

# 水泥基粉土泡沫轻质土干湿循环特性 试验研究

周鹏飞<sup>1</sup>, 王喆<sup>2</sup>, 苏聚卿<sup>3</sup>, 杨强<sup>4</sup>, 张宏博<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>山东高速集团有限公司, 山东 济南

<sup>2</sup>山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

<sup>3</sup>山东省交通规划设计院有限公司, 山东 济南

<sup>4</sup>济南金衢公路勘察设计研究有限公司, 山东 济南

Email: \*zhanghongbo@sdu.edu.cn

收稿日期: 2021年3月11日; 录用日期: 2021年4月8日; 发布日期: 2021年4月16日

## 摘要

为了揭示水泥基粉土泡沫轻质土耐久性能, 通过调整轻质土湿密度、粉土掺量等指标, 研究了50次干湿循环过程中泡沫轻质土无侧限抗压强度的变化规律。结果表明, 随着干湿循环次数的增多, 泡沫轻质土的基本力学性能仅略有衰减, 对于整体强度未产生显著影响, 显示了良好的抗干湿循环特性。依据试验结果, 建立了适用于不同配比的水泥基粉土泡沫轻质土无侧限抗压强度随干湿循环次数的数学预测公式。研究成果可为该材料的工程应用提供科学依据。

## 关键词

水泥基粉土泡沫轻质土, 干湿循环, 无侧限抗压强度, 预测公式

# Experimental Study on Dry-Wet Cycle Characteristic of Silt-Based Foamed Concrete

Pengfei Zhou<sup>1</sup>, Zhe Wang<sup>2</sup>, Juqing Su<sup>3</sup>, Qiang Yang<sup>4</sup>, Hongbo Zhang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Shandong High Speed Group Co. Ltd., Jinan Shandong

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

<sup>3</sup>Shandong Provincial Transportation Planning and Design Institute Co. Ltd., Jinan Shandong

<sup>4</sup>Jinan Jinqi Highway Survey and Design Research Co. Ltd., Jinan Shandong

Email: \*zhanghongbo@sdu.edu.cn

\*通讯作者。

Received: Mar. 11<sup>th</sup>, 2021; accepted: Apr. 8<sup>th</sup>, 2021; published: Apr. 16<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

To reveal the durability of silt-based foamed concrete, the variation law of unconfined compressive strength during 50 dry-wet cycles was studied by adjusting the wet density and silt content. The results show that the basic mechanical properties of silt-based foamed concrete only decreased slightly with the increasing dry-wet cycles. But dry-wet cycles had no significant effect on the overall strength. The silt-based foamed concrete showed a good resistance to dry-wet cycles. According to the test results, a mathematical formula for predicting the unconfined compressive strength of silt-based foamed concrete with different proportions as a function of the number of dry-wet cycles was established. The research results can provide scientific basis for the engineering application of this material.

## Keywords

Silt-Based Foamed Concrete, Dry-Wet Cycles, Unconfined Compressive Strength, Predicting Formula

Copyright © 2021 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

泡沫轻质土在实际使用过程中,受气候条件、地下水位变动等因素影响,泡沫轻质土不可避免处于干湿循环状态。为了研究泡沫轻质土抗干湿循环特性,国内外学者开展了一定的研究,如顾欢达[1]等指出发泡颗粒轻质土在干湿循环环境下其抗压强度能够保持稳定而不会出现明显的劣化。刘楷等[2]对普通泡沫轻质土和地聚合物轻质土进行的干湿循环和硫酸钠溶液浸泡试验表明,前者的干湿循环性能较好,而后者硫酸钠溶液浸泡的耐久性更好。阳卫平[3]通过改变集料与胶凝材料比例(S/C)研究了泡沫轻质土的干湿循环性能,提出随着S/C的增大,泡沫轻质土在10次干湿循环后的抗压强度损失率会越来越小。为了揭示干湿循环对水泥基材料性能的影响,周贤良等[4]指出“干”过程会使材料内部发生炭化反应导致强度降低,“湿”过程会使材料再胶结强度恢复但能力有限,长期干湿循环作用会造成材料发生不可逆影响。

以上研究大多基于普通水泥基泡沫轻质土,为了降低泡沫轻质土造价,研究提出可通过参加外掺料替代部分水泥制备泡沫轻质土,如掺加粉煤灰[5]、尾矿粉[6]、橡胶粉[7]、黏土[8]、粉土[9] [10]等,取得了良好的应用效果和经济效益。为了探讨该类泡沫轻质土的抗干湿循环特性,梁朋涛等[11]气泡掺入量在25%左右或者原料土掺入量在35%左右时,抗压强度衰减较小。贾兴文等[12]通过试验发现干湿循环会使粉煤灰加气混凝土的抗压强度减小,并且冻融性能随着含水率的增加而变差。结合山东省广泛分布的黄河冲淤积粉土,张宏博等[9] [10]研究了其作为泡沫轻质土外掺料的可行性,并在实体工程中进行了应用。而黄河冲积平原区水网密布、地下水位普遍介于0.5~2 m、毛细现象严重,对泡沫轻质土具有显著的干湿循环效应[13]。因此,为了更好地对其进行推广应用,有必要开展干湿循环试验研究。

由上,本文通过调整湿密度、粉土掺量,研究了水泥基粉土泡沫轻质土50次干湿循环对无侧限抗压

强度的影响规律，并结合试验数据分析，提出了无侧限抗压强度与干湿循环次数的预测模型。研究成果可为该类型泡沫轻质土的推广应用奠定良好的试验基础。

## 2. 试验

### 2.1. 水泥

本试验采用淄博山水集团生产采用 P.O 42.5 水泥。其基本物理性能见表 1。

**Table 1.** Physical properties of cement

**表 1.** 水泥的物理性能

比表面积 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )	标准稠度 (%)	凝结时间(min)		3d 抗压强度 (MPa)	3d 抗折强度 (MPa)
		初凝	终凝		
358	28.5	230	294	5.5	2.72

### 2.2. 发泡剂

发泡剂采用烟台龙驰公司生产的复合型发泡剂，其主要性能指标如表 2 所示。

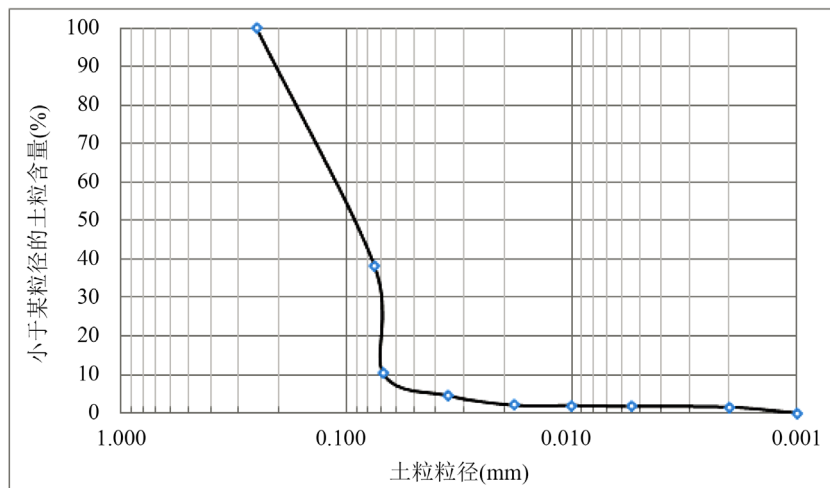
**Table 2.** Main performance index of foaming agent

**表 2.** 发泡剂主要性能指标

检测项目	品种	稀释倍数	发泡倍数	标准泡沫密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	30 min 泌水率 (%)
试验值	复合型	50	800~1000	40~50	15.93

### 2.3. 原料土

选用山东省境内广泛分布的黄河流域粉土作为原料土，颗粒的级配曲线见图 1 所示。



**Figure 1.** Grain size distribution curve

**图 1.** 粒径分布曲线

由图 1 可知，原料土粒径  $d_{10}$  为 0.066， $d_{30}$  为 0.073， $d_{60}$  为 0.25， $C_c$  为 0.32， $C_u$  为 3.79，可判别为砂质粉土，属均粒土。

## 2.4. 水泥基粉土泡沫轻质土试验级配设计

本试验所采用的泡沫轻质土级配如表 3 所示。

**Table 3.** Mix ratio of silt-based foamed concrete

**表 3.** 水泥基粉土泡沫轻质土配合比

湿密度(kg/m <sup>3</sup> )	粉土掺量(%)	用水量(kg/m <sup>3</sup> )	水泥用量(kg/m <sup>3</sup> )	粉土用量(kg/m <sup>3</sup> )	泡沫用量(kg/m <sup>3</sup> )	水固比
600	0	201	365	0	34	0.55
600	20	182	295	74	31	0.49
600	30	171	261	112	29	0.45
600	40	158	227	151	27	0.41
700	0	237	432	0	31	0.55
700	20	215	351	88	27	0.49
700	30	203	311	133	26	0.45
700	40	188	271	180	24	0.41
800	0	274	498	0	28	0.55
800	20	249	406	101	25	0.49
800	30	234	360	154	23	0.45
800	40	219	314	209	22	0.41

## 2.5. 干湿循环试验方法与步骤

参考《蒸压加气混凝土性能试验方法》(GB/T 11969-2008)进行, 试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm, 详细步骤如下:

1) 首先将养护 28 天的试件放入电热鼓风干燥箱内(60 ± 5)°C 烘至恒重。

2) 然后在室内冷却 20 min, 冷却完成后将其放入(20 ± 5)°C 的水箱中 5 min。试件顶面与水面距离要求至少大于 20 mm, 到时间后再将试件放入室内 30 min。

3) 将试件在(20 ± 5)°C 的室内冷却 20 min, 然后放入钢丝网箱(恒温水槽或水箱)内, 并浸入水温为(20 ± 5)°C 的水中。水高出试件上表面 30 mm, 保持 5 min 后取出, 放在室内晾干 30 min, 放入电热鼓风干燥箱内, 在(60 ± 5)°C 下烘 7 h, 在室内冷却 20 min, 作为 1 次干湿循环。

根据规范要求, 15 次即可结束试验。为了更好的验证水泥基粉土泡沫轻质土抗干湿循环特性, 以及干湿循环过程中泡沫轻质土无侧限抗压强度的衰变规律, 本试验设计干湿循环次数为 50 次, 其中每 5 次循环选择 3 个平行试件进行无侧限抗压强度试验。

## 3. 试验结果与分析

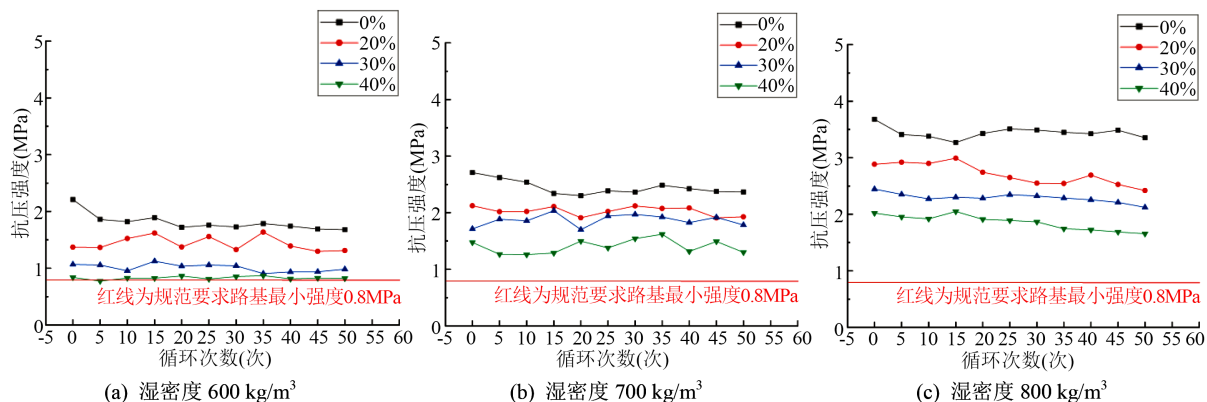
### 3.1. 干湿循环试验结果

如图 2 所示, 为 50 次干湿循环后不同配合比下水泥基粉土泡沫轻质土试件无侧限抗压强度变化规律。由图可知, 对于三种不同湿密度的泡沫轻质土, 在经过 50 次干湿循环后, 均呈现波动下降趋势, 其中, 波动是因为发泡的不均匀性造成, 各配比条件下的无侧限抗压强度降低幅度普遍小于 10%。

相比较, 湿密度为 800 kg/m<sup>3</sup> 的泡沫轻质土受干湿循环影响略偏大, 分析原因, 可能是湿密度越大, 泡沫体积越小, 但水泥量及用土量也越大, 这使得干燥状态下泡沫轻质土无侧限抗压强度提高。但随着干湿循环次数的增加, 水分逐渐渗透到泡沫轻质土内部, 使得已固化的粉土土颗粒湿化膨胀, 影响了无

侧限抗压强度的发挥。这种现象也可由不同的粉土掺量试验曲线得以印证。

然而, 需要进一步说明的是, 尽管泡沫轻质土无侧限抗压强度略有降低, 但并未影响其整体强度, 表明水分的侵入仅表现在表面, 对于泡沫轻质土内部并未产生影响。因此, 泡沫轻质土在实际使用过程中, 其干湿循环性能可保持稳定状态。该结论可由 3.2 部分的表现现象分析予以验证。

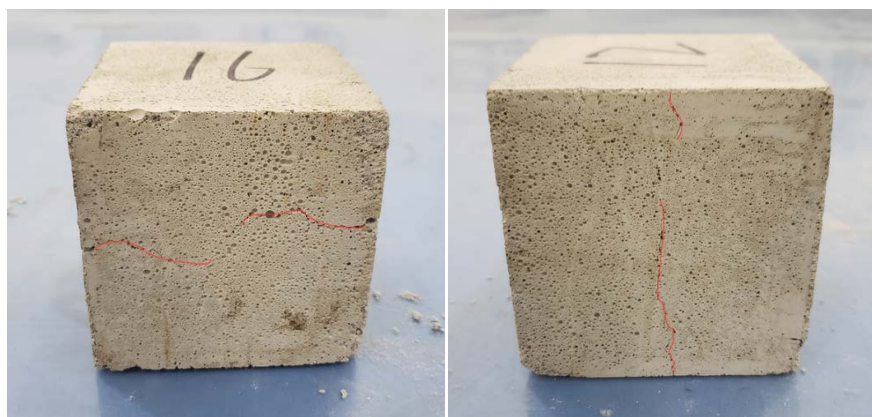


**Figure 2.** Relation curve between unconfined compressive strength of different wet densities and number of dry-wet cycles  
**图 2.** 不同湿密度无侧限抗压强度与干湿循环次数关系曲线

### 3.2. 干湿循环过程中泡沫轻质土表现现象分析

如图 3 所示, 为干湿循环 50 次后泡沫轻质土表现现象, 可发现试块表面产生了一些微小的裂缝。分析原因, 受浸湿和干燥的反复作用, 水分子将在其表面一定深度内发生迁移, 使得颗粒间膨胀力逐渐增大, 导致其内部颗粒间的间距发生微小变化。当超过颗粒间的结合力时, 泡沫轻质土会产生细微裂纹。

为了揭示这些微小裂缝对泡沫轻质土无侧限抗压强度的影响, 首先将同密度同掺量和相同循环次数的试块烘到恒质后, 进行无侧限抗压强度测试。试验时, 将试样分为组进行对比: 1) 裂缝平行于受压面, 如图 3(a)所示; 2) 裂缝垂直于受压面, 如图 3(b)所示。



(a) 裂缝与受压面平行

(b) 裂缝与受压面垂直

**Figure 3.** Silt-based foamed concrete in different compression states  
**图 3.** 不同受压状态气泡混合轻质土试件

试验结果如表 4 所示, 由表可知, 两种加载模式对于泡沫轻质土试样的无侧限抗压强度无明显影响, 验证了表面微裂缝并没有向试件内部延伸, 干湿循环未对泡沫轻质土内部产生影响。

**Table 4.** Unconfined compressive strength results of the specimen  
**表 4.** 试件无侧限抗压强度结果

湿密度(kg/m <sup>3</sup> )	粉砂土掺量(%)	循环次数 (次)	抗压强度(MPa)	
			与裂缝平行	与裂缝垂直
600	30	50	1.01	0.97
700	30	50	1.82	1.75
800	30	50	2.23	2.12
600	40	50	0.91	0.82
700	40	50	1.24	1.29
800	40	50	1.54	1.68

### 3.3. 不同配比条件下水泥基粉土泡沫轻质土无侧限抗压强度随干湿循环次数的预测公式

为了建立公式, 首先定义水泥基粉土泡沫轻质土无侧限抗压干湿循环系数  $K_{\text{干湿}}$  如式(1)所示。

$$K_{\text{干湿}} = \frac{q_{ud}}{q_{u,\text{规定}}} \quad (1)$$

式中:  $q_{ud}$  为定干湿循环后测定的无侧限抗压强度,  $q_{u,\text{规定}}$  为规范要求路基最小无侧限抗压强度 0.8 MPa。 $K_{\text{干湿}}$  大于 1 表示强度符合要求。

为了反映浆体相对密度、粉砂土掺量对无侧限抗压强度的影响, 浆体相对密度定义为新拌浆体的表观密度与假定绝对密实状态时相应固体颗粒的密度之比, 新拌浆体表观密度采用 1 L 标准量筒量得, 绝对密实状态时相应固体颗粒的密度及浆体相对密度由式(2)和(3)计算得到

$$\varphi = \frac{\rho_0}{\rho} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{m_c + m_f}{\frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_f}{\rho_f}} \quad (3)$$

式中:  $\varphi$  为浆体相对密度,  $\rho_0, \rho$  分别为新拌浆体的表观密度和假定绝对密实状态时相应固体颗粒的密度,  $m_c, m_f$  分别为水泥和粉砂土质量,  $\rho_c, \rho_f$  分别为水泥和粉砂土密度。

根据图 2 试验结果, 使用通用全局优化算法, 分析浆体相对密度、粉砂土掺量和干湿循环次数的影响, 建立了水泥基粉土泡沫轻质土干湿循环强度系数  $K_{\text{干湿}}$  公式, 如式(4)所示:

$$K_{\text{干湿}} = \frac{1}{0.728 + 0.024 \left( \frac{N}{50} \right)^2 - 7.538\varphi^2 + 0.0002\alpha^2} \quad (4)$$

其中,  $N$  为干湿循环次数,  $\varphi$  为浆体相对密度,  $\alpha$  为粉砂土掺量。R<sup>2</sup> 为 0.921。

## 4. 结论

本文针对水泥基粉土气泡混合轻质土的干湿稳定性能进行了试验研究, 可得到以下结论:

1) 不同湿密度及粉土掺量条件下的泡沫轻质土经过 50 次的干湿循环试验, 其无侧限抗压强度并未发生明显衰减, 表明其具有良好的季节适应性。

2) 经过 50 次的干湿循环后, 水泥基粉土泡沫轻质土仅出现了表面的微裂缝, 对其抗压强度并未产

生影响。

3) 50次干湿循环后,仅湿密度为 $600\text{ kg/m}^3$ 、粉土掺量为40%的泡沫轻质土试件无侧限抗压强度低于设计规定值,其余均能满足路用性能要求。

4) 通过对试验结果进行拟合,得到水泥基粉土气泡混合轻质土干湿循环和冻融循环强度系数与浆体相对密度、粉砂土掺量和循环次数关系式。

## 参考文献

- [1] 顾欢达,顾熙. 干湿循环作用下发泡颗粒轻质土的稳定性的研究[J]. 公路, 2005(5): 125-128.
- [2] 刘楷,李仁民,杜延军,魏明俐. 气泡混合轻质土干湿循环和硫酸钠耐久性试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S1): 362-366.
- [3] 阳卫平. 泡沫轻质土耐久性能试验研究[J]. 湖南交通科技, 2017, 43(2): 99-101.
- [4] 周贤良,刘长武,冯波,郭兵兵,卢永虎,张连卫. 干湿循环作用对水泥基复合充填材料的影响[J]. 工程科学学报, 2019, 41(12): 1609-1617.
- [5] 李茜莎. 耐碱玻纤和粉煤灰对轻质混凝土强度及冻融耐久性的影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(5): 51-5+60.
- [6] 欧孝夺,彭远胜,莫鹏,等. 掺铝土尾矿泡沫轻质土的物理力学及水力特性研究[J]. 材料导报, 2020, 34(1): 241-245.
- [7] 周恩全,张蒋浩,崔磊,等. 橡胶-粉土轻质土击实及动变形特性研究[J]. 建筑材料学报, 2021: 1-13.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20210204.1106.012.html>
- [8] Cong, M. and Bing, C. (2015) Properties of a Foamed Concrete with Soil as Filler. *Construction and Building Materials*, **76**, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.066>
- [9] Zhang, H., Qi, X., Ma, C., et al. (2020) Effect Analysis of Soil Type and Silt Content on Silt-Based Foamed Concrete with Different Density. *Materials*, **13**, 3866. <https://doi.org/10.3390/ma13173866>
- [10] Zhang, H., Qi, X., Wan, L., et al. (2020) Properties of Silt-Based Foamed Concrete: A Type of Material for Use in Backfill behind an Abutment. *Construction and Building Materials*, **261**, 119966. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119966>
- [11] 梁朋涛,李章珍,冀伟,等. 干湿循环条件下气泡混合轻质土的水稳性试验研究[J]. 河北建筑工程学院学报, 2017, 35(2): 27-30.
- [12] 贾兴文,钱觉时. 粉煤灰加气混凝土的耐久性研究[J]. 新型建筑材料, 2007, 34(1): 20-23.
- [13] 宋修广,张宏博,王松根,贾朝霞,管延华. 黄河冲积平原区粉土路基吸水特性及强度衰减规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1594-1602.