

文章编号: 1007-2993(2023)05-0602-07

# 湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土填筑材料 冻融循环试验研究

金生莲<sup>1</sup> 杨作青<sup>1</sup> 张鑫<sup>1</sup> 曾海珍<sup>1</sup> 朱彦鹏<sup>2</sup>

(1. 甘肃西部岩土工程有限责任公司, 甘肃兰州 730050; 2. 兰州理工大学, 甘肃兰州 730050)

**【摘要】** 在湿陷性黄土地区, 基槽回填区常因回填土自身沉降和湿陷等问题产生区域大面积沉降, 对建筑正常使用和居民正常生活造成了严重影响。根据区域工程实际, 提出湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土填筑材料, 并通过设置湿陷性黄土、红砂岩、水泥及水的不同占比进行正交试验, 得到了利用黄土、红砂岩开发新型基槽回填材料的最佳配合比。通过对集成水泥土试件与素水泥土试件进行冻融循环试验, 发现集成水泥土的抗冻性能明显优于素水泥土, 具有更好的力学性能与使用耐久性。本研究为湿陷性黄土地区填筑材料的工程应用提供了一定的参考。

**【关键词】** 湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土填筑材料; 正交试验; 耐久性能; 冻融循环试验

**【中图分类号】** TU 411.3

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.05.014

## Experimental Study on Freeze-thaw Cycle of Collapsible Loess Red Sandstone Integrated Cement Soil Filling Material

Jin Shenglian<sup>1</sup> Yang Zuoqing<sup>1</sup> Zhang Xin<sup>1</sup> Zeng Haizhen<sup>1</sup> Zhu Yanpeng<sup>2</sup>

(1. Western Geotechnical Co., Ltd., Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. College of Civil Engineering Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

**【Abstract】** In the collapsible loess area, the backfill area of the foundation trough often produces a large area of settlement due to the self-subsidence and collapsibility of backfill, which has a severe impact on the regular use of buildings and the everyday life of residents. According to the regional engineering practice, the collapsible loess-red sandstone integrated cement-soil filling material is put forward. The orthogonal test was carried out by setting different proportions of collapsible loess, red sandstone, cement, and water. The best mixture ratio of developing new foundation trench backfill material using loess and red sandstone was obtained. Through freeze-thaw cycling tests on integrated cement-soil specimens and plain cement-soil specimens, it was found that the freeze-thaw resistance of integrated cement-soil specimens is significantly better than that of plain cement-soil specimens, with better mechanical properties and durability. This study provides some reference for the engineering application of fill materials in collapsible loess areas.

**【Key words】** collapsible loess-red sandstone integrated cement-soil filling material; orthogonal test; durability; freeze-thaw cycling test

### 0 引言

建筑主体施工完成后, 通常需对基槽进行回填。当回填材料和填筑施工质量存在问题时, 在地表超载、地下水渗流及自重作用下, 回填区易产生大面积不均匀沉降, 给后期建筑物正常使用带来诸多安全隐患。

针对这一问题, 国内外学者根据工程需要和岩土材料特性, 研发了利用水泥和水加入原位土均匀拌

合后强度满足要求的水泥土填筑材料。当前水泥土填筑材料的应用已日趋广泛, 但在干湿交替频繁的冻土地区使用水泥土时, 对其抗冻性能提出了更高的要求。

Shibi 等<sup>[1]</sup>、Kamei 等<sup>[2]</sup> 等研究了冻融条件下废石膏和粉煤灰对水泥土耐久性能的影响, 发现双掺废石膏和粉煤灰能够有效提升水泥土的强度和耐久性; Lu

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(51978321); 国家重点研发计划(2019YFD1101004); 教育部长江学者和创新团队支持计划项目(IRT17R51)

**作者简介:** 金生莲, 女, 1983 年生, 汉族, 甘肃兰州人, 大专, 工程师, 主要从事地质灾害治理和建筑地基基础专业技术管理及研究工作。E-mail: 876883244@qq.com

等<sup>[3]</sup>研究了不同含盐量对水泥固化土强度的影响,研究发现固化土的抗压强度值随着含盐量的不断增加呈现先增加后降低的趋势;Gao等<sup>[4]</sup>研究了冻融循环作用下纤维对水泥土静动态力学的影响,发现纤维的掺入提高了冻融循环作用下水泥土的波速、无侧限抗压强度、动态抗压强度和吸收能。伍永平<sup>[5]</sup>开展了偏高岭土水泥土在不同侵蚀环境下的耐久性试验,试验表明掺加偏高岭土能提高水泥土的耐久性。其他相关研究也表明在土体中掺入不同的物质可以改善重塑土的抗压强度<sup>[6-12]</sup>。我国西北地区存在着大量的湿陷性黄土、红砂岩等基坑开挖废弃土方,针对上述材料参考水泥土的方法制备湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土填筑材料进行工程应用是可行且符合绿色发展原则的。西北地区属于典型的季节性冻土地区,土体每年会经历数次冻融循环过程,因此在确定湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土填筑材料最优配合比的过程中还应考虑其抗冻性。目前存在一定数量的水泥土材料抗冻融循环性能研究,但针对湿陷性黄土、红砂岩工程开挖废料制备水泥土的研究尚不多见,因此利用冻融循环试验对其破坏机理以及提高其冻融耐久性的措施进行研究具有重要的工程应用价值。

从工程开挖废弃材料重复利用的角度出发,基于正交试验,对湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土填筑材料的最优配比进行了研究,并通过冻融循环试验对最优配比集成水泥土的抗冻性能进行了分析,验证了湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土填筑材料用于工程回填的可行性。

## 1 湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土填筑材料正交试验设计

### 1.1 试验材料

#### (1)湿陷性黄土

试验所用湿陷性黄土取自兰州市某处深基坑工程,如图1所示。

#### (2)红砂岩

试验所用红砂岩取自兰州市某处深基坑,如图2所示。该红砂岩原样土的渗透系数范围为 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$  cm/s,黏聚力为43 kPa,内摩擦角 $30^\circ \sim 40^\circ$ 。

### 1.2 正交试验方案设计

本次试验选取湿陷性黄土和红砂岩比例、水泥掺量、用水量3种因素,每个因素5个水平,将无侧限抗压强度作为评价指标。对于3因素5水平的试验研究,如果进行常规的全面试验,共需要125次试



图1 工程开挖湿陷性黄土



图2 工程开挖红砂岩

验,工作量大,采用正交试验进行研究可极大地减少工作量。正交试验采用规范化的表格设计试验方案,可以用较少的试验次数并且在不影响全面了解试验因素对评价指标影响的情况下,取得较为可靠的试验结果。本次试验采用 $L_{25}(5^3)$ 正交表(见表1),考虑试验误差的影响,不考虑因素间的相互作用,共有25个配合比(试验方案),每个配合比分别设置3个平行试验。

表1 正交试验因素水平表

水平	因素		
	湿陷性黄土与红砂岩比例	水泥掺量/%	用水量/%
1	60:40	6	8
2	65:35	8	10
3	70:30	11	15
4	75:25	13	20
5	80:20	15	25

### 1.3 试验方法

试验准备阶段首先将工程开挖湿陷性黄土进行过筛,除去结块黄土和杂物后作为细集料使用;开挖出的红砂岩进行机械破碎后,取粒径在2~5 mm的部分作为粗集料使用。集料准备完成后,根据选择的配合比,依照《混凝土物理力学性能试验方法标准》<sup>[13]</sup>

进行制备试样,试样选择边长为100 mm的立方体,每组试样制备3块,取试验平均值以减少误差。制样24 h后及时脱模并置于标准养护条件(温度 $20\pm 2$  °C,湿度95%以上的环境)进行养护,待达到28 d龄期后进行强度测试。

采用微机控制压力试验机进行无侧限抗压强度测试,且符合国家标准《试验机通用技术规程》(GB/T 2611)相应的规定,测量精度为 $\pm 1\%$ ,同时试验机具有加载速率控制装置,能满足均匀且连续加载的要求,本次试验速率为0.1 kN/s。试样在抗压强度测试中的破坏形态如图3所示。



图3 抗压试验破坏图

## 2 试验结果分析

### 2.1 正交试验结果

采用极差分析和方差分析法,确定每种因素对抗压强度的影响规律以及每种因素对抗压强度影响的敏感性。无侧限抗压强度测试结果见表2,表中数据取3组平行试验的平均值。

### 2.2 极差分析

表3显示了无侧限抗压强度的极差分析结果。其中 $K_i(i=1, 2, 3, 4, 5)$ 为某因素第 $i$ 个水平的指标之和, $k_i$ 为其指标之和的平均值; $R$ 表示 $K_i$ 中最大值与最小值的差值, $R$ 值越大,说明对因素对指标的影响越强,即因素对指标越敏感。

从表3可以看出,各影响因素对抗压强度影响的敏感性大小顺序为水泥含量 $\rightarrow$ 用水量 $\rightarrow$ 黄土与红砂岩的比例。下面就这三种因素对抗压强度的影响进行分析。

#### (1) 湿陷性黄土与红砂岩比例效应曲线

湿陷性黄土与红砂岩比例效应曲线图如图4所示,湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土填筑材料的 $k$ 值随着湿陷性黄土与红砂岩比例增大先增大后减小。当黄土与红砂岩的比例为75:25时,湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土填筑材料的 $k$ 值达到峰值,此时 $k$ 值为2.186。即当水泥含量和用水量一定时,湿陷性黄土与红砂岩比例为75:25的湿陷性黄土-红砂岩

表2 正交试验结果

试验号	湿陷性黄土和红砂岩比例	水泥用量/%	用水量/%	无侧限抗压强度/MPa
1	60:40	6	8	1.320
2	60:40	8	10	1.454
3	60:40	11	15	1.920
4	60:40	13	20	2.211
5	60:40	15	25	2.373
6	65:35	6	10	1.472
7	65:35	8	15	1.669
8	65:35	11	20	1.870
9	65:35	13	25	2.091
10	65:35	15	8	2.430
11	70:30	6	15	1.072
12	70:30	8	20	1.102
13	70:30	11	25	2.386
14	70:30	13	8	2.383
15	70:30	15	10	3.428
16	75:25	6	20	1.355
17	75:25	8	25	1.539
18	75:25	11	8	1.598
19	75:25	13	10	3.030
20	75:25	15	15	3.408
21	80:20	6	25	1.104
22	80:20	8	8	1.402
23	80:20	11	10	2.512
24	80:20	13	15	2.230
25	80:20	15	20	2.108

注:湿陷性黄土和红砂岩用量比例均为土体干燥时的质量比,水泥掺量为干燥粗细集料总用量的百分比;用水量为干燥集料与水泥总质量的百分比,因土体具有一定天然含水量,为保持一致,用水量包括土体的天然含水量。

表3 正交试验极差分析表

$K$ 值	湿陷性黄土与红砂岩比例	水泥用量/%	用水量/%
$K_1$	9.278	6.323	8.187
$K_2$	9.532	7.166	8.323
$K_3$	10.371	10.286	9.586
$K_4$	10.9	11.945	10.879
$K_5$	9.356	13.737	10.292
$k_1$	1.8556	1.2646	1.6374
$k_2$	1.9064	1.4332	1.6646
$k_3$	2.0742	2.0572	1.9172
$k_4$	2.186	2.3890	2.1758
$k_5$	1.8712	2.7494	2.0584
$R$	0.3304	1.4848	0.5384

集成水泥土填筑材料试件强度达到最优。因此确定湿陷性黄土与红砂岩最优比例为 75 : 25。

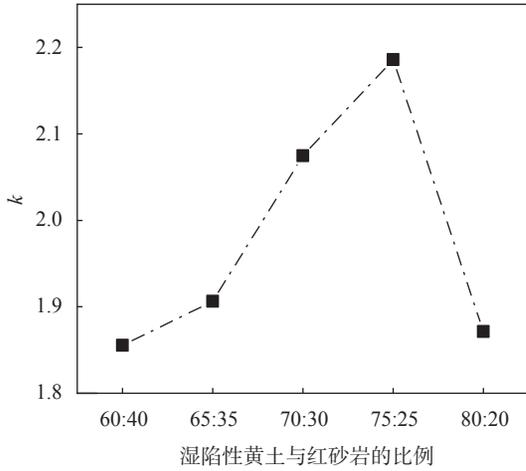


图 4 湿陷性黄土和红砂岩比例效应曲线图

(2)水泥掺量效应曲线

水泥掺量效应曲线图如图 5 所示。由图 5 可以看出,湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土填筑材料试件的 k 值随着水泥掺量的增加而增大,其原因是水泥水化产物填充土颗粒间的空隙形成水泥石骨架,约束原本松散的土颗粒,产生一定强度骨架。因此水泥土填筑材料中最佳水泥含量应根据实际工程强度需求进行选择,本试验中取 15%。

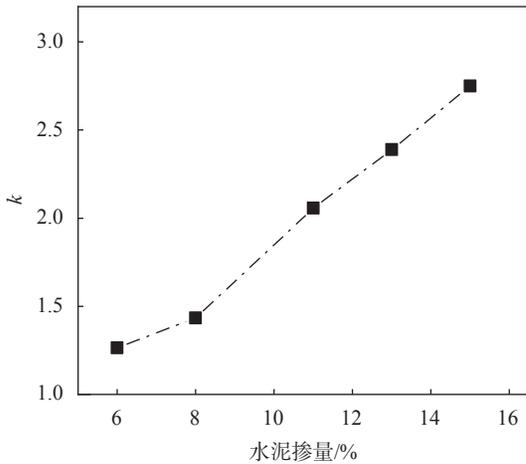


图 5 水泥掺量效应曲线图

(3)用水量效应曲线

用水量效应曲线图如图 6 所示。由图 6 可以看出,湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土填筑材料试件的 k 值随着用水量的增大先增大后减小。当用水量为 20% 时,湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土填筑材料试件的 k 值达到最优。

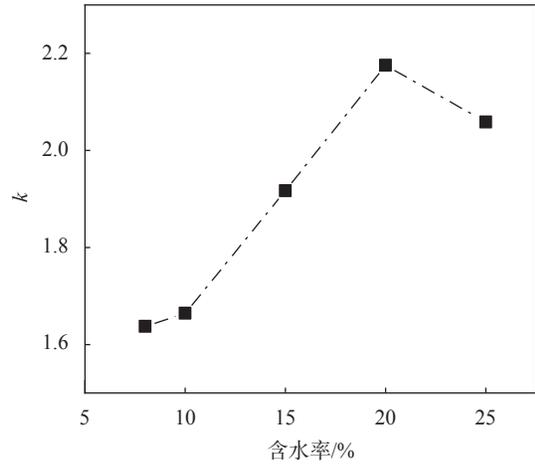


图 6 用水量效应曲线图

压强度)影响的大小,但采用方差分析方法可就试验因素对试验指标影响的显著性做出更明确的评价,从而更加准确地确定湿陷性黄土和红砂岩的比例、水泥掺量、用水量的最佳配合比。方差分析结果见表 4。表 4 中 F 表示分布临界值:  $F_{0.01}(4, 4)=16$ ,  $F_{0.05}(4, 4)=6.39$ ,  $F_{0.1}(4, 4)=4.11$ 。

表 4 方差分析结果表

因素	偏差平方和	自由度	平均偏差平方和	F值	显著性
A	0.289	4	0.072	2.182	
B	7.824	4	1.956	59.273	显著
C	2.614	4	0.654	19.812	显著
误差	0.133	4	0.033		
总和	10.860	20			

根据表 4 结果可知,水泥掺量与用水量对湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土填筑材料试件强度的影响显著,而湿陷性黄土与红砂岩比例对其影响不显著。这一结论与极差分析中湿陷性黄土与红砂岩比例、水泥掺量和用水量这三个因素对强度影响的大小规律一致,验证了极差分析的可靠性。

根据极差和方差的综合分析结果,综合考虑经济因素,得出湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土填筑材料试件的最优配合比(见表 5)。

表 5 湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土填筑材料最优配合比

湿陷性黄土与红砂岩的比例	水泥掺量/%	用水量/%
75 : 25	15	20

3 最佳配合比下集成水泥土冻融循环试验

3.1 试验方案

冻融循环试验中水泥土试样为边长 100 mm 的立方体。在正交试验得出的最佳配合比(湿陷性黄土

2.3 方差分析

通过极差分析可以得出不同试验因素对指标(抗

与红砂岩比例为 75 : 25, 水泥掺量为 15%, 用水量为 20%) 的基础上, 制作湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土试样及相同条件下的素水泥土(湿陷性黄土掺量为 100%, 水泥掺量为 15%, 用水量为 20%) 试样各 6 组, 每组制作 3 个平行试样。前五组试样进行冻融循环试验, 冻融循环次数分别为 5 次、10 次、15 次、20 次和 25 次, 最后一组不进行冻融循环试验, 作为对照组使用。试件制作完成后, 将两组水泥土试样放入标准养护箱(温度为  $20 \pm 2$  °C, 相对湿度为 95%) 中养护 28 d 后再进行冻融循环试验。

养护结束后, 将两组水泥土试件放置在冻融循环试验箱内, 按照冻融循环试验要求设置循环组态后, 开始试验。在冻融循环试验前, 对素水泥土试件与湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土试件分别进行质量测定, 在对两组水泥土试件进行 5 次、10 次、15 次、20 次、25 次冻融循环试验后, 分别对试件质量进行测定, 并对每组试件进行无侧限抗压强度试验。

### 3.2 试验结果分析

#### (1) 强度结果与分析

对经历不同次数冻融循环试验的水泥土试件进行无侧限抗压强度试验, 根据在水泥土试件冻融循环试验前和经过 5 次、10 次、15 次、20 次和 25 次冻融循环试验后抗压强度值, 绘制出水泥土冻融循环试验后的强度变化图, 如图 7 所示。

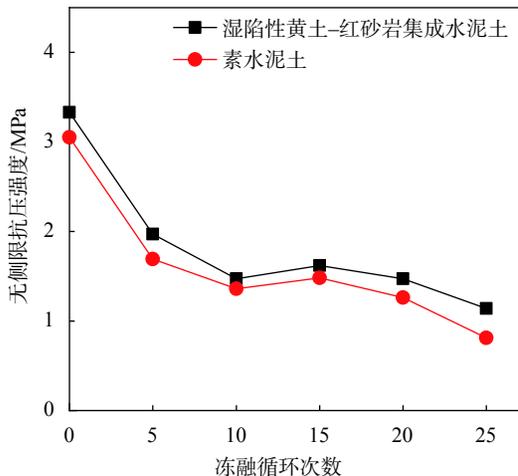


图7 水泥土冻融循环试验无侧限抗压强度变化图

由图 7 可知, 经历相同次数的冻融循环试验后, 湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土试件其无侧限抗压强度值明显高于素水泥土试件。经过 25 次冻融循环试验后, 湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土试件与素水泥土的无侧限抗压强度分别下降了 66.1%、68.9%。

#### (2) 质量变化分析

冻融循环试验前, 称量湿陷性黄土-红砂岩集成

水泥土件与素水泥土水泥试件, 在完成 5 次、10 次、15 次、20 次和 25 次冻融循环试验后, 分别称量冻融循环后试件的质量。试件在经历冻融循环后质量的变化用质量变化率来表示, 记作  $W_n$ 。试件的质量变化率用如下公式计算:

$$W_n = \frac{m_n - m_0}{m_0} \quad (1)$$

式中:  $W_n$  为水泥土试件的质量变化率, %;  $m_0$  为水泥土试件冻融循环试验前的质量, g;  $m_n$  为水泥土试件进行第  $n$  次冻融循环后的质量, g。

根据质量变化绘制质量变化率随冻融循环次数的变化曲线(见图 8)。由图 8 可知, 在相同的冻融循环试验条件下, 经过 5 ~ 12 次冻融循环过程, 素水泥土试件及湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土试件的质量均出现增长现象, 素水泥土试件的质量增长略高于湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土试件; 在 12 ~ 25 次冻融循环过程中, 素水泥土试件与湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土试件均出现质量损失现象, 随冻融次数的增加, 素水泥土试件的质量损失更为明显。

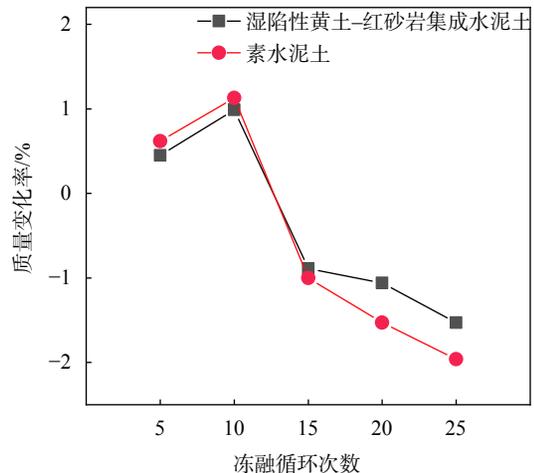


图8 水泥土质量变化率点线图

#### (3) 外观分析

图 9、图 10 分别为素水泥土、湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土试样经冻融循环试验后试样外观图。

由图 9 可知, 对于素水泥土试件, 经过 5 次冻融循环试验后, 试样表面与初始状态相比没有太大变化, 在冻融循环 5 次和 10 次之间没有显著差异。但在 15 次冻融循环试验后, 试件表面发生变化。经过 20 次冻融循环过程后, 试样表面的裂纹比冻融循环 15 次的裂纹大, 试样周围的土体出现脱落现象。经 25 次冻融循环后, 试件上部 and 下部周围的土体发生严重的变形。

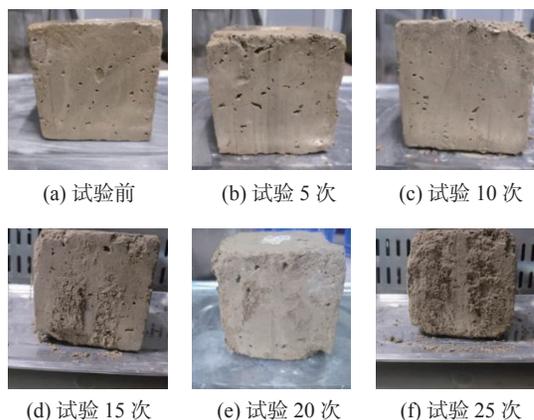


图9 素水泥土试件冻融循环下试件外观图

由图10可知,对湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土试件,冻融循环5次后,试件表面无裂纹。在经过冻融循环10次后,试件的表面仍然没有出现裂缝,但可看出试件的表皮有轻微脱落的现象。比较经过15次及10次冻融循环试验的试样,湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土试件没有显著差异。在经过20次冻融循环过程后,湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土试件表面出现明显裂缝,试样上部的棱角缺失。当完成25次冻融循环试验后,湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土试件表面的裂缝明显增多,表面有一小部分表皮脱落。

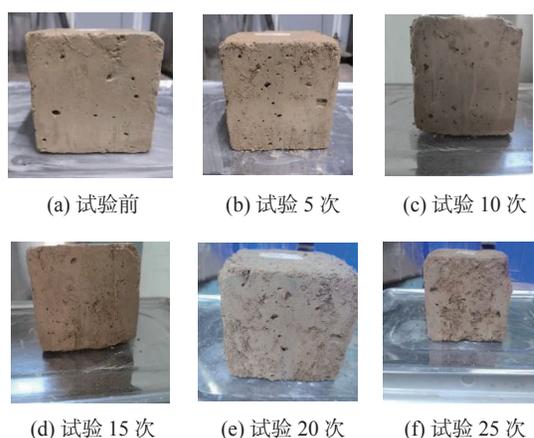


图10 湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土填筑材料试件冻融循环下试件外观图

通过对比试件外观损伤程度发现,湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土试件具有一定抵抗冻融循环过程破坏的能力,结合抗压强度变化可知其抗冻性能优于素水泥土试件。

#### (4) 应力-应变分析

应力-应变曲线可以较好地反映水泥土试件在不同应力阶段的变形能力和抵抗破坏的能力。同时,也能清楚地反映水泥土试件的力学性能,为湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土试件在实际工程中的应用提供

理论依据。

对均未进行冻融循环作用的湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土试件与素水泥土试件的无侧限抗压强度试验结果进行应力应变分析,得出试件的应力-应变曲线(见图11)。

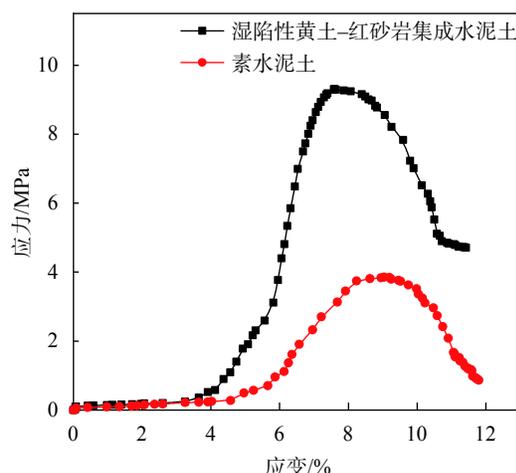


图11 冻融循环试验下水泥土应力-应变曲线

由图11可得,湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土与素水泥土试件的应力-应变曲线均呈先增大后减小的趋势,在试验初期其增长速度较为缓慢,后呈快速增长的趋势,在达到应力最大值后,随应变的增加,其应力呈减小趋势。且素水泥土的应力-应变曲线在各个阶段的增长速度及其应力最大值始终小于湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土试件的增长速度及其应力最大值。

由图11可以看出,湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土试件的变形可分为4个阶段:压缩阶段、弹塑性变形阶段、强度下降阶段和残余强度阶段。在压缩阶段,应力-应变曲线呈现下凹趋势,应力值缓慢增加;在弹塑性变形阶段,水泥土试件的应变不断增加,应力达到最大值,对应的应变最大值约为8%;在强度下降阶段,应变继续增大,应力开始迅速降低,集成水泥土试件的裂缝不断增加;在残余强度阶段,集成水泥土试件应力-应变曲线变得平缓,但仍存在一定的残余强度,试件抵抗变形的能力不断降低。

## 4 结论

借助正交试验方法对湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土填筑材料中湿陷性黄土与红砂岩比例、水泥用量与用水量的最佳配合比进行了研究,并通过进行冻融循环试验对比分析了素水泥土试件与最佳配合比下的集成水泥土试件的抗冻性能。得出以下结论:

(1)根据正交试验的极差分析与方差分析得出湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土试件优化配比:湿陷性

黄土与红砂岩的质量比例为 75 : 25、水泥掺量为集料质量的 15%、用水量为集料和水泥总质量的 20%，实际应用时水泥掺量还应按照强度需求进行适当调整。

(2)在冻融循环过程中，湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土试件与素水泥土试件质量均存在先增加后减小现象，在不同质量变化过程中，素水泥土的变化量均相对较大。综合来看，集成水泥土具有更好的抵抗冻融循环的能力。

(3)对比湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土和素水泥土试件的应力-应变曲线可知，二者应力-应变曲线均呈先增大后减小的趋势，在试验初期其增长速度较为缓慢，后呈快速增长的趋势，在达到应力最大值后，随应变的增加，其应力呈减小趋势。对应曲线各阶段，集成水泥土的增长速度及其应力最大值始终大于素水泥土。

(4)湿陷性黄土-红砂岩集成水泥土试件的变形可分为 4 个阶段：压缩阶段、弹塑性变形阶段、强度下降阶段和残余强度阶段，在弹塑性阶段可达到应力的最大值。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] SHIBI T, KAMEI T. Effort of freeze-thaw cycles on the strength and physical properties of cement-stabilised soil containing recycled bassanite and coal ash[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 106-107: 36-45.
- [ 2 ] KAMEI T, AHMED A, SHIBI T. The use of recycled bassanite and coal ash to enhance the strength of very soft clay in dry and wet environmental conditions[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 38: 224-235.
- [ 3 ] LU Q F, JIANG L S, MA B, et al. A study on the effect of the salt content on the solidification of sulfate saline soil solidified with an alkali-activated geopolymer[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 176: 68-74.
- [ 4 ] GAO C H, DU G Y, GUO Q, et al. Static and dynamic behaviors of fiber reinforced cement-soil after freeze-thaw cycle[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2020, 24(12): 3573-3583.
- [ 5 ] 伍永平. 偏高岭土水泥土力学性能和耐久性试验与分析[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
- [ 6 ] WANG X Y, HAN P J, BAI X H, et al. Influence of slag on properties of lightweight cement-treated soils subjected to sulfate corrosion[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 205: 511-518.
- [ 7 ] 宁宝宽, 陈四利, 刘 斌, 等. 环境侵蚀下水泥土的力学效应试验研究[J]. *岩土力学*, 2005, (4): 600-603.
- [ 8 ] 刘泉声, 柳志平, 程 勇, 等. 水泥土在侵蚀环境中的试验研究和等效分析[J]. *岩土力学*, 2013, 34(7): 1854-1860.
- [ 9 ] 刘东锋. 氯化钠、氯化镁侵蚀环境对水泥土力学性质影响试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(26): 131-135.
- [ 10 ] 董猛荣, 杨俊杰, 王 曼, 等. 海相软土地带水泥土劣化机理室内试验研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(1): 93-103.
- [ 11 ] 刘松玉, 郑 旭, 蔡光华, 等. 活性MgO碳化固化土的抗硫酸盐侵蚀性研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(11): 3057-3064.
- [ 12 ] 张经双, 段雪雷, 马冬冬. 氯盐和冻融耦合下水泥土的强度和破坏特征[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(2): 515-522.
- [ 13 ] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S], 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

收稿日期: 2022-06-22