

Experimental Investigation on the Mechanical Properties of Foamed Mixture Lightweight Silty Soil

Hailong Jiang¹, Zhe Wang², Xiaobin Xu¹, Yufeng Bi³, Jie Song³, Liyao Wan²

¹Qilu Transportation Development Group, Jinan Shandong

²School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

³Shandong Traffic Planning and Design Institute, Jinan Shandong

Email: 99733145@qq.com

Received: Sep. 1st, 2019; accepted: Sep. 11th, 2019; published: Sep. 18th, 2019

Abstract

In order to explore the influence of different dosage of silty soil on the mechanical properties of foamed mixture lightweight silty soil, in view of the foamed mixture lightweight silty soil with the wet density of 700 kg/m³ commonly used in engineering, the unconfined compressive strength, saturated compressive strength, flexural tensile strength and static elastic modulus of foamed mixture lightweight silty soil with different silty soil content (20%, 30%, 40%) are tested and analyzed through laboratory tests. The test results show that the unconfined compressive strength, flexural tensile strength and static elastic modulus first increase and then decrease with the increase of silty soil content, and the optimal content is 20%. Compared with unconfined compressive strength, saturated compressive strength decreases significantly, and decreases with the increase of silty soil content.

Keywords

Foamed Mixture Lightweight Silty Soil, Unconfined Compressive Strength, Saturated Compressive Strength, Flexural Tensile Strength, Static Elastic Modulus

水泥基泡沫轻质粉土力学性能试验研究

姜海龙¹, 王 喆², 许孝滨¹, 毕玉峰³, 宋 杰³, 万立尧²

¹齐鲁交通发展集团, 山东 济南

²山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

³山东省交通规划设计院, 山东 济南

Email: 99733145@qq.com

收稿日期：2019年9月1日；录用日期：2019年9月11日；发布日期：2019年9月18日

摘要

为了探究粉砂土的不同掺量对水泥基泡沫轻质粉土力学性能的影响规律，针对工程常用的湿密度为 700 kg/m^3 的泡沫轻质粉土，通过开展室内试验，对水泥基泡沫轻质粉土在不同粉砂土掺量(20%, 30%, 40%)条件下的无侧限抗压强度、饱水抗压强度、弯拉强度和静弹性模量进行了测试分析。试验结果表明：随着粉砂土掺量的提高，无侧限抗压强度、弯拉强度和静弹性模量先增大后降低，最优掺量为20%；相较于无侧限抗压强度，饱水抗压强度降低幅度较大，且随粉砂土掺量增加而降低。

关键词

水泥基泡沫轻质粉土，无侧限抗压强度，饱水抗压强度，弯拉强度，静弹性模量

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

桥头跳车及拓宽公路的不均匀沉降现象是公路工程建设中的重大技术难题，不仅引起路面结构的早期破坏，而且带来了严重的交通安全隐患。为了解决该问题，国内外先后提出了包括强夯法、复合地基法、轻质路基等多种处治方式，并在不同工程中得以应用。其中，轻质路基技术包括粉煤灰路堤、EPS轻质路堤，以及近年来新发展的气泡混合轻质土路堤等类型。相比较，由于粉煤灰路堤施工污染严重、包边工艺复杂而较难推广使用，EPS轻质路堤虽施工便捷、可靠，但费用过高而难以被工程界广泛接受，气泡混合轻质土通过发泡将泡沫与水泥浆进行混合而浇筑形成轻质路堤，环境污染小、施工速度快、施工成本低，目前在广东、天津、浙江等地得到了较多的应用。其应用原理为：气泡混合轻质土由于密度较小，可显著降低地基附加应力，不仅可明显减小地基的工后沉降量，而且还可大幅节约地基处理费用[1][2]。同时，该类轻质土还具有高流动性、自立性、强度可调节性等特点[3][4][5]。

尽管如此，随着国家环保要求的提升，对建材的生产和运输都提出了更高的要求，同时也造成水泥价格的不断攀升，对气泡混合轻质土的推广应用也带来了很大的障碍。因此，为了在保证气泡混合轻质土路用性能的基础上进一步降低价格，本文基于粉砂土基本力学特性介于砂土与黏土之间的特性，通过分析其骨架结构特征[6][7]，研究提出可采用粉砂土替代部分水泥的研究思路，其重点在于粉砂土掺量的合理确定。为了评价不同粉砂土掺量条件下气泡混合轻质土的力学性能，本文测试分析了抗压强度、弯拉强度、静弹性模量、饱水抗压强度等指标[8][9][10]，分析了不同掺量条件下各指标的变化规律，研究结果为水泥基泡沫轻质粉土路基的推广应用提供了依据。

2. 试验

2.1. 原材料

本试验中，水泥采用 P.O42.5 普通硅酸盐水泥；发泡剂采用山东烟台生产的复合型水泥发泡剂，稀

释倍率 40 倍, 发泡倍率为 800~1000 倍。原料土选用山东省境内黄河流域地区的粉砂土, 其粒径分布曲线如图 1 所示。

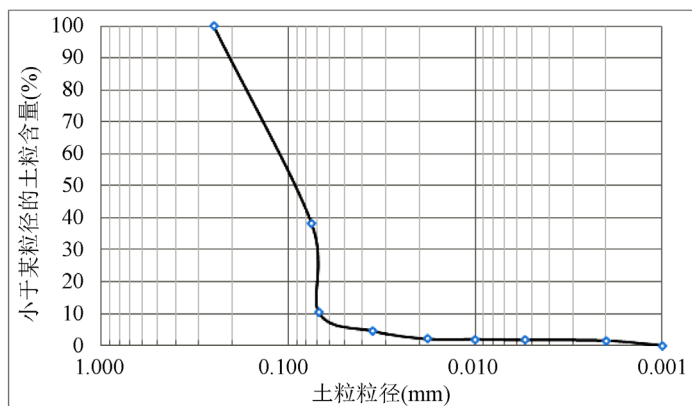


Figure 1. Grading curve of silty soil
图 1. 粉砂土级配曲线

从图 1 可知, d_{60} 为 0.250, C_u 为 3.79, CC 为 0.32, 此类粉砂土为均粒土, 属级配不良。砂粒含量为 61.8%, 粒径主要在 0.5 mm 以内。

2.2. 配合比

为了研究粉砂土掺量对泡沫轻质粉土力学性能的影响, 本文在保持水灰比不变的基础上改变粉砂土掺量。粉砂土掺量分别为水泥掺量的 20%、30%、40%, 并采用不同剂量泡沫控制湿密度不变, 配合比组成见表 1。

Table 1. Mix proportion
表 1. 试验用配合比

湿密度(kg/m ³)	水泥用量(kg/m ³)	用水量(kg/m ³)	粉砂土掺量(%)	粉砂土用量(kg/m ³)	泡沫用量(kg/m ³)
700	432	237	0	0	31
700	373	205	20	93	29
700	339	187	30	145	28
700	304	167	40	202	27

2.3. 无侧限抗压强度试验

无侧限抗压强度是泡沫轻质粉土最基本的力学性能指标。根据《现浇泡沫轻质土技术规程》，泡沫轻质土抗压强度试验试件的尺寸宜为 100 mm × 100 mm × 100 mm。试件脱模后放入标准养护室，养护时间达到规定龄期后将其取出并进行试验。试验所用仪器为多功能路面材料强度试验机。

2.4. 饱水抗压强度试验

路基路面的强度与稳定性同水的关系十分密切。路基路面的病害有多种,形成病害的因素亦很多,但水的作用是主要因素之一。因此在将水泥基泡沫轻质粉土用于道路路基填料工程中时,应对饱水抗压强度进行测试。在进行室内试验时,为切实模拟实际工程情况,当试件养护达到 28 天时,将其放入水中两周时间,使其充分饱水,称得质量后使用多功能路面材料强度试验机对其进行无侧限抗压强度测试。

2.5. 弯拉强度试验

依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51-2009)中弯拉强度试验方法,试件尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 400\text{ mm}$, 养护 28 d 后, 使用电子式万能试验机按三分点法对其进行双点加压, 因水泥基泡沫轻质粉土试件强度较低, 不宜采用较快加载速率, 所以采用与抗压强度相同的加载速率对其进行加压。

2.6. 静弹性模量试验

水泥基泡沫轻质粉土的静弹性模量测定按照《蒸压加气混凝土性能试验方法》(GBT11969-2008)进行, 试件尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 。

3. 结果与分析

3.1. 无侧限抗压强度

图 2 为不同养护龄期下的水泥基泡沫轻质粉土无侧限抗压强度随粉砂土掺量变化曲线。从图 2 可见, 3 天养护龄期的水泥基泡沫轻质粉土无侧限抗压强度随粉砂土含量的增加而增大。除 3 天养护龄期外, 随着粉砂土含量由 0% 增加到 20%, 其他养护龄期的水泥基泡沫轻质粉土无侧限抗压强度随之增大, 粉砂土含量从 20% 增加到 40%, 无侧限抗压强度开始降低。

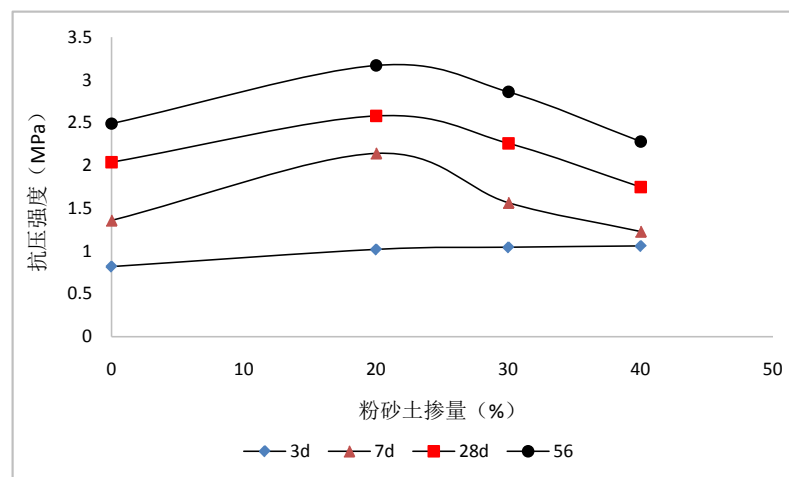


Figure 2. The effect of silt content on unconfined compressive strength

图 2. 粉砂土掺量对无侧限抗压强度影响结果

其中, 3 天养护龄期水泥基泡沫轻质粉土无侧限抗压强度从 0.82 MPa 增大到了 1.06 MPa。7 天养护龄期水泥基泡沫轻质粉土无侧限抗压强度在掺加 20% 粉砂土后, 强度由 1.36 MPa 增大到 2.14 MPa, 在继续掺加粉砂土后强度开始减少, 30% 粉砂土含量强度为 1.57 MPa, 40% 粉砂土含量强度为 1.23 MPa。28 天养护龄期的水泥基泡沫轻质粉土无侧限抗压强度由 1.36 MPa 先增加到 2.58 MPa, 然后降低到 1.75 MPa。56 天养护龄期水泥基泡沫轻质粉土无侧限抗压强度从 2.49 MPa 增加到 3.17 MPa, 然后降低到 2.28 MPa。

这主要是因为粉砂土在少量掺加时, 可以对泡沫轻质粉土起到骨架作用, 增大水泥基泡沫轻质粉土无侧限抗压强度。但是粉砂土属于惰性材料, 无法参与以及促进水化反应, 并且本试验由粉砂土替代水泥, 所以粉砂土含量越多, 水泥含量越少, 导致水化产物减少, 孔隙率增加, 内部结构疏松, 水泥基泡沫轻质粉土无侧限抗压强度随之降低。

3.2. 饱水抗压强度

图 3 为水泥基泡沫轻质粉土随着粉砂土含量增加时无侧限抗压强度与饱水抗压强度对比图。从图 3 可以看出, 水泥基泡沫轻质粉土试件饱水抗压强度与粉砂土掺量呈线性负相关关系, 粉砂土掺量为 20% 时, 饱水抗压强度为 1.46 MPa, 粉砂土掺量为 30% 时, 饱水抗压强度为 1.25 MPa, 粉砂土掺量为 40% 时, 饱水抗压强度为 1.03 MPa。不过饱水抗压强度与无侧限抗压强度相比变化较大, 约为无侧限抗压强度的 58.5%。

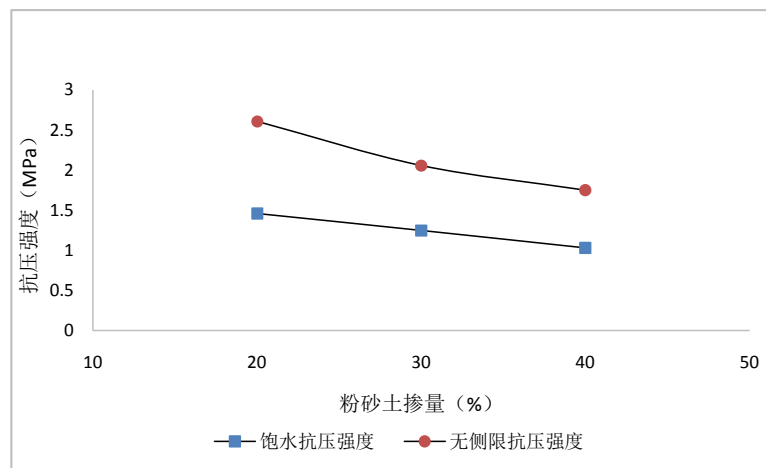


Figure 3. Relationship curve between unconfined compressive strength and saturated compressive strength

图 3. 无侧限抗压强度与饱水抗压强度关系曲线

综上所述, 水泥基泡沫轻质粉土试件饱水后抗压强度会有明显下降, 虽然强度值均大于 0.8 MPa, 满足规范要求, 但 40% 粉砂土掺量的泡沫轻质粉土饱水抗压强度已接近该临界值。因此在实际工程中, 应避免将水泥基泡沫轻质粉土填料置于地下水位以下或采取一定的防水措施。

3.3. 弯拉强度

图 4 为水泥基泡沫轻质粉土弯拉强度随粉砂土掺量变化曲线。通过弯拉试验中对试件的观察, 水泥基泡沫轻质粉土的弯拉破坏同混凝土相同, 是脆性破坏, 破坏前无明显征兆。试件的裂缝产生于试件底部, 并迅速扩展、断裂。

从图 4 可以看出, 随着粉砂土掺量的增加, 水泥基泡沫轻质粉土弯拉强度先增大后减小; 粉砂土掺量为 0 时, 水泥基泡沫轻质粉土弯拉强度为 0.43 MPa; 粉砂土掺量为 20% 时, 弯拉强度为 0.64 MPa; 粉砂土掺量为 30% 时, 弯拉强度为 0.56 MPa; 粉砂土掺量为 40% 时, 弯拉强度为 0.44 MPa。

根据《公路路基设计规范》(JTG D30-2015) 中的规定, 用作路堤填料的轻质材料抗弯强度不宜小于 150 kPa, 试验试件的弯拉强度均满足要求。湿密度为 700 kg/m³ 的水泥基泡沫轻质粉土, 弯拉强度大约为无侧限抗压强度的 23.4%。

3.4. (静)弹性模量试验结果

图 5 为水泥基泡沫轻质粉土静弹性模量随粉砂土掺量关系曲线。可以看出, 随着粉砂土掺量的增加, 水泥基泡沫轻质粉土静弹性模量先增大后减小。粉砂土掺量为 0% 时, 静弹性模量为 1966.37 MPa; 粉砂土掺量为 20% 时, 静弹性模量为 2241.2 MPa; 粉砂土掺量为 30% 时, 静弹性模量为 2224.3 MPa; 粉砂土

掺量为 40% 时, 静弹性模量为 2241.2 MPa; 可以看出湿密度为 700 kg/m^3 的水泥基泡沫轻质粉土静弹性模量变化幅度较小, 数值基本均在 2200 MPa 左右。

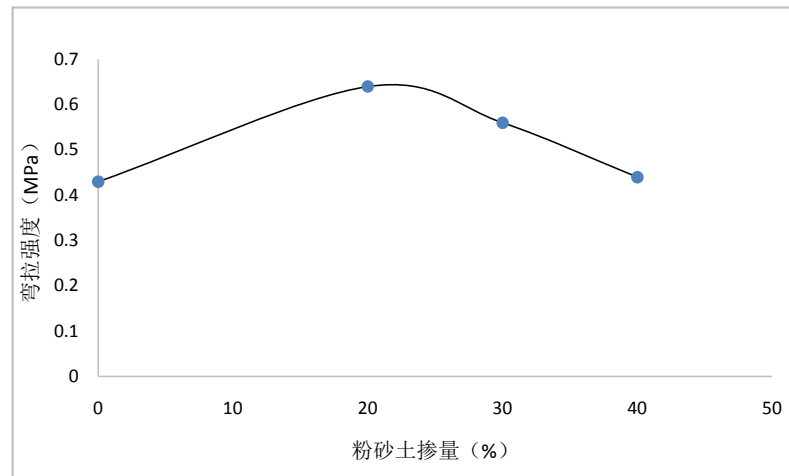


Figure 4. Flexural tensile strength varies with the content of silty soil

图 4. 弯拉强度随粉砂土掺量的变化

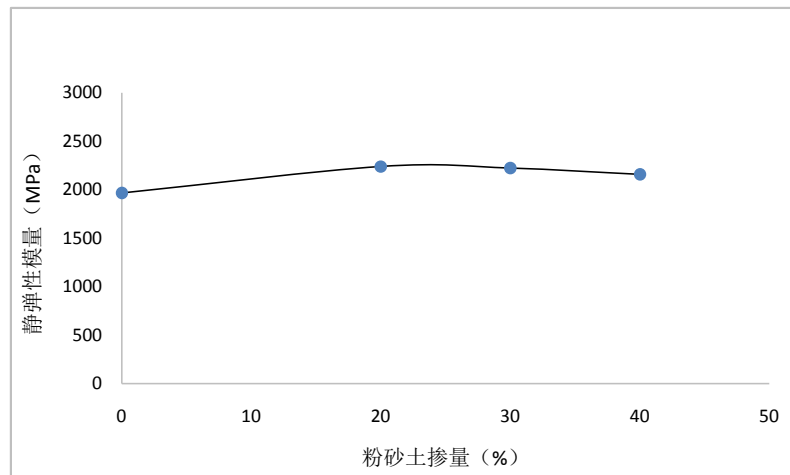


Figure 5. The static elastic modulus varies with the content of silty soil

图 5. 静弹性模量随粉砂土掺量的变化

通过上述分析, 建立水泥基泡沫轻质粉土静弹性模量与湿密度和粉砂土掺量之间的关系如下:

$$E_c = -3093.74 + 7.897\rho - 4.147x, \quad R^2 \text{ 为 } 0.954$$

其中, E_c 为静弹性模量, 单位: MPa; ρ 为轻质土的湿密度 ($600 \leq x \leq 800$), 单位: kg/m^3 ; x 为粉砂土掺量 ($20 \leq x \leq 40$), 单位: %。

4. 结论

为了揭示不同掺量条件下泡沫轻质粉土力学性能变化规律, 本文对湿密度为 700 kg/m^3 , 粉砂土掺量分别为 20%、30% 和 40% 的水泥基泡沫轻质粉土进行了力学性能测试, 包括无侧限抗压强度、饱水抗压强度、弯拉强度、静弹性模量, 提出如下主要结论:

随着粉砂土掺量的增加, 3 天龄期无侧限抗压强度逐渐增加, 但 7 天、28 天、56 天龄期水泥基泡沫轻质粉土无侧限抗压强度则先增大后减小。

随着粉砂土掺量的增加, 水泥基泡沫轻质粉土饱水抗压强度逐渐降低, 平均约为该掺量条件下无侧限抗压强度的 58.5%, 其中粉砂土掺量为 40% 的试件强度已接近规范最小值。

水泥基泡沫轻质粉土弯拉破坏属于脆性破坏, 随着粉砂土掺量的增加, 弯拉强度先增大后减少。粉砂土掺量对水泥基泡沫轻质粉土静弹性模量的影响较小。

综上, 除饱水抗压强度外, 水泥基泡沫轻质粉土各力学指标随粉砂土掺量增加均呈抛物线变化规律, 其中掺量 20% 为峰值点, 但对于本文研究的掺量范围, 其力学指标均能满足规范相关要求。

参考文献

- [1] 范鹏举, 武杨, 张磊. 高速公路改扩建工程气泡轻质土设计与优化[J]. 现代交通技术, 2018, 15(3): 18-22.
- [2] 史志楼. 气泡混合轻质土在桥头跳车问题处理中的应用[J]. 山西建筑, 2019, 45(7): 152-154.
- [3] Tian, T., Yan, Y., Hu, Z., et al. (2016) Utilization of Original Phosphogypsum for the Preparation of Foam Concrete. *Construction and Building Materials*, **115**, 143-152.
- [4] Amran, Y.H.M., Farzadnia, N. and Ali, A.A.A. (2015) Properties and Applications of Foamed Concrete: A Review. *Construction and Building Materials*, **101**, 990-1005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112>
- [5] Ramamurthy, K., Nambiar, E.K.K. and Ranjani, G.I.S. (2009) A Classification of Studies on Properties of Foam Concrete. *Cement and Concrete Composites*, **31**, 388-396.
- [6] 杨琪, 张友谊, 林斌, 张玲玲, 刘华强, 赵运会. 粉砂土对气泡轻质土强度变形特性影响试验研究[J]. 公路, 2016, 61(11): 58-62.
- [7] 王静, 周刘光, 钟春玲, 张云龙. 冻融作用下粉砂土微观结构变化对宏观力学参数的影响研究[J]. 公路, 2017, 62(10): 22-30.
- [8] 农飞比. 泡沫轻质土力学性能及在柳南高速改扩建工程的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [9] 程冠之. 制备参数对泡沫轻质土工作性能和力学性能的影响[J]. 铁道建筑, 2017(1): 56-60.
- [10] 冯炜, 雷学通, 王新岐. 现浇泡沫轻质土力学性能的试验研究[J]. 城市道桥与防洪, 2015(5): 205-207+216.