, 2016, **42**(6): 114 - 120. (ZHU Yan-peng, YANG Xiao-hui, ZHOU Yong, et al. Experiment of shear strength of compacted soil when effect of its moisture capacity and dry density being taken into account[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016, **42**(6): 114 - 120. (in Chinese))
- [15] 张豫川, 姚永国, 周 泓. 长龄期改良黄土抗剪强度与渗透性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(增刊 2): 170 - 176. (ZHANG Yu-chuan, YAO Yong-guo, ZHOU Hong. Experimental study of shear strength and permeability of improved loess with long age[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(S2): 170 - 176. (in Chinese))
- [16] 陈国庆, 简大华, 陈宇航, 等. 不同含水率冻融后红砂岩剪切蠕变特性[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(4): 661 - 669. (CHEN Guo-qin, JIAN Da-hua, CHEN Yu-hang, et al. Shear creep characteristics of red sandstone after freeze-thaw with different water contents[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(4): 661 - 669. (in Chinese))
- [17] 中华人民共和国. 住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))

(编校: 明经平)