

文章编号: 1674—8247(2022)05—0005—05

DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2022.05.002

# 干湿循环下水泥改良高液限黏土力学特性试验

张海凤

(鲁南高速铁路有限公司, 济南 250014)

**摘要:**对水泥掺量为4%、5%、6%、8%和10%的水泥改良高液限黏土试样进行干湿循环处理,开展三轴压缩试验和无侧限抗压强度试验,研究改良土的黏聚力、内摩擦角和无侧限抗压强度随干湿循环次数的变化规律。研究表明:(1)内摩擦角、黏聚力和无侧限抗压强度均随干湿循环次数的增加而衰减,无侧限抗压强度和黏聚力的衰减较大,内摩擦角的衰减较小(小于10%);(2)随着水泥掺量的增加,干湿循环作用导致的衰减效应逐渐减弱;(3)当水泥掺量为4%、5%和6%时,无侧限抗压强度和黏聚力的衰减率较大,最大衰减率均大于10%;(4)当水泥掺量大于等于8%,黏聚力和无侧限抗压强度的衰减率较小,最大衰减率均小于10%;(5)工程中可选取8%作为最优水泥掺量配置改良高液限黏土。

**关键词:**改良高液限黏土;力学特性;三轴压缩试验;无侧限抗压强度试验

中图分类号: TU411

文献标识码: A

## Test on Mechanical Properties of Cement-improved High Liquid Limit Clay during Drying-wetting Cycle

ZHANG Haifeng

(Lunan High-speed Railway Co., Ltd., Jinan 250014, China)

5

**Abstract:** The cement-improved high liquid limit clay samples with a cement content of 4%, 5%, 6%, 8% and 10% were subject to drying-wetting cycle, and triaxial compression test and unconfined compressive strength test were carried out to study how the cohesion, internal friction angle and unconfined compressive strength of the improved soil change with the changes of the number of drying-wetting cycles. The results show that: (1) The internal friction angle, cohesion and unconfined compressive strength attenuate as the number of drying-wetting cycles increases. The attenuation rate of unconfined compressive strength and cohesion is relatively large, while the attenuation rate of internal friction angle is relatively small (less than 10%). (2) With the increase of cement content, the attenuation effect caused by drying-wetting cycle gradually weakens. (3) When the cement content is 4%, 5% and 6%, the attenuation rates of unconfined compressive strength and cohesion are relatively large, and their maximum attenuation rates are all greater than 10%. (4) When the cement content is 8% or more, the attenuation rates of cohesion and unconfined compressive strength are small, and their maximum attenuation rates are all less than 10%. (5) In projects, 8% can be selected as the optimal cement content to prepare the improved high liquid limit clay.

**Key words:** modified high liquid limit clay; mechanical properties; triaxial compression test; unconfined compressive strength test

公路和铁路路基建设过程中常遇到高液限黏土。高液限黏土具有天然含水率大、渗透性及水稳

性较差、压实困难等特点,属于工程中的典型不良土。为满足工程应用,需要对高液限黏土进行改良

收稿日期: 2022-09-26

作者简介: 张海凤(1981-),男,高级工程师。

引文格式: 张海凤. 干湿循环下水泥改良高液限黏土力学特性试验[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(5): 5-9.

ZHANG Haifeng. Test on Mechanical Properties of Cement-improved High Liquid Limit Clay during Drying-wetting Cycle[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(5): 5-9.

处理。

水稳性差的土常可采用化学方法进行改良。工程中常见的化学改良方法包括水泥改良、石灰改良和粉煤灰改良等。通常利用常规试验条件下的 CBR 试验、无侧限抗压强度试验、三轴压缩试验和直剪试验对化学改良高液限黏土的强度特性开展研究,并根据强度指标大小评价改良效果,以确定改良土的最优配合比<sup>[1-4]</sup>。然而,常规试验条件没有考虑干湿循环作用的影响,与工程实际相差较大。在我国南方地区,由于地区雨水充足,地下水位上升和下降是十分常见的事情,干湿循环的影响是路基出现病害的主要原因<sup>[5]</sup>。因此,对于很多路基工程项目,即便路基填料在常规试验条件下的强度满足工程项目或规范要求,路基仍会因干缩湿胀而出现开裂、不均匀沉降和滑塌等病害。为此,许多学者对改良土的干湿循环特性进行了研究,针对木质素改良土,夏林枫等<sup>[6]</sup>设计了干湿循环条件下的三轴压缩试验,在分析干湿循环作用对黏聚力和内摩擦角影响的基础上,评价改良效果;崔宏环等<sup>[7]</sup>利用干湿循环试验研究了干湿循环对 CBR 值的影响,评价了水泥改良粉质黏土的改良效果。目前,现有研究通常是采用单一的试验指标评价改良效果和确定最优的改良技术参数<sup>[8-11]</sup>,工程应用效果通常较差。

本文对不同水泥掺量的试样开展干湿循环条件下的三轴压缩试验和无侧限抗压强度试验,分析黏聚力、内摩擦角和无侧限抗压强度等强度参数与干湿循环次数之间的关系,综合试验结果评价改良效果,确定最优水泥掺量等技术参数,工程应用效果通常较差。

## 1 试验方案

### 1.1 制样和试样干湿循环处理

土样取自广西百色市,塑性指数为 22.1,液限是 56.8%,为高液限黏土。考虑到工程应用中改良土内掺入水泥的质量百分比(以下简称水泥掺量)通常大于 3%<sup>[12-15]</sup>,在高液限黏土中分别掺入质量百分比为 4%、5%、6%、8%和 10%的水泥,根据相应的最优含水率和最大干密度制作试样。素土(水泥掺量为 0)和水泥改良土的塑性指数、液限、最大干密度和最优含水率等物理参数如表 1 所示。

针对土样的干湿循环处理,目前尚未有统一的试验标准。本文参照文献[10]提出的方法对试样进行干湿循环处理:首先,对试样实施标准养护,当养护龄期达到 28 d 后,在室温条件下让试样自然风干,直至试样的含水率减少 30%。然后,利用真空饱和法让试

样吸水饱和,此操作过程为对试样进行 1 次干湿循环处理。重复该操作过程可以对试样开展多次干湿循环处理。对于本文试验,干湿循环次数记为  $M$ , $M$  取值为 0、2、4、8 和 14,即本文试验需要对经历 0、2、4、8 和 14 次干湿循环处理的试样开展试验。

表 1 素土和水泥改良土的物理参数表

水泥掺量 / %	塑性指数	液限 / %	最大干密度 / (g/cm <sup>3</sup> )	最优含水率 / %
0	22.1	56.8	1.77	21.5
4	20.3	44.5	1.78	17.8
5	19.2	41.4	1.80	18.2
6	18.4	40.6	1.82	18.4
8	17.8	38.4	1.83	18.7
10	17.2	37.2	1.86	19.1

### 1.2 三轴压缩试验

利用 TSZ-6A 型应变控制式三轴仪对经过干湿循环处理的试样开展固结不排水三轴压缩试验。试样为圆柱体,高度为 80 mm,直径为 39.1 mm。围压分别为  $S = 100、150、300$  kPa。先在试样侧向和轴向施加围压,让试样等向固结,然后在轴向施加偏压荷载。用应变控制模式进行轴向加载,轴向加载速率为 0.06%/min。

试样的水泥掺量方案有 5 种,水泥掺量分别为 4%、5%、6%、8%和 10%。对应任意 1 种水泥掺量方案,每个围压加载下均需要 5 个水泥掺量相同的试样,这 5 个试样分别经历 0、2、4、8 和 14 次干湿循环处理。由于加载时的围压为 3 个,因此,三轴压缩试验一共需要 75 个试样。

对试验数据进行处理,根据摩尔库伦强度准则得到土的黏聚力和内摩擦角。对于经过  $M$  次干湿循环处理的试样,试样的黏聚力和内摩擦角分别记为  $C_M$  和  $\varphi_M$ 。由试验结果可以得到水泥掺量不同试样的  $C_M \sim M$  关系和  $\varphi_M \sim M$  关系。

### 1.3 无侧限抗压强度试验

利用电液伺服的无侧限抗压试验仪对经过干湿循环处理的试样开展无侧限抗压强度试验。试样为圆柱体,直径为 50 mm,高为 50 mm。加载模式为力加载。在试样轴向施加力,加载速率为 0.8 mm/min。和三轴压缩试样一样,无侧限抗压强度试样的水泥掺量方案同样有 5 种(水泥掺量分别为 4%、5%、6%、8%和 10%)。对应任意 1 种水泥掺量方案,均需要制作 5 个水泥掺量相同的试样,并对这 5 个试样分别进行 0、2、4、8 和 14 次干湿循环处理,因此,无侧限抗压强度试验所需试样数为 25 个。

对于经过  $M$  次干湿循环处理的试样, 设其无侧限抗压强度为  $Y_M$ 。由试验结果可以得到水泥掺量不同试样的  $Y_M \sim M$  关系。

2. 试验结果及分析

2.1 三轴试验结果及分析

(1) 干湿循环对黏聚力的影响

对于水泥掺量不同的改良土, 黏聚力和干湿循环次数之间的关系 ( $C_M \sim M$ ) 如表 2 所示。

表 2 黏聚力和干湿循环次数关系表

水泥掺量 / %	不同干湿循环次数下试样的黏聚力 $C_M$ / kPa				
	$M = 0$	$M = 2$	$M = 4$	$M = 8$	$M = 14$
4	221.2	195.1	179.6	170.5	164.8
5	242.3	218.6	212.0	198.9	195.8
6	267.4	253.5	247.1	238.5	229.2
8	285.6	275.3	268.7	261.3	260.8
10	312.4	306.8	301.2	294.3	289.0

从表 2 可看出, 当水泥掺量一定时, 黏聚力  $C_M$  随干湿循环次数  $M$  的增加而衰减。例如, 当水泥掺量为 5% 时, 随着  $M$  从 0 增加到 14,  $C_M$  从 221.2 kPa 衰减到 164.8 kPa。例如, 当水泥掺量为 8% 时, 随着  $M$  从 0 增加到 14,  $C_M$  从 285.6 kPa 衰减到 260.8 kPa。

为反映黏聚力的衰减程度, 设干湿循环条件下黏聚力的衰减率为:

$$\alpha_M = \frac{c_0 - c_M}{c_0} \tag{1}$$

式中:  $\alpha_M$ ——经过  $M$  次干湿循环处理试样的黏聚力相对未经历干湿循环处理试样的黏聚力的衰减幅度。

根据式(1),  $0 \leq \alpha_M \leq 1$ ,  $\alpha_M$  能反映黏聚力随干湿循环次数增加而衰减的程度。 $\alpha_M$  越接近 1, 表明干湿循环对黏聚力的衰减作用越大;  $\alpha_M$  越接近 0, 则表明干湿循环对黏聚力的衰减作用越小。

对于水泥掺量不同的试样,  $\alpha_M$  与  $M$  之间的关系如图 1 所示。

由图 1 可知, 水泥改良土的黏聚力的衰减率随干湿循环次数的增大而增大,  $M = 14$  时黏聚力的衰减率最大, 即  $\alpha_{14}$  最大。当水泥掺量为 4%、5%、6%、8% 和 10% 时,  $\alpha_{14}$  分别为 25.5%、19.2%、14.3%、8.7% 和 7.5%。随着水泥掺量的增大, 黏聚力的最大衰减率减小, 这表明随着水泥掺量的增加, 改良土的黏聚力受干湿循环的劣化影响减小。当水泥掺量大于 8% 时, 黏聚力的衰减率较小, 最大衰减率小于 10%。

(2) 干湿循环对内摩擦角的影响

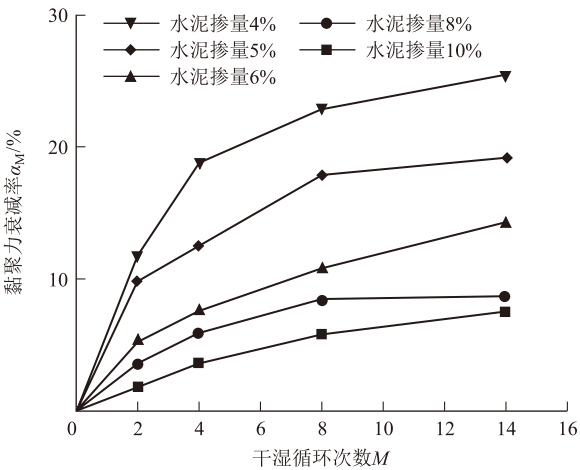


图 1 黏聚力衰减率随干湿循环次数变化曲线图

对于不同水泥掺量的改良土, 其内摩擦角和干湿循环次数之间的关系 ( $\varphi_M \sim M$ ) 如表 3 所示。当水泥掺量一定时, 内摩擦角  $\varphi_M$  随干湿循环次数  $M$  的增加而衰减。当水泥掺量为 4% 时, 随着  $M$  从 0 增加到 14,  $\varphi_M$  从 34.6° 衰减到 31.5°; 当水泥掺量为 6% 时, 随着  $M$  从 0 增加到 14,  $\varphi_M$  从 37.8° 衰减到 35.8°。

表 3 内摩擦角和干湿循环次数关系表

水泥掺量 / %	不同干湿循环次数下试样的内摩擦角 $\varphi_M$ / (°)				
	$M = 0$	$M = 2$	$M = 4$	$M = 8$	$M = 14$
4	34.6	32.4	32.0	31.8	31.5
5	36.1	34.6	34.0	33.7	33.5
6	37.8	36.7	36.4	36.0	35.8
8	38.7	38.0	37.7	37.6	37.4
10	39.5	39.1	38.8	38.6	38.4

为反映内摩擦角的衰减程度, 设干湿循环条件下内摩擦角衰减率为:

$$\beta_M = \frac{\varphi_0 - \varphi_M}{\varphi_0} \tag{2}$$

式中:  $\beta_M$ ——经过  $M$  次干湿循环处理后试样的内摩擦角相对未经历干湿循环处理试样的内摩擦角的衰减幅度。

根据式(2),  $0 \leq \beta_M \leq 1$ ,  $\beta_M$  能反映内摩擦角随干湿循环次数增加而衰减的程度。 $\beta_M$  越接近 1, 则干湿循环对内摩擦角的衰减作用越大; 反之, 干湿循环对内摩擦角的衰减作用越小。

对于不同水泥掺量的试样,  $\beta_M$  与  $M$  之间的关系如图 2 所示。

由图 2 可知, 水泥改良土的内摩擦角衰减率随干湿循环次数的增大而增大,  $M = 14$  时内摩擦角的衰减



率最大,即  $\beta_4$  最大。当水泥掺量为 4%、5%、6%、8% 和 10% 时,  $\beta_4$  分别为 9.0%、7.2%、5.3%、3.4% 和 2.8%,均小于 10%。随着水泥掺量的增大,内摩擦角的最大衰减率逐渐减小,且最大衰减率较小。由此可见,干湿循环作用虽然对内摩擦角产生一定的劣化影响,但影响较小。

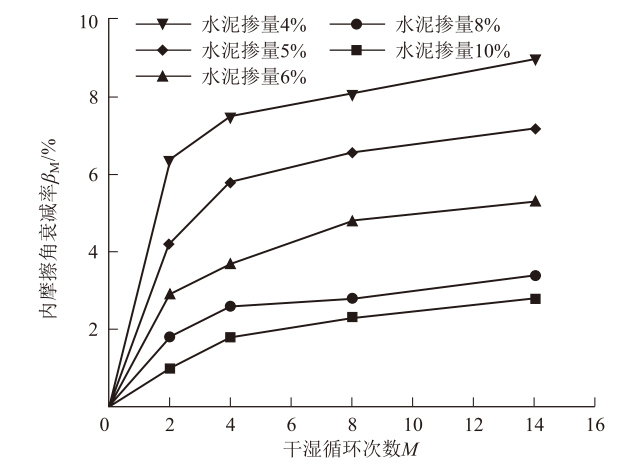


图 2 内摩擦角衰减率随干湿循环次数变化曲线图

2.2 无侧限抗压强度试验结果及分析

对于水泥掺量不同的改良土,其无侧限抗压强度和干湿循环次数之间的关系( $Y_M \sim M$ )如表 4 所示。

表 4 改良试样的无侧限抗压强度和干湿循环次数的关系表

水泥掺量 /%	不同干湿循环次数下试样的无侧限抗压强度 $Y_M$ /kPa				
	$M = 0$	$M = 2$	$M = 4$	$M = 8$	$M = 14$
4	846.5	696.7	640.0	612.0	600.2
5	874.6	745.2	696.2	659.4	652.5
6	976.2	862.0	843.4	822.0	817.1
8	1 065.3	992.9	984.3	967.3	960.9
10	1 235.4	1 190.9	1 169.9	1 137.8	1 130.4

从表 4 可看出,当水泥掺量一定时,无侧限抗压强度  $Y_M$  随干湿循环次数  $M$  的增加而衰减。例如,当水泥掺量为 5% 时,随着  $M$  从 0 增加到 14,  $Y_M$  从 874.6 kPa 衰减到 620.1 kPa;当水泥掺量为 8% 时,随着  $M$  从 0 增加到 14,  $Y_M$  从 1 065.3 kPa 衰减到 960.9 kPa。

为反映无侧限抗压强度的衰减程度,设干湿循环条件下无侧限抗压强度衰减率为:

$$\gamma_M = \frac{Y_0 - Y_M}{Y_0}$$

(3)

式中: $\gamma_M$ ——经过  $M$  次干湿循环处理后试样的无侧限抗压强度相对未经历干湿循环处理试样的无侧限抗

压强度的衰减幅度。

由式(3)可知,  $0 \leq \gamma_M \leq 1$ ,  $\gamma_M$  能反映无侧限抗压强度随干湿循环次数增加而衰减的程度。 $\gamma_M$  越接近 1,则干湿循环对无侧限抗压强度的衰减作用越大;反之,干湿循环对无侧限抗压强度的衰减作用越小。

对于水泥掺量不同的试样,  $\gamma_M$  与  $M$  之间的关系如图 3 所示。由图 3 可知,水泥改良土的无侧限抗压强度衰减率随干湿循环次数的增大而增大,  $M = 14$  时无侧限抗压强度的衰减率最大,即  $\gamma_{14}$  最大。当水泥掺量为 4%、5%、6%、8% 和 10% 时,  $\gamma_{14}$  分别为 29.1%、25.4%、16.3%、9.8% 和 8.5%。由此可见,随着水泥掺量的增大,无侧限抗压强度的最大衰减率逐渐减小。以上分析表明,随着水泥掺量的增加,改良土的无侧限抗压强度受干湿循环的劣化影响减小;当水泥掺量大于 8% 时,无侧限抗压强度的衰减率较小,最大衰减率  $\gamma_{14}$  小于 10%。

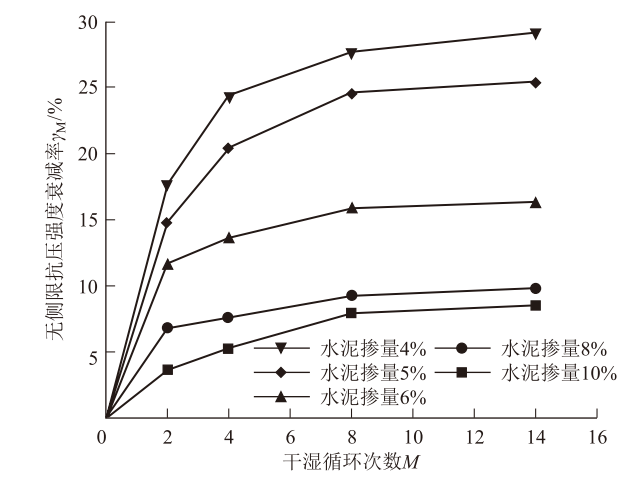


图 3 无侧限抗压强度衰减率随干湿循环次数变化曲线图

3 结论

对不同水泥掺量的改良高液限黏土试样开展干湿循环条件下的三轴压缩试验和无侧限抗压强度试验,研究干湿循环作用对黏聚力、内摩擦角和无侧限抗压强度等强度指标的影响,得到的主要结论如下:

(1) 干湿循环作用下,水泥改良高液限黏土的黏聚力、内摩擦角和无侧限抗压强度等强度指标会随干湿循环次数的增加而逐渐衰减。干湿循环作用对黏聚力和无侧限抗压强度的衰减作用较大,对内摩擦角的衰减作用较小。

(2) 随着水泥掺量的增加,黏聚力、内摩擦角和无侧限抗压强度等强度指标在干湿循环条件下的衰减

效应减小。随着水泥掺量的增加,改良土抵抗干湿循环衰减影响的性能逐渐提高。

(3) 当水泥掺量大于等于 8% 时,干湿循环作用下黏聚力、内摩擦角和无侧限抗压强度的衰减率均较小,最大衰减率均小于 10%。工程实际应用中可选取 8% 作为最优水泥掺量配置水泥改良高液限黏土。

## 参考文献:

- [1] 郑德平. 高液限黏土工程特性及改良试验研究[J]. 路基工程, 2022(1): 66-71.  
ZHENG Deping. Experimental Study on Engineering Characteristics and Improvement of High Liquid Limit Clay [J]. Subgrade Engineering, 2022(1): 66-71.
- [2] 李柱, 王宏. 电石灰改良高液限黏土强度特性研究[J]. 施工技术, 2021, 50(9): 103-106.  
LI Zhu, WANG Hong. Study on Strength Characteristics of High Liquid Limit Clay Improved by Calcium Carbide Dust [J]. Construction Technology, 2021, 50(9): 103-106.
- [3] 于宝富, 王明岳, 巩曰明, 等. 木质素改良高液限黏土试验研究[J]. 北方交通, 2021(3): 63-66.  
YU Baofu, WANG Mingyue, GONG Yueming, et al. Experimental Study on High Liquid Limit Clay Improved by Lignin [J]. Northern Communications, 2021(3): 63-66.
- [4] 夏北伟. 废旧混凝土再生粉料改良高液限黏土试验研究[J]. 城市道桥与防洪, 2022(7): 187-190.  
XIA Beiwei. Experimental Study on Improvement of High Liquid Limit Clay with Recycled Powder of Waste Concrete [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2022(7): 187-190.
- [5] 刘雨, 朱自强, 陈俊桦. 干湿循环条件下水泥改良泥质板岩粗粒土的静力特性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(3): 679-686.  
LIU Yu, ZHU Ziqiang, CHEN Junhua. Experimental Research on Static Mechanical Properties of Cement-Improved Argillite-Slate Coarse-Grained Soil under Drying-Wetting Cycles [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(3): 679-686.
- [6] 夏林枫, 董伟智, 葛世平, 等. 干湿循环条件下的木质素改良土三轴试验研究[J]. 吉林建筑大学学报, 2020, 37(4): 35-38.  
XIA Linfeng, DONG Weizhi, GE Shiping, et al. Analysis of Soil Improved by Lignin in Triaxial Test under Wetting-Drying Cycles [J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2020, 37(4): 35-38.
- [7] 崔宏环, 朱超杰, 杨尚礼, 等. 干湿循环作用下改良粉质粘土的路用性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 42-49.  
CUI Honghuan, ZHU Chaojie, YANG Shangli, et al. Road Performance of Improved Silty Clay under the Action of Drying-Wetting Cycles [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(2): 42-49.
- [8] 陈乐求, 张家生, 陈俊桦. 泥质板岩改良土物理力学性质试验[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2017, 30(1): 63-68.  
CHEN Leqiu, ZHANG Jiasheng, CHEN Junhua. Test of Physical and Mechanical Properties of Improved Argillite-Slate Soil [J]. Journal of Hunan Institute of Science and Technology (Natural Sciences), 2017, 30(1): 63-68.
- [9] 费少刚, 王保田, 单熠博, 等. 硅灰、水泥复合改良膨胀土试验研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(9): 190-193.  
FEI Shaogang, WANG Baotian, SHAN Yibo, et al. Experimental Study on Composite Improvement of Expansive Soil with Silica Fume and Cement [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(9): 190-193.
- [10] 王建华, 高玉琴. 干湿循环过程导致水泥改良土强度衰减机理的研究[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(5): 23-27.  
WANG Jianhua, GAO Yuqin. Study on the Strength Degradation Mechanism of Cement-Soils Resulting from Dry-Wet Cycles [J]. China Railway Science, 2006, 27(5): 23-27.
- [11] 曾帅, 曾长贤, 卞友艳, 等. 干湿循环过程中红黏土改良土路基填料试验研究[J]. 铁道建筑, 2020, 60(6): 82-84.  
ZENG Shuai, ZENG Changxian, BIAN Youyan, et al. Experimental Study on Red Clay Improved Soil as Subgrade Filler in the Process of Dry-Wet Cycles [J]. Railway Engineering, 2020, 60(6): 82-84.
- [12] 余先江. 低液限粉土及其改良土干湿循环特性试验研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2012, 25(1): 86-88.  
YU Xianjiang. Test Study on Engineering Properties of Low Liquid Limit Silt and Improved Soil under Wetting-Drying Cycle [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science), 2012, 25(1): 86-88.
- [13] 张瑜, 黄珂, 朱文旺. 水泥、石灰改良粉土试验研究[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(3): 33-36.  
ZHANG Yu, HUANG Ke, ZHU Wenwang. Experimental Study on Cement and Lime to Improve Silt Soil [J]. China Harbour Engineering, 2017, 37(3): 33-36.
- [14] 戴范, 刘枫, 黄希望, 等. 一级公路高液限土水泥改良试验研究[J]. 中外公路, 2020, 40(1): 240-242.  
DAI Fan, LIU Feng, HUANG Xiwang, et al. Experimental Study on Cement Improvement of High Liquid Limit Soil of First Class Highway [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(1): 240-242.
- [15] 陈维超, 杨伟军. 水泥改良砂土无侧限抗压强度试验研究[J]. 中外公路, 2019, 39(6): 188-196.  
CHEN Weichao, YANG Weijun. Experimental Research on Unconfined Compressive Strength of Cement Improved Sand [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(6): 188-196.