

文章编号:1674-599X(2022)03-0001-10

固化改良玄武岩残积红土试验研究

唐正光¹,王成望¹,王奕博¹,华伦¹,布希濂²,梁栋²

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院,云南 昆明 650500;2. 创辉达设计股份有限公司云南分公司,云南 昆明 650000)

摘 要:为探究玄武岩残积红土的有效加固方法,采用正交试验方法,开展不同掺量的石灰、水泥、砂子、玄武岩纤维和水玻璃(粉状)等固化材料的玄武岩残积红土在浸水、标准和自然风干3种不同工况下的无侧限抗压强度和微观试验,分析不同固化剂对玄武岩残积红土强度和水稳定性的影响及作用机理。研究表明:土壤固化材料的加入,可不同程度地改善土体的强度及水稳定性。石灰、水泥和纤维等固化材料中,石灰对玄武岩残积红土的固化效果最为明显,而砂子和水玻璃产生的作用较小,甚至起到了反作用。加入石灰固化材料所生成的大量方解石(CaCO_3)是土体强度和稳定性提高的关键。

关键词:玄武岩残积红土;正交试验;固化剂;强度;稳定性

中图分类号:TU411

文献标志码:A

Experimental study on solidified and improved basalt residual laterite

TANG Zhengguang¹, WANG Chengwang¹, WANG Yibo¹, HUA Lun¹, BU Xilian², LIANG Dong²

(1. Faculty of Civil Engineering & Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Chuanghuida Design Co., Ltd., Yunnan Branch, Kunming 650000, China)

Abstract: In order to explore the effective reinforcement method for basalt residual laterite, the orthogonal test was carried out. Lime, cement, sand, basalt fiber and sodium silicate (powder) were added as curing materials. The unconfined compressive strength and microscopic tests were performed on immersion, standard and natural air drying sample, respectively. The impact of different curing agents on the strength and water stability of basalt residual laterite was analyzed. The results show that the strength and water stability of the soil can be improved by adding the soil curing materials in various degree. Among the curing materials such as lime, cement and fiber, the lime has the most obvious curing effect on the residual laterite of basalt, while sand and sodium silicate have little effect or even adverse effect. A large amount of calcite CaCO_3 will be generated adding lime curing material. Which plays the key role to improve the strength and stability of soil.

Key words: basalt residual laterite; orthogonal test; soil stabilizer; strength; stability

相关研究表明,含水率对土体性质及强度影响很大^[1-3],而加入土壤固化剂的固化土具有较好的水稳性、抗收缩性及其他力学性能^[4-6]。史保华等人^[7]选用了抗耐土壤稳定剂、水泥和石灰对土体进行改良,发现掺入固化剂后土体的水理性能、回弹模量

和无侧限抗压强度都有所提高。刘瑾等人^[8]利用STW型高分子土壤稳定剂对黏性土进行改良,发现掺入稳定剂后可以明显提高黏性土的水稳性。黄伟等人^[9]使用离子固化剂对蒙脱土进行了改良,发现离子固化剂改变了阳离子交换量及比表面积,因

收稿日期:2022-03-10

基金项目:云南省交通厅科研项目(云交科2014(A)02)

作者简介:唐正光,男(1969—),男,昆明理工大学副教授,博士。

此弱化了蒙脱土的持水能力。刘清秉等人^[10]研究了离子土固化剂对膨胀土结合水的影响规律,发现离子土固化剂通过对膨胀土矿物表面及层间的物化作用,弱化矿物部分的“水合活性中心”能量,从而抑制了膨胀土水化膨胀势。黄河等人^[11]研究了 STW 型生态土壤稳定剂对膨胀土水稳性、浸水强度等性能的影响,结果表明 STW 型生态土壤稳定剂明显提高了膨胀土的水稳性和浸水强度。现有土壤固化剂品种较多,在工程中被广泛应用,但土壤固化改良存在一个普遍问题,即:由于不同土壤的性质存在差异,土壤固化剂的适用性、有效性也存在较大的差异。针对基土的性质,选用合适的固化剂及合理配比是土壤固化改良的关键。

现场调研与查阅资料发现,玄武岩区出露的红土耐水性弱,抗水性差,对温度和湿度等环境因素非常敏感,被水浸泡后其力学强度急剧降低,崩塌变形较大,崩解严重,遇水侵蚀易发生滑坡、塌陷等现象^[12-14]。根据《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)规定^[15],液限大于 50%,塑性指数大于 26 的

细粒土,不得直接作为路堤填料。根据该要求,大多数红土只能废弃,会造成巨大的经济损失。在云南地区,公路建设常穿越玄武岩区域,沿线地质灾害也较为普遍。

目前,针对云南玄武岩残积红土的固化研究较少,因此,借鉴国内外的传统加固黏土工艺、三合土工艺等研究^[16-18],同时参照目前工程常用的土壤固化技术,采取正交试验,研究石灰、砂子、水泥、玄武岩纤维和水玻璃等固化材料在不同工况下对玄武岩残积红土强度和水稳定性的影响,以期为有效改良玄武岩残积红土提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 红土

试验所选用红土为武倘寻高速公路玄武岩残积红土边坡滑坡的土体,其基本物理性质指标见表 1。其液限 ω_L 为 69.5%,为高液限土;土的塑性指数 $I_p=20.8$, $I_p<0.73(\omega_L-20)$,其性质与红黏土的相似;测试土体 pH 值为 5.19,呈酸性。

表 1 土的基本物理指标

Table 1 Physical properties of soil

天然含水率/%	天然密度/(g·cm ⁻³)	相对密度	孔隙比	塑限/%	液限/%	塑性指数	pH 值
44.6	1.7~1.9	2.73	1.1~1.3	48.7	69.5	20.8	5.19

1.2 固化材料及作用

石灰:试验选用熟石灰 Ca(OH)₂,为气硬性无机胶凝材料,白色粉末状,是传统固化材料。

水泥:试验选用普通硅酸盐水泥 P·O42.5,为粉状水硬性无机胶凝混合材料。其主要化学成分为:氧化钙 CaO,二氧化硅 SiO₂,三氧化二铁 Fe₂O₃,三氧化二铝 Al₂O₃。该水泥为传统固化材料。

砂子:试验选用机制砂,成分为白云岩,过筛粒径小于 2.000 mm 且大于 0.075 mm,其在无机结合料中形成骨架加固土体。

玄武岩纤维:短切长度为 6 mm,抗拉强度高,利用其加筋功能达到加固土体的目的。

水玻璃:硅酸钠 Na₂O·nSiO₂,为白色粉末状固体,用作填料、黏合剂加固土体。

1.3 试验工况

选定合适的配制范围,见表 2。采用 L₂₅(5⁶)标

准正交试验表制定正交试验方案,探究各影响因素的最佳掺量,共设计 25 组试验,见表 3。每组试验均包含浸水、标准和自然风干 3 种工况。

表 2 因素水平(工况)对照

Table 2 Comparison table of factor levels (working conditions)

%					
5 个因素	水平一	水平二	水平三	水平四	水平五
石灰(A)	0.00	25.00	50.00	75.00	100.00
水泥(B)	0.00	10.00	20.00	30.00	40.00
砂子(C)	0.00	25.00	50.00	75.00	100.00
纤维(D)	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
水玻璃(E)	0.00	2.50	5.00	7.50	10.00

表3 L₂₅(5⁶)标准正交试验
Table 3 Orthogonal test table for the L₂₅(5⁶)

试验 编号	石灰	水泥	砂子	纤维	水玻璃	空列	试验 编号	石灰	水泥	砂子	纤维	水玻璃	空列
1	1	1	1	1	1	1	14	3	4	1	3	5	2
2	1	2	2	2	2	2	15	3	5	2	4	1	3
3	1	3	3	3	3	3	16	4	1	4	2	5	3
4	1	4	4	4	4	4	17	4	2	5	3	1	4
5	1	5	5	5	5	5	18	4	3	1	4	2	5
6	2	1	2	3	4	5	19	4	4	2	5	3	1
7	2	2	3	4	5	1	20	4	5	3	1	4	2
8	2	3	4	5	1	2	21	5	1	5	4	3	2
9	2	4	5	1	2	3	22	5	2	1	5	4	3
10	2	5	1	2	3	4	23	5	3	2	1	5	4
11	3	1	3	5	2	4	24	5	4	3	2	1	5
12	3	2	4	1	3	5	25	5	5	4	3	2	1
13	3	3	5	2	4	1							

将固化剂看作不含水的干料,按风干土质量的一定比例掺入固化剂,测得自然风干含水率为 ω_0 ,石灰和水泥固化剂的水灰比为0.3,砂子、纤维和水玻璃等固化剂的水灰比为0.2,红土的最佳含水率 ω 为20%。表2中百分比数值 a 表示固化剂质量与土粒质量的比值,即 $a=(\text{固化剂质量}/\text{土粒质量})\times 100\%$ 。比如25号试件,掺入的石灰水泥质量为土粒质量的40%,砂子质量为土粒质量的75.0%,纤维质量为土粒质量的0.5%,水玻璃质量为土粒质量的2.5%。

风干土制样掺固化剂质量按公式(1)确定,制样加水质量按公式(2)确定。制样时需保证土样含水均匀。

$$m_i = 0.01 \times a \times \frac{m_0}{1 + 0.01 \times \omega_0} \tag{1}$$

$$m_{w,i} = \frac{m_0}{1 + 0.01 \times \omega_0} \times a \times 0.01 \times r \tag{2}$$

$$m_{ws} = \frac{m_0}{1 + 0.01 \times \omega_0} \times (\omega - \omega_0) \tag{3}$$

$$m_w = \sum_{i=1}^5 m_{w,i} + m_{ws} \tag{4}$$

式中: m_i 为掺入固化剂的质量(i 表示第 i 个因素),g; m_0 为风干土质量,g; a 为制样时固化剂掺量,%; ω_0 为风干土含水率,%; $m_{w,i}$ 为固化剂需要配水的质量

(i 表示第 i 个因素),g; r 为水灰比; m_{ws} 为土需配水的质量,g; ω 为试样的含水率,%; m_w 为配水的质量,g。

1.4 试验方法

按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E50—2009)^[19]中的要求,试验选用红土,防止石灰、水泥结块和杂质混入,并过2 mm筛。土体在最佳含水率的情况下,通过千斤顶和反力架,将其制成50 mm(直径)×50 mm(高度)的圆柱体。千斤顶可提供压力4.1 MPa,试件压实度按90%控制。

根据正交试验设计25组试验,每组试验制作18个试件。依据规范^[19],在每组试验中,所有试件在养护箱(温度18℃,相对湿度90%)养护27 d后,将其中6个试件放置养护箱外(温度18℃,相对湿度55%)自然静置1 d,6个试件继续在养护箱(温度18℃,相对湿度90%)养护1 d,剩余6个试件浸水1 d。然后,测定这些试件的含水率、无侧限抗压强度和水稳系数。为更好地测试试件失水性能及模拟实际工程状态,增加测试自然失水状态下的含水率及无侧限抗压强度。与水稳系数对应,本试验定义了干稳系数。水稳系数为试件养护龄期最后1 d浸水的无侧限抗压强度与最后1 d养护箱养护同龄期试件的无侧限抗压强度之比;干稳系数为试件养护龄

期最后1 d自然风干的无侧限抗压强度与最后1 d 养护箱养护同龄期试件的无侧限抗压强度之比。本研究采用水稳系数、干稳系数表征试件的吸、失水状况。

2 试验结果与分析

2.1 正交试验结果

对试件的试验数据进行统计处理。在标准工况下,每组试件的28 d无侧限抗压强度平均值如图1所示,正交试验结果见表4。从图1可以看出,6~25 试验号的28 d无侧限抗压强度有了明显提高,这表明石灰对固化土的无侧限抗压强度的提升有显著影响。

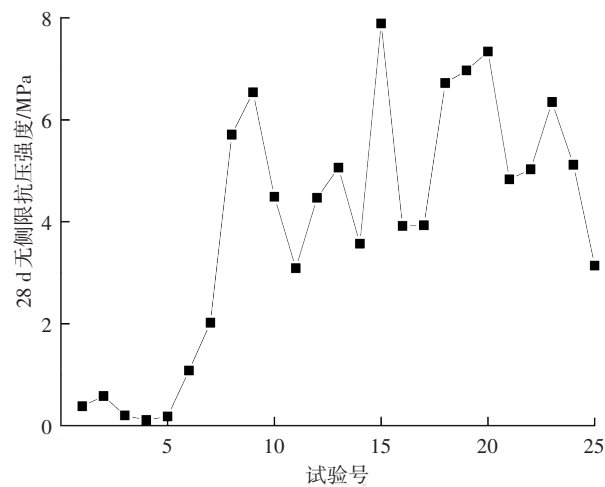


图1 标准工况下无侧限抗压强度
Fig.1 Unconfined compressive strength diagram under standard working condition

表4 正交试验结果
Table 4 The results of orthogonal test

试验号	28 d 无侧限抗压强度值/MPa			水稳系数	干稳系数	备注
	自然	标准	浸水			
1	5.93	0.38	0.27	0.71	15.61	素土
2	2.38	0.58	0.52	0.90	4.10	固化土
3	0.55	0.20	0.20	1.00	2.75	固化土
4	0.41	0.11	0.08	0.73	3.73	固化土
5	0.44	0.18	0.13	0.72	2.44	固化土
6	2.17	1.08	0.88	0.81	2.01	固化土
7	3.91	2.02	2.00	0.99	1.94	固化土
8	6.43	5.71	4.90	0.86	1.13	固化土
9	8.20	6.54	6.19	0.95	1.25	固化土
10	3.90	4.49	3.67	0.82	0.87	固化土
11	5.14	3.09	2.85	0.92	1.66	固化土
12	5.57	4.47	3.94	0.88	1.25	固化土
13	6.24	5.06	4.89	0.97	1.23	固化土
14	3.77	3.57	3.32	0.93	1.06	固化土
15	11.47	7.89	6.86	0.87	1.45	固化土
16	5.02	3.92	3.94	1.01	1.28	固化土
17	5.17	3.93	3.75	0.95	1.32	固化土
18	8.98	6.72	6.78	1.01	1.34	固化土
19	9.88	6.97	6.76	0.97	1.42	固化土
20	7.94	7.34	6.67	0.91	1.08	固化土
21	6.39	4.83	2.86	0.59	1.32	固化土
22	5.94	5.03	4.62	0.92	1.18	固化土
23	6.78	6.35	5.62	0.89	1.07	固化土
24	7.69	5.12	5.10	1.00	1.50	固化土
25	1.61	3.14	3.26	1.04	0.51	固化土

2.2 极差分析

对正交试验结果进行极差分析,其主要数据见表5。 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 、 K_5 分别为该因素(列)水平结果的均值,水平均值 K 越大表示此因素下该水平对结果的效果越好。极差 R 为该因素(列)最大与最小的水平均值的差,极差 R 越大,表明该因素对整个试验的影响越大。

由表5可知,对于自然风干后的28 d无侧限抗压强度而言,5种外掺料的极差 R 从大到小依次为 R_A 、 R_D 、 R_E 、 R_C 、 R_B ,这表明石灰对玄武岩残积红土强度的影响最为显著;A因素所对应的 K 值从大到小依次为 K_4 、 K_3 、 K_5 、 K_2 、 K_1 ,这表明在5种水平掺量中,75%(水平四)为石灰的最佳掺量。

表5 无侧限抗压强度极差分析

Table 5 The results of range analysis of unconfined compressive strength

指标	工况	因素	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	R
28 d无侧限抗压强度	自然	A	1.94	4.92	6.44	7.40	5.68	5.46
		B	4.93	4.59	5.80	5.99	5.07	1.40
		C	5.70	6.54	5.05	3.81	5.29	2.73
		D	6.88	5.05	2.65	6.23	5.57	4.23
		E	7.34	5.26	5.26	4.54	3.98	3.36
	标准	A	0.28	3.97	4.72	5.78	4.50	5.50
		B	2.22	3.19	4.81	4.41	4.61	2.59
		C	3.99	4.56	3.51	3.47	3.71	1.09
		D	5.02	3.82	2.33	3.92	4.15	2.69
		E	4.61	3.95	3.80	3.72	3.16	1.45
	浸水	A	0.25	3.53	4.47	5.58	4.69	5.33
		B	2.60	2.98	4.48	4.34	4.12	1.88
		C	3.78	4.14	3.41	3.22	3.96	0.92
		D	4.54	3.64	2.33	4.11	3.90	2.21
		E	4.18	3.98	3.88	3.43	3.05	1.13

在标准养护和浸水情况下,玄武岩残积红土的28 d无侧限抗压强度的极差 R 从大到小依次为 R_A 、 R_D 、 R_B 、 R_E 、 R_C ,这表明石灰对强度的影响最为显著。

2.3 土体固化改良影响分析

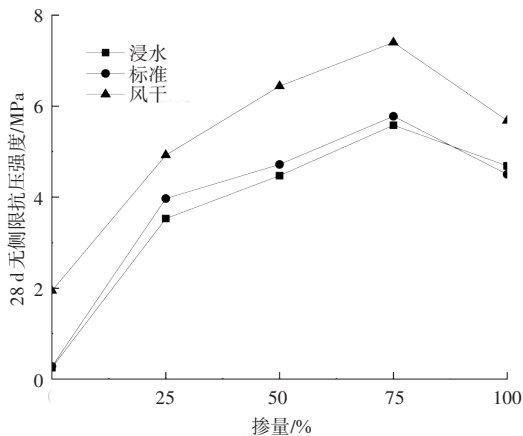
由表1可知,试验选取的玄武岩残积红土呈中强酸性,加入石灰后两者发生酸碱中和反应, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 可以电离出 OH^- ,使得混合土体呈碱性,从而提供了更适于水化物生成的碱性环境^[20]。土中硅酸盐和铝酸盐在碱的激发下解离出硅酸盐和铝酸盐单体^[21],结合 H_2O 和 Ca^{2+} ,生成CSH等无定型聚合物。水化物填充土体的内部孔隙,连接黏土颗粒,使材料形成一个整体。

从图2可以看出,掺入不同固化剂,对3种工况下的玄武岩残积红土的28 d无侧限抗压强度有不同程度的影响。其中,掺入水泥能增强玄武岩残积

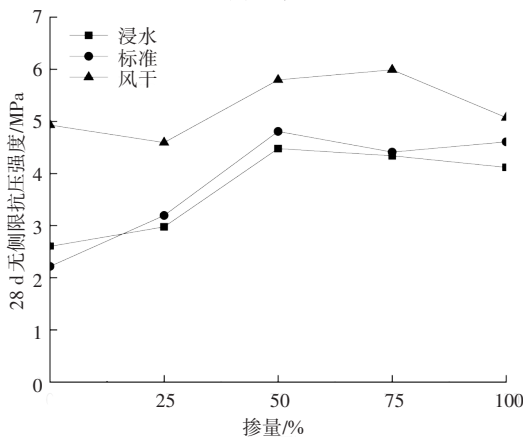
红土的28 d无侧限抗压强度,这是由于土体与水泥发生反应,生成水化物,混合土在遇水后表现稳定。掺入少量砂子时,增强了玄武岩残积红土28 d无侧限抗压强度,但效果不明显;掺入大量砂子时,反而削弱了该红土的28 d无侧限抗压强度。掺入纤维的目的是想利用其加筋作用,但因固化土胶结程度较低,纤维无法锚固,在土体中未起到加筋作用,反而削弱了土体的黏聚力,使得试件容易在含纤维的地方破损。水玻璃的加入降低了土体的抗压强度,这是由于混合土水分不足,呈松散状,水玻璃无法发挥其胶结作用。

2.4 稳定性分析

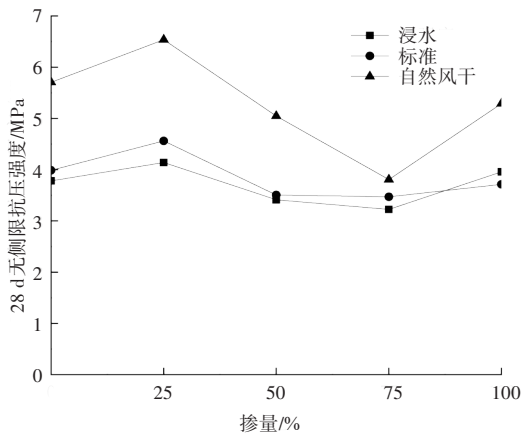
由表4可知,素玄武岩残积红土的水稳系数为0.71,干稳系数为15.61,这表明素土的水稳性能极差。加入不同的固化剂后,固化土水稳系数均有不同程度的提高,干稳系数大幅降低,改善了干缩现象。



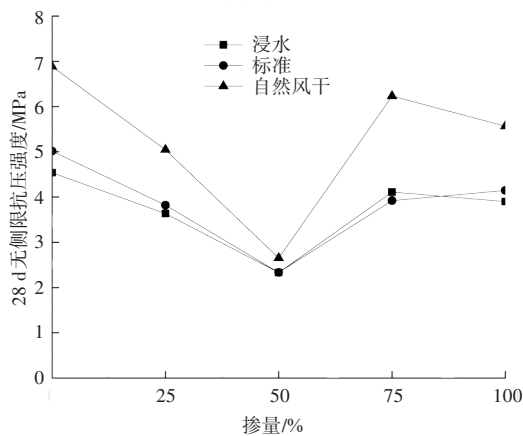
(a) 石灰



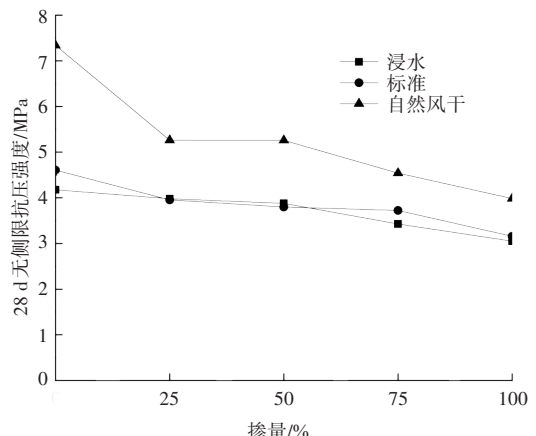
(b) 水泥



(c) 砂子



(d) 纤维



(e) 水玻璃

图2 五种因素各水平下的28 d无侧限抗压强度变化趋势

Fig.2 The 28 d unconfined compressive strength trend diagram of sample under five factors and working conditions

3 微观分析

3.1 微观元素含量分析

通过X射线荧光光谱法(X-ray fluorescence spectrometry, 简称为XRF),对正交试验中5组典型试件进行分析,选取试件分别为第1组(素土)、第4组(3种工况中强度最低)、第15组(3种工况中强度最高)、第18组(3种工况中强度较高且差距小)、第25组(石灰、水泥掺量最大),这5组试件的元素质量分数见表6。由表6可知,素玄武岩残积红土中仅含有极少量的Ca元素,含量较多的是Fe、Si、Al等元素。固化土由于加入了石灰和水泥,含量最多为Ca元素,其次是Fe、Si、Al等元素,其中,第25组试件中含有的Ca元素最多,达到总样本质量分数的33.07%。素玄武岩残积红土中含有大量的赤铁矿 Fe_2O_3 、石英 SiO_2 和铝氧化物和其他化合物,随着含钙化合物的加入,它们发生了一系列反应,生成新的物质,从而达到固化改良土体的目的。土中各元素含量的不同,不同固化剂中元素含量,以及水化反应等条件的差异性,均会影响土体固化的效果。观察发现,除素土含Ca元素极少外,第4组试件的Ca元素的质量分数为16.84%,其抗压强度较低;第15、18组试件的Ca元素的质量分数分别为25.61%、27.15%,这两组试样的强度表现均较高;第25组试件的Ca元素的质量分数为33.07%,其强度反而很低。这是石灰、水泥掺比高,而按水灰比加入的水分大部分被基土所吸收,试件较松散,导致Ca元素的水化反应不充分。

表6 土样各元素质量分数
Table 6 Mass fraction of each element in soil sample

编号	元素	各元素质量分数/%				
		第1组	第4组	第15组	第18组	第25组
1	Fe	18.14	11.44	9.58	10.32	7.13
2	Si	15.36	12.90	8.96	8.47	6.68
3	Al	13.93	9.33	7.35	7.19	5.24
4	Ca	0.04	16.84	25.61	27.15	33.07
5	Ti	5.25	3.92	3.18	3.40	2.35
6	Co	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
7	K	0.34	0.39	0.32	0.27	0.24
8	Mg	0.15	1.24	0.89	1.04	1.42
9	P	0.16	0.11	0.09	0.07	0.06
10	Zr	0.07	0.03	0.03	0.04	0.03
11	Mn	0.08	0.06	0.05	0.05	0.04
12	Cu	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01
13	Zn	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
14	Ba	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00
15	Nb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	Ni	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00
17	S	0.01	0.15	0.44	0.18	0.55
18	Cr	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02
19	Rb	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
20	Na	0.00	0.73	0.04	0.21	0.29
21	Cl	0.00	0.02	0.02	0.01	0.02
22	Pb	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00
23	Sr	0.00	0.01	0.02	0.01	0.03
24	O	41.67	39.92	39.08	38.31	36.22

3.2 试件矿物含量分析

选取正交试验中第1组(素土)、第4组(3种工况中强度最低)、第15组(3种工况中强度最高)和第25组(水泥、石灰掺量最大)试件,通过X射线衍射(X-ray diffraction, 简称为XRD)法分析素土及各固化土的矿物质成分,结果如图3~6所示。图中横坐标为X射线入射角度 θ 的两倍角,纵坐标为衍射后的强度 I 。

第1组试样含有的矿物成分为赤铁矿 Fe_2O_3 、埃洛石 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、高岭石 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 、石英 SiO_2 。

第4组试件中含有埃洛石 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、

高岭石 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 、石英 SiO_2 、方解石 CaCO_3 、白云石 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 和硅酸二钙 Ca_2SiO_4 ,与素土相比其生成了较多的物质。第4组试样中虽未掺入石灰 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,却生成了方解石 CaCO_3 ,这是因为掺入的水泥中含有硅酸二钙 Ca_2SiO_4 、硅酸三钙 Ca_3SiO_4 。虽然第4组试件有方解石,但其强度却远远小于第15组试件的。比较分析发现,第4组试件中大量剩余的硅酸二钙 Ca_2SiO_4 未参与反应,未掺石灰的玄武岩残积红土,在潮湿的环境中极易吸水,当其长时间处于富水状态时,会发生轻微开裂,故其强度很低。

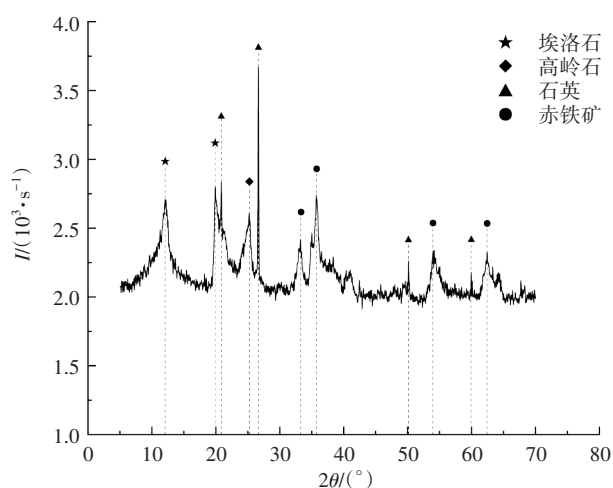


图3 第1组试件X衍射图谱

Fig. 3 X-ray diffraction pattern of the group 1 of specimen

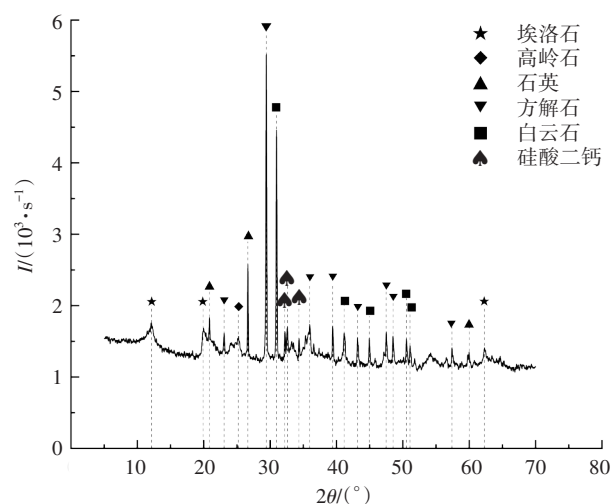


图4 第4组试件X衍射图谱

Fig. 4 X-ray diffraction pattern of the group 4 of specimen

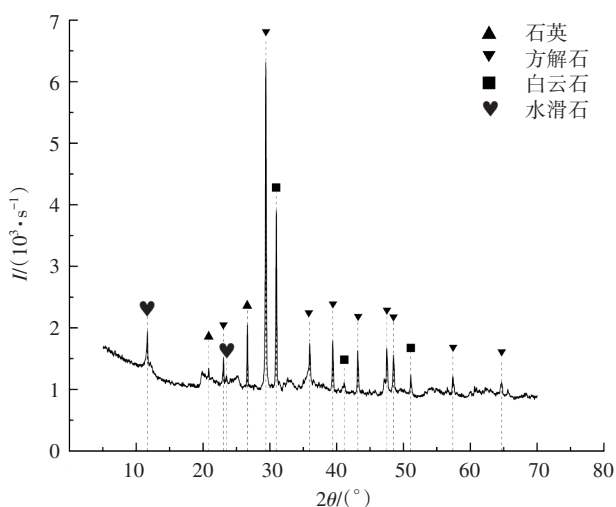


图5 第15组试件X衍射图谱

Fig. 5 X-ray diffraction pattern of the group 15 of specimen

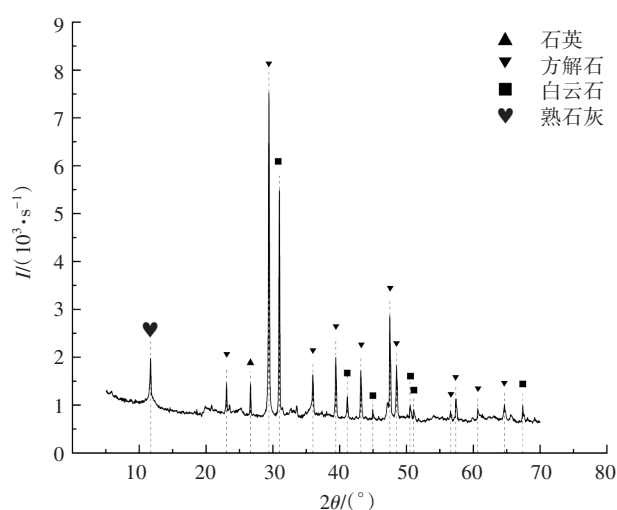


图6 第25组试件X衍射图谱

Fig. 6 X-ray diffraction pattern of groups 25 of specimen

第15组试件含有石英 SiO_2 、方解石 CaCO_3 、白云石 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 和熟石膏 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。相对于素土,第15组试件中未检测到埃洛石和高岭石,其中,石英未发生反应,剩余在固化土中,熟石膏来源于外掺水泥和石灰中混入的杂质。第15组试件中生成较多的方解石,表明石灰 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生了碳酸化反应, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与空气中的 CO_2 发生了化学反应,生成了 CaCO_3 。 CaCO_3 具有较高的强度与水稳性,它对土的胶结作用加固了土结构^[22]。

第25组试件含有石英 SiO_2 、方解石 CaCO_3 、白云石 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 、熟石膏 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,其所含物质与第15组试件的相同,但是第15组试件却有较大的强度,极弱的膨胀性,而第25组试件则相反,强度不大,膨胀性极大。

由XRD结果可知,固化土无明显的水化产物生成,素土中埃洛石、高岭石的矿物成分也无明显剩余,这表明这两种矿物成分均参与了化学反应,而素土中的石英未参与反应。掺入固化土中的硅酸三钙 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 、硅酸四钙 $4\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 和石灰 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 无明显的剩余,但是掺入的水泥中却有剩余熟石膏。固化土中生成了大量的方解石 CaCO_3 ,但却无水化产物生成,因此,需要通过扫描电子显微镜(scanning electron microscope, 简称为SEM)作进一步的分析。

3.3 微观结构分析

采用SEM对第1、4、15、25组试件的微观结构进行观察和成像分析,得到2 000倍的SEM观察图,如图7~10所示。

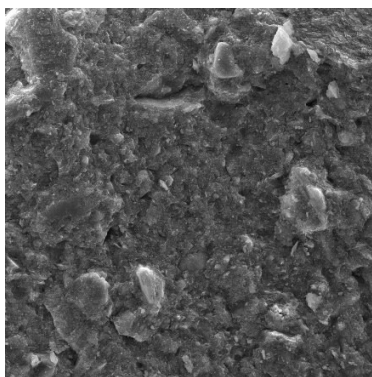


图7 第1组试件SEM观察图

Fig. 7 SEM observation chart of the group 1 of specimen

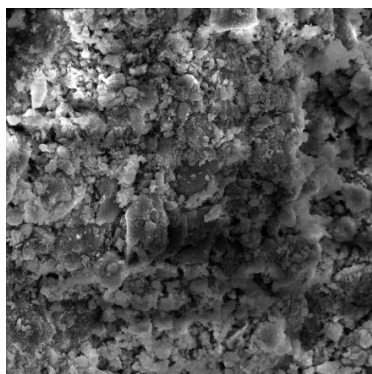


图8 第4组试件SEM观察图

Fig. 8 SEM observation chart of the group 4 of specimen

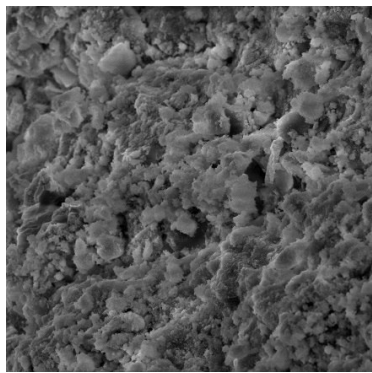


图9 第15组试件SEM观察图

Fig. 9 SEM observation chart of the group 15 of specimen

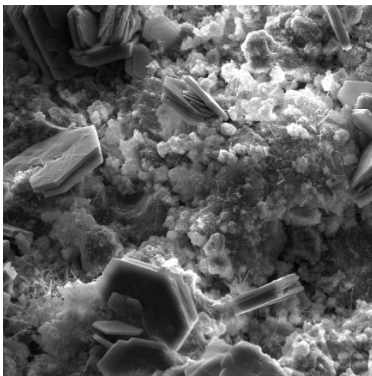


图10 第25组试件SEM观察图

Fig. 10 SEM observation chart of the group 25 of specimen

由图7~10可以看出,第1组试件较为密实,有少量孔隙和裂缝,土体中较大的颗粒被黏粒包裹,但是土体颗粒之间没有形成整体骨架。第4组试件孔隙较多,整体较为松散,土体中生成了晶状和少量絮状颗粒。虽然有晶体状和絮状结构,但土体内部依然有很大的孔隙,且晶状体与土体颗粒间表现为简单搭接,未形成整体的密实结构。第15组试件较为密实,土体附着大量的絮状结构,且絮状结构已形成整体,结构较为稳定。增加 Ca^{2+} 的浓度,可以促进高岭土中的 Na^+ 、 K^+ 发生离子交换作用,土壤胶体双电层变薄,土壤颗粒团聚絮凝,结构更加致密和稳定^[22]。第25组试件土粒间存在较多孔隙,内部有片状、晶状、絮状、针状和网状颗粒,但互相之间仅为简单搭接,未形成整体,杂乱无序,呈松散状态。

4 结论

本研究通过正交试验方法,对固化玄武岩残积土开展28 d无侧限抗压强度试验,结合微观试验结果分析,得到以下结论:

1) 经固化剂处理后,红土的强度、水稳定性有所改善,石灰、水泥、纤维的固化效果优于砂子和水玻璃的。在风干情况下,固化剂对红土强度的影响程度由大到小依次为石灰、纤维、硅酸钠、砂子、水泥。在常温常湿和浸水情况下,固化剂对红土强度的影响程度由大到小依次为石灰、纤维、水泥、硅酸钠、砂子。因此,石灰是对红土强度影响最大的固化剂。

2) 在玄武岩残积红土中掺入石灰、水泥等固化剂,生成的大量方解石(CaCO_3)是红土强度和稳定性提高的关键因素。通过扫描电镜观察发现,经过长期养护的素土无明显骨架结构,在掺入固化剂后,土体产生了絮凝结构,形成了土的整体骨架,使土体结构更加密实,提高了强度和稳定性。

3) 根据试验结果可知,固化改良玄武岩残积红土在最佳含水率条件下,掺入80%的石灰、20%~30%的水泥、10%的砂子、不加入纤维和硅酸钠,经养护后,强度提高,且对遇水强度变低问题的改良效果也较好。

参考文献(References)

[1] 王琪琪,黄娟,杨建军.雨水浸润后黄土边坡稳定性分

- 析[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(3): 1-9. (WANG Qiqi, HUANG Juan, YANG Jianjun. Stability analysis of loess slope soaked by rainwater [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(3): 1-9. (in Chinese))
- [2] 唐凛, 杨晓松, 查旭东, 等. 基于含水率的重塑低液限黏土抗剪强度关系模型试验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(2): 26-32. (TANG Lin, YANG Xiaosong, ZHA Xudong, et al. Experiment on shear strength relation model of remolded low liquid limit clay based on water content [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(2): 26-32. (in Chinese))
- [3] 曹海利, 付丽红. 高液限土石灰改良处治技术试验及工后沉降分析[J]. 公路与汽运, 2021(4): 83-86. (CAO Haili, FU Lihong. Test of lime improvement treatment technology for high liquid limit soil and analysis of post-construction settlement [J]. Highways & Automotive Applications, 2021(4): 83-86. (in Chinese))
- [4] YU H, HUANG X, NING J G, et al. Improving performance of soil stabilizer by scientific combining of industrial wastes [J]. Geomechanics and Engineering, 2016, 10(2): 247-256.
- [5] YANG J K, KANG S H. A study on pre-red mud and bio-solids applicability as soil stabilizer [J]. Journal of Korean Society of Water and Wastewater, 2011, 25(3): 419-428.
- [6] SEO S G, LEE K S, KIM Y S, et al. A study on the estimation of optimal unit content of binder for the soil stabilizer using the recycled resource in DMM [J]. Korean Geosynthetics Society, 2019, 18(2): 37-44.
- [7] 史保华, 宁文溥, 许巍, 等. 抗耐土壤稳定剂在简易机场道面中的应用[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(2): 25-33. (SHI Baohua, NING Wenpu, XU Wei, et al. Application of con-aid soil stabilizer in expedient airfield pavement [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(2): 25-33. (in Chinese))
- [8] 刘瑾, 施斌, 姜洪涛, 等. STW型高分子土壤稳定剂改良黏性土团聚体水稳性实验研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(2): 77-80, 94. (LIU Jin, SHI Bin, JIANG Hongtao, et al. Experimental study on the water-stability property of clay aggregates stabilized by STW polymer soil stabilizer [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(2): 77-80, 94. (in Chinese))
- [9] 黄伟, 刘清秉, 项伟, 等. 离子固化剂改性蒙脱土吸附水特性及持水模型研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(1): 121-130. (HUANG Wei, LIU Qingbing, XIANG Wei, et al. Water adsorption characteristics and water retention model for montmorillonite modified by ionic soil stabilizer [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(1): 121-130. (in Chinese))
- [10] 刘清秉, 项伟, 崔德山. 离子土固化剂对膨胀土结合水影响机制研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(10): 1887-1895. (LIU Qingbing, XIANG Wei, CUI Deshan. Effect of ionic soil stabilizer on bound water of expansive soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(10): 1887-1895. (in Chinese))
- [11] 黄河, 施斌, 刘瑾, 等. STW型生态土壤稳定剂改性膨胀土水理性质试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8): 1236-1240. (HUANG He, SHI Bin, LIU Jin, et al. Water-physical properties of expansive soils modified by STW ecotypic soil stabilizer [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1236-1240. (in Chinese))
- [12] CUI K, YANG Y. Experimental study on engineering characteristics of basalt residual soil on high slope [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3307 (580-583): 460-463.
- [13] ZHANG X W, KONG L W, LI J J. Influence of dry and wet seasons on disintegration characteristics of basalt residual soil from the Leizhou Peninsula, China [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2018, 51(4): 450-460.
- [14] 侯兆霞, 刘中欣, 武春龙. 特殊土地基[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2007. (HOU Zhaoxia, LIU Zhongxin, WU Chunlong. Special land base [M]. Beijing: China Building Material Industry Publishing House, 2007. (in Chinese))
- [15] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. (CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd.. Specifications for design of highway subgrades: JTG D30—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [16] GUPTA A, BISWAS S, ARORA V K. Ranking of stabilizers to stabilize/solidify dredged soil as highway construction material [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 43: 1694-1699.
- [17] 樊恒辉, 高建恩, 吴普特. 土壤固化剂研究现状与展望[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(2): 141-146, 152. (FAN Henghui, GAO Jian'en, WU

- (KUAI Haidong, ZHANG Yong, DONG Jifang, et al. Experimental study on dynamic stability of asphalt mixture under different temperature [J]. Technology of Highway and Transport, 2017, 33 (4) : 25-27. (in Chinese))
- [15] 何华, 沈昆, 李炜, 等. 硬质沥青混合料的路用性能研究 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2017, 13 (6) : 196-198. (HE Hua, SHEN Kun, LI Wei, et al. Study on road performance of hard asphalt mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology Edition), 2017, 13 (6) : 196-198. (in Chinese))
- [16] 李志刚. DXG-1 抗车辙剂沥青混合料路用性能研究 [J]. 河南科学, 2020, 38 (8) : 1264-1269. (LI Zhigang. The road performance of asphalt mixture with DXG-1 anti-rutting agent [J]. Henan Science, 2020, 38 (8) : 1264-1269. (in Chinese))
- [17] 孔令坤, 李文凯. 不同纤维沥青混合料性能研究 [J]. 河南科学, 2020, 38 (5) : 791-796. (KONG Lingshen, LI Wenkai. Study on the performance of different fiber asphalt mixture [J]. Henan Science, 2020, 38 (5) : 791-796. (in Chinese))
- [18] 陈安京. 温拌高模量沥青混合料性能试验研究 [J]. 长沙理工大学学报 (自然科学版), 2021, 18 (1) : 33-39. (CHEN Anjing. Experimental research on the performance of warm mix high-modulus asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18 (1) : 33-39. (in Chinese))
- [19] 代霞. 不同工艺制备的 SBS 改性沥青混合料性能研究 [J]. 公路与汽运, 2020 (6) : 53-56, 60. (DAI Xia. Study on performance of SBS modified asphalt mixture prepared by different processes [J]. Highways & Automotive Applications, 2020 (6) : 53-56, 60. (in Chinese))
- [20] 周彦黎. PR.P 高模量沥青混合料的动态模量及疲劳性能研究 [J]. 中外公路, 2017, 37 (6) : 292-295. (ZHOU Yanyun. Study on dynamic modulus and fatigue performance of PR.P high modulus asphalt mixture [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37 (6) : 292-295. (in Chinese))
- (责任编辑: 刘国奇; 校对: 罗容 李脉; 英文编辑: 陈璐)
-
- (上接第 10 页)
- Pute. Prospect of researches on soil stabilizer [J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition), 2006, 34 (2) : 141-146, 152. (in Chinese))
- [18] 黄伟, 张毫奎, 张丽, 等. 钢渣-杂填土基层材料配合比优化试验研究 [J/OL]. 土木与环境工程学报 (中英文), 2021: 1-10. (2021-05-26). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20210525.1312.008.html>. (HUANG Wei, ZHANG Maodie, ZHANG Li, et al. Experimental study on optimization of mix ratio for steel slag-miscellaneous fill base material [J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021: 1-10. (2021-05-26). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20210525.1312.008.html>. (in Chinese))
- [19] 交通部公路科学研究院. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51—2009 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009. (Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering: JTG E51—2009 [S]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese))
- [20] HUANG X, LI Z G, NING J G, et al. Principle and method of optimization design for soft soil stabilizer [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2009, 24 (1) : 154-160.
- [21] DEVENTER J, PROVVIS J L, DUXSON P, et al. Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 139 (3) : 506-513.
- [22] 张登良. 加固土原理 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1990. (ZHANG Dengliang. Principle of reinforced soil [M]. Beijing: People's Communications Press, 1990. (in Chinese))
- (责任编辑: 刘平; 校对: 罗容 李脉; 英文编辑: 陈璐)