

文章编号:1674-599X(2022)04-0053-07

固化改良玄武岩红土浸水抗剪特性研究

华伦,唐正光,王奕博

(昆明理工大学 建筑工程学院,云南 昆明 650500)

摘 要:为改善玄武岩残积红土的浸水抗剪特性,将水泥、石灰、水玻璃和水泥-水玻璃双浆4种固化剂分别掺入玄武岩红土进行浸水剪切试验,研究掺入不同固化剂对玄武岩红土抗剪强度改善的影响规律和内在机理。研究结果表明:固化剂的掺入可以增大玄武岩红土浸水后的黏聚力与内摩擦角,显著改善其浸水抗剪强度。当掺入10%水泥时,固化改良玄武岩红土抗剪强度达到161.42 kPa,增强效果最好;当掺入10%水泥-水玻璃双浆时,增强效果次之,抗剪强度为112.07 kPa;当分别掺入10%石灰或10%水玻璃时,增强效果相对较差。

关键词:固化剂;红土;浸水试验;抗剪强度;内摩擦角;黏聚力

中图分类号:TU411.7

文献标志码:A

Shear performance of solidified improved basalt laterite after immersion in water

HUA Lun, TANG Zhengguang, WANG Yibo

(School of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to improve the shear properties of basalt residual laterite, four kinds of curing agents, such as cement, lime, sodium silicate and cement-sodium silicate double slurry, were mixed into basalt laterite respectively. The immersion shear test was carried out, and the internal mechanism and influence of different curing agents on the improvement of the shear strength of basalt laterite were studied. The results show that the addition of curing agent can improve the cohesion and internal friction angle of laterite after soaking water, and significantly improve the shear strength of laterite. When 10% cement is added, the shear strength of the modified basalt laterite can reach 161.42 kPa, and the strengthening effect is the best. When 10% cement and sodium silicate double slurry are added, the shear strength is 112.07 kPa; When adding 10% lime or 10% sodium silicate, the enhancement effect is relatively poor.

Key words: curing agent; red soil; water immersion; shear strength; internal friction angle; cohesion

公路边坡、路基受地下水或降雨的影响会产生破坏。玄武岩残积红土为玄武岩风化后表层的红色黏性土,主要分布在中国南方。该红土的特性与红黏土的相似,具有高液限、高孔隙比等特点,但强度比红黏土的略低^[1]。相关研究已证明水对土体强度及稳定性会产生不良影响^[2-3],通常在土体中加入固化剂可以改善其性质。常用的固化剂包括水泥和石灰等。鲍洋等人^[4]研究发现,水泥掺入红黏土中可以有效提高土体强度。经石灰改良后的红黏

土无侧限抗压强度及加州承载比(california bearing ratio, 简称为CBR)显著提高,抗变形能力增强^[5]。水玻璃作为无机胶凝材料在土壤固化中得到广泛应用。王生新等人^[6]开展了水玻璃固化黏土矿物的试验研究,发现固化土体结构发生改变,粒状、片状结构变为团块状的网状结构。简文彬等人^[7]探究了水泥-水玻璃双浆固化软土的微观机理。颜胜才^[8]发现将水泥掺入土中可以改善土体水稳性,且随着掺量的增加改善效果越显著。将水泥与石灰共同

收稿日期:2022-01-10

作者简介:华伦(1998—),男,昆明理工大学硕士生。

掺入砂土中,可以改善其水稳性^[9]。已有研究结果表明:水泥、石灰和水玻璃可以有效改善土体特性,但将不同固化剂分别掺入玄武岩红土进行试验的研究较少。因此,本研究以玄武岩残积红土为研究对象,在玄武岩残积红土中分别掺入水泥、石灰、水玻璃和水泥-水玻璃双浆4种固化剂后进行浸水剪切试验,探究不同固化剂对玄武岩红土浸水抗剪强度的改善效果及机理,以期该类土体路基和边坡处治提供参考。

1 试验材料

1.1 试验土样

本试验所用土样为玄武岩残积红土,红土经自然风干后碾碎,过2 mm筛,按照规范《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[10]的要求进行相关室内试验,测量其基本物理指标,见表1。图1为特殊土塑性图^[11]。从图1可以看出,本试验选用的玄武岩残积红土在MHR区域内,属于红黏土范畴。塑性指数较大,表明该红土土颗粒较细,比表面积较大,土中黏粒含量较多,土体更易吸水,稳定性较差。

表1 红土的基本物理指标

Table 1 Basic physical indicators of laterite

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
56.50	1.59~1.75	2.73	1.40~1.70	48.72	69.50	20.80	5.19

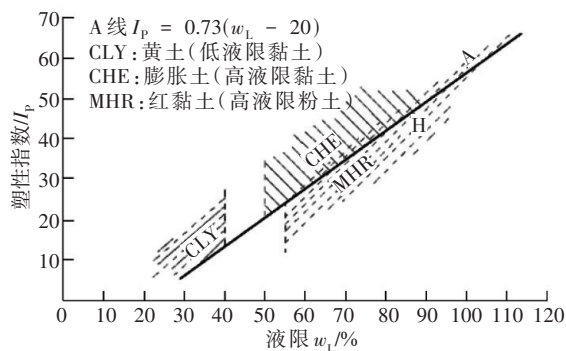


图1 特殊土塑性图

Fig. 1 Plasticity diagram of the special soil

使用X射线荧光光谱仪测得土样的主要化学元素及氧化物的质量分数,见表2。由表2可知,土样中含量较高的化学元素为Si、Al和Fe,其余为小部分稀有金属元素;对应含量较高的氧化物为SiO₂、Al₂O₃和Fe₂O₃。

表2 红土主要化学元素及氧化物的质量分数

Table 2 Content of main elements and oxides in laterite

编号	化学元素	质量分数/%	氧化物	质量分数/%
1	Al	14.705	Al ₂ O ₃	27.150
2	Si	15.705	SiO ₂	32.387
3	Fe	20.128	Fe ₂ O ₃	26.598
4	Ti	5.628	TiO ₂	8.855
5	Co	2.329	Co ₃ O ₄	3.167
6	K	0.398	K ₂ O	0.455

1.2 试验固化剂

土壤固化剂的主要成分是无机结合料,通过将其加入土壤与水发生物理或化学反应,以改善土壤工程性能^[12],根据已有研究,本试验选用水泥、石灰、水玻璃及水泥-水玻璃双浆4种材料作为固化剂,其中,双浆固化剂中水泥和水玻璃的质量配比为1:1。水泥为普通硅酸盐水泥(P·O42.5),其主要成分为硅酸二钙、硅酸三钙、铝酸三钙、铁铝酸四钙和熟石膏,使用前过2 mm筛,防止水泥结块;石灰为熟石灰Ca(OH)₂;水玻璃为硅酸钠水玻璃Na₂O·nSiO₂,模数n为2.9。

2 试验设计

2.1 试验方案

已有研究成果表明水泥和石灰掺量为10%较为合适^[13-14],为对比分析各固化剂在不同掺量下对玄武岩红土抗剪强度的影响,本试验将各固化剂掺量定为3%、5%和10%,固化剂的质量按式(1)进行计算,水的掺量按式(2)进行计算。本试验共制备14组试件,每组12个试件,每4个为一批,一组共3批试件,取每组数据的平均值为试验值以消除误差,各组试件参数见表3。本试验控制所有试件的质量为(110±5)g,含水率为40%。其中,C0土样不浸水,直接进行剪切试验,其他试件制作完成脱模后在室内养护1 d成型,然后再放入养护箱中养护180 d。养护箱为自制养护箱,在洗干净的箱子上铺砂浆砖,砖上铺河砂,加水至淹过河砂,箱中保持温度18℃,相对湿度90%。

$$m_a = 0.01 \times a \times \frac{m_0}{1 + 0.01 \times w_0} \tag{1}$$

$$m_w = \left[(1 + 0.01 \times a) \times 0.01 \times w - 0.01 \times w_0 \right] \times \frac{m_0}{1 + 0.01 \times w_0} \quad (2)$$

式中: m_a 为固化剂质量,g; m_0 为风干土质量,g; w_0 为风干土含水率,%; m_w 为水的质量,g; w 为试件含水率,%; a 为固化剂掺量,%。

表 3 试件参数

Table 3 Specimen parameters %

试件编号	固化剂种类	固化剂质量分数
C0	无	0
C1	无	0
C2	水泥	3
C3	水泥	5
C4	水泥	10
C5	石灰	3
C6	石灰	5
C7	石灰	10
C8	水玻璃	3
C9	水玻璃	5
C10	水玻璃	10
C11	双浆	3
C12	双浆	5
C13	双浆	10

2.2 直剪试验

直剪试验使用SDJ-2型电动应变控制式直剪仪,四级法向应力分别为100、200、300和400 kPa。为研究红土浸水后的性能,剪切前先将达到养护龄期的试件放入水中浸泡1 h(由于抽真空饱和和加压试验容易使红土试件发生破坏,所以利用浸水1 h代替),以0.8 mm/min的剪切速率对试件进行剪切,自剪切开始,每隔15 s记录一个测力计读数,每次试验持续时间为10 min。

3 剪切试验结果与分析

黏聚力和内摩擦角是土体抗剪强度的两个重要指标,各试件的抗剪强度指标见表4。由表4可知,水泥和石灰掺量增加时,试件的黏聚力逐渐上升,内摩擦角变化相对稳定;水玻璃掺量增加时,黏聚力先上升后下降,内摩擦角先下降后上升;双浆掺量增加时,黏聚力与内摩擦角均上升。

表 4 各试件抗剪强度指标

Table 4 Shear strength index of the specimen

试件编号	固化剂掺量/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
C0	0	17.04	10.50
C1	0	10.35	8.24
C2	3	15.33	8.42
C3	5	38.54	8.87
C4	10	103.24	8.16
C5	3	11.15	7.78
C6	5	16.70	6.48
C7	10	19.73	9.41
C8	3	10.32	8.78
C9	5	16.42	3.47
C10	10	13.49	9.79
C11	3	25.01	6.94
C12	5	26.69	7.48
C13	10	40.28	10.18

由表4还可知,当固化剂掺量为10%时固化效果最为明显,因此,本研究对固化剂掺量为10%的试件抗剪强度进行对比分析,试验结果见表5。由表4~5可知,素土浸水后强度明显下降,其中,黏聚力下降较明显,这是因为土体中孔隙水增多,土颗粒间距增大。图2(a)、(b)所示为饱和状态下素土抗剪过程的机理示意图,土颗粒之间被水填充,无直接接触,黏聚力下降,抗剪强度降低。图2(c)、(d)所示为饱和状态下固化土抗剪过程的机理示意图,相较素土,其土颗粒之间有固化剂及其水化物填充,孔隙水减少,且因水化物有一定的强度,颗粒间黏聚力增大,土体抗剪强度增强。

表 5 固化剂掺量为10%的试件抗剪强度

Table 5 Shear strength of specimen with 10% curing agent kPa

试件编号	不同法向应力下的抗剪强度			
	100	200	300	400
C0	34.63	57.53	68.65	92.71
C1	27.48	39.15	46.23	73.41
C4	118.00	131.92	144.99	161.42
C7	33.77	54.66	73.53	82.76
C10	30.74	49.16	62.91	83.67
C13	54.11	84.40	90.08	112.07

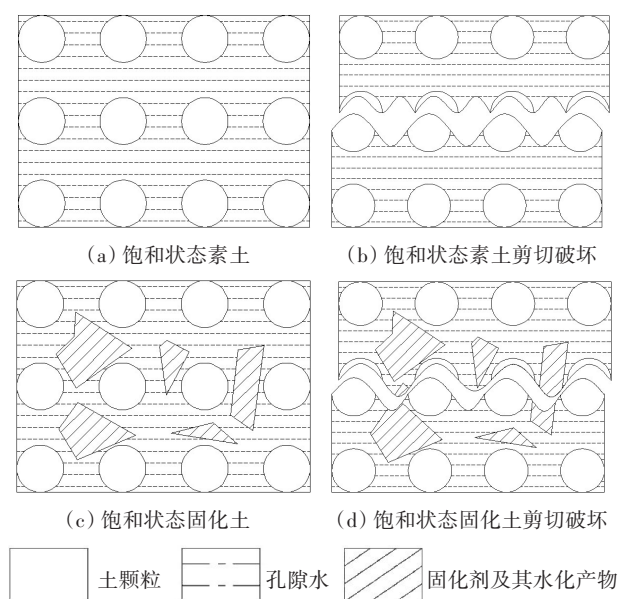


图2 饱和土体抗剪过程的机理示意

Fig. 2 Mechanism diagram of shear process of saturated soil

图3所示为素土及固化剂掺量为10%的不同固化土抗剪强度柱状图。从图3可以看出,加入固化剂后,土样的抗剪强度均有所提升,与浸水素土相比,当法向应力为100 kPa时,分别加入水泥、石灰、水玻璃和水泥-水玻璃双浆的固化土抗剪强度分别增加329.40%、22.89%、11.86%和96.91%;法向应力为200 kPa时,其分别增加236.96%、39.62%、25.57%和115.58%;在法向应力为300 kPa时,其分别增加213.63%、59.05%、36.08%和94.85%;当法向应力为400 kPa时,其分别增加119.89%、12.74%、13.98%和52.66%。试验结果表明:掺入水泥的固化土抗剪强度最大,掺入水泥-水玻璃双浆的次之,掺入石灰与水玻璃的最小且两者固化效果较为接近。

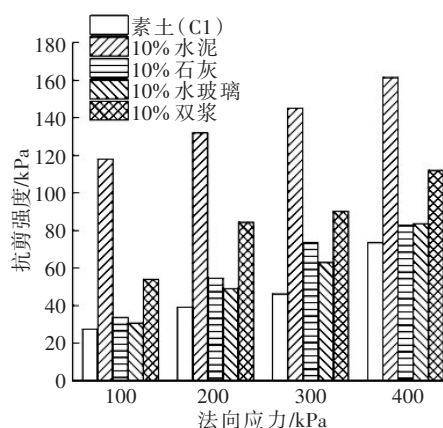


图3 素土及不同固化红土的抗剪强度柱状图

Fig. 3 Shear strength histogram of plain soil and solidified laterite

4 扫描电镜试验结果与分析

4.1 微观结构分析

通过扫描电镜可以观察各土样整体形貌结构及固化剂对土体的影响。本研究选用放大倍数为500倍的扫描电镜,对在400 kPa法向应力下剪切的素红土和掺量均为10%的4种固化红土进行扫描。根据已有研究,加固土的机理主要为化学机理与物理机理,化学机理是土中生成新的化合物,其对土体有黏结作用或本身具有较高强度,使土体性质得到改善;物理机理是无新物质产生,固化剂本身可以填充土颗粒孔隙或使土颗粒胶结在一起,从而提高土体整体性。

图4所示为素土及掺量均为10%的4种固化红土的扫描电镜图,从图4(a)可以看出,素土试样的结构主要为絮凝状结构和凝块状结构。红土矿物以高岭石为主,高岭石的片状结构以边面结合形成絮状结构与块状结构,这两种结构结合形成土体骨架。弯曲和卷曲的片状黏土矿物晶片通过边面、面面接触形成不规则的聚集体,骨架之间的孔隙主要由水充填,粒团内孔隙发达^[15]。絮状结构的黏性土的土粒之间联结强度往往由于长期的固结作用和胶结作用得到加强^[16]。从图4(b)可以看出,掺入水泥的固化红土含赤铁矿晶体,并伴随有针状晶体生成,晶状体称为钙矾石晶体,又称水泥杆菌。水泥杆菌最初以针状结晶的形式在较短时间内析出,其生成量与水泥掺量多少及龄期长短有关。该反应的速度较快,反应过程结合大量的自由水,最终以结晶水的形式固定下来。水泥杆菌的生成延缓了水泥的水化和硬化过程^[17]。因水泥细度较土颗粒小,故水泥的掺入可以减小土体结构中的孔隙,增强土体密实性;其次,生成的针状钙矾石晶体也具有一定的结构性与强度,钙矾石的生成消耗了大量的水分,且其溶解度极小,因此,水泥的掺入增加了红土的浸水稳定性,提高了其浸水后的强度。对照比例尺可以看出,部分晶体的长度超过了20 μm,这表明其水化反应较为充分,絮凝状结构变少,孔隙被胶凝物填充,从而使红土结构性和整体性得到提高。从图4(c)可以看出,掺入石灰的固化红土土体结构较为松散,存在较多的孔隙及较小的絮状结构,这表明石灰不能很好地填充到土体孔隙之中。熟石灰的主要成分Ca(OH)₂与红土中的SiO₂和Al₂O₃结合生成具有胶结作用的CaSiO₃和3CaO·Al₂O₃,使

土颗粒黏结在一起,提高了土体强度和水稳性。从图4(c)中可以看出,土颗粒间虽存在一定的团聚现象,但土体整体性较差,孔隙较多,石灰对红土的改良效果并不明显,这可能是石灰掺量较少或反应不充分所致。从图4(d)可以看出,掺入水玻璃的固化红土中,水玻璃与土体胶结为整体,密实程度较好。但土样浸水后附着的水玻璃凝胶发生软化,大部分流失,造成大量孔隙与裂缝的产生,从而导致土体强度明显降低。由图4(e)可以看出,掺入双浆的固化红土结构密实度较好,但由于水泥剂量较少,土体中未生成针状钙矾石,虽有少部分絮状结构生成,但未结合形成整体,因此,强度提升效果有限。水玻璃与水泥水化产物氢氧化钙反应,生成水化硅酸钙凝胶,水化硅酸钙凝胶进一步生成水化硅酸钙,其具有较高的强度^[7]。水泥水化产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和水化硅酸钙易溶于水,不会阻碍水泥颗粒与水继续发生反应^[16],水与水泥的反应更加彻底,生成了大量水化物,提高了土体的稳定性,土体中水分被消耗后,水玻璃溶于水的量减少,水玻璃与水泥水化物共同保证了土体浸水后的稳定性。

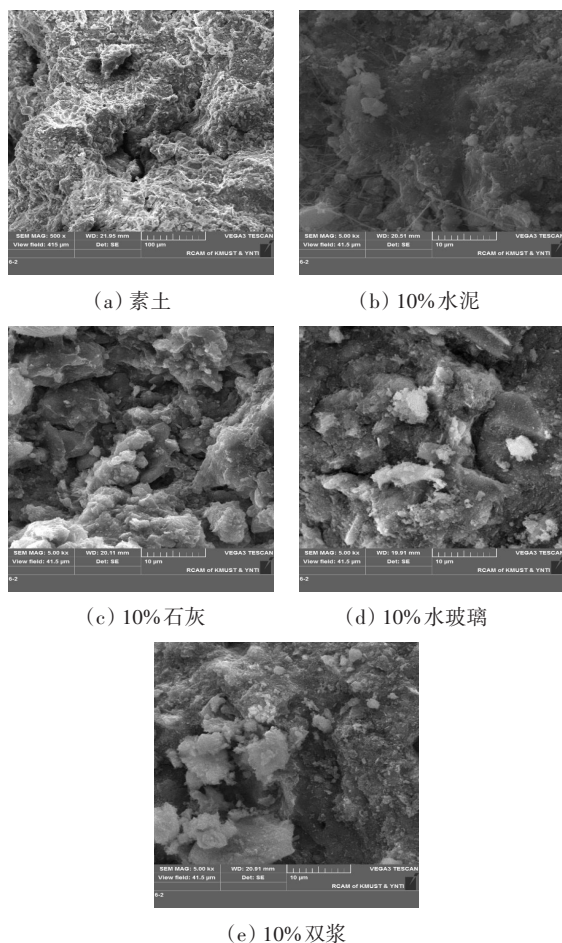


图4 素土及各固化红土的扫描电镜图

Fig. 4 The SEM of plain soil and solidified laterite

4.2 电镜图处理分析

本研究利用 MATLAB 编程软件对扫描电镜图进行分析,通过提取图片中的孔隙率并对其量化,探究固化剂对土体孔隙率的影响。对微观图像进行二值化处理,设置阈值对图像内的点进行筛选,由于每张微观图的灰度与亮度均不同,为了减少误差,需要根据目标图像的灰度与亮度选择合适的阈值,处理过程如图5所示。图5(b)黑色区域代表土体中的孔隙,白色区域代表土体基质。

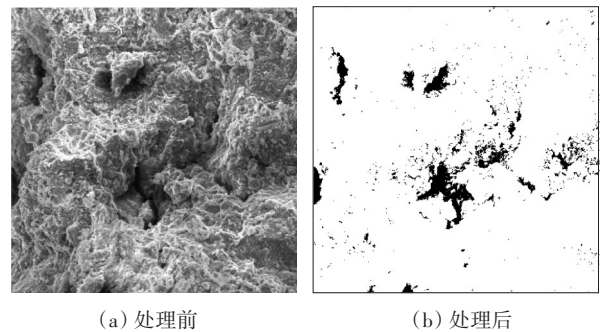


图5 阈值分割处理图像

Fig. 5 Image using the threshold segmentation method

素土及固化剂掺量均为10%的4种固化红土的孔隙率见表6。由表6可知,在浸水情况下,掺入固化剂可以降低土体孔隙率,提高土体强度与稳定性。其中,加入10%水泥的固化红土的孔隙率最低,这是因为生成的钙矾石加固了土体整体骨架,且钙矾石难溶于水,使土体即使在水的影响下也能保持较好的整体结构,不会因水产生破坏。加入10%水玻璃的固化红土孔隙率高于素土的,主要原因是水玻璃易溶于水,当土体发生破坏时,水玻璃溶于水后流失,使其填充的孔隙暴露,增大了土体孔隙率。水泥-水玻璃双浆固化剂中的水玻璃起到了速凝作用^[18],在降低孔隙率与提升强度方面对土体改善效果较明显。

表6 素土及不同固化红土的孔隙率

Table 6 Porosity of plain soil and solidified laterite %

试件编号	孔隙率
C1	8.43
C4	2.60
C7	6.19
C10	10.50
C13	4.35

5 结论

1) 水泥、石灰、水玻璃和水泥-水玻璃双浆固化剂在一定程度上可以改善玄武岩残积红土的浸水稳定性,且随固化剂掺量的增加,土体抗剪强度不断增强。其中,水泥的固化效果最好,水泥-水玻璃双浆的次之,石灰和水玻璃的相对较差且两者固化效果接近。掺入10%水泥的固化红土抗剪强度最高达到161.42 kPa,掺入10%双浆的最高达112.07 kPa,掺入10%石灰的最高达82.76 kPa,掺入10%水玻璃的最高达83.67 kPa。

2) 借助扫描电镜观察玄武岩残积红土,发现其内部存在较多孔隙,土体结构主要为絮凝状结构和凝块状结构。掺入水泥后产生的水化物填充了土体孔隙,生成的钙矾石增强了土体水稳性,土体抗剪强度增幅最高达329.40%。掺入石灰的土样中仍有较多孔隙,土样整体性较差。水玻璃可以填充土体孔隙,但水玻璃易溶于水,水玻璃凝胶遇水软化后流失,土体强度也随之降低。双浆固化剂中水泥与水玻璃的相互作用使土体内摩擦角得到较好改善,土体抗剪强度得到较大增强,但因水玻璃易溶于水,土体强度增幅最高为115.5%。

3) 掺入固化剂可以降低土体孔隙率,增强土体密实性,从而降低土体浸水破坏程度。相较于其他固化剂,水玻璃因其自身易溶于水的特点对孔隙率改善效果较差,但与水泥共同掺入土体时可以产生较好的固化效果。

参考文献(References):

- [1] 唐大雄,张文殊,王清,等.工程岩土学[M].2版.北京:地质出版社,1999:125-128.(TANG Daxiong, ZHANG Wenshu, WANG Qing, et al. Engineering rock and soil [M]. 2nd edition. Beijing: Geological Publishing House, 1999:125-128.(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] 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))
- [4] 鲍洋,戴剑勇,徐志豪,等.水泥掺量对红黏土固结体抗剪特性影响的试验研究[J].南华大学学报(自然科学版),2019,33(4):32-37.(BAO Yang, DAI Jianyong, XU Zhihao, et al. Experimental study on the effect of cement content on the shear behavior of red clay consolidation [J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2019,33(4):32-37.(in Chinese))
- [5] 肖庆一,孙立东,封仕杰,等.石灰改良云南红黏土路基路用性能研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(10):79-84.(XIAO Qingyi, SUN Lidong, FENG Shijie, et al. Road performance of lime-modified Yunnan red clay roadbed [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020,39(10):79-84.(in Chinese))
- [6] 王生新,吕擎峰,王得楷,等.水玻璃固化黏土矿物的试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(7):2656-2662.(WANG Shengxin, LYU Qingfeng, WANG Dekai, et al. Experimental study of clay minerals solidified by sodium silicate [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013,44(7):2656-2662.(in Chinese))
- [7] 简文彬,张登,黄春香.水泥-水玻璃固化软土的微观机理研究[J].岩土工程学报,2013,35(S2):632-637.(JIAN Wenbin, ZHANG Deng, HUANG Chunxiang. Micromechanism of cement-sodium silicate-stabilized soft soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013,35(S2):632-637.(in Chinese))
- [8] 颜胜才.水泥改良土的物理力学特性试验研究[J].铁道建筑,2015,55(4):107-109.(YAN Shengcai. Experimental study on physical and mechanical properties of cement-improved soil [J]. Railway Engineering, 2015,55(4):107-109.(in Chinese))
- [9] 张俊,翁兴中,刘军忠,等.复合固化砂土力学及水稳性能试验研究[J].材料导报,2014,28(24):115-119,124.(ZHANG Jun, WENG Xingzhong, LIU Junzhong, et al. Experimental research on mechanical property and water stability of complex stabilized sandy soil [J]. Materials Reports, 2014,28(24):115-119,124.(in Chinese))
- [10] 水利部水利水电规划设计总院.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.(China Renewable Energy Engineering Institute. Standard

- for soil test method: GB/ T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [11] 王奕博,唐正光,杨玉龙. 矿粉土壤固化剂改良高原红黏土试验研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2020, 41(5): 443-449. (WANG Yibo, TANG Zhengguang, YANG Yulong. Experimental study on improving plateau red clay with mineral powder soil solidifier[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2020, 41(5): 443-449. (in Chinese))
- [12] 北京建筑材料科学研究总院有限公司. 土壤固化外加剂: CJ/T 486—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. (Beijing General Research Institute of Building Materials Co., LTD.. Soil stabilizing admixtures: CJ/T 486—2015 [S]. Beijing China Standards Press, 2016. (in Chinese))
- [13] 曾军. 石灰改良红黏土的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(7): 1289-1293. (ZENG Jun. Experimental study on improvement of red clay with lime[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(7): 1289-1293. (in Chinese))
- [14] 胡文华, 刘超群, 刘中启, 等. 水泥或石灰改良红黏土的力学强度特性试验研究[J]. 路基工程, 2017(5): 11-14, 19. (HU Wenhua, LIU Chaoqun, LIU Zhongqi, et al. Experimental research on mechanical strength characteristics of red clay stabilized by cement or lime[J]. Subgrade Engineering, 2017(5): 11-14, 19. (in Chinese))
- [15] 梁少欢, 卢玉东, 潘网生, 等. 基于SEM的贵州黔南红黏土微观结构研究[J]. 水电能源科学, 2020, 38(2): 151-154. (LIANG Shaohuan, LU Yudong, PAN Wangsheng, et al. Study on microstructure of red clay in southern Guizhou Province based on SEM [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(2): 151-154. (in Chinese))
- [16] 戴俊, 徐水林, 宋四达, 等. 基于XRD和SEM分析微波照射前后玄武岩的变化[J]. 中国科技论文, 2018, 13(24): 2780-2783. (DAI Jun, XU Shuilin, SONG Sida, et al. Changes in basalt before and after microwave irradiation based on XRD and SEM [J]. China Sciencepaper, 2018, 13(24): 2780-2783. (in Chinese))
- [17] 张登良. 加固土原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990. (ZHANG Dengliang. Principle of reinforcing soil [M]. Beijing: China Communications Press, 1990. (in Chinese))
- [18] 徐至钧. 水泥土搅拌法处理地基[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004. (XU Zhijun. Treatment of foundation with cement soil mixing method [M]. Beijing: China Machine Press, 2004. (in Chinese))
- (责任编辑: 刘平; 校对: 欧兆虎 罗容; 英文编辑: 陈璐)