

文章编号:1674-599X(2022)04-0035-06

# 石灰改良膨胀土压缩特性及力学特性研究

龚锦林<sup>1</sup>,柳厚祥<sup>2</sup>,王真<sup>1</sup>

(1. 湖南省交通科学研究院有限公司,湖南 长沙 410000;2. 长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**为研究石灰改良膨胀土的力学性能,针对石灰改良膨胀土在不同石灰掺量和养护时间情况下的压缩性能、侧限抗压强度及抗剪强度进行试验分析。研究表明:随着石灰掺量及养护时间的增加,石灰改良膨胀土的压缩系数均呈现先增加后稳定的变化趋势。当石灰掺量为2%时,石灰改良膨胀土的压缩系数从0.78 MPa减小至0.18 MPa;当石灰掺量超过6%时,其压缩系数的减小幅度很小。石灰改良膨胀土的无侧限抗压强度随石灰掺量的变化呈指数分布。当养护时间为1 d,石灰掺量分别为2%、4%、6%、8%时,其无侧限抗压强度分别增加至311.9、206.9、177.8和104.8 kPa。在不同养护时间内,改良膨胀土黏聚力、内摩擦角均随着石灰掺量的增加而快速增大,且黏聚力、内摩擦角随石灰掺量的变化均呈指数分布。在养护初期,改良膨胀土的黏聚力及内摩擦角快速增加,而随着养护时间的增加,石灰逐渐絮凝,导致产生的絮凝产物含量不再增加,从而使其黏聚力及内摩擦角增长变缓。该结果可为石灰改良膨胀土的工程应用提供参考。

**关键词:**道路路堤;石灰改良膨胀土;力学特性;指数函数

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

## Study on compression characteristics and mechanical properties of lime modified expansive soil

GONG Jinlin<sup>1</sup>, LIU Houxiang<sup>2</sup>, WANG Zhen<sup>1</sup>

(1. Hunan Provincial Research Institute of Transportation Science Co., Ltd., Changsha 410000, China;

2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** To investigate the mechanical properties of the lime-treated expansive clay, the experimental analysis of compressive properties, unconfined compressive strength and shear strength was performed on the lime-treated expansive clay with different lime content and curing time. The study showed that the compression coefficient of lime-modified expansive soil showed a trend of increasing first and stabilizing eventually with the increase of lime dosing and curing time. The change of unconfined compressive strength of improved expansive soil increases exponentially with the increase of lime content. When the samples were cured for 1 d, the lime content is 2%, 4%, 6% and 8%, the unconfined compressive strength increases to 311.9, 206.9, 177.8 and 104.8 kPa, respectively. Both the cohesion and internal friction angle of the modified expansive soil increase rapidly within the curing period. Those increases exponentially at early stage of curing. However, the growth rate slows down with the increase of curing time, as the lime gradually flocculates, causing the content of produced flocculation product to stop increasing. The results can provide reference for the engineering application of lime-improved expansive soil.

**Key words:** road embankment; lime modified expansive soil; mechanical properties; exponential function

收稿日期:2022-03-19

作者简介:龚锦林(1978—),男,湖南省交通科学研究院有限公司高级工程师。

膨胀土广泛分布于中国南方地区,因其黏土矿物含量高、干缩湿胀性大<sup>[1-2]</sup>,在降雨及蒸发作用下极易导致路堤发生开裂、垮塌等灾害,影响道路安全运营,危及这些地区人们的生命财产安全<sup>[3-5]</sup>。

为减少膨胀土不良特性对道路路堤的影响,在工程中常采用化学改良的方法对其进行改性,以达到高速公路运营要求<sup>[6-7]</sup>。SECO 等人<sup>[8]</sup>利用粉煤灰对膨胀土进行改良,发现其可有效提高膨胀土力学强度。DU 等人<sup>[9]</sup>利用水泥改性膨胀土,研究了水泥改良膨胀土的微观机理,建立了水泥改良膨胀土的不同层间阳离子与表面电荷的分子模型。张明敏<sup>[10]</sup>研究了不同干湿循环次数对改良膨胀土无侧限抗压强度、黏聚力及内摩擦角等的影响。孙健峰等人<sup>[11]</sup>探讨了最佳石灰掺量、最佳掺水量和聚苯乙烯泡沫颗粒(expanded polystyrene, 简称为 EPS)掺量对复合改良土膨胀性的影响规律。王东星等人<sup>[12]</sup>通过无侧限抗压强度、动回弹模量、核磁共振及扫描电镜等试验,分析了在干湿-冻融循环作用下,水泥改性膨胀土的强度特性与微观结构随初始含水率、水泥掺量、干湿循环和冻融循环次数的变化规律。符策岭等人<sup>[13]</sup>通过石灰改良膨胀土在不同石灰掺量和养护龄期下的膨胀率、击实、直剪及干湿循环试验,获得了其力学性能和水稳定性等物理性能指标的变化规律。高晓波等人<sup>[14]</sup>研究了石灰掺量、压实系数及养护龄期对改良土无侧限抗压强度的影响,并通过灰色关联度分析法探讨了改良土无侧限抗压强度的主要影响因素。这些研究成果主要集中在由粉煤灰、石灰和水泥等材料改良过的膨胀土的强度、变形、压缩、路基的压实和承载力等方面<sup>[15-18]</sup>,但对石灰改良膨胀土水稳定性的研究较少,也未建立改良剂掺量与改良膨胀土力学特性之间的函数模型。因此,作者拟通过对不同石灰掺量和养护时间的石灰改良膨胀土进行压缩试验、无侧限抗压试验及直剪试验,研究改良膨胀土的压缩性能、无侧限抗压强度及抗剪强度参数的变化规律,建立石灰掺量与改良膨胀土的压缩性能、无侧限抗压强度及抗剪强度参数之间的函数关系,为石灰改良膨胀土工程应用提供参考。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

本试验所用膨胀土均取自广西百色市郊区,颜

色为棕黄色,裂隙发育。烘干取回的膨胀土,碾碎,过 2 mm 筛。依据《公路土工试验规程》(JTG343—2020)对其进行筛分试验,测量膨胀土试样的主要物理指标结果见表 1。由表 1 可知,该膨胀土属于弱膨胀土。本试验所用石灰为成都隆峰建材有限公司生产的优质石灰,其主要含 73.4% 的 CaO、8.5% 的 MgO 及少量 SiO<sub>2</sub>,烧失量为 25.1%。

表 1 膨胀土的基本特性

Table 1 Basic properties of expansive soil

天然含水率/%	自由膨胀率	液限/%	塑限/%	塑性指数	相对密度	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
24.1	59	43.1	27.5	15.6	2.7	18.3	1.69

### 1.2 试验方法

分别将 0、2%、4%、6%、8% 的石灰与膨胀土混合后,将其配置成含水率为 18.3% 的改良膨胀土,密封养护 24 h 后,采用静压法制备  $\Phi 61.8$  mm $\times$ 20 mm 的环刀试样及  $\Phi 50$  mm $\times$ 100 mm 圆柱形试样,试样干密度为 1.69 g/cm<sup>3</sup>。将制备好的石灰改良膨胀土试样置于湿度为 95% $\pm$ 3%,温度为 20 $\pm$ 1 °C 的室内分别养护 1、3、7、14 和 28 d 后,再进行压缩试验、无侧限抗压强度试验及直剪试验,测量改良膨胀土在不同养护时间的压缩系数、无侧限抗压强度和抗剪强度参数,具体试验方案见表 2。其中,压缩试验利用 GJZ 单杠杆式三联中压固结仪进行,试验过程中竖向荷载分别按照 25、50、100、200、400 和 800 kPa 的进行递增加载,每级加载时间为 24 h。

表 2 试验方案

Table 2 Test scheme

石灰掺量/%	养护时间/d	竖向荷载/kPa	试验
0、2、4、6、8	1、3、7、14、28	25、50、100、200、400、800	压缩试验
		100、200、300、400	直剪试验
		—	无侧限抗压强度、

## 2 试验结果与分析

### 2.1 改良膨胀土压缩特性

石灰改良膨胀土压缩系数随石灰掺量的变化曲线如图 1 所示。从图 1 可以看出,在同一养护时间内,随着石灰掺量的增加,石灰改良膨胀土的压缩系数显著减小,最终趋于稳定。以养护时间 1 d

为例,未添加石灰时,膨胀土的压缩系数为0.25 MPa。当石灰掺量为2%时,其压缩系数为0.18 MPa,减小幅度为28%。当石灰掺量超过6%时,其压缩系数减小趋势变得平缓,这是因为石灰掺量的增加导致改良膨胀土的微观孔隙减小,使改良改良膨胀土难以压缩,造成其压缩系数减小。随着养护时间的持续增长,改良膨胀土的石灰发生絮凝反应,进一步缩小其内部微观孔隙,导致其压缩系数迅速减小。当石灰掺量为2%,改良膨胀土的养护时间分别为1、3、7、14和28 d时,石灰改良膨胀土的压缩系数分别为0.18、0.16、0.14、0.12和0.11 MPa。当石灰掺量为6%,改良膨胀土的养护时间分别为1、3、7、14和28 d时,压缩系数分别为0.12、0.1、0.07、0.06和0.05 MPa。这表明:随着养护龄期的增加,改良膨胀土压缩系数迅速减小,最后趋于稳定。这主要原因是养护初期石灰与水反应迅速生成絮凝产物,填充孔隙,从而导致其压缩系数迅速减小,后期石灰反应完全,絮凝产物生成量减小<sup>[15]</sup>,改良膨胀土后期压缩系数趋于稳定。

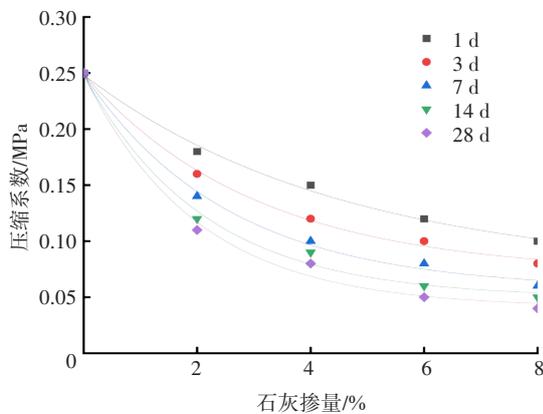


图1 压缩系数指数模型拟合曲线

Fig. 1 Fitting curve of exponential model of compression coefficient

从图1还可以看出,不同石灰掺量对石灰改良膨胀土压缩系数的变化规律符合指数函数,其表达式为:

$$\alpha = Ae^{(-x/B)} + C \quad (1)$$

式中: $\alpha$ 为改良膨胀土压缩系数,MPa; $x$ 为石灰掺量,%; $A$ 、 $B$ 、 $C$ 均为拟合参数。不同养护时间可得到5种不同的拟合结果。

① 当养护时间为1 d时,拟合表达式为:

$$\alpha = 0.071\ 74e^{(-x/0.176\ 70)} + 4.543\ 60, R^2 = 0.995\ 4(2)$$

② 养护为3 d时,拟合表达式为:

$$\alpha = 0.071\ 04e^{(-x/0.178\ 14)} + 3.026\ 08, R^2 = 0.997\ 5(3)$$

③ 养护时间为7 d时,拟合表达式为:

$$\alpha = 0.056\ 92e^{(-x/0.192\ 10)} + 2.537\ 34, R^2 = 0.996\ 4(4)$$

④ 养护时间为14 d时,拟合表达式为:

$$\alpha = 0.049\ 37e^{(-x/0.199\ 43)} + 2.114\ 42, R^2 = 0.993\ 3(5)$$

⑤ 养护时间为28 d时,拟合表达式为:

$$\alpha = 0.040\ 74e^{(-x/0.208\ 08)} + 1.992\ 65, R^2 = 0.993\ 3(6)$$

式中: $R^2$ 为均方误差。

## 2.2 改良膨胀土无侧限抗压强度

改良膨胀土无侧限抗压强度与石灰掺量的关系如图2所示。从图2可以看出,当养护时间一定时,随着石灰掺量的增加,改良膨胀土的无侧限抗压强度呈先快速增长后趋于稳定趋势,其增长幅度随石灰掺量的增加而逐渐减小。以养护时间为1 d的改良膨胀土为例,未掺入石灰时膨胀土的无侧限抗压强度为227.8 kPa,当石灰掺量为2%时,无侧限抗压强度为539.7 kPa。增长幅度达136.9%。当石灰掺量分别为4%、6%和8%时,无侧限抗压强度分别为746.6、924.4和1 059.2 kPa,增幅分别为227.7%、305.8%和365.0%。当石灰掺量一定时,在养护初期的改良膨胀土的无侧限抗压强度急剧增长,随着养护时间的延长,强度增长趋缓。当石灰掺量为4%时,改良膨胀土在养护时间分别为1、3、7、14和28 d时,无侧限抗压强度分别为746.6、857.2、968.5、1 027.6和1 075.2 kPa。将改良膨胀土的无侧限抗压强度和石灰掺量进行拟合,两者之间符合指数函数,其表达式为:

$$F = Ae^{(x/B)} + C \quad (7)$$

式中: $F$ 为改良膨胀土无侧限抗压强度,MPa; $x$ 为石灰掺量,%; $A$ 、 $B$ 、 $C$ 均为拟合系数。

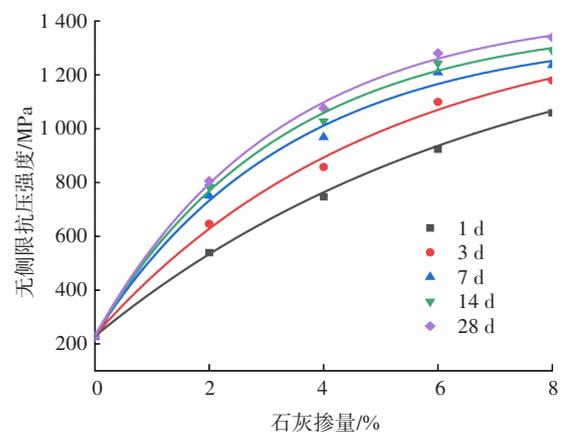


图2 改良膨胀土无侧限抗压强度随石灰掺量变化规律

Fig. 2 Variation of unconfined compressive strength of modified expansive soil with the amount of lime admixture

在5种不同养护龄期下,可得到5种不同的拟合函数。

1) 当养护时间为1 d时,拟合表达式为:  

$$F = 1460.50e^{(x/1.232.13)} + 7.02, R^2 = 0.9984$$
 (8)

2) 当养护时间为3 d时,拟合表达式:  

$$F = 1427.05e^{(x/1.195.57)} + 4.97, R^2 = 0.9956$$
 (9)

3) 当养护时间为7 d时,拟合表达式为:  

$$F = 1359.28e^{(x/1.128.56)} + 3.40, R^2 = 0.9938$$
 (10)

4) 当养护时间为14 d时,拟合表达式为:  

$$F = 1398.87e^{(x/1.168.45)} + 3.24, R^2 = 0.9973$$
 (11)

5) 当养护时间为28 d时,拟合表达式为:  

$$F = 1446.07e^{(x/1.216.49)} + 3.20, R^2 = 0.9986$$
 (12)

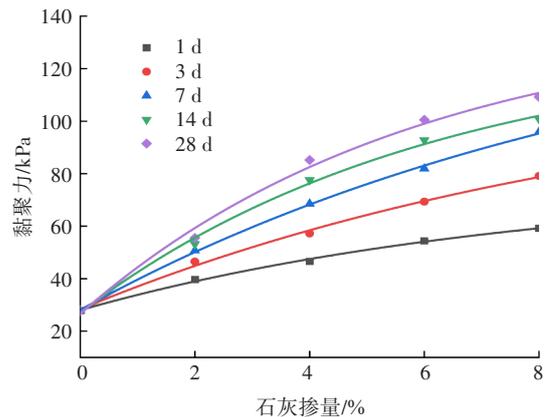
式中: $R^2$ 为均方误差。

从式(8)~(12)可知,随着养护时间的持续增长,拟合系数A、B均随之先减小后增大,而系数C随养护时间的增长一直减小。

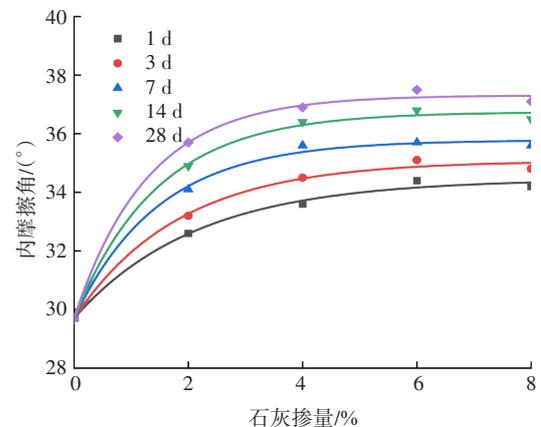
### 2.3 改良膨胀土抗剪强度

改良膨胀土的抗剪强度参数随石灰掺量的变化规律,如图3所示。从图3(a)可以看出,在不同养护期内,改良膨胀土黏聚力c均随着石灰掺量的增长而快速增长。养护时间为1 d时,未掺入石灰的膨胀土的黏聚力仅为27.8 kPa,石灰掺量分别为2%、4%、6%和8%的石灰改良膨胀土,其黏聚力分别为39.7、46.6、54.4和59.2 kPa,增幅分别为42.8%、67.6%、95.7%和112.9%。这主要原因是养护时间为1 d时,石灰絮凝程度较小,主要起填充孔隙及增强颗粒间黏聚的作用。当养护时间延长后,石灰絮凝产物逐渐增多,改良膨胀土的黏聚力快速增长,而随着养护时间的持续,石灰逐渐完全絮凝,导致产生的絮凝产物含量不再增加,从而使其黏聚力增

长幅度逐渐减小。从图3(b)还可以看出,随着石灰含量的增长,其内摩擦角开始快速增长,后趋于稳定,这主要是由于掺入石灰后,石灰细度较小,黏聚力较大且逐渐与水发生反应,从而使膨胀土颗粒发生聚集,形成大颗粒,增加了颗粒间滚动的难度,从而使其内摩擦角增大。随着石灰掺量持续增长,其内部絮凝程度逐渐变缓,从而导致其内摩擦角增长速率变缓,与文献[14,16]结论一致。



(a) 黏聚力与石灰掺量之间的关系



(b) 内摩擦角与石灰掺量之间的关系

图3 改良膨胀土抗剪强度参数随石灰掺量变化规律

Fig. 3 Variation of shear strength parameters of modified expansive soil with lime admixture

从图3可以看出,改良膨胀土黏聚力c、内摩擦角φ与石灰掺量之间的关系为:黏聚力c、内摩擦角φ与石灰掺量间均符合指数函数,拟合结果见表3。

表3 黏聚力c、内摩擦角φ与石灰掺量间指数函数关系

Table 3 Exponential function between cohesion c, internal friction angle φ and lime admixture

养护时间/d	黏聚力	内摩擦角
1	$c = 76.99e^{(x/48.98)} + 7.90, R^2 = 0.9976$	$\varphi = 34.45e^{(x/4.75)} + 2.14, R^2 = 0.9939$
3	$c = 120.55e^{(x/92.20)} + 10.13, R^2 = 0.9971$	$\varphi = 35.07e^{(x/5.39)} + 1.83, R^2 = 0.9949$
7	$c = 151.43e^{(x/123.34)} + 10.16, R^2 = 0.9992$	$\varphi = 35.78e^{(x/6.09)} + 1.47, R^2 = 0.9967$
14	$c = 130.31e^{(x/103.33)} + 6.17, R^2 = 0.9966$	$\varphi = 36.74e^{(x/7.05)} + 1.45, R^2 = 0.9975$
28	$c = 139.80e^{(x/113.12)} + 5.87, R^2 = 0.9939$	$\varphi = 37.31e^{(x/7.61)} + 1.29, R^2 = 0.9974$

### 3 结论

本研究通过压缩试验、无侧限抗压试验及直剪试验,分析了石灰改良膨胀土在不同石灰掺量、养护时间时的压缩性能、无侧限抗压强度及抗剪强度参数,得到结论为:

1) 随着石灰掺量及养护时间的增加,石灰改良膨胀土的压缩系数均呈现出先增加后趋于稳定的趋势,且石灰掺量与改良膨胀土的压缩系数间符合指数函数关系。

2) 改良膨胀土的无侧限抗压强度与石灰掺量的关系符合指数函数,随着养护时间的持续增长,其拟合参数 $A$ 、 $B$ 均先减小后增大,而参数 $C$ 随养护时间的增长一直减小。

3) 不同养护时间下,改良膨胀土黏聚力 $c$ 、内摩擦角 $\varphi$ 与石灰掺量间均符合指数函数增长趋势,养护时间为1 d时,掺量分别为2%、4%、6%和8%石灰改良膨胀土的黏聚力的增幅分别为42.8%、67.6%、95.7%和112.9%。

#### 参考文献(References):

- [1] 陶坚,王桂尧,常婧美,等. 香根草根系对膨胀土渗透性影响试验研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(4): 10-16. (TAO Jian, WANG Guiyao, CHANG Jingmei, et al. Experimental study on the effect of vetiver root system on the permeability of expansive soil [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(4): 10-16. (in Chinese))
- [2] 范峥,李金明,何李. 降雨条件下膨胀变形对膨胀土边坡暂态饱和区的影响研究[J]. 公路与汽运, 2021(6): 69-73. (FAN Zheng, LI Jinming, HE Li. Study on the effect of swelling deformation on the transient saturation zone of swelling soil slope under rainfall conditions [J]. Highways & Automotive Applications, 2021(6): 69-73. (in Chinese))
- [3] 文畅平. 基于LADE-DUNCAN模型的生物酶改良膨胀土弹塑性本构关系研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(11): 4190-4200. (WEN Changpin. Study on elasto-plastic constitutive relation of bio-enzyme treated expansive soil based on LADE-DUNCAN model [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(11): 4190-4200. (in Chinese))
- [4] 刘维正,徐阳,石志国,等. 湿化作用下改良膨胀土永久变形特性多级加载试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 296-305. (LIU Weizheng, XU Yang, SHI Zhiguo, et al. Characterization of permanent deformation of modified expansive soil under wetting effect using multi-stage dynamic triaxial test [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 296-305. (in Chinese))
- [5] 刘宽,叶万军,高海军,等. 干湿环境下膨胀土力学性能劣化的多尺度效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2148-2159. (LIU Kuan, YE Wanjun, GAO Haijun, et al. Multi-scale effects of mechanical property degradation of expansive soils under drying-wetting environments [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 2148-2159. (in Chinese))
- [6] VIJAYAN D S, PARTHIBAN D. Effect of solid waste based stabilizing material for strengthening of expansive soil-A review [J]. Environmental Technology & Innovation, 2020(20): 101108.
- [7] LU Y, LIU S, ZHANG Y, et al. Freeze-thaw performance of a cement-treated expansive soil [J]. Cold Regions Science and Technology, 2020(170): 102926.
- [8] SECO A, RAMÍREZ F, MIQUELEIZ L, et al. Stabilization of expansive soils for use in construction [J]. Applied Clay Science, 2011, 51(3): 348-352.
- [9] DU J, ZHOU A, LIN X, et al. Revealing expansion mechanism of cement-stabilized expansive soil with different interlayer cations through molecular dynamics simulations [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2020, 124(27): 14672-14684.
- [10] 张明敏. 干湿循环对粉煤灰改良路堤膨胀土影响试验研究[J]. 湖南交通科技, 2020, 46(4): 34-36. (ZHANG Minming. Experimental study on the influence of dry-wet cycle on expansive soil of fly ash improved embankment [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2020, 46(4): 34-36. (in Chinese))
- [11] 孙健峰,李明东,潘耀森,等. 石灰-EPS颗粒复合改良膨胀土的膨胀性研究[J]. 水力发电, 2022, 48(6): 109-112, 118. (SUN Jianfeng, LI Mingdong, PAN Yaosen, et al. Study on the expansion of lime-EPS particles composite modified expansive soil [J]. Water power, 2022, 48(6): 109-112, 118. (in Chinese))
- [12] 王东星,张子伟,王协群,等. 干湿-冻融循环作用下水泥改性膨胀土的路用性能与微观机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 306-316. (WANG Dongxing, ZHANG Ziwei, WANG Xiequn, et al.

- Performance and micromechanism of cement-modified expansive soils under the influence of freeze-thaw and dry-wet cycles [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53 (1) : 306-316. (in Chinese))
- [13] 符策岭,曾召田,莫红艳,等.石灰改良膨胀土的工程特性试验研究[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2019, 44 (2):524-533.(FU Celing, ZENG Zhaotian, MO Hongyan, et al. Experimental study on the engineering characteristics of the improved expansive soils with lime [J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2019, 44(2):524-533.(in Chinese))
- [14] 高晓波,阮波,田晓涛,等.贵州地区石灰改良膨胀土无侧限抗压强度的试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2014, 11 (6) : 68-71.(GAO Xiaobo, RUAN Bo, TIAN Xiaotao, et al. Experiment study on unconfined compressive strength of lime stabilized expansive soil in Guizhou Province [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2014, 11(6):68-71.(in Chinese))
- [15] 王佩,宋新江,徐海波,等.水泥改性膨胀土基本特性试验[J]. *水利水电科技进展*, 2021, 41(3):56-60.(WANG Pei, SONG Xinjiang, XU Haibo, et al. Experiments on basic characteristics of cement-modified expansive soil [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, 41(3):56-60. (in Chinese))
- [16] 邓云叶,文畅平.干湿循环下石灰粉煤灰改良膨胀土的双屈服面本构关系[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53 (2) : 75-83.(DENG Yunye, WEN Changping. Constitutive relation with double yield surfaces of expansive soil improved by lime and flyash subjected to wetting-drying cycles [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(2):75-83.(in Chinese))
- [17] 边加敏.石灰改良膨胀土重塑后抗剪强度特性及应用[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(10) : 103-109.(BIAN Jiamin. Remoulded lime-treated expansive soil: shear strength and application [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(10) : 103-109.(in Chinese))
- [18] 商拥辉,徐林荣,刘维正,等.重载铁路水泥改良膨胀土工程特性与路用性能[J]. *西南交通大学学报*, 2020, 55 (5) : 1044-1051.(SHANG Yonghui, XU Linrong, LIU Weizheng, et al. Engineering characteristics and road performance of cement-stabilized expansive soil for heavy haul railways [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2020, 55(5):1044-1051.(in Chinese))

(责任编辑:欧兆虎;校对:罗容 李脉;英文编辑:陈璐)