

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2020.02.007

辽西地区粗颗粒泥质砂岩水泥改良试验研究

胡 敏¹, 杨果林², 刘 洋², 肖洪波³

(1. 湖南科技大学 建筑与艺术学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075;
3. 中建五局土木工程有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘 要: 为探索辽西地区具有强膨胀性的粗颗粒泥质砂岩作为高速铁路路基填料的适用性, 在常规试验方法受到局限的情况下, 通过改进试验仪器, 克服了粒径对试验方法的限制, 对水泥改良后的粗颗粒泥质砂岩进行了无荷膨胀率试验、膨胀性试验、加州承载比(CBR)试验。结果表明: 水泥的掺入对粗颗粒泥质砂岩的膨胀性有明显的抑制作用, 且最佳水泥添加质量分数为6%, 此时, 路基填料的CBR值从原土样的2.6提高到11.2, 改良后土样的强度约提高了331%。

关键词: 粗颗粒泥质砂岩; 水泥改良; 最佳掺灰比; 膨胀性试验; 加州承载比(CBR)试验

中图分类号: U213.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2020)02-0037-06

引文格式: 胡 敏, 杨果林, 刘 洋, 等. 辽西地区粗颗粒泥质砂岩水泥改良试验研究[J]. 湖南工业大学学报, 2020, 34(2): 37-42.

An Experimental Study on the Improvement of Argillaceous Sandstone Cement in Western Liaoning

HU Min¹, YANG Guolin², LIU Yang², XIAO Hongbo³

(1. School of Architecture and Art, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China;
2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
3. Civil Engineering Co., Ltd., China Construction Fifth Engineering Bureau, Changsha 410004, China)

Abstract: This paper is to explore the applicability of coarse-grained argillaceous sandstone with strong expansibility as subgrade filler for high-speed railway in Western Liaoning Province. Under the condition that the conventional test method is limited, the limitation of the test method can be overcome by improving the test instrument, with the no-load expansion rate test, expansion test and California bearing ratio (CBR) test to be carried out for the coarse-grained argillaceous sandstone after the cement improvement. The results show that the addition of cement helps to obviously inhibit the expansion of coarse-grained argillaceous sandstone, with the optimal mass fraction of cement being 6%. Meanwhile, the CBR value of the subgrade filler increases from 2.6 of the original soil to 11.2 after improvement, with the strength increasing by about 331%.

Keywords: coarse-grained argillaceous sandstone; cement improvement; optimal cement ratio; expansibility test; California bearing ratio (CBR) test

收稿日期: 2019-10-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778641), 中国铁路设计集团有限公司科技开发课题基金资助项目(721630)

作者简介: 胡 敏(1988-), 女, 湖南湘潭人, 湖南科技大学讲师, 硕士, 主要从事建筑设计和土木工程方面的教学与研究,

E-mail: 706601045@qq.com

1 研究背景

随着国内高速铁路的飞速发展,高速铁路将穿越更多复杂的地质条件区域,但是高速铁路对其路基变形有着严格的要求,这无疑会增加高速铁路的修建技术要求。京沈客运专线途经的辽西地区,分布着大量的风化岩,其中较为常见的是泥质砂岩。这种路基土具有遇水膨胀软化、失水收缩干裂的工程特性,因而限制了施工时对路基填料的就地取材。因此,需要对泥质砂岩进行改良,以提高其作为路基填料的利用率。

对于膨胀岩性能方面的研究,国内外学者们已经取得了诸多的成果^[1-4]。如池泽成^[1]、谢云^[2]等,均采用三向膨胀仪,分别对不同地域的膨胀土进行了膨胀力的相关试验,得知膨胀土的竖向膨胀力总是大于其横向膨胀力。杨长青^[3]、钟志彬^[4]等以膨胀性泥岩为研究对象,在室内开展了原状岩样浸水物化膨胀性试验,得知岩样吸水膨胀变形具有显著的时间效应。傅学敏等^[5]对软岩(砂质泥岩、泥岩)进行了大量的膨胀性试验,并且探究了软岩的宏观膨胀规律,同样发现岩样的膨胀率有很强的时间效应,并且证明了岩样的层理方向对其膨胀率也有一定的影响。

国内外学者们对于改良膨胀岩土样方面的研究也相对较多,如刘雨等^[6]对水泥改良的泥质板岩粗粒土样进行了大型静三轴试验,得出了该改良土样的轴向应力-应变关系,并且得知改良后土样的抗压强度、黏聚力和弹性模量均得到了显著提高,土样的线弹性变形范围也显著扩大,但是其内摩擦角的变化不大。孙姣姣等^[7]研究了渗透时间对水泥改良土样的强度以及渗透性能的影响,发现制备的水泥改良土样的抗压强度随着渗透时间的增加而降低,但是其渗透系数随着渗透时间的增加而增大。刘占一^[8]通过剪切试验,不仅对水泥改良土样的机理进行了分析,而且对改良土样的主要影响因素进行了探讨,试验结果表明,经水泥改良后可以较大幅度地提高土样的抗剪强度,并且随着土样初始含水率与水泥掺入量的增加,土样的抗剪强度均不断增加。闫爱军^[9]用水泥对黄土状土样进行了改良,并且经过对比试验获得了最佳的改良方案。高建伟等^[10]用水泥对膨胀性土进行了改良,并且通过试验研究了水泥改良膨胀土的强度特性,所得结果表明,水泥的添加不仅抑制了膨胀土的膨胀性能,并且增强了改良土的水稳性和土体强度。

综上所述,水泥是一种良好的膨胀土改良剂,水泥的添加既能抑制土样的膨胀性能,也能增加土样

的抗剪强度^[11-14]。但是已有的研究成果大多数停留在对细颗粒小环刀试样的研究,而对于土颗粒粒径超过 20 mm 的膨胀土样的研究相对较少,因此,本文拟通过改良现有仪器,对泥质砂岩进行大粒径原状土的改良试验,这样的试验结果会更加贴近实际工程,以期对现场改良泥质砂岩作为路基填料方案提供更具价值的理论参考。

2 基本参数

本课题组依照铁路工程土工试验规程^[15],对辽西地区的泥质砂岩进行了大量的室内土工试验,得出了该地区泥质砂岩的基本物理力学指标,具体指标与数据如表 1 所示。

表 1 辽西地区泥质砂岩的基本物理力学指标

Table 1 Basic physical and mechanical indicators of argillaceous sandstone in Western Liaoning

最大干密度 / (g·cm ⁻³)	最优含水率 / %	颗粒密度 / (g·cm ⁻³)	自由膨胀率 / %	液限 / %	塑限 / %	塑性指数
1.728	19.8	2.701	51	48	33.13	14.86

实验过程中发现,该地区泥质砂岩具有黏性土的特征,虽然在烘干状态时较为坚硬,但是遇水后即呈泥浆状。因此,对辽西地区的泥质砂岩进行了干筛和湿筛的对比,得到的泥质砂岩级配曲线与级配情况如图 1 和表 2 所示。

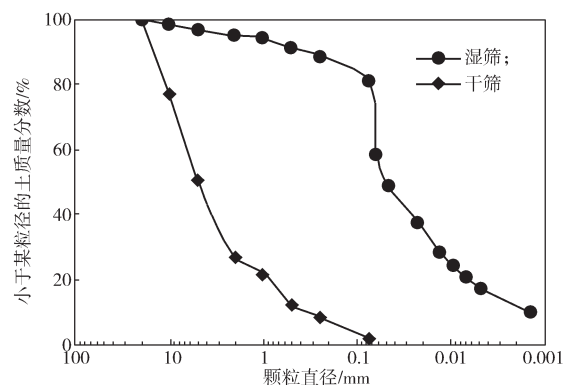


图 1 泥质砂岩级配曲线

Fig. 1 Argillaceous sandstone grading curves

表 2 泥质砂岩级配情况

Table 2 Shale sandstone grading

处理方式	d_{10}/mm	d_{30}/mm	d_{60}/mm	C_c	C_u	级配情况
干筛	0.33	2.2	6.2	2.4	18.8	级配良好
湿筛	0.001 4	0.013 4	0.060 0	2.0	45.4	级配良好

表 2 中, d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 分别为粒径分布曲线上的纵坐标上质量分数等于 10%、30%、60% 时对应的粒径,其中 d_{10} 称为有效粒径; C_c 为曲率系数; C_u 为不均匀系数。

由图1所示泥质砂岩干筛和湿筛的级配曲线可以得知, 经过干筛和湿筛处理后, 所得到的泥质砂岩颗粒的直径分布的差异较大, 湿筛中各颗粒粒径土的通过率大大提高。从数值上分析, 干筛中颗粒直径为 0.075 mm 的通过率仅为 1.68%, 而湿筛的同粒径土的通过率达到了 80.7%。如此巨大的差异, 说明了大中粒径的土颗粒是由细颗粒(依据铁路规范, 细颗粒土的粒径不大于 0.075 mm)黏结而成, 故大中粒径的土颗粒在遇水及外力的双重作用下可以解散为细颗粒。因此, 在室内击实试验和现场施工中, 如果遇到降水或者地下水位上升, 再加之外力做功, 将使得泥质砂岩湿土颗粒破碎, 从而形成新的级配结果。而通过湿筛的泥质砂岩级配情况良好, 并且由其不均匀系数为 45.4 可以得知, 泥质砂岩具有极好的不均匀性, 易于压实。

3 试验仪器改进概述

由铁路工程土工试验规程^[15]可以得知, 土样的膨胀性试验主要有无荷膨胀率试验、有荷膨胀率试验和膨胀力试验。相比有荷膨胀率试验和膨胀力试验, 无荷膨胀率试验更能满足基床表层和基床底层填料属于无荷载和低荷载的工程实际要求, 并且具有操作简单、试验结果准确、试验效率高等优点。传统的试验试样为环刀样(直径为 61.8 mm, 高 20 mm), 且要求土样最大的颗粒粒径应小于 2 mm, 因此需要将风化岩过 2 mm 筛后再进行试验, 这与工程现场最大粒径为 20 mm 的泥质砂岩原样土有明显的差异。故综合考虑以上两点, 对改进试验, 采用体积更大的击实筒试样(直径为 152 mm, 高 116 mm)进行无荷膨胀率试验。

制作击实桶试样时的膨胀率制样刻画标记线与人工整平如图2所示。

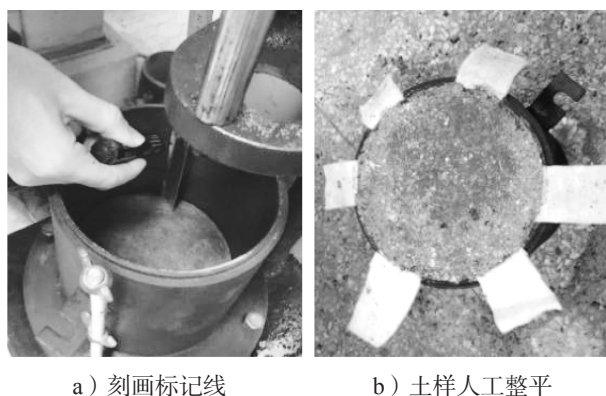


图2 膨胀率制样刻画标记线并人工整平

Fig. 2 Incremental rate sample plot line with artificial leveling

为保证改进试验的合理性和准确性, 在制作击实

桶试样时具体改进以下3点:

1) 按照所需要的压实度称取土样, 并将其分3层击入击实筒中, 每次试验结束后将击实筒清洗干净, 自然晾干后刷油养护, 以避免击实筒表面锈蚀, 造成土样与筒壁间的摩擦增大, 最终导致不能准确反映其在无荷状态下的膨胀率。

2) 试验土样过 20 mm 筛, 且需要预先计算出土样在各个压实度下的土样质量, 再将土样击入击实筒中。由于机具难于掌握, 会导致土样压实标准超过所要求的压实度。故将试样分为3层击样, 预先画好每层的刻度线, 并且最后一层应在高出筒边沿 1 cm 左右时即停止机械击样, 采用木锤人工击实, 并且整平试样表面。

3) 充分发挥土样膨胀性能的前提是土样能够充分吸水, 但是因击实筒试样的高度为 116 mm、直径为 152 mm, 加之泥质砂岩的渗透系数极小, 将严重影响试样的吸水能力。为了提高土样的渗水性能, 借鉴静三轴试验的经验, 击实土样时在筒壁周围放置6条土工布条, 以有效提高试样的渗水性能。

具体的击样过程可以分为如下3步:

第一步, 画记刻度线。因试样需要分3层进行击样, 故按照击实筒的高度(除去垫块高度 50 mm)为 116 mm, 确定每层试样高度, 约为 39 mm, 在相应位置处分别画记刻度线。

第二步, 击实第一层。按照压实度以及土样的湿密度计算出该层所需要的土样质量, 并将土样装入击实筒中, 然后用击实仪将土样击实至该层刻度线处, 再用刮刀刮毛其表面。

第三步, 制作渗透通道, 击实后两层试样。在击实完第一层后, 借鉴静三轴试验中采用滤纸条充当渗透路径的思路, 本试验中利用透水土工布条制作成渗透通道, 以加快土样的透水速度, 提高击实试验效率。在击实筒边缘放置滤条布, 并且依次击入后两层土样, 最后一层土样接近筒沿的时候, 取下击实筒, 用木锤人工击实并处理平整。

本试验均采用此种击实桶制备试样, 击实后的试样如图2b所示。

图3所示为膨胀率试验泡水读数示意图。

如图3a所示, 将击实的试样依次加装底座、透水板并架设百分表, 考虑到风化岩可能具有较强的膨胀性能, 其膨胀量可能会超过普通百分表量程, 所以选用了量程为 50 mm 的百分表。

如图3b所示, 本试验采用两组平行样, 每次测得两组压实度数据。加水前读取百分表的初读数, 然后采用上下两面同时加水的方法, 即水池加水至试样

中土样高度,同时往击实筒内加水,以提高试样的透水速率、加快土样的膨胀速率,并通过人工采集数据后绘制试样的膨胀率时程曲线。



a) 大量程百分表读数图 b) 两组平行样示意图

图3 膨胀率试验泡水读数示意图

Fig. 3 Schematic diagram of expansion test reading

4 改良土试验

4.1 原样土膨胀率试验

将过 20 mm 筛的泥质砂岩原样土采用击实筒制做试样,在 90% 和 95% 两种压实度情况下,测得泥质砂岩试样的无荷膨胀率随时间的变化曲线如图 4 所示。

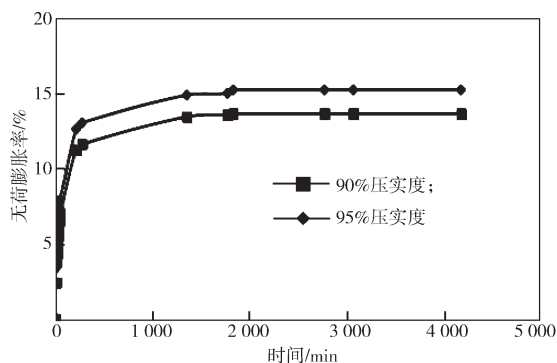


图4 不同压实度的泥质砂岩膨胀率曲线

Fig. 4 Different compaction argillaceous sandstone expansion rates

由图 4 所示不同压实度泥质砂岩膨胀率曲线可以得知,在测试前期的较短时间内,泥质砂岩的无荷膨胀率陡增,表明土样对水的敏感性强烈。过 20 mm 筛的泥质砂岩原样土试样在 95% 和 90% 两种压实度下,其无荷膨胀率分别为 15.27% 和 13.69%,且由表 1 知泥质砂岩的自由膨胀率为 51%。依据《铁路工程土工试验规程》(TB 10001—2017)^[15] 中的定名表,将泥质砂岩定名为高液限粉质黏土,属于 D 组填料,故可以得知泥质砂岩具有一定的改良价值。

4.2 水泥改良土膨胀性试验

通过查阅相关的文献资料^[6-14, 16-17],针对泥质砂岩的膨胀性和软弱性两种基本特征,选择普通的硅酸

盐水泥作为改良剂,改良目标为抑制泥质砂岩的膨胀性为主,并且兼顾改善其软弱性。为总结众多水泥改良土中的最佳水泥掺杂量,设定泥质砂岩中的水泥添加质量分数分别为 2%, 4%, 6%, 8%。

将过 20 mm 筛的不同水泥添加量的泥质砂岩改良土,采用击实筒制作试样。制样后,将试样用塑料薄膜密封养护 24 h,以保证试样内部的水分充分迁移,并且采用改进后的无荷膨胀率试验方法进行试验操作,所得到的水泥改良土膨胀率与时间关系试验结果如图 5 所示,水泥掺量与无荷膨胀率的关系曲线如图 6 所示。

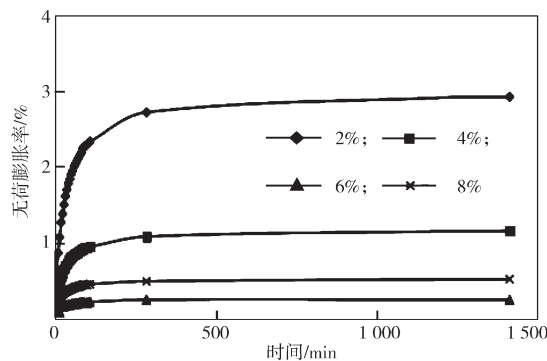


图5 水泥改良土膨胀率与时间关系曲线

Fig. 5 Relation curves of cement improved soil and time

由图 5 所示水泥改良土膨胀率与时间关系试验结果可以得知,随着试验时间的不断增加,各不同添加量水泥改良膨胀土的无荷膨胀率开始迅速增加,然后基本趋于稳定。无荷膨胀率稳定时,掺入水泥质量分数为 2%, 4%, 6%, 8% 土样的无荷膨胀率分别为 2.93%, 1.15%, 0.24%, 0.51%。可见,水泥对泥质砂岩的膨胀性抑制效果十分明显。

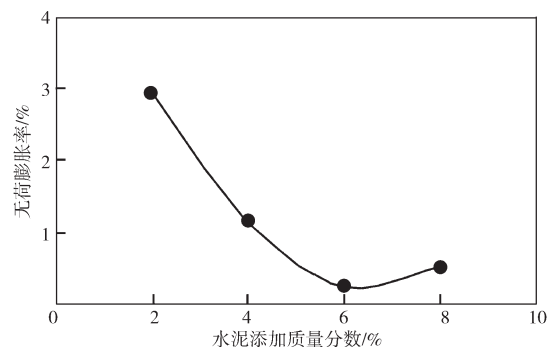


图6 水泥掺量与无荷膨胀率关系曲线

Fig. 6 Relation curves between cement content and no-load expansion rate

由图 6 所示水泥掺量与无荷膨胀率关系试验结果可以得知,随着水泥添加质量分数的增加,泥质砂岩改良土的无荷膨胀率呈现出先逐渐减小再逐渐增大的变化趋势。当水泥添加质量分数为 6% 时,土样的

无荷膨胀率达最小值, 为 0.23%, 表明此条件下对泥质砂岩的抑制效果最明显。因此, 当以膨胀率作为判断标准时, 泥质砂岩存在最佳的水泥掺量, 即水泥的添加质量分数为 6% 左右。

4.3 水泥改良土强度试验

对过 20 mm 筛的泥质砂岩原样土和经添加质量分数为 6% 的水泥改良土试样, 采用加州承载比 (California bearing ratio, CBR) 试验测定其强度, CBR 值能反映土样的路用强度性能。表 3 所示为泥质砂岩原样土和水泥添加质量分数为 6% 的改良土的 CBR 值。

表 3 泥质砂岩改良前后的 CBR 值

Table 3 CBR values before and after the improvement of argillaceous sandstone

土 样	CBR 值
泥质砂岩	2.6
6% 水泥添加量改良的泥质砂岩土	11.2

由表 3 可以得知, 水泥作为改良剂, 在其最佳添加质量分数 6% 时, 改良的泥质砂岩土强度有了较大幅度的提升, 试样的 CBR 值从原样土的 2.6 提高到改良后的 11.2, 强度约提高了 331%, 达到了高速铁路路基填料的强度要求。

5 结论

本文通过改良现有仪器, 对泥质砂岩进行了大粒径原样土的改良试验, 通过测试水泥改良土膨胀率与时间关系、水泥掺量与无荷膨胀率关系及水泥改良土的强度, 可以得出如下结论:

1) 泥质砂岩作为典型的风化岩, 通过改良仪器对粗颗粒泥质砂岩进行改良试验具有一定的可行性, 其试验结果对实际工程具有更高的参考价值。

2) 水泥改良泥质砂岩具有很明显的抑制膨胀性和改善软弱性的效果, 当水泥的添加质量分数为 6% 时, 其击实桶试样的无荷膨胀率从原样土的 15.27% 减小到改良土的 0.23%, 其 CBR 值从 2.6 提升为 11.2, 强度约提高了 331%。

3) 从泥质砂岩的强度和膨胀性两方面来看, 水泥改良土相较于原样土均有较大的提升, 因此可以考虑将泥质砂岩水泥改良土作为 A、B 组填料应用于高速铁路路基填筑中, 以提高风化填料的利用率, 节约建设成本。

参考文献:

[1] 池泽成, 陈善雄, 周 哲, 等. 合肥重塑膨胀土三向

膨胀力试验研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊 1): 381-386.

CHI Zecheng, CHEN Shanxiong, ZHOU Zhe, et al. Experimental Study on Three-Dimensional Expansion Force of Remolded Expansive Soil in Hefei[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S1): 381-386.

[2] 谢 云, 陈正汉, 孙树国, 等. 重塑膨胀土的三向膨胀力试验研究 [J]. 岩土力学, 2007(8): 1636-1642.

XIE Yun, CHEN Zhenghan, SUN Shuguo, et al. Experimental Study on the Three-Dimensional Expansion Force of Remolded Expansive Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007(8): 1636-1642.

[3] 杨长青, 董 东, 谭 波, 等. 重塑膨胀土三向膨胀变形试验研究 [J]. 工程地质学报, 2014, 22(2): 188-195.

YANG Changqing, DONG Dong, TAN Bo, et al. Experimental Study on Three-Dimensional Expansion Deformation of Remolded Expansive Soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(2): 188-195.

[4] 钟志彬, 李安洪, 邓荣贵, 等. 川中红层泥岩时效膨胀变形特性试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(1): 76-86.

ZHONG Zhibin, LI Anhong, DENG Ronggui, et al. Experimental Study on the Time-Dependent Swelling Characteristics of Red-Bed Mudstone in Central Sichuan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(1): 76-86.

[5] 傅学敏, 潘清莲. 软岩的膨胀规律和膨胀机理 [J]. 煤炭学报, 1990, 15(2): 31-38.

FU Xuemin, PAN Qinglian. Rules and Mechanism for Swelling of Weak and Soft Rocks[J]. Journal of China Coal Society, 1990, 15 (2): 31-38.

[6] 刘 雨, 陈俊桦, 朱自强. 水泥改良泥质板岩粗粒土的静力特性 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2019, 50(1): 139-145.

LIU Yu, CHEN Junhua, ZHU Ziqiang. Static Mechanical Properties of Argillaceous Slate Coarse-grained Soil Improved by Cement[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2019, 50(1): 139-145.

[7] 孙姣姣, 陈四利, 张精禹, 等. 渗透时间对水泥改良土力学特性的试验研究 [J]. 施工技术, 2017, 46(3): 112-115.

SUN Jiaojiao, CHEN Sili, ZHANG Jingyu, et al. Experimental Study on Mechanical Property of Cement Modified Soil Under Permeation Time[J]. Construction Technology, 2017, 46(3): 112-115.

[8] 刘占一. 水泥改良土的剪切试验研究 [J]. 路基工程, 2016(5): 129-132.

LIU Zhanyi. Shear Test Study on Cement Modified Soil[J]. Subgrade Engineering, 2016(5): 129-132.

- [9] 闫爱军. 水泥改良黄土状土的试验研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(5): 225-228.
YAN Aijun. Experiment on Improved Loess Soil by Cement[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26(5): 225-228.
- [10] 高建伟, 余宏明, 钱玉智, 等. 水泥改良膨胀土强度特性试验研究 [J]. 公路, 2013, 58(12): 165-168.
GAO Jianwei, YU Hongming, QIAN Yuzhi, et al. Research on Strength Characteristics of Cement Modified Expansive Soil[J]. Highway, 2013, 58(12): 165-168.
- [11] 肖 杰, 王保田, 孙衣春, 等. 水泥石灰复合改良膨胀土试验 [J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(2): 9-13.
XIAO Jie, WANG Baotian, SUN Yichun, et al. Experimental Research on the Stabilized Lime-Cement Expansive Soil[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science and Technology, 2012, 10(2): 9-13.
- [12] 查甫生, 刘松玉, 杜延军. 石灰-粉煤灰改良膨胀土试验 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2007, 37(2): 339-344.
CHA Fusheng, LIU Songyu, DU Yanjun. Experiment on Improvement of Expansive Clays with Lime-Fly Ash[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007, 37(2): 339-344.
- [13] 唐云伟, 童 磊, 张国栋, 等. 水泥改良膨胀土无侧限抗压强度试验研究 [J]. 淮阴工学院学报, 2013, 22(3): 26-30.
TANG Yunwei, TONG Lei, ZHANG Guodong, et al. Test of the Unconfined Compressive Strength of Improved Cement Expansive Soil[J]. Journal of Huaiyin Institute of Technology, 2013, 22(3): 26-30.
- [14] 李朝辉, 张柯宏, 程谦恭, 等. 高铁路堤中改性膨胀土工程应用特性试验研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(3): 445-454.
LI Zhaohui, ZHANG Kehong, CHENG Qiangong, et al. Experimental Study on Application Characteristics of Improved Expansive Soil in High-Speed Railway Embankment[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(3): 445-454.
- [15] 中华人民共和国铁道部. 铁路工程土工试验规程: TB 10102—2010[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2011: 300-307.
Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for Soil Test of Railway Engineering: TB 10102—2010[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010: 300-307.
- [16] 刘 泽, 黄凯峰, 谷 明, 等. 水泥稳定红土砾石的承载特性试验研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(2): 12-16.
LIU Ze, HUANG Kaifeng, GU Ming, et al. An Experimental Study on the Bearing Characteristics of Cement Stabilized Laterite Gravel[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2019, 33(2): 12-16.
- [17] 杜瑞锋, 裴向军, 张晓超, 等. 泥质砂岩在循环荷载作用下能量响应规律的试验研究 [J]. 工程地质学报, 2019, 27(3): 505-515.
DU Ruifeng, PEI Xiangjun, ZHANG Xiaochao, et al. Experimental Study on Energy Response of Argillaceous Sandstone Under Cyclic Loading[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(3): 505-515.

(责任编辑: 廖友媛)