

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.20190419.019

# 水泥掺量对红粘土固结体抗剪特性影响的试验研究

鲍洋,戴剑勇\*,徐志豪,康虔

(南华大学 资源环境与安全工程学院,湖南 衡阳 421001)

**摘要:**为探讨水泥掺量对红粘土固结体抗剪强度特性的影响规律,本文以大掺量水泥对红粘土固结体抗剪强度指标的影响为切入点,室内制备了四种不同水泥掺入比的红粘土固结体试块,开展了不同法向应力条件下的红粘土水泥固结体直接剪切试验。试验发现:随着水泥掺量的不断增大,红粘土固结体的剪应力-剪位移关系曲线上峰值应力跌落现象逐渐显现;红粘土固结体抗剪强度指标随水泥掺量的增大而提高,但是粘聚力与内摩擦角的增大规律并不相同:粘聚力的增大速率随水泥掺量的增大而不断减小,内摩擦角的增大规律随水泥掺量的增大而呈“S”型。

**关键词:**红粘土;水泥土;直剪试验;内摩擦角;粘聚力

**中图分类号:**TU411 **文献标志码:**B **文章编号:**1673-0062(2019)04-0032-06

## Experimental Study on the Effect of Cement Content on the Shear Behavior of Red Clay Consolidation

BAO Yang, DAI Jianyong\*, XU Zhihao, KANG Qian

(School of Resource & Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of cement content on the shear strength of red clay consolidation, this paper takes the influence of high-content cement on the shear strength index of red clay consolidation as the starting point, and four different cement incorporations are prepared indoors. The direct shear test of red clay cement consolidation under different normal stress conditions was carried out on the red clay consolidation test block. It is found that with the increasing amount of cement, the peak stress drop phenomenon on the shear stress-shear displacement curve of red clay consolidated body gradually

收稿日期:2019-03-22

基金项目:国家自然科学基金(51704168);湖南省教育厅科研基金项目(17C1375);南华大学大学生研究生学习和创新性实验计划项目(2016NH020XJXZ;2017XJXZ016)

作者简介:鲍洋(1993-),男,硕士研究生,主要从事岩土工程灾害预测与控制方面的研究。E-mail:530494952@qq.com。\*通信作者:戴剑勇(1979-),男,教授,博士,主要从事核安全系统工程、矿业系统工程等方面的研究。E-mail:daijy13@163.com

appears; The shear strength index of red clay consolidated body increases with the increase of cement content, but the cohesion and internal friction angle increase are not the same; The rate of increase of cohesive force decreases with the increase of cement content, and the law of increase of internal friction angle is "S" type with the increase of cement content.

**key words:** red clay; cement soil; direct shear test; internal friction angle; cohesion

## 0 引言

水泥土是在土中掺入水泥来改善土的力学性能的一种新型材料<sup>[1]</sup>,广泛应用于地基处理、基坑支护、边坡加固等岩土工程领域。水泥土的工程指标包括无侧限抗压强度、抗剪强度、渗透特性等,在不同岩土工程领域,对水泥土固结体各工程指标的重视程度也不相同。红黏土是一种对环境湿度变化敏感、具有多裂隙性、强胀缩性和强度衰减性的高塑性黏土<sup>[2]</sup>,其不良的物理性质与良好的力学特性之间的矛盾所带来的工程问题正引起学术界与工程界的广泛关注<sup>[3]</sup>。由于水泥土搅拌法可用于加固各种成因的软黏土,在红黏土地基加固领域得到广泛地推广应用。

黄辉<sup>[4]</sup>开展了石灰改良红黏土的无侧限抗压强度试验,发现压实度和养护条件对石灰改良红黏土的抗压强度影响最大,而石灰掺入量影响次之;王海湘<sup>[5]</sup>根据实际工程中红黏土团聚效应对改良效果影响显著的事实,开展了碳酸钙粉末的不同掺入方法对改良红黏土抗剪强度及抗压强度的影响规律,发现将天然红黏土自然风干后再掺料的改良方法效果最好,并发现碳酸钙粉末的掺入量为10%时,改良红黏土的抗剪及抗压强度值最大;刘之葵<sup>[6]</sup>研究了粉煤灰和二灰掺量对桂林红黏土的改良效果,发现粉煤灰和二灰的掺入都可以提高红黏土的抗剪强度及压缩模量,但是当掺入量超过一定限度后,红黏土粘聚力不增反降,并对水泥的改良效果进行了研究<sup>[7]</sup>,发现在相同养护龄期时,内摩擦角随水泥掺量增加而增大,粘聚力增大更加明显;吴瑞潜<sup>[8]</sup>、印长俊<sup>[9]</sup>、李晓全<sup>[10]</sup>、郭培玺<sup>[11]</sup>等发现改良红黏土试块抗压强度随水泥、粉煤灰的掺量增大而提高,随龄期的增长而增加<sup>[4]</sup>;汤怡新<sup>[12]</sup>在大量试验测试基础上,提出水泥固化土的抗压强度主要取决于水泥用量;刘宝臣<sup>[13]</sup>对桂林红黏土的水泥改良效果开展了试验研究工作,对不同水泥掺入比及养护龄期的水泥土试块进行了无侧限抗压强度、轴向压裂、及直接剪切试验,发现水泥掺入比为20%时,

抗拉性能经济性最好,超过20%后,水泥土固结体抗拉强度增长缓慢;肖桂元<sup>[14]</sup>对不同水泥掺入比及不同含水率的桂林红黏土固结体进行快剪试验,探究了相同含水率下,红黏土的抗剪强度与水泥掺量之间的关系;施灿海等<sup>[15]</sup>研究了纤维、纤维水泥对云南红黏土抗剪及抗压强度的影响,结果表明,往红黏土掺入纤维、纤维水泥后,其强度有了显著的改善;胡文华<sup>[16]</sup>采用水泥和石灰对江西红黏土进行改良,发现水泥和石灰的掺量越高,改良红黏土的最大干密度和最优含水率均增大<sup>[6]</sup>;吴超<sup>[17]</sup>对砂砾改良红黏土进行研究后发现,砂砾可降低红黏土液塑限,降低收缩量,提高土体强度;邓庆德<sup>[18]</sup>对流化床粉煤灰改良红黏土抗压强度的影响规律进行了研究,发现流化床粉煤灰掺量为30%时,改良红黏土强度最高。

值得注意的是,现有的水泥土改良红黏土研究成果主要集中在地基处理领域,而水泥土搅拌法还可以应用于基坑支护、边坡加固等工程,但是在这方面的研究成果极少。地基处理工程中更加关注改良红黏土的抗压强度、密实度、水稳定性等特征,但是在基坑支护、边坡加固等工程中,则更加关注水泥土固结体的抗剪与抗拉性能。为探究水泥掺量对红黏土固结体抗剪强度指标的影响规律,本文对四种不同水泥掺入比的红黏土固结体试块进行直接剪切试验,收集并分析了水泥土固结体内摩擦角及粘聚力与水泥掺入比之间的关系。

## 1 试样制备与试验方案

### 1.1 试验设备

本次试验是在南华大学岩土力学实验室RMT-150B岩石力学试验系统(见图1)上开展的,该设备最大垂直加载能力为1 000 kN,水平向加载能力为500 kN,是一套功能多样化的试验装置。设备动态性能良好,实时显示全过程曲线,计算机自动记录并保存各项测量数据。RMT-150B试验系统形成一套闭环回路,控制系统将试验参数控制在电子线路组成的闭环回路系统中。



图1 岩石力学试验系统

Fig.1 Rock mechanics test system

### 1.2 试件制备

试验所用红黏土取自衡阳市某镇,其重塑土样物理力学指标见表1,水泥为标号32.5R普通硅酸盐水泥。为防止高温烘干过程破坏红黏土结构,影响试验结果,对试验所用红黏土进行自然风干处理,然后将风干土样置于电磨中碾成粉末,并过0.075 mm孔径筛分后备用。

表1 风干红黏土物理力学指标

Table 1 Air-dried red clay physical and mechanical indicators

含水率	塑性指数 $I_p$	粘聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
1.77	18.07	9.25	6.76

注:表中含水率为自然风干后测量数据。

所制备红黏土水泥固结体试块尺寸为长 $\times$ 宽 $\times$ 高=200 mm $\times$ 180 mm $\times$ 200 mm,试块制备过程中,以水泥土混合材料的塌落度作为拌和指标,控制加水量;每次浇筑时按预先测试确定配合比称取好材料,将材料倒入搅拌机中混合搅拌(搅拌时间为5 min),待混合料搅拌均匀后,将其装载入定制磨具中浇筑成型(见图2),24 h后拆模,在标准养护箱中继续养护7 d,然后取出进行直剪试验。

### 1.3 试验方案

设计水泥掺入比  $m(\text{水泥}):m(\text{自然风干红黏土})$  分别为1:1、1:2、1:4、1:8四组,为防止个别法向应力下无法获取有效数据,每组设计6个不同法向应力下的直接剪切试验,实验测定水泥土固结体试样单轴抗压强度均超过3.5 MPa(水

泥掺入质量比为1:8试块),据此设定法向荷载分别为10、20、30、40、60、80 kN,相应的法向应力分别为0.27、0.56、0.83、1.11、1.67、2.22 MPa。在法向荷载施加至目标值后保持不变,以0.02 mm/s的位移控制方式施加水平向荷载,直至试件剪断破坏。

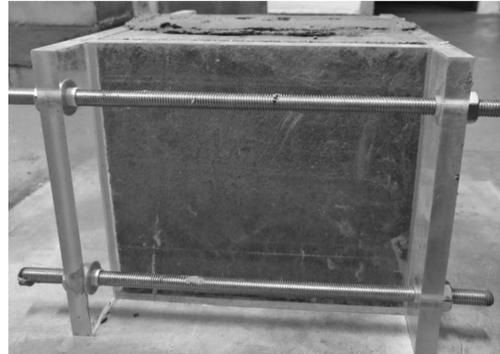


图2 浇筑水泥土试块及定制模具

Fig.2 Pouring cement soil test block and custom mold

## 2 试验结果与分析

### 2.1 红黏土水泥固结体变形特征

导出剪切试验结果,通过试验得出数据发现,在水泥掺入比一定范围内,水泥土固结体在水泥掺量增加的过程中变化规律表现出剪切峰值随着法向应力增大而增大,同时剪切力与水平位移的比值在水平位移较小时变化不大,根据这些规律,将剪切试验结果中不同法向力下剪切应力偏离过大的曲线给剔除,得到不同水泥掺入比下红黏土固结体的剪应力-剪位移关系曲线(见图3),可以发现:随水泥掺入量的不断增大,峰值剪断后的应力跌落现象逐渐明显,掺入比为1:4及以下时,剪应力-剪位移曲线上基本没有应力跌落现象,红黏土固结体没有明显的峰值强度,其残余应力与峰值应力基本持平,表明在较低水泥掺入量(1:4及以下)条件下,以水泥土抗剪能力为主要特性的抗滑桩,剪切面形成后,其抗剪强度降低程度并不明显。这是由于:当水泥掺入量较少时,水泥水化形成的固结体并不能在红黏土内部有效连接并协同工作,导致红黏土固结体基本呈现出与红黏土相似的剪切变形特征。

当水泥掺入比增大至1:2及以上时,由于红黏土中的水泥掺量足够多,其水化产物在红黏土中能够有效连接,并协同发挥抗剪能力,此时红黏土在固结体发挥抗剪作用时的参与度越来越小。

### 2.2 红黏土水泥固结体强度规律

进一步分析提取试验数据,将不同水泥掺入比的红黏土固结体试块峰值剪应力-正应力数值

点绘于图4中,并对图4中的数据点进行线性拟合,拟合结果同时呈现在图4中对应图片左上角。

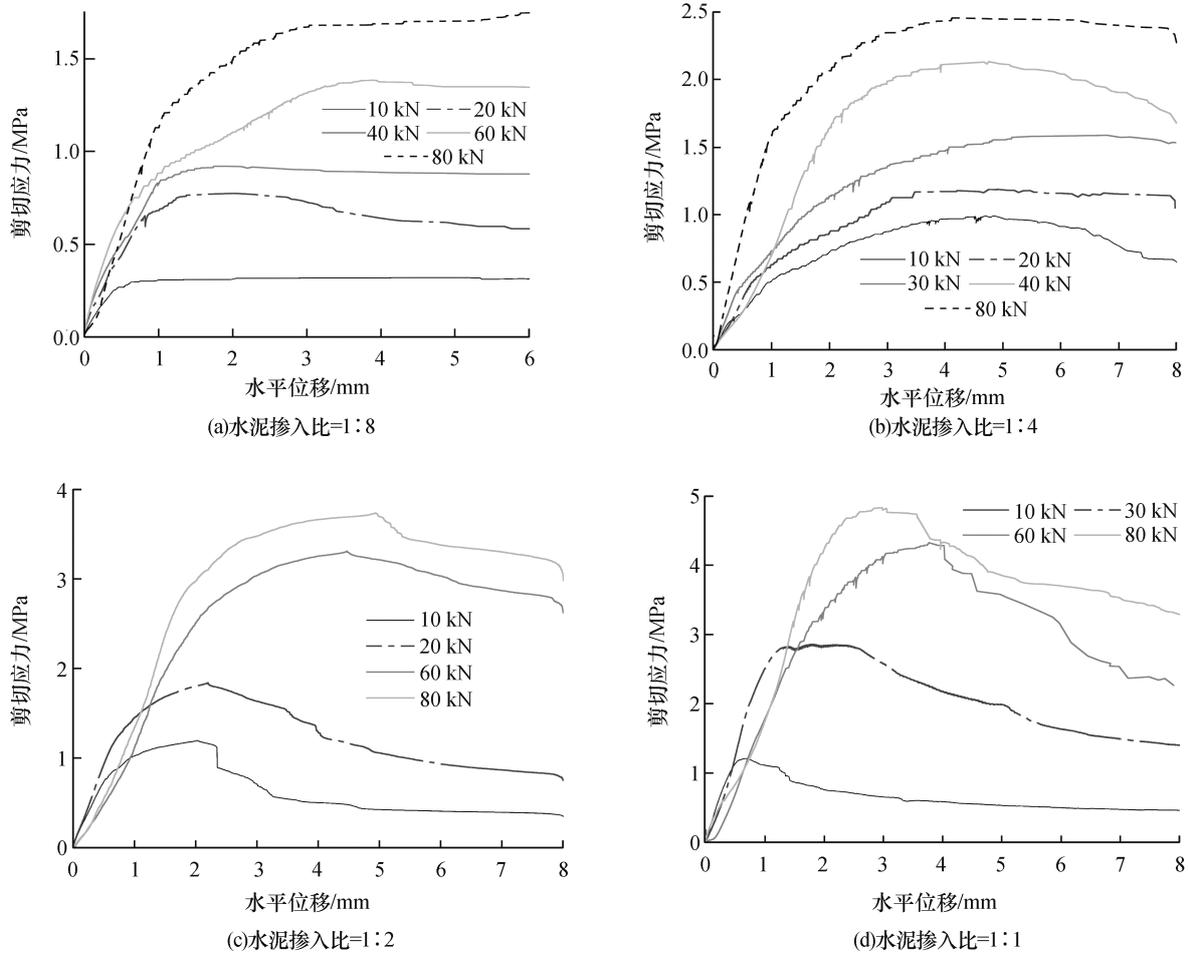


图3 不同法向下红黏土水泥固结体剪应力-剪位移关系曲线

Fig.3 Shear stress-shear displacement relationship curve of red clay cement consolidation under different normal forces

图4中数据点的拟合结果显示,所提取的试验数据具有较高的规律一致性。图4中所呈现的拟合直线,并不能直观呈现水泥掺入比对红黏土固结体抗剪强度指标的影响规律性,表明水泥掺入比对红黏土固结体抗剪强度指标( $c, \varphi$ )的影响并不相同。

根据已作出的剪切力水平位移曲线图,分别取各水泥掺入比不同法相力条件下水泥土试件破坏的剪切峰值强度,根据这些数据,分别作出4种水泥掺入比条件下的固结体抗剪强度参数拟合结果图,相对应的根据拟合结果可以求出各水泥掺入比下黏聚力与内摩擦角的参数,得到表2所示的红黏土水泥固结体抗剪强度指标与水泥掺入比

之间的对应性关系。

表2 红黏土固结体抗剪强度参数  
Table 2 Shear strength parameters of red clay consolidation

水泥掺入比(质量份数)	$c$ /MPa	$\varphi$ / ( $^\circ$ )
1 : 1	1.00	61.54
1 : 2	0.99	52.35
1 : 4	0.80	36.26
1 : 8	0.22	35.19

为了更为直观的呈现红黏土固结体抗剪强度指标与水泥掺入比之间的关系,将表2中的数据,绘于图5中。

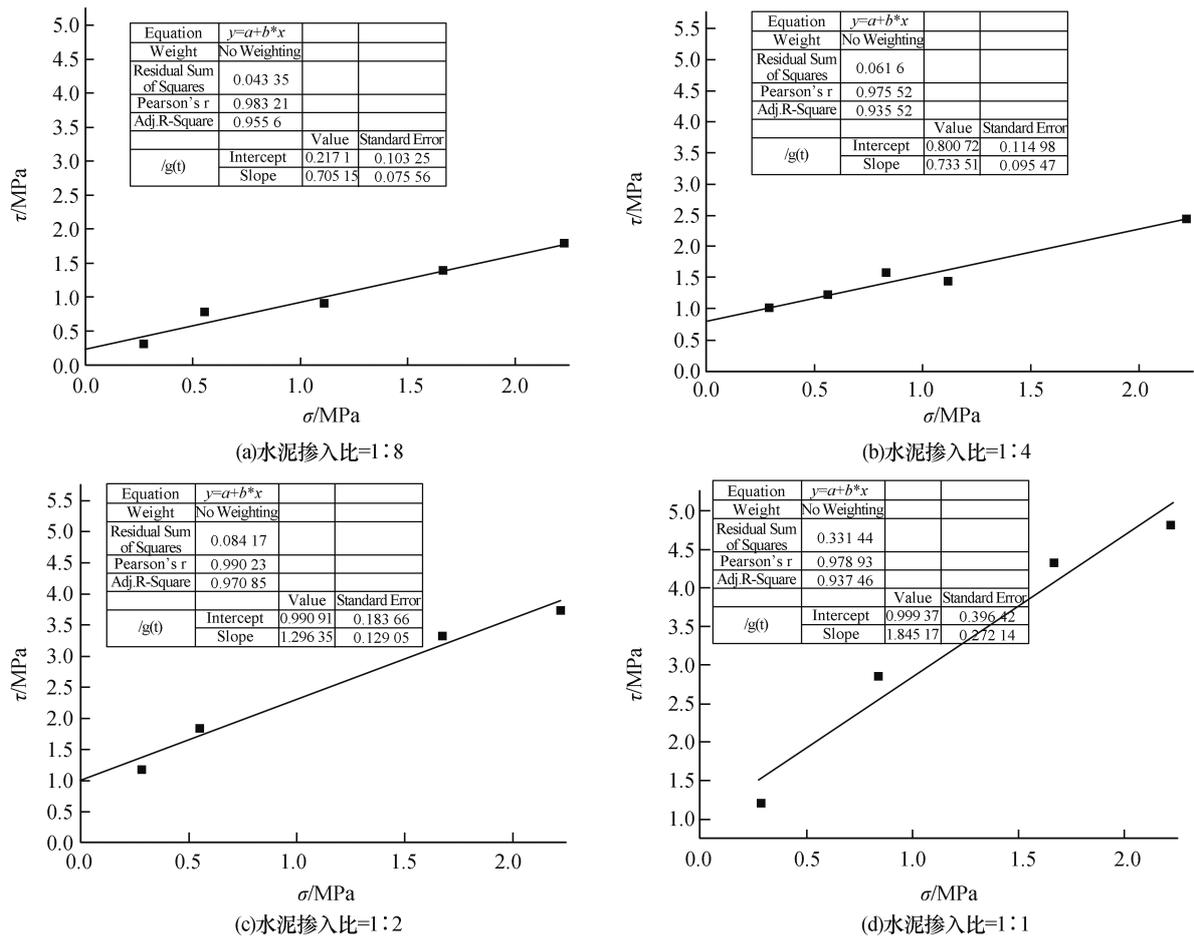


图4 红黏土水泥固结体抗剪强度参数及其拟合结果图

Fig. 4 Shear strength parameters of red clay cement consolidation and fitting result diagram

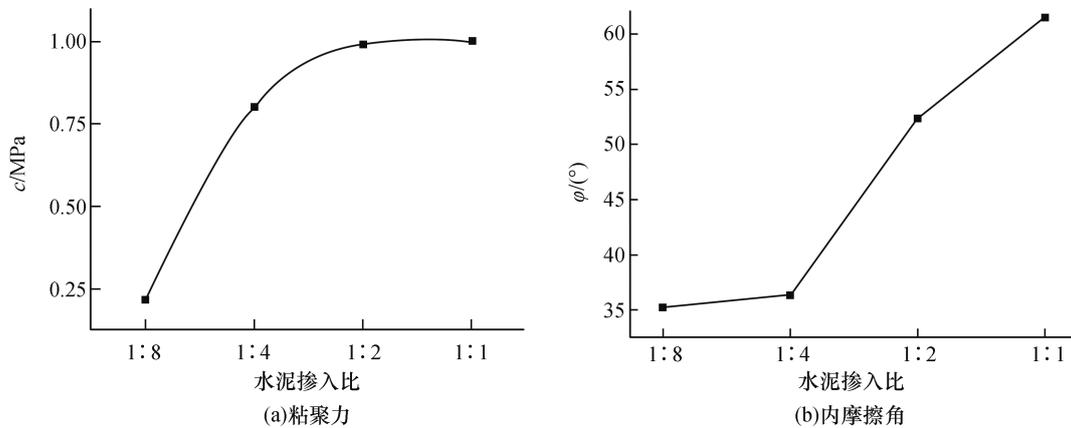


图5 剪切力学参数与水土比关系结果图

Fig. 5 Result diagram of relation between shear mechanics parameters and soil-water ratio

从图5可以直观看出:红黏土水泥固结体抗的剪强度指标,粘聚力  $c$  与内摩擦角  $\varphi$ , 都随水泥掺入比的增大而逐渐增大,但是增大的规律性上,两者呈现出不同的变化关系;随着水泥掺入比的不断增大,粘聚力的增大速率逐渐减小,当水泥掺

入比超过 1:2 时,水泥掺入量再增大,对粘聚力的贡献极为有限;但是内摩擦角的增大速率却随水泥掺入比的不断增大而呈“S”型变化,在水泥掺入比较小小时,内摩擦角对水泥掺量的增加不敏感,水泥掺入比较大时,内摩擦角的增长速率又会

减慢。

对于红黏土中水泥掺量较大时,固结体抗剪强度指标变化规律的差异性,笔者计划结合扫描电镜等微细观观测技术,开展进一步的深入研究工作,以尝试从现象上探究水泥掺入比对红黏土固结体抗剪强度指标影响的内在机理。

### 3 结 论

鉴于水泥土搅拌桩在基坑支护、边坡防护工程领域的广泛应用,本文以大掺量水泥对红黏土固结体抗剪强度指标的影响规律为切入点,开展了不同法向应力条件下红黏土水泥固结体的直接剪切试验,探讨和分析了水泥掺量对红黏土固结体剪应力-剪位移曲线特征、抗剪强度指标变化的影响规律,主要得到如下结论:

1)随着水泥掺量的不断增大,红黏土固结体剪切块的剪应力-剪位移关系曲线上峰值应力跌落现象逐渐显现。

2)红黏土固结体抗剪强度指标随水泥掺量的增大而提高,但是水泥掺量对红黏土固结体粘聚力与内摩擦角的影响规律不同:红黏土固结体粘聚力增大速率随水泥掺量的增大而不断减小,至掺入比为1:2后,粘聚力增长基本趋于停滞;红黏土固结体内摩擦角增大速率随水泥掺量的增大而呈“S”型增大,水泥掺量较低时,内摩擦角增长缓慢,掺量较高时,内摩擦角增长速率开始放缓。

#### 参考文献:

- [1] 王珊珊,卢成原,孟凡丽.水泥土抗剪强度试验研究[J].浙江工业大学学报,2008,36(4):456-459.
- [2] 陈开圣.干湿循环下红黏土裂隙演化规律及对抗剪强度影响[J].水文地质工程地质,2018,45(1):89-95.
- [3] 崔德山,项伟,ROHN J.离子土固化剂加固红黏土的

X射线衍射试验[J].长江科学院院报,2009,26(9):36-43.

- [4] 黄辉.红黏土无侧限抗压强度试验影响因素研究[J].湖南工业大学学报,2010,24(4):22-26.
- [5] 王海湘,于冬升,张金团,等.不同改性方法对红黏土强度的影响研究[J].施工技术,2017,46(20):120-124.
- [6] 刘之葵,郭彤,王剑.粉煤灰和二灰对桂林红黏土力学性质的影响[J].水文地质工程地质,2017,44(3):86-92.
- [7] 刘之葵,邱晓娟,雷轶.水泥改良桂林红黏土的试验研究[J].公路工程,2016,41(1):6-9;19.
- [8] 吴瑞潜,谢康和,陈先华,等.水泥和粉煤灰加固红黏土的试验研究[J].工业建筑,2006,36(7):29-31.
- [9] 印长俊,马石城.水泥红土的力学性能试验研究[J].湘潭大学自然科学学报,2004,26(2):99-101.
- [10] 李晓全,马石城,屈畅姿,等.水泥红黏土的强度试验研究[J].公路工程,2007,32(6):49-52.
- [11] 郭培玺,阮怀宁.红黏土地区水泥土强度的试验研究[J].岩土工程技术,2006,20(3):132-135.
- [12] 汤怡新,刘汉龙,朱伟.水泥固化土工程特性试验研究[J].岩土工程学报,2000,22(5):549-554.
- [13] 刘宝臣,李翠娟,潘宗源,等.水泥搅拌法改良桂林红黏土力学性质试验研究[J].工程地质学报,2012,20(4):633-638.
- [14] 肖桂元,龙建云,钟倩丽,等.水泥外加剂对红黏土强度的影响[J].桂林理工大学学报,2016,36(2):260-263.
- [15] 施灿海,李猛,王绍强,等.改良云南红黏土强度特性研究[J].科学技术与工程,2011,11(9):2137-2140.
- [16] 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.
- [17] 吴超.砂砾改良高液限红黏土的试验研究[J].山西建筑,2008,34(19):96-98.
- [18] 邓庆德,王群英,李勇辉,等.循环流化床粉煤灰固化红黏土研究[J].公路,2015,60(5):177-180.

(责任编辑:扶文静)