

# 基于固废的粉土固化材料干缩性能试验研究

周建和<sup>1</sup>, 张磊<sup>2\*</sup>, 王旭<sup>1</sup>, 张林宏<sup>2</sup>, 刘宁<sup>1</sup>

<sup>1</sup>山东高速基础设施建设有限公司, 山东 济南

<sup>2</sup>山东省交通科学研究院, 山东 济南

收稿日期: 2024年3月28日; 录用日期: 2024年5月16日; 发布日期: 2024年5月24日

## 摘要

为了验证基于固体废物的固化材料对粉土干缩性能的提升作用, 采用3种掺量(2%、4%和6%)的固化材料、6%水泥固化土和素土, 进行干缩试验对比分析收缩特性。结果表明: 掺加基于固体废物的固化材料能明显提高粉土的前期保水能力, 失水过程主要发生在试验的前7天, 同时能大幅降低粉土的干缩应变和干缩系数, 且随着掺量的增加, 效果越明显。基于固体废物的固化材料能提高粉土的抗裂性能, 为路基路床填料提供了一种新的参考措施, 也为固体废物的循环利用提供了一种新的思路。

## 关键词

固体废弃物, 干缩试验, 粉土, 干缩性能

# Experimental Study on Dry Shrinkage Properties of Solidified Material Based on Solid Waste

Jianhe Zhou<sup>1</sup>, Lei Zhang<sup>2\*</sup>, Xu Wang<sup>1</sup>, Linhong Zhang<sup>2</sup>, Ning Liu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shandong High-Speed Infrastructure Construction Company Limited, Jinan Shandong

<sup>2</sup>Shandong Transportation Research Institute, Jinan Shandong

Received: Mar. 28<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 16<sup>th</sup>, 2024; published: May 24<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In order to verify the effect of solidified materials based on solid waste on the dry shrinkage performance of silt, three kinds of solidified materials (2%, 4% and 6%), 6% cement stabilized soil and plain soil were used to carry out dry shrinkage tests to compare and analyze the shrinkage charac-

\*通讯作者。

teristics. The results show that the addition of solidified materials based on solid waste can significantly improve the early water retention capacity of silt, the water loss process mainly occurs in the first 7 days of the test, and can significantly reduce the dry shrinkage strain and dry shrinkage coefficient of silt, and the effect is more obvious with the increase of the content. The solidified material based on solid waste can improve the crack resistance of silt, which provides a new reference measure for subgrade and roadbed filling, and also provides a new idea for the recycling of solid waste.

## Keywords

Solid Waste, Dry Shrinkage Test, Solidified, Dry Shrinkage Property

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

粉土作为一种不良土体，在公路建设工程中一直无法直接应用，通常需要经过水泥等材料改良处理才能达到性能要求。但是水泥的水化反应消耗大量水分，导致水泥土体容易发生干缩应变和温缩应变，影响道路的整体强度和稳定性[1] [2] [3]。

在工业生产中会产生大量工业废弃物，如赤泥、尾矿、钢渣等，这些工业废弃物的堆放严重影响了生态环境，从减量化、资源化和再利用入手，寻找解决大宗工业固体废物不当处置与堆存所带来的环境污染和安全隐患，符合国家环境保护政策和低碳经济的基本原则，对促进环境保护和经济社会可持续发展具有重大意义。同时，赤泥、尾矿、钢渣等大宗工业固体废物的物理力学性质、颗粒组成、化学成分等能够具有道路材料的适用性要求，并且已经有大量学者[4] [5] [6] [7] [8]将其应用到道路工程中。因此，利用上述材料开发道路新型建筑材料，将其大规模应用于公路工程建设中，不仅可以使资源循环利用，而且废渣处理工艺简单、成本低，是目前实现减量化、资源化的有效途径之一。

赤泥的吸附治污功能是近年来的研究热点，赤泥具有多孔结构和较大的比表面积，所以其吸附作用较强，可以用来清洁气体、处理污水，或者利用赤泥中的铁或重金属元素所具有的催化作用，对废气废液进行综合处理[9] [10] [11] [12] [13]。

李允[14]等对赤泥的化学和矿物成分进行了分析，表明化学组成主要包含为  $\text{SiO}_2$  和  $\text{CaO}$ ，同时含有少量的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，矿物成分主要为钙霞石、水钙铝榴石、硬水铝石等，物理性质类似于粉质黏土；曹瑛等[15]并利用磷石膏(掺加量为 10%~15%)作为活性成分，进行固化赤泥的研究，研究发现赤泥呈碱性，对粉煤灰有良好的激活能力，增强其活性；齐建召[16]对山东铝业赤泥基层材料的试验研究表明，按赤泥：粉煤灰：水泥 = 80:10:10 配比混合而成的赤泥道路基层材料，具有更高的强度、更大的回弹值，可满足高等级公路的要求；王辉[17]等通过提高硅粉掺量的方式降低水泥的用量，降低赤泥中氟等染物的浸出，同时降低 pH 值；孙兆云等[18]制备烧结法赤泥 - 沥青粉固化剂，验证了其具有良好的固化性能。

赤泥的物理力学性质、颗粒组成、化学成分等能够满足道路材料的适用性要求，故研制一种基于固体废物的固化材料，通过室内干缩试验测得的干缩系数进行评价，研究其对粉土的抗裂性能的改良作用。

## 2. 试验材料

### 2.1. 粉土

本文所使用山东某地黄泛区粉土，根据 JTG E40-2007《公路土工试验规程》进行击实试验及液塑限

试验测定试验用土的基本物理参数，如表 1 所示。

**Table 1.** Basic physical properties of soil

**表 1.** 试验粉土基本物理性质

最大干密度( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	最佳含水率	液限 $W_L(\%)$	塑限 $W_P(\%)$	土的分类
1.79	13.93	29.66	19.93	低液限粉土

通过分析粉土的基本物理性质，分析发现液限  $WL < 50$ ，塑性指数  $IP = 9.73$ ，按照土的分类标准划分的话，可归为低液限粉土。

## 2.2. 水泥

本文选取的水泥是普通的 P.O42.5 硅酸盐水泥。对所选水泥的基本性质进行测试，得到以下性能指标，如表 2 所示。

**Table 2.** Physical and mechanical properties of cement

**表 2.** 水泥的物理力学性能指标

密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	凝结时间(min)		抗压强度(MPa)		抗折强度(MPa)	
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
3.18	180	320	6.8	8.9	36.3	55.8

## 2.3. 固废基固化材料

固化材料为新型研制的抗收缩土壤固化剂，黑色粉末状，粒径小于 0.075 mm，主要制作原材料为赤泥、沸石粉、70#基质沥青。选用的赤泥为拜耳法赤泥，主要矿物成分为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ ，质量占比分别为 9.58%、2.45%、21.7%、43.15%，固化材料配合比为赤泥：沸石粉：70#基质沥青 = 22:1:100。

## 3. 试验方案及试验准备

### 3.1. 试验方案选择

为了验证固化材料对粉土收缩性能的影响及效果，设计三种不同比例的固化材料与水泥共同对粉土改性处理，同时把只添加水泥的改良土和粉土作为对照组。具体试验方案如表 3 所示。

**Table 3.** Test scheme

**表 3.** 试验方案

试验方案	水泥/%	固化剂/%	粉土/%
1	6	2	100
2	6	4	100
3	6	6	100
4	6	0	100
5	0	0	100

### 3.2. 击实试验

根据试验方案,对每种试验方案进行击实试验,得到最大干密度和最佳含水率,各方案击实结果如表4所示。

**Table 4.** Compaction data of test scheme

**表 4.** 各试验方案击实数据

试验方案	最大干密度(g·cm <sup>-3</sup> )	最佳含水率(%)
1	1.93	14.03
2	1.78	14.22
3	1.83	14.35
4	1.98	16.78
5	1.79	13.93

### 3.3. 试件制备

根据 JTJ E51-2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程规程》的试件成型方法,选择尺寸为 10 cm × 10 cm × 40 cm 的中梁试件。根据击实试验得到材料的最大干密度和最佳含水率,按 98% 压实度压实成型,成型后放入标准养护室内,在温度 20℃ ± 2℃,湿度 ≥ 95% 的标准养生条件下养生 7 天,并在养生期的最后一天,将试件泡水。

## 4. 干缩试验

### 4.1. 试验方法

试件制备完成后,按照标准养护方法养护 7 d,并在养护期最后一天泡水,随后将饱水后的试件表面擦干,放置到恒温恒湿试验箱内的干缩仪上测定试件的干缩形变,同时在恒温恒湿试验箱内放置同样的试件,用来测定干缩失水率。恒温恒湿试验箱内的温度控制在 20℃,湿度控制在 60%。

干缩性能通常采用干缩应变和干缩系数等指标评价,干缩应变和干缩系数的计算公式如下,

$$\varepsilon_d = \frac{\delta_d}{L} \quad (1)$$

$$\alpha_d = \frac{\varepsilon_d}{\omega} \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon_d$ : 试件的干缩应变;  $\delta_d$ : 当失水量  $\omega$  为时,试件的总体收缩量;  $\omega$ : 试件的失水率。

### 4.2. 试验结果分析

从图1中可以看出,失水过程的总时长上,素土的用时最短,为 12 d,抗收缩固化土用时为 24 d,水泥土用时最长,为 28 d。而分析失水率与时间的关系可知,素土前期失水率变化较大,在试验开始的第 1 天失水率达到了 11.65%,占最终失水率的 88%,而 6% 水泥固化土和 3 种不同掺量抗收缩固化土失水率与时间的变化关系较一致,均表现为在开始的 7 天内变化较大,而随着继续时间增加,失水率则逐渐趋于稳定或略有增加。水泥是固化材料强度形成的主要来源。水泥中的组分在固化土中发生水化反应,产生大量的水化产物,如纤维状和絮状的水化硅酸钙凝胶,这些水化产物能够填充到土颗粒中的孔隙里,增强土颗粒之间的联结力,增加保水性能。抗收缩固化剂中的赤泥成分中含有大量的活性 CaO、

$\text{SiO}_2$ ，与水泥共同发生水化反应，可以促进转化形成水化硅酸钙凝胶，形成致密的三维空间水泥石结构，进一步提升保水性能。在第 7 天时，6% 水泥固化土失水率达到了 89.9%，掺量 2% 抗收缩固化土失水率达到了 87.5%，掺量 4% 抗收缩固化土失水率达到了 86.6%，掺量 6% 抗收缩固化土失水率达到了 85.5%，说明抗收缩剂可以降低粉土的最终失水率，具有更好的前期保水性，可以一定程度抑制试件中干缩裂缝的产生。由此可以看出，在施工时，应在施工完成后的 7 天内采取养护措施，避免失水过多导致干缩应变增加。

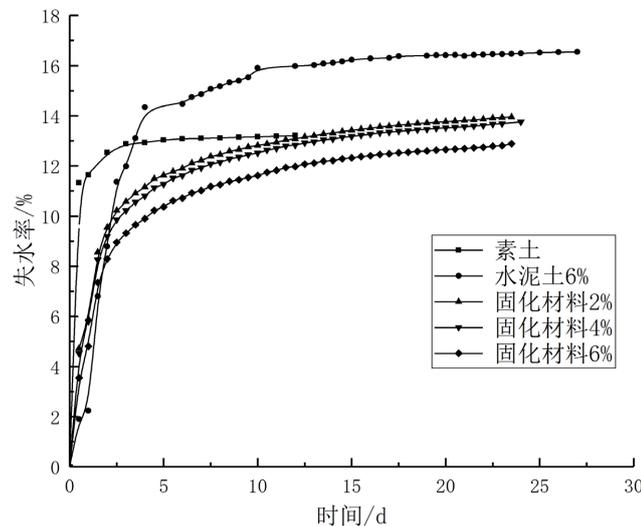


Figure 1. Variation of water loss rate with time

图 1. 失水率随时间变化

从图 2 可以看出，素土干缩应变用时最短，为 12 天，且主要发生在干缩试验前 2 天；6% 水泥固化土和抗收缩固化土试件的干缩应变随时间的变化趋势也基本一致，干缩应变主要发生在试验的前 14 天，随着时间的延长，干缩应变逐渐趋于稳定。素土的干缩应变依然主要发生在试验的第 1 天，干缩应变达到了总应变量的 89.5%，6% 水泥固化土在第 14 天时，干缩应变达到了总干缩应变量的 89.3%，掺量 2% 抗收缩固化土在第 14 天时，干缩应变达到了总干缩应变量的 87.3%，掺量 4% 抗收缩固化土在第 14 天时，干缩应变达到了总干缩应变量的 85.4%，掺量 6% 抗收缩固化土在第 14 天时，干缩应变达到了总干缩应变量的 84.4%。通过比较三种材料的总体干缩应变可以发现，掺量 6% 抗收缩固化土 < 掺量 4% 抗收缩固化土 < 掺量 2% 抗收缩固化土 < 6% 水泥固化土 < 素土，分别为  $525.5 (10^{-6})$ 、 $627.5 (10^{-6})$ 、 $726.9 (10^{-6})$ 、 $1275.2 (10^{-6})$  和  $1455.8 (10^{-6})$ ，说明抗收缩固化剂能有效抑制干缩应变的增加。综合失水率与时间变化规律可以判断，抗收缩固化剂有良好的前期保水性，并能大幅降低粉土的干缩应变。

从图 3 中可以看出，三种材料干缩系数随着时间增加，干缩系数呈现先增加后稳定的变化规律，对比平均干缩系数发现，掺量 6% 抗收缩固化土 < 掺量 4% 抗收缩固化土 < 掺量 2% 抗收缩固化土 < 6% 水泥固化土 < 素土，分别为  $122.7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 、 $134.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 、 $171.9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 、 $172.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  和  $183.2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，与干缩应变有相似的规律，说明固化剂稳定土抗收缩性能良好。

从图 4 中分析失水率与干缩应变的变化规律可以看出，前期失水率对干缩系数影响较小，后期较大，这是因为，前期水分的损失主要为试件表面水分和试件内部自由水，这部分水分损失对试件内部孔隙结构影响较小；而随着这些水分损耗完毕，后期内部毛细水损失是导致干缩的主要原因。吸附水开始蒸发，使颗粒表面水膜变薄，颗粒间距变小，分子力增大，导致其收缩。

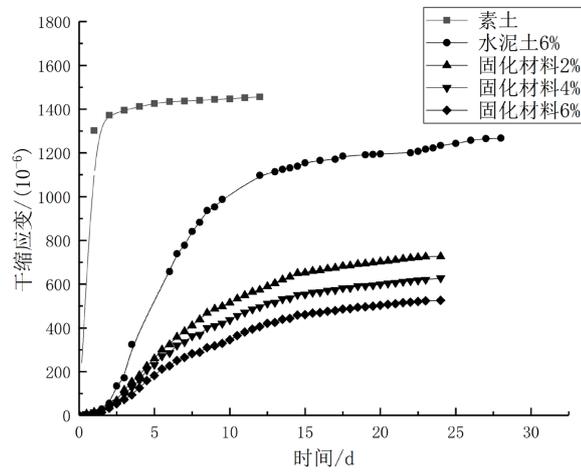


Figure 2. Variation of shrinkage strain with time

图 2. 干缩应变随时间变化

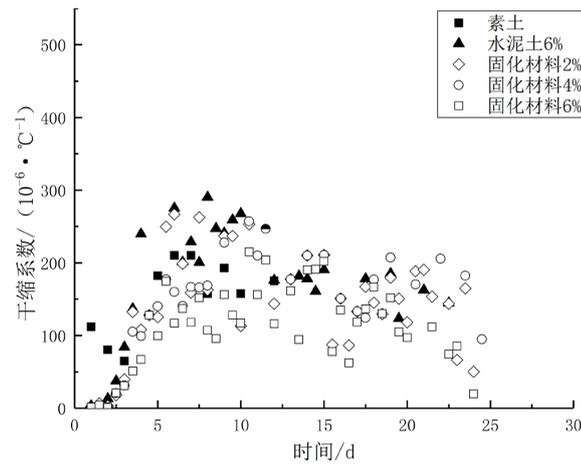


Figure 3. Variation of shrinkage coefficient with time

图 3. 干缩系数随时间变化

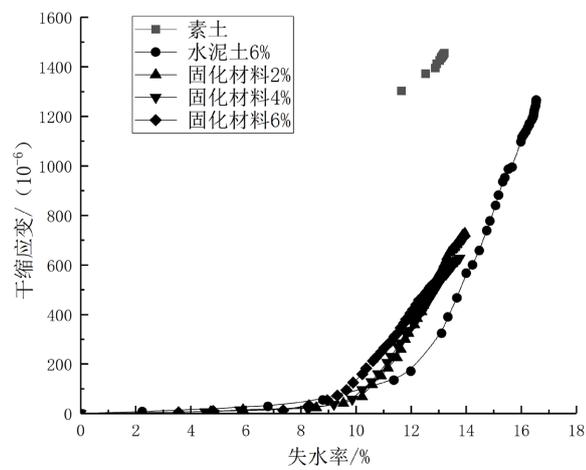


Figure 4. Relationship between water loss rate and dry shrinkage strain

图 4. 失水率与干缩应变关系规律

## 5. 结论

本文通过对基于固体废物的抗收缩粉土固化材料收缩性能的研究, 得出以下结论:

1) 掺加基于固体废物的抗收缩剂和水泥的固化土能明显提高粉土的前期保水能力, 失水过程主要发生在试验的前 7 天。因此, 在施工完成后的 7 天内应采取养护措施, 避免失水过多导致干缩应变增加。

2) 分析干缩与时间的关系, 发现素土的用时最短, 为 12 d, 且主要发生在干缩试验前 2 天; 抗收缩固化土用时为 24 d, 水泥土用时为 28 d, 且主要发生在干缩试验的前 14 天。

3) 掺加基于固体废物的抗收缩剂和水泥的固化土能大幅降低粉土的干缩应变和干缩系数。

## 参考文献

- [1] 嵇晓雷, 杨平, 刘红梅. 水泥土收缩性能室内试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2017, 43(2): 81-84.
- [2] 王浩, 马族庆. 水泥稳定土基层收缩裂缝的形成与治理[J]. 河南建材, 2021(9): 91-92.
- [3] 申爱琴, 马磊, 苏毅, 等. 加固的含砂低液限粉土收缩性能研究[J]. 建筑材料学报, 2000, 3(4): 335-339.
- [4] 焦莎莎. 改良赤泥固化体用于道路基层材料的研究[D]: [硕士学位论文]. 洛阳: 河南科技大学, 2015.
- [5] Li, L.Y. (1998) Properties of Red Mud Tailings Produced under Varying Process Conditions. *Journal of Environmental Engineering*, **124**, 254-264. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1998\)124:3\(254\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1998)124:3(254))
- [6] 刘鹏飞, 尹松, 王玉隆, 等. 赤泥的路用性能研究现状及其环境影响控制技术[J]. 轻金属, 2021(12): 14-21.
- [7] 李荣海, 汪建, 周志华, 等. 铁尾矿在公路工程中的应用[J]. 矿业工程, 2007(5): 52-54.
- [8] He, A.P., Hu, Z.L., Cao, D.G., et al. (2014) Extraction of Valuable Metals from Red Mud. *Advanced Materials Research*, **881-883**, 667-670. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.881-883.667>
- [9] 景英仁, 景英勤, 杨奇. 赤泥的基本性质及其工程特性[J]. 轻金属, 2005(6): 23-25.
- [10] 朱军, 兰建凯. 赤泥的综合回收与利用[J]. 矿产保护与利用, 2008(2): 52-54.
- [11] Patel, M. (1992) Extraction of Titanium Dioxide & Production of Building Bricks from Red Mud. *Research and Industry*, **37**, 154.
- [12] Kalkan, E. (2006) Utilization of Red Mud as a Stabilization Material for the Preparation of Clay Liners. *Engineering Geology*, **87**, 220-229. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.07.002>
- [13] Tsakiridis, P.E., Agatzini-Leonardou, S. and Oustadakis, P. (2004) Red Mud Addition in the Raw Meal for the Production of Portland Cement Clinker. *Journal of Hazardous Materials*, **116**, 103-110. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.002>
- [14] 李允. 工业废渣赤泥路用技术研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- [15] Cao, Y., Li, W.D. and Liu, Y.G. (2007) Properties of Red Mud and Current Situation of Its Utilization. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, **26**, 143-145.
- [16] 齐建召, 杨家宽, 王梅. 赤泥做道路基层材料的试验研究[J]. 公路通科技, 2005, 22(6): 30-33.
- [17] 王辉, 焦莎莎, 葛滢, 等. 赤泥掺加硅灰用于道路基层材料的试验研究[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(3): 8-10+15.
- [18] 孙兆云, 韦金城, 王林, 等. 烧结法赤泥-沥青粉固化剂稳定粉土的路用性能研究[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(4): 101-109.