

# Experimental Study on Water Stability of Red Sandstone and Its Improved Soil

Jian Zhang<sup>1</sup>, Tianyi Hu<sup>2</sup>, Shaozhen Li<sup>3</sup>, Peizhai Xia<sup>4</sup>, Zhaoyuan Lv<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Jinan Jinyu Highway Survey and Design Research Co. Ltd., Jinan Shandong

<sup>2</sup>School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

<sup>3</sup>Jinan Highway Administration, Jinan Shandong

<sup>4</sup>Jinan Jinnuo Highway Engineering Supervision Co. Ltd., Jinan Shandong

Email: 345286503@qq.com, 1078985798@qq.com, 1768814865@qq.com, 1040861683@qq.com, \*1365866766@qq.com

Received: Sep. 1<sup>st</sup>, 2019; accepted: Sep. 12<sup>th</sup>, 2019; published: Sep. 19<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Through the disintegration test of red sandstone, the disintegration law and disintegration mechanism are summarized. The dry-wet cycle and long-term water immersion test of red sandstone improved soil were carried out to study the variation law of unconfined compressive strength and quality of red sandstone improved soil under dry and wet cycles and long-term water immersion conditions. The results show that the red sandstone has very poor water stability and is easily disintegrated after water contact. After the first disintegration, the content of particles larger than 5 mm is only 31%. And the larger the particle size, the stronger the disintegration and the faster the disintegration speed. The cement and lime are used to solidify the disintegrated soil separately. When the amount of cementing material is higher (8%), after 5 dry and wet cycles, the strength loss rate of cement-modified soil is lower than that of lime-modified soil. The structure of the test piece is relatively complete, and the mass loss rate is basically the same as that of lime-modified soil. Therefore, when the amount of the mixture is high, the water stability of the cement-modified soil is better than that of the lime-modified soil. When the amount of cementing material is low (4%, 6%), the strength loss rate of cement-modified soil is higher than that of lime-modified soil. The specimen was severely damaged, and the mass loss rate was higher than that of lime-modified soil. Therefore, the lime-modified soil has good water stability when the amount is low. Under long-term water immersion conditions, the dry shrinkage and swelling effect of the improved soil is small, and the cementitious material continues to undergo hydration reaction. Therefore, the strength of cement improved soil and lime improved soil has an upward trend. In comparison, the strength of cement-modified soil increases more, and the water stability of long-term immersion is better.

## Keywords

Disintegration Test, Dry and Wet Cycle, Long-Term Water Immersion, Unconfined Compressive Strength, Quality

---

\*通讯作者。

# 红砂岩及其改良土水稳定性试验研究

张 建<sup>1</sup>, 胡天一<sup>2</sup>, 李少祯<sup>3</sup>, 夏培斋<sup>4</sup>, 吕昭元<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>济南金衢公路勘察设计研究有限公司, 山东 济南

<sup>2</sup>山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

<sup>3</sup>济南市公路管理局, 山东 济南

<sup>4</sup>济南金诺公路工程监理有限公司, 山东 济南

Email: 345286503@qq.com, 1078985798@qq.com, 1768814865@qq.com, 1040861683@qq.com, \*1365866766@qq.com

收稿日期: 2019年9月1日; 录用日期: 2019年9月12日; 发布日期: 2019年9月19日

## 摘 要

通过对红砂岩进行崩解试验, 总结了其崩解规律及崩解机理; 分别利用水泥及石灰对崩解土进行改良处理, 对养护28 d龄期后的红砂岩改良土进行干湿循环和长期浸水试验, 探究其在干湿循环和长期浸水条件下无侧限抗压强度及质量的变化规律。研究结果表明, 红砂岩水稳定性极差, 遇水后极易崩解, 第一次崩解后, 粒径大于5 mm的颗粒含量仅剩31%, 粒径越大, 崩解性就越强, 崩解速度就越快; 利用水泥和石灰改良后的红砂岩, 水稳定性大大提高。胶凝材料掺量较高(8%)时, 经5次干湿循环后, 水泥改良土的强度损失率低于石灰改良土, 试件结构较为完整, 质量损失率与石灰改良土基本相同。故高掺量时, 水泥改良土抗干湿循环的能力更强; 胶凝材料掺量较低(4%、6%)时, 水泥改良土的强度损失率高于石灰改良土, 试件破损严重, 有大块脱落现象, 质量损失率高于石灰改良土。故低掺量时, 石灰改良土抗干湿循环的能力更强。长期浸水条件下, 改良土的干缩湿胀作用较小, 且胶凝材料继续发生水化反应, 故水泥改良土和石灰改良土强度均呈现上升趋势。相比而言, 水泥改良土强度增长幅度更高, 长期浸水下表现的水稳定性更好。

## 关键词

崩解试验, 干湿循环, 长期浸水, 无侧限抗压强度, 质量

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

红砂岩为富含铁质氧化物而呈红、深红或者褐色的砂岩、泥岩, 主要分布于我国华东、西南及中南各省区。由于其成岩的时间较晚、组成岩石的碎屑堆积物成分混杂, 且胶结物大多数为泥质成分, 导致其岩石的胶结性不良, 矿物稳定性差, 风化迅速, 其风化产物水敏感性极强, 干湿循环作用下易发生膨胀崩解, 工程性质较差[1][2]。加之红砂岩大多数属于软岩或极软岩, 单轴抗压强度较低, 所以无法直接用来填筑路基。但利用其易风化, 遇水易崩解的特点, 可将红砂岩经人工崩解后形成的崩解产物作为路基填料[3][4]。但是, 已有研究及工程实例表明, 利用崩解后的红砂岩填筑的道路在通车运营后, 路基经

常出现不均匀沉降并产生裂缝,存在一定的工程问题。尤其是在夏季多雨的情况下,加之地下水位升降的影响,红砂岩路基土常处于干湿循环或长期浸水的环境中,环境的干湿交替可改变路基土的力学状态,影响路基工程的稳定性,造成路基变形、塌陷等工程问题,从而极大地降低了行车的安全性。因此,探究红砂岩崩解性,了解红砂岩崩解规律,通过改良方法提高其水稳定性就显得尤为重要。曾胜[5]等通过计算红砂岩边坡安全系数发现,多次干湿循环后,边坡安全系数下降至天然状态下的40%,很容易发生变形破坏;曾清林[6]等通过室内崩解试验及对原状红砂岩及崩解后的红砂岩进行微观结构分析得出,崩解作用有助于红砂岩中亲水性强的矿物流失,改善其遇水膨胀特性,减少道路路基的沉降。吴道祥等[7]利用室内浸水崩解试验,分析了红砂岩崩解后颗粒级配变化情况,得出结论,红砂岩类型及其黏土矿物含量是决定红砂岩崩解性强弱的主要内在因素,且随着崩解的进行,红砂岩的崩解性逐渐减弱甚至消失;祝艳波[8]等研究表明水泥、石灰、粉煤灰等固化剂可以有效抑制红砂岩的膨胀性,使其力学性能有了较大提高,能够满足高速公路设计强度要求;王帅等研究表明水泥或石灰作为改良剂效果较好,可以大大提高红砂岩强度,改善其填料的崩解性[9];高慧芳[10]等研究表明石灰与粉煤灰复掺,其强度介于水泥固化土及石灰固化土之间,且强度呈现后期持续增长的特点。

本研究通过崩解试验,研究了原状红砂岩的崩解规律并利用水泥、石灰对红砂岩进行了改良。通过干湿循环和长期浸水试验,对比了不同工况下水泥和石灰改良土的无侧限抗压强度及质量的变化规律,并阐述了其作用机理。

## 2. 试验材料和试验方案

### 2.1. 试验材料

本试验所采用的原材料为山东章丘桃花山地区的红砂岩,利用液塑限联合测定法测得液限为27.75%,塑限为15.75%,塑性指数为12;利用密度计法测得其充分崩解后颗粒以粒径小于0.075 mm的细粒为主,为低液限粘土;采用重II-2型击实试验测得原状土及改良土的最佳含水率及最大干密度见表1;

**Table 1.** Optimal moisture content and maximum dry density of red sand and improved soil  
**表 1.** 红砂岩及改良土的最佳含水率和最大干密度

原料	比例	最佳含水率/%	最大干密度/g/cm <sup>3</sup>
红砂岩	100	8.84	2.03
石灰:红砂岩	4:96	11.31	1.98
石灰:红砂岩	6:94	12.49	1.96
石灰:红砂岩	8:92	13.01	1.93
水泥:红砂岩	4:96	9.52	2.01
水泥:红砂岩	6:94	9.78	2.00
水泥:红砂岩	8:92	10.59	1.98

### 2.2. 试验方案

将红砂岩切成4×4×4 cm的立方体试块,取12个试块进行崩解试验。将试块放入容器,加水至淹没试块。浸泡时间设置为第一次30 min,之后为每次24 h。达到浸泡时间后,将容器内崩解后的红砂岩带水依次过5 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm、0.075 mm孔径的土壤筛并反复冲洗。将各级筛中的崩解物置于烘箱内于105℃下烘干至恒重(时间不少于24 h),冷却至室温后,称取各级筛中崩解物质量。记录质量后将崩解物再次倒入容器,加水进行下一次崩解,依次循环,完成崩解实验。

将红砂岩原料进行 3 次人工浸水崩解, 烘干后用木碾碾碎, 过 5 mm 筛。按相关规程[11]制件并在标准条件下养护 28 d 后分别进行干湿循环及长期浸水试验。

干湿循环试验共制备 5 组试件(每组 6 个)。将试件放入烘箱中低温烘干 24 h (温度保持 50℃), 从烘箱中取出试件, 室温下(20℃左右)冷却 1~2 h 后称重并泡入水中浸泡 24 h, 取一组试件进行无侧限抗压强度试验, 此为一次循环, 五组试样分别进行 1、2、3、4、5 次循环。每次循环后分别测试试件的无侧限抗压强度和重量。

长期浸水试验共制备 4 组试件(每组 6 个)。分别置于水中浸泡 1 d、7 d、28 d 和 90 d 后, 测试其无侧限抗压强度。

### 3. 试验结果及分析

#### 3.1. 红砂岩的崩解性

崩解是红砂岩失去整体性, 逐步解体分散的过程。该地区红砂岩的崩解曲线如图 1 所示。由图可知, 红砂岩在解体分散过程中, 随崩解次数的增加, 粒径 > 5 mm 的颗粒呈现逐渐减少的趋势, 减少的速度先快后慢, 第一次崩解后, 其含量仅剩 31%, 崩解 3 次后, 其含量低于 10%, 说明该红砂岩水稳定性极差, 遇水后极易崩解。粒径 0.075~5 mm 的颗粒呈现先增加后降低的趋势, 均出现极值现象。粒径越大, 崩解性就越强, 崩解速度越快, 达到含量极值的崩解次数也就越少。粒径 < 0.075 mm 的颗粒在前 10 次干湿循环过程中呈持续增加趋势。

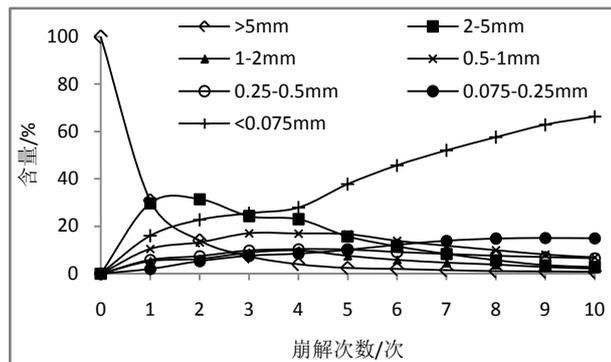


Figure 1. Red sandstone disintegration curve  
图 1. 红砂岩崩解曲线

图 2 为随崩解次数的增加, 红砂岩在不同尺寸筛孔的通过率曲线。随崩解次数的增加, 通过率曲线越来越密。说明早期的干湿循环对红砂岩的崩解效果最为明显, 每一级粒径的含量变化率较大。循环次数越多, 红砂岩崩解的越充分, 粒径变化程度也就越小。

红砂岩的浸水崩解是一种物理风化现象, 其主要与黏土矿物有关[12]。蒙脱石、伊利石和高岭石等黏土矿物颗粒与颗粒之间靠较弱的吸引力连接而成。由于结构单元表面呈负电性, 故极性水化阳离子和极性水分子易受到电性吸引进入结构单元之间, 在结构单元之间形成一层水膜, 使得层间间距增大, 从而导致岩石表面产生微小裂缝, 随着水分的不断侵入, 可溶性胶结物不断流逝[13][14], 在水的毛细作用下微裂缝不断扩展, 最终导致岩体的开裂。

#### 3.2. 干湿循环条件下改良土强度的变化规律

未改良的素土试件进行一次干湿循环, 试件便发生崩解溃散, 无侧限抗压强度为 0 MPa。掺入水泥、

石灰进行改良后, 红砂岩水稳定性有了极大提高。图 3 为改良土无侧限抗压强度随干湿循环次数的变化曲线。由图可以看出, 固化剂掺量为 4% 时, 石灰改良土的强度随循环次数的增加先上升后下降, 而水泥改良土的强度则呈现持续下降的趋势。固化剂掺量为 6% 和 8% 时, 石灰改良土和水泥改良土的强度随循环次数的增加均呈现先上升后下降的趋势。原因在于: 红砂岩改良土最优含水率较低, 拌和时加入的水, 大部分被土体吸收, 造成参与水化反应的水较少, 胶凝材料掺量较大时, 不能完全进行水化反应。从而在干湿循环初期, 随着循环次数的增加, 改良土的水化反应得到进一步发展, 强度不断提高。当干湿循环达到一定次数后, 对改良土结构产生的破坏作用不断累积, 加之土粒间的盐溶质不断流失[15], 导致改良土产生了大量微裂缝, 随循环次数的增加, 微裂缝逐渐变大, 削弱了结构的完整性, 无侧限抗压强度逐渐降低。

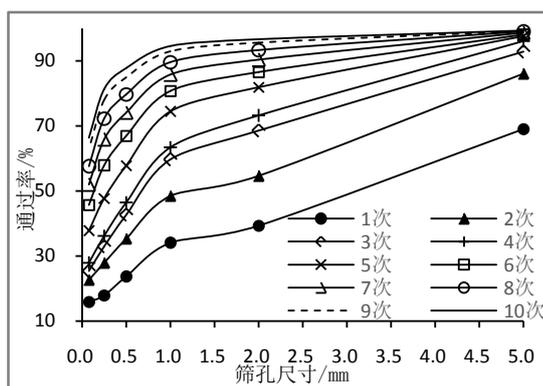


Figure 2. Red sandstone pass rate curve after disintegration  
图 2. 崩解后红砂岩通过率曲线

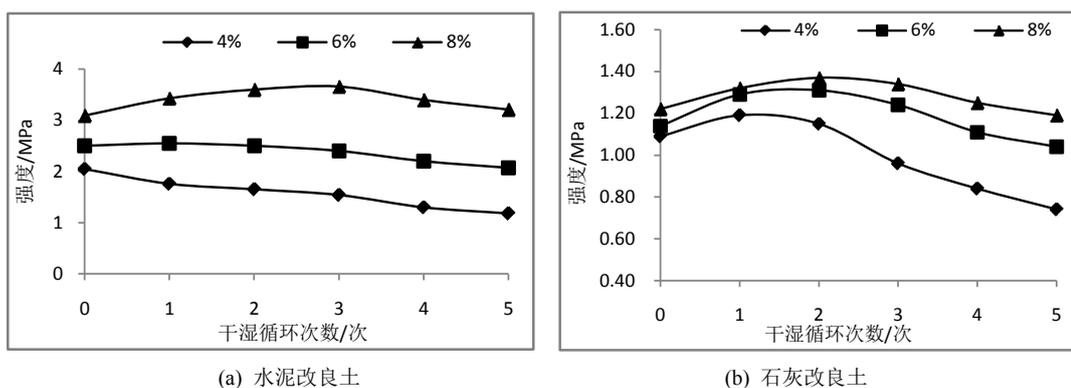


Figure 3. Relationship between improved soil strength and number of wet and dry cycles  
图 3. 改良土强度与干湿循环次数的关系

进一步分析试验结果可以发现, 随着固化剂掺量的增加, 其强度峰值点所对应的循环次数不断增大。说明固化剂掺量越高, 其水化反应所需要的循环次数越多。

经过五次干湿循环, 4% 掺量水泥、石灰改良土强度分别由 2.05 MPa、1.09 MPa 下降至 1.18 MPa、0.74 MPa, 强度损失率分别为 42.4% 和 32.1%; 6% 掺量的水泥、石灰改良土强度分别由 2.5 MPa、1.14 MPa 下降至 2.07 MPa、1.04 MPa, 强度损失率分别为 17.2% 和 8.8%。对比可知, 掺量较低(4%、6%)时, 在干湿循环下石灰改良土的强度损失率要低于水泥改良土。原因在于, 改良土中的黏粒具有吸水膨胀、失水收缩的特性。在改良土进行干湿循环时, 必然在内部发生干缩和湿胀变形。水泥改良土内部生成水化硅

酸钙凝胶及钙矾石晶体, 结构较为紧密(如图 4(a)), 本身具有一定的强度, 变形会受到水泥改良土自身强度的限制。当变形产生的应力超过水泥改良土自身的强度时, 就会在土颗粒连结薄弱处产生微裂缝, 随着干湿循环次数的不断增加, 干缩和湿胀变形也进一步增大, 导致裂缝进一步扩展, 造成强度的降低。而石灰改良土中的氢氧化钙遇水离解出的  $\text{Ca}^{2+}$  可以置换出土中的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  等阳离子, 改变了土颗粒表面带电状态, 减少了黏土颗粒表面吸附水膜的厚度, 使分子间引力增加, 有效的抑制了黏土矿物的吸水膨胀作用, 且石灰改良土相对较软, 相比于水泥改良土, 其结构较为疏松(如图 4(b)), 为干缩湿胀提供了一定的变形空间。故低掺量时, 石灰改良土在干湿循环下的性能要优于水泥改良土。对比 8% 掺量的水泥、石灰改良土, 经过 5 次干湿循环后, 水泥改良土强度增长 3.9%, 石灰改良土强度降低 2.5%。原因在于: 掺量较高时, 水泥改良土自身强度较高且处于不断发展的状态, 能够抵消大部分的干湿循环导致的变形应力。从而五次干湿循环后水泥改良土强度略高于初始状态。

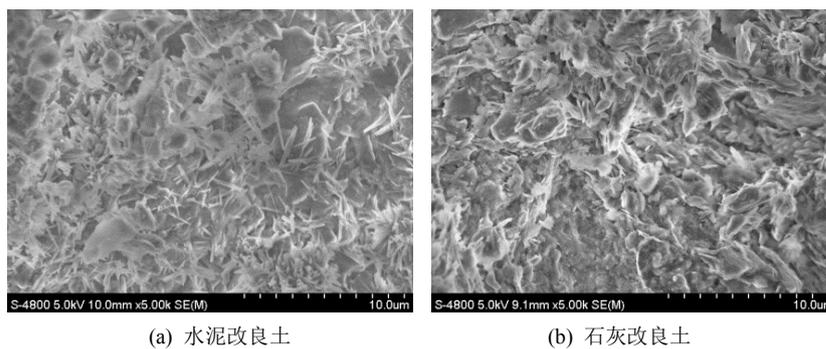


Figure 4. SEM images of improved soil at 28 days of age  
图 4. 改良土标准养护 28 d 的 SEM 照片

图 5 为改良土质量随干湿循环次数的变化规律。由图可知, 水泥、石灰改良土质量随干湿循环次数的增加呈现逐渐降低的趋势。4% 的水泥、石灰改良土经 5 次干湿循环后, 质量损失率分别为 4.02% 和 1.33%; 6% 的水泥、石灰改良土质量损失率为 1.04% 和 0.92%; 8% 的水泥、石灰改良土质量损失率为 0.59% 和 0.62%。低掺量时(4%、6%), 水泥改良土的质量损失率高于石灰改良土; 高掺量时(8%), 两种改良土结构均较完整, 无大块脱落现象, 试件形态变化差异不大, 质量损失率基本相同。

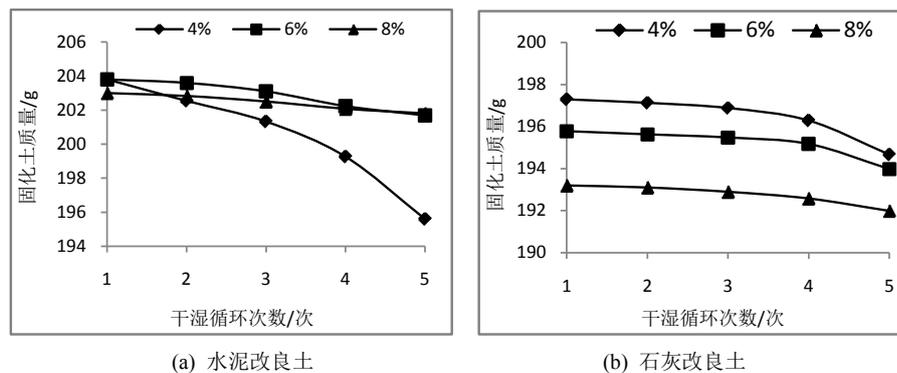


Figure 5. Relationship between improved soil quality and number of wet and dry cycles  
图 5. 改良土质量与干湿循环次数的关系

对比干湿循环后改良土的破坏形态(如图 6)可知, 对于 4% 掺量的水泥改良土, 循环 2 次时, 试件表面开始出现裂缝; 随循环次数增加, 裂缝不断扩展, 并出现了少量浅坑; 循环 5 次后, 试件边缘出现了

大块脱落，试件表面破坏严重。对于 4% 掺量的石灰改良土，其 5 次循环后试件边缘仅出现了少量脱落，表面结构相对完整，进一步说明了低掺量时，石灰改良土抗干湿循环的能力要明显优于水泥改良土。

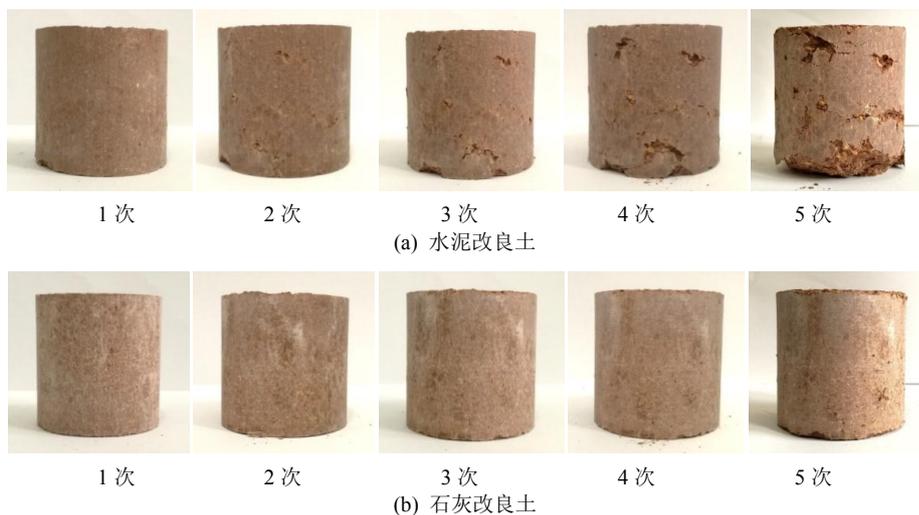


Figure 6. Variation of modified soil failure morphology with the number of dry and wet cycles  
图 6. 改良土破坏形态随干湿循环次数的变化

### 3.3. 长期浸水条件下改良土强度的变化规律

图 7 为改良土强度与浸水时间的关系曲线。由图可知，两种改良土的无侧限抗压强度随浸水时间的延长均呈现不断增长的趋势。对比可知，水泥改良土强度增幅较大，8% 掺量的水泥改良土强度由 3.09 MPa 增长至 5.03 MPa，增幅为 62.8%。相同掺量的石灰改良土增幅仅为 5.7%，且后期强度基本没有增长。原因在于，水泥改良土含水量较低，水分不足以让水泥完全进行水化，将试件浸入水中后，水分通过土颗粒间空隙逐渐渗入试件内部，未水化完全的水泥得到进一步水化，从而加强了土颗粒间的连结力，填充了土颗粒间的空隙。而且不同于干湿循环作用，长期浸水下水泥改良土不会发生循环性的干缩湿胀，从而减小了体积变化应力对结构的破坏，这就导致水泥改良土在浸水后强度一直处于上涨阶段。将石灰改良土试件浸入水中后，一部分未反应完全的石灰继续进行火山灰反应，改良土强度有了一定提高。然而，不同于水泥改良土的是，石灰改良土的火山灰反应较慢，随着浸泡时间的延长，一部分土颗粒间未反应完全的石灰和部分盐溶质溶解流失。导致土颗粒胶结性变低，颗粒间空隙的填充性变差，从而强度在并没有显著提高。所以对于长期浸水试件的水稳定性来说，水泥对红砂岩的改良效果要高于石灰。

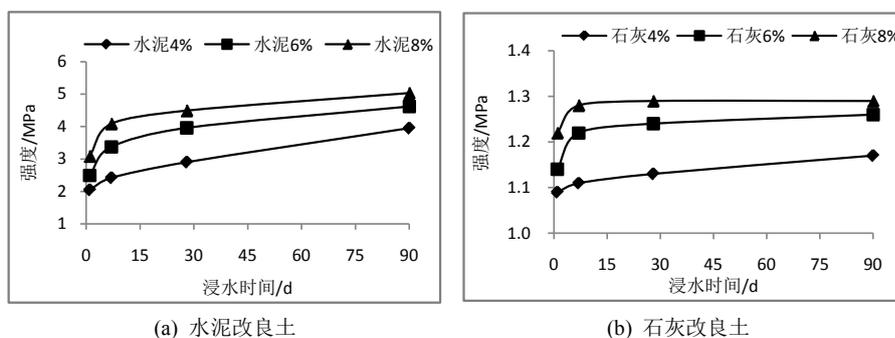


Figure 7. Relationship between improved soil strength and water immersion time  
图 7. 改良土强度与浸水时间的关系

## 4. 结论

本研究通过室内试验,研究了原状红砂岩在干湿循环条件下的崩解规律。并对改良后的红砂岩进行了干湿循环和长期浸水试验,研究了其在不同条件下的强度和重量变化,探究了胶凝材料种类及掺量对红砂岩水稳定性的改良效果。

1) 红砂岩在干湿循环条件下极易崩解,粒径越大,崩解性就越强,崩解速度就越快,粒径  $> 5 \text{ mm}$  的颗粒在第一次崩解后,其含量仅剩 31%。

2) 干湿循环条件下,胶凝材料掺量较高(8%)时,水泥改良土的强度损失率低于石灰改良土,试件结构较为完整,质量损失率与石灰改良土基本相同。故高掺量时,水泥改良土的水稳定性较好;

3) 干湿循环条件下,胶凝材料掺量较低(4%、6%)时,水泥改良土的强度损失率高于石灰改良土,试件破损严重,有大块脱落现象,质量损失率高于石灰改良土。故低掺量时,石灰改良土在水稳定性较好。

4) 长期浸水条件下,水泥改良土强度增长显著,而石灰改良土强度增长缓慢,故水泥改良土在长期浸水条件下的稳定性要高于石灰改良土。

## 参考文献

- [1] 刘宏杰. 红色泥质砂岩筑路材料的工程性质研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.
- [2] 甘文宁. 红砂岩工程特性的试验研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
- [3] 伍剑奇. 泥质红砂岩筑路材料的工程性质研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [4] 胡新民. 红砂岩水化特性及其路用改良技术研究[J]. 公路工程, 2010, 35(1): 138-142.
- [5] 曾胜, 李振存, 陈涵杰, 等. 干湿循环下红砂岩强度衰减规律及工程应用[J]. 长沙理工大学学报, 2011, 8(4): 18-23.
- [6] 曾清林. 水对泥质红砂岩的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [7] 吴道祥, 刘宏杰, 王国强. 红层软岩崩解性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 4173-4179.
- [8] 祝艳波. 红层泥岩改良土特性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2): 425-432.
- [9] 王帅, 邹静蓉, 雷润杰, 等. 怀芷高速公路红砂岩路基填料改良试验研究[J]. 路基工程, 2018, 201(6): 152-156.
- [10] 高慧芳, 王文君, 苏命命, 等. 不同固化材料及含量对红砂岩工程性质的影响[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017(1): 61.
- [11] 公路工程无机结合料稳定材料试验规程. GTJ E51-2009.
- [12] 赵明华, 邓赜宇, 曹文贵. 红砂岩崩解特性及其路堤填筑技术研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(3): 1-5.
- [13] 林志红, 王俊杰. 红砂岩遇水崩解软化机理的试验研究[J]. 路基工程, 2019(3): 94-98.
- [14] 南宇星. 红砂岩遇水崩解机理研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016(2): 101-102.
- [15] 查甫生, 刘晶晶, 许龙, 等. 水泥固化重金属污染土干湿循环特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 35(7): 1246-1252.